UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ANÁLISE MORFOESTRUTURAL, HIDROGEOLÓGICA E
HIDROQUÍMICA NO ESTUDO DO AQUÍFERO CÁRSTICO
DO JAÍBA, NORTE DE MINAS GERAIS.

Adelbani Braz da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

Área de Concentração: Geologia Geral e de Aplicação

São Paulo
1984

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC

30900005645

ANÁLISE MORFOESTRUTURAL, HIDROGEOLÓGICA E
HIDROQUÍMICA NO ESTUDO DO AQUÍFERO CÁRSTICO
DO JAÍBA, NORTE DE MINAS GERAIS.

Adelbani Braz da Silva

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Estanislau do Amaral

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO EXAMINADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. S.E. do Amaral	<i>Sérgio E. do Amaral</i>
Examinadores:	Dr. A. da C. Rebouças	<i>Adelbani Braz da Silva</i>
	Dr. ^a M. Szkłiszay	<i>Maria Szkłiszay</i>
	Dr. ^a L. Nordemann	<i>L. Nordemann</i>
	Dr. P.M.B. Landim	<i>P.M.B. Landim</i>

São Paulo
1984

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE QUADROS	V
RESUMO	1
ABSTRACT	2
 1. <u>INTRODUÇÃO</u>	 3
1.1. LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA ÁREA	4
1.2. OBJETIVOS	4
1.3. SINOPSE DO ROTEIRO METODOLÓGICO	6
1.4. AGRADECIMENTOS	8
 2. <u>CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS</u>	 10
2.1. LITO-ESTRATIGRAFIA	11
2.1.1. <u>Grupo Bambuí</u>	13
2.1.2. <u>Sedimentos Cenozóicos</u>	15
2.2. GEOMORFOLOGIA	17
2.3. ASPECTOS DA GEOLOGIA ESTRUTURAL	20
 3. <u>CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS</u>	 22
3.1. HIDROCLIMATOLOGIA	23
3.2. HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE	27
3.3. HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA	32
3.3.1. <u>Piezometria</u>	33
3.3.2. <u>Características dimensionais do aquífero</u>	39
3.3.3. <u>Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero</u>	42
3.3.4. <u>Avaliação das reservas de água subterrânea</u>	52
3.4. HIDROQUÍMICA	58
3.4.1. <u>Águas superficiais</u>	58
3.4.2. <u>Águas subterrâneas</u>	63
 4. <u>TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS MORFOESTRUTURAIS</u>	 75
4.1. DOCUMENTOS UTILIZADOS	76
4.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	76
4.3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS FEIÇÕES MORFOESTRUTURAIS	78
4.3.1. <u>Procedimentos adotados</u>	78
4.3.2. <u>Descrição dos procedimentos matemáticos</u>	79
4.3.3. <u>Tendência da distribuição espacial das fraturas</u>	82

4.3.4.	<u>Tendência da distribuição espacial das dolinas</u>	90
4.3.5.	<u>Correlação entre as superfícies de tendência das feições morfoestruturais</u>	95
4.3.5.	<u>Relação entre as feições morfoestruturais e as características do aquífero</u>	97
4.4.	<u>ANÁLISE DAS ORIENTAÇÕES DAS FRATURAS</u>	99
4.4.1.	<u>Procedimentos adotados</u>	100
4.4.2.	<u>Descrição dos procedimentos matemáticos</u>	100
4.4.3.	<u>Tendência das direções das fraturas</u>	102
4.4.4.	<u>Relação entre as orientações das fraturas e as características do aquífero</u>	111
4.4.5.	<u>Análise das frequências dos azimutes das fraturas.</u>	112
5.	<u>TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DO AQUÍFERO</u>	115
5.1.	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	115
5.2.	DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS	117
5.3.	PROCEDIMENTOS ADOTADOS	121
5.4.	ANÁLISE DE TENDÊNCIA	121
5.4.1.	<u>Características dimensionais</u>	124
5.4.2.	<u>Transmissividade do aquífero</u>	127
5.4.3.	<u>Armazenamento do aquífero na área</u>	129
5.4.4.	<u>Capacidade específica dos poços</u>	131
5.4.5.	<u>Razão da capacidade específica e espessura do aquífero</u>	131
5.4.6.	<u>Similaridade entre as superfícies de tendência</u>	131
5.5.	ANÁLISE DE AGRUPAMENTO	134
5.6.	ANÁLISE FATORIAL	135
6.	<u>INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS</u>	151
6.1.	ZONEAMENTO HÍDRICO	152
6.1.1.	<u>Padrões de orientação das fraturas</u>	152
6.1.2.	<u>Distribuição das feições morfoestruturais</u>	155
6.2.	ZONEAMENTO HIDROQUÍMICO	157
6.2.1.	<u>Características geohidroquímicas</u>	158
6.2.2.	<u>Qualidade da água</u>	162
6.3.	ZONEAMENTO DAS POTENCIALIDADES HÍDRICAS	168
7.	<u>CONCLUSÕES</u>	174
8.	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	180

