

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS GEOMATEMÁTICAS NO ESTUDO
DE UM AQUÍFERO CÁRSTICO

POR

ADELBANI BRAZ DA SILVA

RESUMO -- As técnicas geomatemáticas empregadas foram as análises estatísticas tri-dimensionais de tendências e as análises multivariantes (agrupamento e fatorial). As análises de tendências objetivaram complementar os dados disponíveis e verificar o comportamento hidrogeológico naqueles locais onde existiam poucos dados ou estes estavam mal distribuídos. A análise de agrupamento teve a intenção de conhecer a influência simultânea dos parâmetros hidrogeológicos (espessura, transmissividade, armazenamento, capacidade específica pela espessura saturada) em diversos pontos da área. Após a identificação dos grupos de amostras do aquífero realizou-se a análise fatorial, em cada um deles, para definir as inter-relações entre os parâmetros hidrogeológicos em cada grupo, e estudar as causas das suas variabilidades. Essas técnicas geomatemáticas forneceram informações complementares ao estudo dos dados hidrogeológicos disponíveis. A integração de todas as interpretações permitiram identificar algumas características relevantes do aquífero e elaborar um zoneamento dos potenciais hídricos da área. As técnicas empregadas neste trabalho mostraram que são de grande valia nas pesquisas de água subterrânea de aquíferos cársticos tendo em vista a facilidade de sua aplicação, seus baixos custos e considerando-se as informações que eles podem fornecer.

INTRODUÇÃO

Um dos mais importantes problemas, relacionados com a interpretação de dados hidrogeológicos, é o estudo do comportamento espacial de parâmetros que assumem valores definidos para cada ponto no espaço.

Na interpretação hidrogeológica convencional, assume-se que os valores amostrais dos parâmetros são realizações de uma variável casual. As posições relativas das amostras são ignoradas e supõe-se que todos os valores amostrais tenham a mesma probabilidade de serem escolhidos.

A aplicação de técnicas geomatemáticas espaciais, presume, no entanto, que os valores amostrais não são realizações de funções casuais. Assim, o valor de um parâmetro é também uma função de sua posição no espaço.

Neste trabalho demonstra-se que, através de processamentos estatísticos de dados hidrogeológicos, conjuntamente com informações estruturais e hidroquímicas, é possível a caracterização do comportamento de um carste. Para isto, aplicaram-se várias técnicas de tra-

tamento e de interpretação de dados. Desta maneira, foi possível salientar características do carste e se chegar a uma proposição de um modelo de funcionamento do aquífero.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está compreendida entre os paralelos de $14^{\circ}40'$ e $15^{\circ}30'$ de latitude sul e os meridianos $43^{\circ}30'$ e $44^{\circ}00'$ de longitude oeste. Situa-se ao norte do Estado de Minas Gerais e tem aproximadamente uma superfície de 6.000 km^2 .

Esta área faz parte do sistema cárstico da região do Jaíba, ligado as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí.

OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O tratamento estatístico dos parâmetros do aquífero visou dois aspectos principais. O primeiro foi obter informações adicionais da variação espacial dos principais parâmetros do aquífero através de análises de superfícies de tendências. O outro aspecto teve o objetivo de estudar as interligações desses parâmetros utilizando-se análises classificatórias multivariantes (análise de agrupamento e análise fatorial).

Nos estudos hidrogeológicos, normalmente, são utilizados mapas de isolinhas dos parâmetros do aquífero que permitem uma visão da distribuição espacial e também ressaltam certas relações quantitativas necessárias ao conhecimento da complexidade de suas inter-relações. Em muitos casos, contudo, a qualidade e a distribuição dos dados torna os mapas de parâmetros hidrogeológicos muito complicados e não permite uma adequada interpretação.

A utilização de mapas de tendências e seus respectivos resíduos pode ser um conveniente e efetivo método da interpretação hidrogeológica da distribuição dos parâmetros do aquífero. Geralmente, a significância prática dos mapas de tendência é mais importante quando a contribuição dos pontos para a superfície matemática calculada é muito grande, ou seja, a explicação da variabilidade dos pontos pela superfície calculada é elevada. No caso de complexas condições geológicas e hidrogeológicas, no entanto, a contribuição dos pontos para a tendência calculada diminui e conseqüentemente resulta em grandes valores dos resíduos. Evidentemente, quando isto ocorre, a complexidade das condições hidrogeológicas é na realidade muito grande e de difícil observação através de mapas de tendência. Todavia, os mapas de resíduos das superfícies de tendências ressaltam essas zonas complexas e anômalas, constituindo-se assim uma importante ferramenta para esses casos.

Quando a análise multivariante dos parâmetros do aquífero, pode-se adiantar que nos estudos foram utilizadas duas técnicas, ou seja: análise de agrupamento e análise fatorial. Essas técnicas estatísticas de mensurações múltiplas permitem considerar simultaneamente as variabilidades existentes nos diversos parâmetros medidos entre amostras.

A análise de agrupamento é uma técnica classificatória utilizada quando se deseja estudar as similaridades entre indivíduos ou en

tre variáveis, definindo-os em grupos de mesma similaridade, (Davis, 1973).

A análise fatorial visa interpretar a estrutura de um conjunto de dados multivariantes a partir da respectiva matriz de variância-covariância (Krumbein e Graybill, 1965). Existem várias possibilidades para a determinação de fatores condicionadores de um conjunto de variáveis. Uma delas é a análise da matriz de coeficientes de similaridade pelo método dos componentes principais. Outra possibilidade é a análise de fatores, que presuppõe que as relações existentes dentro de um conjunto de variáveis sejam o reflexo das correlações de cada uma dessas variáveis com os fatores, mutuamente não correlacionáveis entre si.

As análises multivariantes fornecem informações na razão direta do número de variáveis (parâmetros) utilizados e permite considerar, simultaneamente, a variabilidade existente nas diversas propriedades medidas e as relações entre estas variáveis.