LISTA DE FIGURAS

1.1 - Mapa de localização da área	5
2.1 - Mapa geológico da área de estudo	14
2.2 - Esboço geomorfológico	18
3.1 - Precipitação, temperatura e umidade relativa médias anuais.	24
3.2 - Balanço hídrico nos postos meteorológicos de Januária e Manga.	28
3.3 - Descargas médias mensais e anuais do rio Verde Grande . . .	31
3.4 - Piezometria do final do período chuvoso (jan.-fev., 1978) . .	34
3.5 - Variação piezométrica entre as épocas seca e chuvosa em 1978.	36
3.6 - Hidrogramas de poços localizados em diversos pontos do aquífero	38
3.7 - Mapa da superfície da base da zona fraturada	40
3.8 - Mapa de espessura da zona fraturada	41
3.9 - Relação entre transmissividade e capacidade específica dos poços	44
3.10- Isolinhas de transmissividade	46
3.11- Relação entre capacidade específica e profundidade dos poços	49
3.12- Isolinhas de capacidade específica	51
3.13- Isolinhas da razão da capacidade específica e espessura saturada	53
3.14- Classificação química das águas do rio Verde Grande	62
3.15- Classificação química das águas subterrâneas	65
3.16- Relação entre os sólidos dissolvidos e a condutividade elétrica	67
3.17- Relação entre os cloretos e as condutividades elétricas . .	69
3.18- Mapa de condutividade elétrica das águas subterrâneas . . .	71
3.19- Isolinhas de cloretos das águas subterrâneas	73
4.1 - Mapas de tendência de 1º grau e de resíduo da densidade das lineações	85
4.2 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade de todas as lineações	86
4.3 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade das grandes lineações	88
4.4 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade das lineações associadas as dolinas	89
4.5 - Mapas de tendência de 1º grau e de resíduo da densidade de dolinas	92

4.6 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade de todas as dolinas	93
4.7 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade das grandes dolinas	94
4.8 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da densidade de dolinas associadas a lineações	96
4.9 - Direções dos azimutes médios das lineações em cada malha . .	103
4.10- Mapas de tendência de 1º grau e de resíduos dos azimutes das lineações	105
4.11- Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo dos azimutes de todas as lineações	106
4.12- Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo dos azimutes das grandes lineações	108
4.13- Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo dos azimutes das lineações associadas a dolinas	110
4.14- Diagramas de frequências das direções das lineações	113
5.1 - Mapas de tendência de 1º grau e de resíduo de T e das características dimensionais do aquífero	122
5.2 - Mapas de tendência de 1º grau e de resíduo de S, q, e q/E . .	123
5.3 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da superfície da base da zona fraturada	125
5.4 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da espessura da zona fraturada	126
5.5 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo das transmissividades	128
5.6 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo do coeficiente de armazenamento	130
5.7 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da capacidade específica	132
5.8 - Mapas de tendência de 3º grau e de resíduo da razão capacidade específica e espessura saturada	133
5.9 - Dendrograma de amostras com dados hidrogeológicos	136
5.10- Distribuição dos grupos segundo o dendrograma	138
5.11- Gráficos dos fatores principais da análise fatorial	139
6.1 - Zoneamento dos padrões de orientação dos fraturamentos das rochas	154