Várias aplicações de análises multivariantes em geologia são encontradas na literatura das quais podem-se destacar: Imbrie e Purdy (1962); Imbrie e Van Andel (1964); Klován (1966); Bettencourt e Landim (1974); Landim et alii (1977); Landim et alii (1978-A); Ashley e Lloyd (1978); Neto e Campos (1980); Bobee et alii (1981); Williams (1982), entre outras. Convém salientar, no entanto, que o tratamento estatístico multivariante deve ser utilizado para testar hipóteses ou ser correlacionado a mapas e dados hidrogeológicos. Esta correlação visa, em última análise, definir isozonas em função do agrupamento de amostras que apresentam variabilidade semelhante a fim de delimitar áreas de recarga e descarga do aquífero ou zonas com diferentes características hidrogeológicas.

METODOLOGIA

A análise de tendência foi realizada tendo em vista a delimitação de isozonas na área, em função das anomalias de cada um dos parâmetros do aquífero. Os parâmetros utilizados foram: espessura saturada, superfície da base da zona fraturada do aquífero, transmissividade, capacidade específica, armazenamento e a razão da capacidade específica e espessura saturada do aquífero. Foram analisadas superfícies de tendências, e seus respectivos resíduos, de primeiro ao terceiro grau.

A análise de tendência, considera as coordenadas de um ponto como variáveis independentes e o valor do parâmetro daquele ponto como única variável dependente. No entanto, neste ponto existem diversas variáveis (parâmetros) que influem nas suas condições hidrogeológicas. Assim, para complementar as análises de tendência e para o conhecimento da influência simultânea de todos os parâmetros em cada ponto (amostra) da área, foram realizadas análises estatísticas multivariantes.

As análises multivariantes (agrupamento e fatorial) foram realizadas utilizando-se parâmetros hidrogeológicos fundamentais que estão relacionados às características físicas do aquífero. Estes parâmetros, de certa forma, permitem definir e em alguns casos prever o funcionamento ou resposta do aquífero frente a determinadas ações

exteriores (exploração por poço, infiltração, etc.).

Os dados hidrogeológicos utilizados nas análises multivariantes foram obtidos a partir de 60 amostras. Cada uma dessas amostras corresponde a uma malha, com 81 km² de área, do mapa da área na escala 1:100.000. Em cada malha, foram medidos todos os cinco parâmetros (variáveis) utilizados na análise (espessura saturada, transmissividade, armazenamento, capacidade específica e a razão da capacidade específica pela espessura saturada).

No processo dos dados para a análise de tendência foi utilizado o programa de computador Trendsup (Landim et alii (1978-B), modificado pelo autor) e para análise de agrupamento e construção dos dendrogramas foi utilizado o programa Cluster (Davis, 1973). Na análise fatorial foi usado o programa Factor do SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, 1975).

RESULTADOS OBTIDOS

Os principais resultados obtidos com o emprego de técnicas geomatemáticas são descritos a seguir.

Análise de tendência

Na figura 1 encontram-se os mapas de tendência linear e de resíduo de alguns parâmetros hidrogeológicos utilizados.

Os mapas de superfícies de tendências e seus respectivos resíduos são auto-explicativos e demonstram a variação regional dos parâmetros e a existência de zonas anômalas. Contudo, podem-se destacar alguns aspectos ressaltados nos diversos mapas de tendência e de resíduos analisados.

Características dimensionais -- No estudo das características dimensionais foram utilizados os mapas de tendências e seus resíduos dos dados da superfície da base da zona fraturada e da espessura do aquífero.

Estes mapas destacam principalmente algumas anomalias que podem constituir zonas de fluxo preferencial de águas subterrâneas. Essas anomalias são: 1) faixa de direção leste-oeste na porção central da área, que talvez seja um prolongamento subterrâneo do riacho Tapera; 2) faixa descontínua ao norte da Colônia do Jaíba, que segue em direção ao oeste passando ao norte da serra Azul; 3) faixa que é o prolongamento para o sul das cabeceiras do riacho Tapera e que cruza com a faixa da Colônia do Jaíba - serra Azul.

Foi verificado que o morro Catarino forma um divisor de água subterrânea. Ali, a superfície de circulação subterrânea também acompanha o realce da superfície topográfica. Convém salientar ainda que as águas infiltradas na zona do morro Catarino terão, forçosamente, fluxos divergentes para o centro da área, rio Verde Grande, Gado Bravo ou Matias Cardoso.

As superfícies de tendências e os resíduos das espessuras do aquífero indicam que as maiores espessuras do aquífero encontram-se na porção central da área. Observam-se, também, que as menores es-

essuras ocorrem a nordeste do morro Catarino, nas margens do rio São Francisco, no córrego Escuro e a zona ao sul da Colônia do Jaíba.

A anomalia mais negativa, isto é, as menores espessuras, aparecem numa faixa que corta o vale do córrego Escuro. Isto significa que nesta faixa a carstificação é pouco profunda, da ordem de 30 metros.

Vale ressaltar ainda que apesar da grande elevação topográfica da serra do Sabonetal a espessura do aquífero ali é pequena. Isto sugere que as águas infiltradas escoam para o córrego Escuro e riacho Serraria. Em última análise, aquela zona tem pequeno coeficiente de armazenamento e baixa capacidade de retenção da água subterrânea.

Transmissividade do aquífero -- Comparando-se os diversos mapas de tendência verifica-se que os coeficientes de transmissividade na área aumentam de sudoeste para noroeste, com altos valores restritos a pequenas áreas.

As maiores anomalias positivas (maiores transmissividades) são encontradas no córrego Escuro, ao sul da Colônia do Jaíba, no vale do riacho Serraria, ao sul da serra Azul e no médio vale do riacho Tapera. Note-se que, nestas zonas, excetuando-se o vale do riacho Tapera, as espessuras do aquífero são pequenas. Assim, pode-se afirmar que a permeabilidade do aquífero, nas referidas zonas, são muito elevadas. Isto inclusive pode sugerir uma elevada carstificação ou fraturamento.