6.2 - Síntese da análise das densidades de fraturas e dolinas . . .	156
6.3 - Síntese dos estudos geohidroquímicos	159
6.4 - Classificação das águas subterrâneas para irrigação	166
6.5 - Síntese hidrogeológica	169

L I S T A D E Q U A D R O S

2.1 - Litoestratigrafia do Grupo Bambuí	12
3.1 - Médias mensais de temperatura do ar, precipitação pluviometria, evapotranspiração potencial e balanço hídrico em Januária e Manga	25
3.2 - Dados fluviométricos característicos do rio Verde Grande . .	30
3.3 - Valores de difusividades hidráulicas e coeficientes de armazenamento	47
3.4 - Infiltração anual média de água de chuva para o aquífero . .	56
3.5 - Características químicas das águas do rio São Francisco . . .	59
3.6 - Características químicas das águas do rio Verde Grande . . .	60
3.7 - Características químicas das águas subterrâneas	64
4.1 - Estatísticas das densidades de lineações da área	83
4.2 - Estatísticas das densidades de dolinas da área	91
5.1 - Características dos grupos identificados no dendrograma da análise de agrupamento	137
5.2 - Coeficiente de correlação e estatísticas da matriz de correlação do Grupo A	141
5.3 - Estatísticas da matriz de fatores não rotada e matriz de fatores final rotada do Grupo A	141
5.4 - Coeficientes de correlação e estatísticas da matriz de correlação do Grupo B	143
5.5 - Estatísticas da matriz de fatores não rotada e matriz de fatores final rotada do Grupo B	143
5.6 - Coeficientes de correlação e estatísticas da matriz de correlação do Grupo C	145
5.7 - Estatísticas da matriz de fatores não rotada e matriz de fatores final rotada do Grupo C	145

5.8 - Coeficientes de correlação e estatísticas da matriz de correlação do Grupo D	147
5.9 - Estatísticas da matriz de fatores não rotada e matriz de fatores final rotada do Grupo D	147
5.10- Coeficientes de correlação e estatísticas da matriz de correlação do Grupo E	149
5.11- Estatísticas da matriz de fatores não rotada e matriz de correlação do Grupo E	149
6.1 - Características das águas subterrâneas e limites de potabilidade	163

RESUMO

Neste trabalho foram aplicadas técnicas de análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica com objetivo de definir as características e as potencialidades de um aquífero cárstico localizado na região norte do Estado de Minas Gerais. Essas técnicas permitiram o estudo da distribuição espacial e da frequência das feições morfoestruturais (fraturas e dolinas), a orientação das fraturas e o comportamento regional dos parâmetros dimensionais, hidrodinâmicos e hidroquímicos do aquífero. A distribuição espacial das feições morfoestruturais evidenciou zonas com diferentes características do ponto de vista tectônico e de carstificação. Além disso, há evidências de que as principais drenagens da área são controladas por fraturamentos. Estatisticamente as fraturas que mais ocorrem na área são as longitudinais com azimutes de 30 a 40 graus e as angulares com azimutes de 110 a 120 graus. As fraturas associadas às dolinas mais frequentes são as angulares orientadas entre 10 e 20 ou 110 e 120 graus e as transversais com azimutes entre 140 e 150 graus. As fraturas longitudinais propiciaram a instalação de um carste mais raso enquanto que a carstificação ao longo das fraturas angulares e transversais atingiu maiores profundidades. Verificou-se também, que os níveis de carstificação não estão relacionados, de uma maneira geral, com o comprimento das fraturas ou ao tamanho das dolinas. A espessura saturada média é de 55 m, a máxima superior a 100 m e a mínima de 30 m. Os recursos exploráveis estimados são de $32.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$. Estes recursos são acessíveis em vista da pouca profundidade do aquífero e são favoráveis a exploração através de poços. As águas subterrâneas da área, de modo geral, não apresentam restrições ao uso agrícola, humano e a alguns tipos de indústrias. As principais restrições ao uso são relativos à dureza e alcalinidade. Foram verificados também, alguns focos de poluição na área em questão refletindo a grande vulnerabilidade do aquífero. Este fato sugere que é importante que sejam observados, na região, os aspectos relacionados a conservação e preservação dos recursos hídricos subterrâneos.