Armazenamento do aquífero na área -- Os mapas de tendências mostram que o armazenamento na área também aumenta de sudeste para noroeste. Observa-se uma anomalia negativa ao norte da área entre o morro Catarino e Matias Cardoso. Isto indica que aquela zona tem baixa capacidade de armazenar água subterrânea.

Como o morro Catarino é uma área de recarga, onde o aquífero é pouco espesso e tem baixa capacidade de armazenamento, pode-se afirmar que a água ali infiltrada é drenada para o rio Verde Grande ou para o centro da área.

Na zona da serra Azul também aparecem valores de resíduos negativos. Esta zona corresponde a área de ocorrência de siltitos e margas, que têm pouca carstificação e baixa densidade de fraturamento. O vale do riacho Serraria também apresenta baixo armazenamento.

Os maiores coeficientes de armazenamento ocorrem na Colônia do Jaíba, córrego Escuro e no riacho Tapera e subordinadamente ocorrem altos valores na porção centro-leste da área. No córrego Escuro e Colônia do Jaíba o armazenamento está relacionado à grande carstificação (elevada densidade de dolinas) e fraturamento ali existente.

No riacho Tapera, por sua vez, o armazenamento está condicionado ao espesso (± 60 metros) capeamento detrítico que ocorre naquela parte da área e aos fraturamentos e carstificações das rochas carbonáticas subjacentes.

Capacidade específica dos poços -- As superfícies de tendências da capacidade específica apresentam de uma maneira geral um comportamento muito semelhante à evolução das transmissividades, em concordância portanto, com os princípios básicos da hidráulica subterrânea. Algumas diferenças são decorrentes dos fatores que influem na capacidade específica. Como a área é um aquífero cárstico estes fatores são mais relevantes.

Razão da capacidade específica e espessura do aquífero -- As zonas mais permeáveis da área encontram-se numa faixa na sua porção central e a sudoeste da Colônia do Jaíba. A faixa central corresponde a uma zona onde as espessuras do aquífero são grandes e também onde são elevadas as capacidades específicas. As zonas com menores permeabilidades são as de resíduos negativos, das quais destacam-se aquelas ao leste do morro Catarino e a faixa ao norte da Colônia do Jaíba e da serra Azul.

É interessante notar que a área correspondente ao morro Catarino, apesar de baixa permeabilidade, é uma zona transmissora graças à influência da espessura do aquífero. Outro aspecto ressaltado é que, nos arredores da Colônia do Jaíba, o aquífero é muito permeável e transmissor, indicando que ali a espessura do aquífero não é significativa.

Similaridade entre as superfícies de tendências -- Com a análise de tendência foi possível observar o comportamento espacial e destacar anomalias dos principais parâmetros do aquífero. É possível agora verificar as similaridades entre as diversas superfícies de tendência do terceiro grau desses parâmetros, através da regressão linear dos coeficientes dos seus polinômios (Harbauch e Merrian, 1968).

Ocorre, por exemplo, boa correlação (0,84) entre a superfície da transmissividade e de capacidade específica, ratificando a relação linear que existe entre estes dois parâmetros. A similaridade entre as superfícies da espessura saturada e da razão da capacidade específica pela espessura saturada (0,93), por sua vez, sugere que, na maioria dos casos, estes dois parâmetros variam paralelamente. Esta afirmativa não é válida para a transmissividade ou para a capacidade específica, onde nem sempre as maiores espessuras significam maiores transmissividades ou capacidades específicas.

É interessante ressaltar ainda a baixa correlação (0,05) entre a superfície cúbica do coeficiente de armazenamento e as dos outros parâmetros hidrogeológicos. Isto sugere que, de uma maneira geral, a variabilidade do coeficiente de armazenamento do aquífero está condicionada por fatores diferentes daqueles que influem nos demais parâmetros, ou que a ação de algum determinado fator tenha provocado resultados diferentes nos parâmetros considerados. Por exemplo, a carstificação de uma determinada zona do aquífero pode ter originado um elevado coeficiente de armazenamento, mas um baixo coeficiente de transmissividade ou pequena espessura saturada. Pode ocorrer também o caso contrário. Contudo, existem localmente algumas variações paralelas, como é o caso da porção centro-leste da área, onde um maior coeficiente de armazenamento corresponde a elevados valores da capacidade específica, espessura e transmissividade, ou a leste da Colônia do Jaíba, onde menores valores coincidem com bai-

xas transmissividades e independem das espessuras.

Análise de agrupamento

A análise de agrupamento foi realizada considerando-se as similaridades entre as amostras (modo Q). Na separação dos grupos de amostras utilizou-se o coeficiente distância como coeficiente de similaridade. Os dados de cada variável foram uniformizados e comprimidos no intervalo entre 0 e 1. Assim, cada variável teve o mesmo peso no processo de agrupamento.

A figura 2 é o dendrograma das amostras como variáveis hidrogeológicas da área. Foram separados cinco grupos de amostras (A a E) que apresentavam similaridades entre si em função da variabilidade dos parâmetros hidrogeológicos.

As principais características hidrogeológicas desses grupos encontram-se no quadro 1.

Análise fatorial

A análise fatorial foi aplicada para cada um dos cinco grupos separados no dendrograma da análise de agrupamento (figura 2), para se testar as associações internas dos parâmetros das diversas amostras (malhas).

Foi realizada a análise fatorial entre variáveis (modo R) considerando-se os mesmos parâmetros da análise de agrupamento. O coeficiente de similaridade utilizado foi o coeficiente de correlação (Pearson). Na figura 3 encontram-se os gráficos dos fatores principais da análise fatorial dos grupos de amostras. Em todas essas análises apenas dois fatores rotados foram suficientes para explicar 100% da variabilidade dos parâmetros. Isto é motivado pelo fato de que a variabilidade de todos os grupos é fortemente influenciada por dois parâmetros (espessura e transmissividade).

Os principais resultados obtidos e as características desses grupos são descritos a seguir.

Grupo A -- Este grupo é composto de 13 espécimes e situa-se nas margens do rio São Francisco e no riacho Tapera.

Os autovalores deste grupo (Harman, 1970) sugerem que praticamente três parâmetros determinam a variabilidade do sistema (espessura, transmissividade e capacidade específica).