ABSTRACT

Morphostructural, hydrogeological and hydrochemical techniques were applied in this study to characterize the groundwater system of the Jaíba Karst aquifer and its potential for exploitation and utilization as water supply to northern part of the state of Minas Gerais. These techniques allowed as the study of the spacial distribution and frequency of some morphological features, such as fracture and sinkholes as well as the regional behavior of dimensional and hydrodynamic parameters of the aquifer. From the point of view of tectonics and karstification, the spacial distribution of the morphological features exhibit zones with different characteristics. It was also seem that the level of karstification is generally independent of the length of the fractures and of the size of the sinkholes. In addition, there is evidence that the drainage of the principal streams is controlled by geological fracturing. Statistically, the most frequently occurring fractures are longitudinal with azimuths from 30 up to 40 degrees and angular fractures with azimuths from 110 up to 120 degrees. The fractures frequently associated with sinkholes are angular (10 up to 20 and 110 up to 120 degrees) and transversal, with azimuths between 140 and 150 degrees. The longitudinal fractures allowed a more shallow karst development while the karstification along the angular and transversal fractures was deeper. The average saturated thickness is 55 m with a maximum around 100 m and a minimum of 30 m. The estimated sustainable groundwater yield is about $32.10^6 \text{ m}^3/\text{year}$. These groundwater resources are highly accessible by wells because of the shallow depth of the water table. The good groundwater quality in this region, in general, allow it be indicated for many types of agricultural, industrial and potables usages. The principle restriction on its usages is related to its hardness and alkalinity. In some parts of the aquifer were also found vestiges of pollution, so indicating its vulnerability to groundwater contamination. This fact suggests the importance of the statement of a groundwater protection program to insure the quality of this valuable resource.

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo visa estabelecer as potencialidades hidrogeológicas e definir aspectos metodológicos de interpretação dos dados de um aquífero cárstico, numa região de clima semi-árido.

A área escolhida para o estudo faz parte do sistema cárstico da região do Jaíba, ligado as rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, e está situada ao norte do Estado de Minas Gerais.

A caracterização do sistema hidráulico de um carste, na maioria das vezes, é difícil pelos métodos convencionais, tendo em vista que a infiltração, armazenamento e a circulação das águas subterrâneas estão condicionadas à dissolução aleatória e/ou ao fraturamento de rochas carbonáticas. Demonstra-se que, através do processamento estatístico de dados e informações geológicas, estruturais e hidroquímicas, conjuntamente com o conhecimento dos processos de carstificação que moldaram o aquífero e dos parâmetros hidrogeológicos, é possível a caracterização do comportamento do carste. Para isto, aplicaram-se várias técnicas de tratamento e de interpretação dos dados, sendo que, muitas delas são inéditas em estudos hidrogeológicos de carstes. Assim, foi possível salientar características do carste e se chegar à definição do modelo real de funcionamento do aquífero.

Trata-se de um trabalho que sintetiza a experiência do autor em estudos de aquíferos cársticos, de várias regiões do Brasil, ao longo de quase 15 anos de atividade profissional.

O trabalho de pesquisa e levantamento de dados da área analisada teve início em dezembro de 1976 e prolongou-se até dezembro de 1981. Esta empreitada contou também com a participação de vários técnicos da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, cabendo ao autor a coordenação dos estudos.

Este estudo fornece subsídios a pesquisa hidrogeológica os quais deverão ser utilizados na perspectiva de serem aprimorados e aplicados em outras regiões cársticas do Brasil.

1.1. LOCALIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA ÁREA

A área de estudo está compreendida entre os paralelos de 14°40' e 15°30' de latitude sul e os meridianos 43°30' e 44°00' de longitude oeste. Situa-se ao norte do Estado de Minas Gerais e tem aproximadamente uma superfície de 6.000 km² (figura 1.1).