O gráfico da figura 3-A salienta a disposição das variáveis em relação aos dois fatores principais (fator 1 e fator 2). Os arranjos dos parâmetros no gráfico indicam dois padrões de distribuição com associação seguinte: 1-espessura e coeficiente de armazenamento e 2-coeficiente de transmissividade e capacidade específica.

Isto sugere que neste grupo a variabilidade do coeficiente de armazenamento é semelhante à da espessura saturada do aquífero. Enquanto, como era de se esperar, a transmissividade tem boa correlação com a capacidade específica.

Vale ressaltar que a transmissividade e a capacidade específica

GRUPO	A			B			C			D			E		
	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.
VALOR															
Espessura Saturada (m)	27,0	41,6	70,0	51,0	76,8	110,0	51,0	60,3	75,0	45,0	52,5	63,0	70,0	84,6	99,0
Coefficiente de transmissividade ($10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)	120,0	212,3	280,0	52,0	80,6	150,0	125,0	227,9	300,0	151,0	198,5	270,0	52,0	121,6	200,0
Capacidade Específica ($10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)	1,0	1,7	2,4	1,0	1,2	2,0	1,2	2,3	3,0	2,4	3,0	4,5	1,9	2,8	3,8
Capacidade Específica por espessura ($10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m/m}$)	54,4	68,2	100,0	54,5	84,9	145,0	75,0	118,3	160,0	80,0	99,4	110,0	85,0	167,1	260,0
Coefficiente de Armazenamento	0,03	0,04	0,006	0,004	0,02	0,035	0,004	0,005	0,007	0,03	0,03	0,04	0,015	0,04	0,05

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DOS GRUPOS IDENTIFICADOS NO DENDROGRAMA DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO.

tem carga (load) negativa no fator 1, indicando baixa correlação e variabilidade diferente do armazenamento e da espessura saturada do aquífero.

A razão da capacidade específica e espessura do aquífero tem carga nos dois fatores, sugerindo correlação com capacidade específica e espessura saturada.

Grupo B -- Este grupo contém 18 amostras e aparece ao norte da serra Azul e sul de Gado Bravo. Os autovalores sugerem que quatro parâmetros determinam a variabilidade do sistema. Estes parâmetros são: espessura saturada, transmissividade, capacidade específica e a razão da capacidade específica por espessura saturada.

Apenas dois fatores explicam a totalidade da variância dos vetores das variáveis e que a maior comunalidade final é da capacidade específica e a menor da espessura.

Observa-se na figura 3-B a associação da transmissividade com a capacidade específica e secundariamente do armazenamento com a espessura saturada do aquífero. Neste grupo, a razão da capacidade específica por espessura saturada, não tem correlação com as demais variáveis, como também, têm uma ampla faixa de variação (54.10^{-7} a $145.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}/\text{m}$), sugerindo uma grande variação e de maneira aleatória.

Outra característica desse grupo são os, normalmente, baixos valores dos coeficientes de armazenamento ($0,004$ e $0,035$) e dos coeficientes de transmissividade (52.10^{-5} a $150.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Trata-se de uma área onde ocorrem siltitos e margas e que tem baixa densidade de fraturamento e de dolinas.

Grupo C -- Este é o grupo que possui o menor número de amostras (sete). Apesar disso, ele aparece bem destacado no dendrograma (figura 2), apresentando portanto boa similaridade entre as espécies (o maior coeficiente distância é $0,26$). Corresponde a parte dos vales do riacho Serraria e do córrego Escuro.

Observa-se no gráfico da figura 3-C a boa correlação entre a espessura e armazenamento. Por outro lado, há baixa correlação entre a transmissividade e a capacidade específica.

É provável que os valores da capacidade específica estejam muito influenciados por perdas de cargas locais porque o aquífero nesta zona é essencialmente fissurado.

A correlação negativa da transmissividade e capacidade específica em relação ao fator 1 sugere que a variabilidade desses parâmetros é completamente diferente do armazenamento e da espessura.

Este grupo é caracterizado também por baixos coeficientes de armazenamento ($0,004$ a $0,007$) e grandes valores dos coeficientes de transmissividade (125.10^{-5} a $300.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Estas características indicam que esta parte do aquífero é, provavelmente, uma zona de intensa circulação de água, pouca espessura e onde não existem grandes reservas armazenadas. As águas infiltra-

das na serra do Sabonetal seriam transferidas para os rios São Francisco e Verde Grande através desta zona.

Grupo D -- Este grupo é constituído de 12 amostras localizadas na zona do morro Catarino e ao sul da Colônia do Jaíba. Os autovalores mostram que apenas três variáveis (espessura, transmissividade e capacidade específica) determinam a totalidade da variabilidade do sistema.

Na figura 3-D observa-se o agrupamento da capacidade específica com a espessura e subordinadamente da razão entre a capacidade específica e a espessura saturada. Isto ratifica a observação de que a capacidade específica neste grupo varia linearmente em função da espessura saturada. A transmissividade tem, por outro lado, alta carga (load) no fator 2 e baixa no fator 1, indicando baixa correlação com a capacidade específica mas alta com o armazenamento.

Este grupo apresenta ainda as seguintes características principais:

- pequenas espessuras e pouco variáveis;
- transmissividades altas e pouco variáveis;
- grandes valores de capacidades específicas;
- baixo armazenamento.

Estas características indicam que este grupo tem poucas reservas de água subterrânea e que as águas infiltradas são logo transferidas para as áreas adjacentes graças à alta transmissividade e baixo armazenamento.

Grupo E -- Este grupo é constituído de 10 amostras situadas na porção central da área. Os maiores autovalores indicam que três variáveis determinam a variabilidade do sistema. A espessura saturada e a transmissividade são as que mais influem no conjunto de variáveis e subordinadamente a capacidade específica. A menor influência é do armazenamento.

Nota-se na figura 3-E um agrupamento entre capacidade específica, transmissividade e armazenamento, sugerindo similaridades entre essas variáveis. Observa-se, ainda, que a espessura não tem correlação com estas três variáveis. Por outro lado, em relação ao fator 2, verifica-se a baixa correlação positiva da razão capacidade específica/espessura saturada com a espessura saturada e armazenamento, e negativa com capacidade específica e transmissividade, sugerindo que a espessura tem variabilidade completamente diferente dos demais parâmetros.

Os valores dos coeficientes de transmissividades deste grupo têm ampla faixa de variação, compreendida entre 52.10^{-5} e $200.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. O coeficiente de armazenamento e a capacidade específica também variam muito. É importante salientar, os altos valores da razão da capacidade específica por espessura saturada, apesar dos grandes valores da espessura saturada daquela zona.

Estas características sugerem que este grupo têm boas reservas de águas subterrâneas, elevadas transmissividades e que o aquífero naquela zona tem grande espessura saturada.

Com os resultados das aplicações metodológicas foi possível tirar as linhas básicas que definem o comportamento do aquífero.

Assim, a área pode ser dividida em várias zonas com características hidrogeológicas próprias, conforme mostra a figura 4. Estas zonas foram delineadas a partir da integração dos resultados obtidos através de técnicas geomatemáticas com as informações estruturais e hidroquímicas do aquífero.

CONCLUSÕES

O zoneamento do aquífero foi realizado a partir do conhecimento atual dos dados existentes e das interpretações estatísticas de diversas variáveis. Com o aporte de novos dados e informações, os limites dessas zonas poderão ser modificados, ou mesmo, estas zonas poderão ser subdivididas ou reagrupadas. As características descritas ou os valores dos parâmetros de cada uma dessas zonas são reflexos dos dados disponíveis, que, em muitos casos, contêm erros analíticos ou de precisão decorrentes dos próprios métodos de sua obtenção. Por outro lado, são valores estatísticos que estão sujeitos a anomalias. Em vista das características próprias de um carste estas anomalias têm maior probabilidade de ocorrência. Contudo, este zoneamento é uma ferramenta excepcional, indispensável para o planejamento de utilização, manejo e proteção dos recursos hídricos da área.

As tendências empregadas permitiram identificar algumas características relevantes do aquífero. Destacam-se as seguintes:

- a carstificação e os fraturamentos mais profundos encontram-se na porção central da área. As maiores espessuras do aquífero também encontram-se nesta parte da área. Por outro lado, as menores espessuras saturadas da área aparecem nas margens do rio São Francisco, a nordeste do morro Catarino, ao sul da Colônia do Jaíba e no vale do córrego Escuro.
- As maiores transmissividades ocorrem nos arredores de Manga, na área do morro Catarino, a sul e sudoeste da Colônia do Jaíba, no médio vale do riacho Tapera e no córrego Escuro.
- Os melhores armazenamentos de água subterrânea são encontrados na área da Colônia do Jaíba, médio vale do riacho Tapera, córrego Escuro e parte centro-leste da área.
- Os poços com maiores capacidades específicas são localizados na porção central da área e ao sul da Colônia do Jaíba.
- Verificou-se também que nem sempre as áreas com maiores espessuras do aquífero apresentavam maiores transmissividades ou capacidades específicas.

O zoneamento espacial do aquífero obtido a partir da análise de agrupamento através de dendrogramas demonstrou que é muito útil nos estudos hidrogeológicos. Ele permite delimitar zonas com características peculiares que podem servir, por exemplo, ao planejamento de estudo de detalhe na área ou de exploração do aquífero. Além disso, pode ser utilizado conjuntamente com modelos matemáticos de simulação a fim de se definir o funcionamento do aquífero e inclusive quantificar as reservas de águas subterrâneas da área.

Por sua vez, a análise fatorial possibilitou o estudo das inter-relações entre os parâmetros do aquífero em diferentes zonas da área. Demonstrou também ser uma ferramenta auxiliar muito útil nos estudos hidrogeológicos.

As diversas técnicas estatísticas empregadas neste trabalho são de grande valia nas pesquisas de água subterrânea, tendo em vista a facilidade de sua aplicação, seus baixos custos e considerando-se as informações que elas podem fornecer. Essas técnicas devem ser usadas principalmente no começo de um estudo hidrogeológico, valendo-se dos dados existentes, com o objetivo de planejar os futuros trabalhos de campo para coleta de novos dados complementares ou de selecionar áreas de pesquisas. À medida que novos dados foram adquiridos, principalmente naquelas áreas onde existiam poucas informações podem-se atualizar ou melhorar as análises estatísticas. No final, têm-se importantes subsídios para o planejamento da utilização dos recursos hídricos. Naturalmente, a precisão dos resultados dependerá de uma série de fatores, principalmente a qualidade, o número e a distribuição espacial de dados. Convém salientar ainda, que estas diferentes técnicas podem ser também aplicadas isoladamente, em função dos objetivos dos trabalhos onde serão utilizadas. No entanto, é a integração e comparação dos resultados dessas técnicas estatísticas com as convencionais e o apoio de trabalhos de campo que se obtém as melhores informações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHLEY, R.P. e LLOYD, J.W. - 1978 - An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *Journal of Hydrology*, 39:355-364.
- BETTENCOURT, J.S. e LANDIM, P.M.B. - 1974 - Estudo geoquímico de óxidos e elementos traços de rochas calcárias do Grupo Açunguí pela análise fatorial. In: XXVIII Cong. Bras. de Geologia, Porto Alegre-RS. Anais da SBG, 2:153-160.
- BOBÉE, B.; LACHANCE, M. e POTVIN, L. - 1981 - Analyse multivariée et interpretation géochimique de la variabilité spatiale de la qualité de l'eau des rivières du Québec Meridional. *Journal of Hydrology*, 53:95-116.
- DAVIS, J.C. - 1973 - Statistics and data analysis in Geology, John Wiley Sons Inc., New York, 549 pp.
- HARBAUCH, J.W. e MERRIAN, D.F. - 1968 - Computer applications in stratigraphical analysis. Willey, New York, 282 pp.
- HARMAN, H.H. - 1970 - Modern factor analysis. University of Chicago Press, Chicago, 474 pp.
- IMBRIE, J. e PURDY, E.G. - 1962 - Classification of modern Bahamian carbonate sediments. *Am. Ass. of Petroleum Geologists*, 1:253-272.
- _____ e VAN ANDEL, T.H. - 1964 - Vector analysis of heavy mineral data. *Bull. of the Geol. Society of America*, 75:1131-1156.

- KLOVAN, J.E. - 1966 - The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distributions. *Journal of Sedimentary Petrology*, 36:115-125.
- LANDIM, P.B.M.; PISANI, J.F. e BÓRIO, N.J. - 1977 - Aplicação do D^2 de Mahalanobis na distribuição de ambientes de sedimentação. *Anais Acad. Bras. Cienc.*, 49(2):259-267.
- _____; BJORNBERG, A.J.S.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A.B.; RODRIGUES, J.E. e BUENO, B.S. - 1978-A - Distinção de seixos provenientes de diversos ambientes de sedimentação pelo método da distância generalizada D^2 de Mahalanobis. *Rev. Ciência e Cultura*, 30(8):957-966.
- _____; BOGAERT, M.O.; SILVA, A.P. e SZULMAN, S. - 1978-B - Análise de superfícies de tendência. Secretaria de Obras e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica, São Paulo, 53 pp. (Inédito).
- NETO, A.F.S. e CAMPOS, H.C.S. - 1980 - Análise de agrupamento - um modelo auxiliar na caracterização de aquíferos. In: XXXI Congresso Bras. Geol. Balneário de Camboriú, SC. *Anais da SBG*, 2:1041-1055.
- SPSS-STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES - 1975 - User's Guide. Second Edition, McGraw-Hill Inc., New York, 675 pp.
- WILLIAMS, R.E. - 1982 - Statistical identification of hydraulic connections between the surface of a mountain and internal mineralized sources. *Ground Water*, 20(4):466-478.

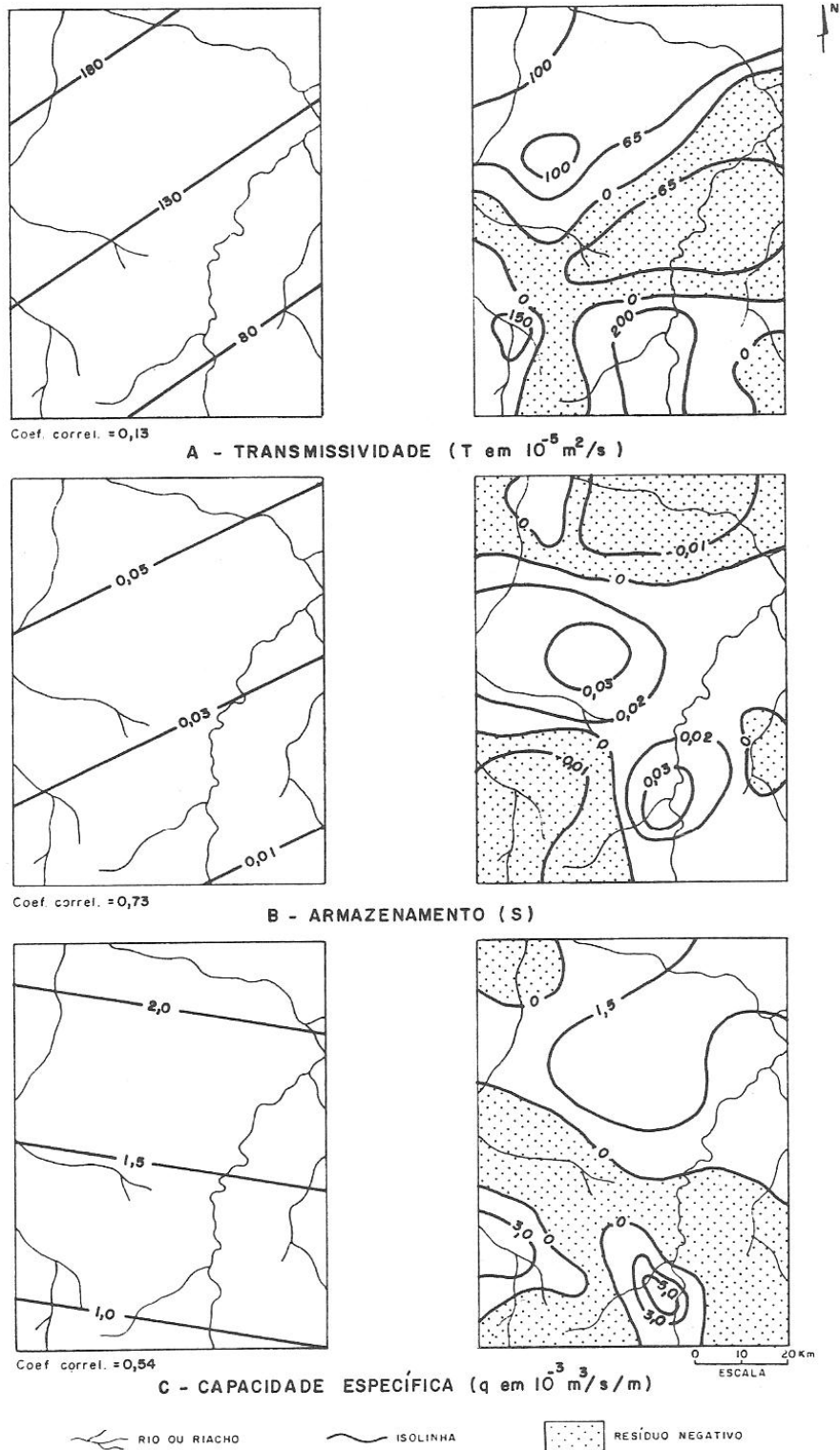


FIGURA 1. MAPAS DE TENDÊNCIA, DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DAS CARACTERÍSTICAS DO AQUIFERO

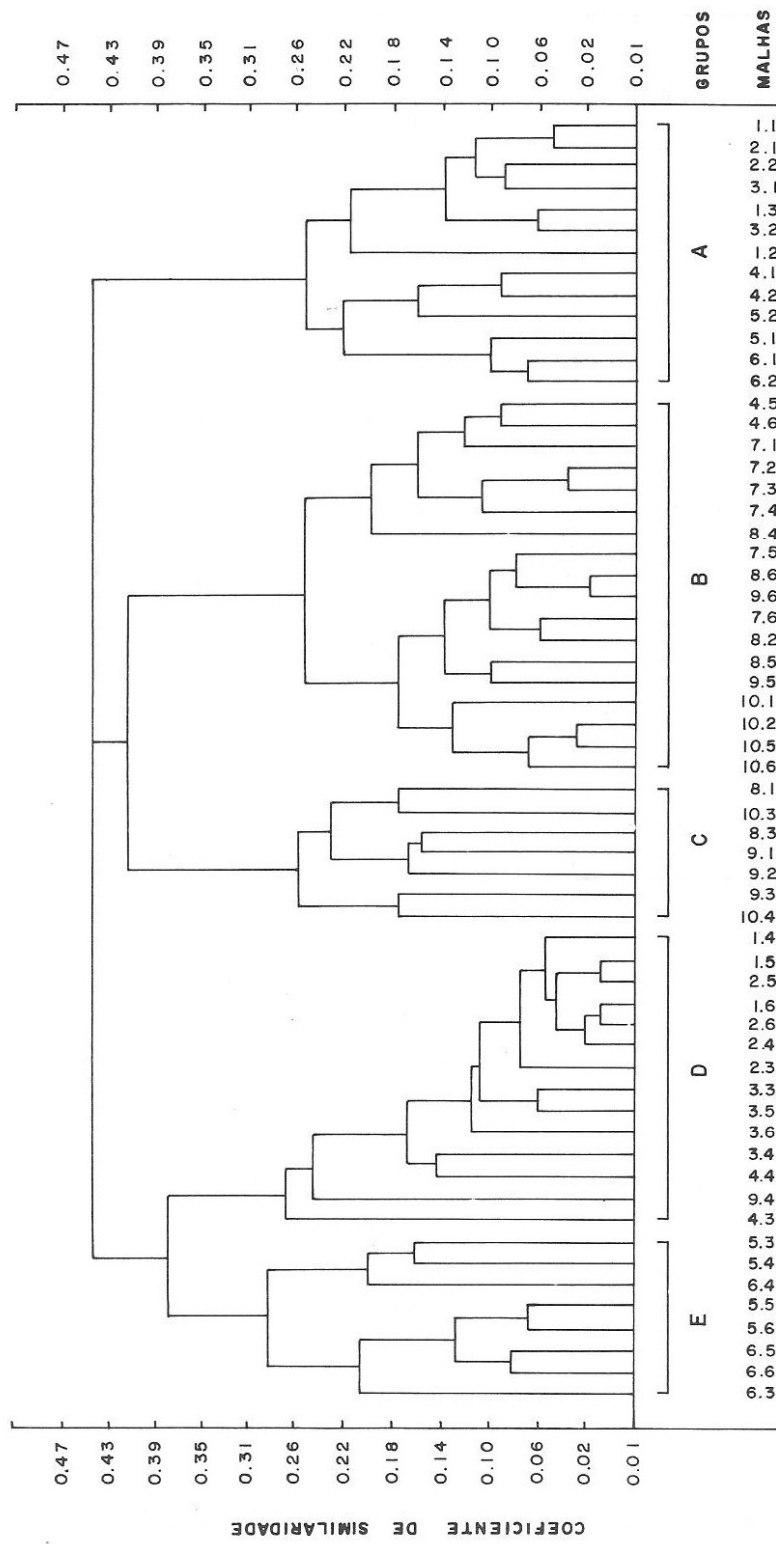
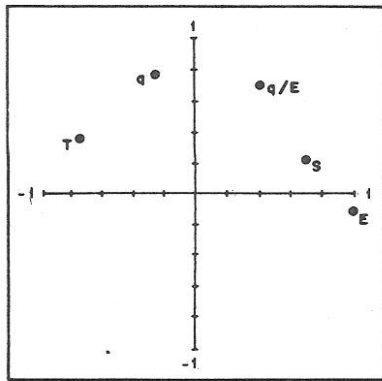
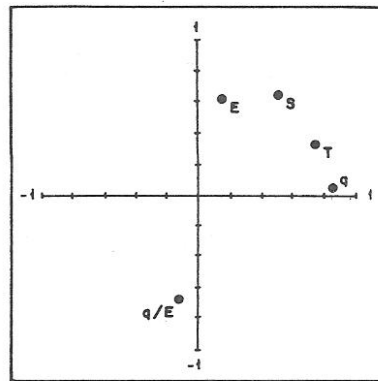


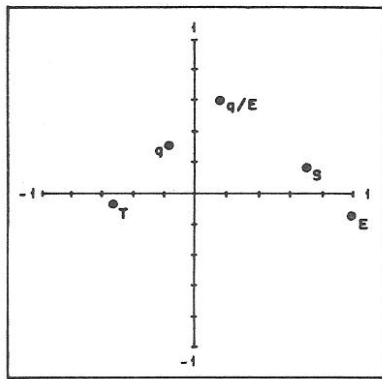
FIGURA 2. DENDROGRAMA DE AMOSTRAS COM DADOS HIDROGEOLÓGICOS



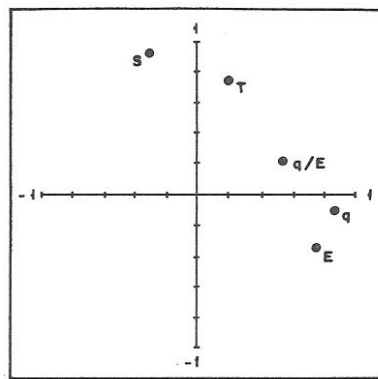
A - GRUPO A



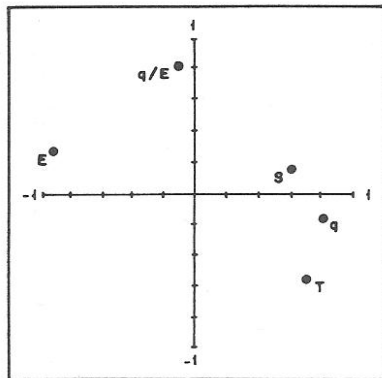
B - GRUPO B



C - GRUPO C



D - GRUPO D



E - GRUPO E

LEGENDA

- E - ESPESSURA SATURADA
- T - COEF. TRANSMISSIVIDADE
- q - CAPACIDADE ESPECÍFICA
- q/E - CAPACIDADE ESPECÍFICA POR ESPESSURA SATURADA
- S - COEF. DE ARMAZENAMENTO

FATOR 1 - EIXO HORIZONTAL

FATOR 2 - EIXO VERTICAL

FIGURA 3. GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL

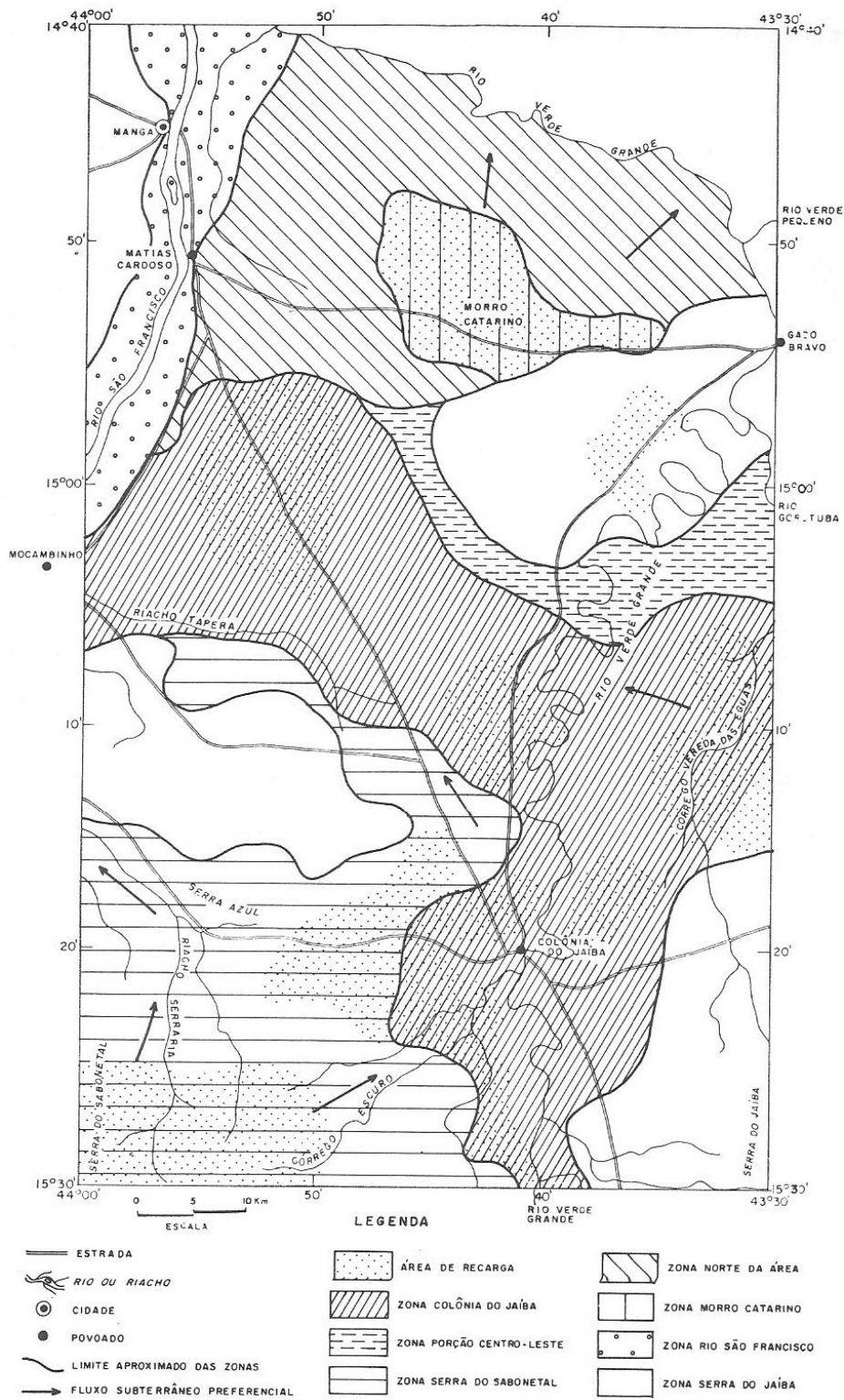


FIGURA 4. SÍNTESE HIDROGEOLÓGICA

APPLICATION OF GEOMATHEMATIC TECHNIQUES TO THE STUDY IN
A KARST AQUIFER
BY
ADELBANI BRAZ DA SILVA

ABSTRACT-- The used geomathematic techniques were the tree-dimensional statistic trend analysis and the multivariate analysis (cluster and factor analysis). The trend analysis objectified to complete the available data and verify the hydrogeological behavior on these locals where there were few data or were not conveniently distributed. The cluster analysis was made to know the simultaneous influence of the hydrogeological parameters (thickness, transmissivity, storativity, specific capacity and the rate of specific capacity against the saturated thickness) in several points of the area. After the aquifer sample groups identification, the factor analysis was made in each of them, to define the relationships among the hydrogeological parameters in each group and to study its variabilities. These geomathematic techniques provided complementary information to study of the available hydrogeological data. The integration of all interpretations allowed the identification of some relevant characteristics of the aquifer and elaborate a zoning of the hydric potencial in the area. The used techniques in this work showed that they are of great importance in the researches about groundwater of karst aquifer, considering the facility for its utilization, its lower costs and also considering the information which they can provide.