Nesta região predomina a atividade agrícola mas, vem aumentando expressivamente a urbanização, em virtude de incentivos do Governo Estadual para aquela área. Está prevista também a implantação de vários projetos de irrigação para o cultivo de cana-de-açúcar graças à boa qualidade dos solos da área e à topografia suave que facilita a mecanização agrícola.

O uso dos recursos hídricos subterrâneos da área é muito pequeno. Só recentemente é que está havendo um incremento na utilização da água subterrânea, seja para uso doméstico, pecuário ou público. Grande parte desse incremento tem sido motivado pela implantação de projetos agropecuários e pelo aumento populacional da Colônia do Jaíba e outros núcleos urbanos.

Trata-se, portanto, de uma região onde cresce, dia-a-dia, a demanda de água. Neste quadro, a água subterrânea vem adquirindo papel de destaque, principalmente, naqueles locais distantes dos rios perenes que drenam a área, onde tornam-se onerosos a captação e o transporte de águas superficiais.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo principal do presente estudo foi o de definir as potencialidades hidrogeológicas da área, através da elaboração de um modelo de funcionamento do aquífero. Este modelo integra os padrões estruturais, feições morfológicas, parâmetros característicos do aquífero e as características hidroquímicas das águas subterrâneas.

O objetivo subsidiário foi a análise e correlação de feições morfoestruturais superficiais com os parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos do aquífero. Enfocaram-se os aspectos morfoestruturais, porque tanto o fraturamento como alguns efeitos da carstificação são refletidos em superfície através de descontinuidades

morfoestruturais mapeáveis.

Desta forma, foi possível caracterizar um roteiro metodológico de estudo aplicável a áreas semelhantes, correspondentes aos domínios cársticos brasileiros.

1.3. SINOPSE DO ROTEIRO METODOLÓGICO

Tendo em vista os objetivos propostos, a abordagem metodológica processou-se em três etapas. A primeira visou a caracterização do aquífero, interpretando-se os dados disponíveis pelos métodos usuais da hidrogeologia. Na segunda etapa, tentou-se complementar os dados existentes e obter informações adicionais através de técnicas geomatemáticas. A partir de então, realizou-se a terceira etapa que foi a integração das informações obtidas e a elaboração do mapa das potencialidades hídricas da área.

Com os métodos de estudos convencionais, enfocaram-se os aspectos geológicos, hidroclimáticos, de hidrologia de superfície, de hidrologia subterrânea e hidroquímicos. Na hidrologia subterrânea, deu-se ênfase especial às características dimensionais, visando definir a geometria do aquífero, e as características hidrodinâmicas com objetivo específico de identificar zonas com diferentes propriedades hidráulicas. Por outro lado, o estudo hidroquímico foi realizado para definir os mecanismos de evolução química das águas e os fenômenos modificadores da composição química, responsáveis pelas suas variações espacial e temporal. Além disso, procurou-se obter informações sobre a direção e o sentido dos fluxos subterrâneos.

As técnicas geomatemáticas empregadas foram as análises estatísticas tri-dimensionais de tendência e análises multivariantes de agrupamento e fatorial.

Através de *análises de tendência*, inicialmente, procederam-se os estudos da distribuição espacial das feições morfoestruturais (fraturas e dolinas) e das orientações das fraturas. Estes estudos visaram a delimitação de zonas com diferentes padrões estruturais e com características próprias do ponto de vista tectônico e de carstificação para, posteriormente, correlacioná-las aos dados hidrogeológicos. Em seguida, efetuaram-se

análises de tendências dos parâmetros dimensionais e hidrodinâmicos do aquífero. Tais análises objetivaram complementar os dados disponíveis e verificar o comportamento hidrogeológico naqueles locais onde existiam poucos dados ou estes estavam mal distribuídos. Nestas condições, a aplicação de análise de tendência, possibilitando a identificação do comportamento regional de diversas características do aquífero, teve um grande alcance prático e científico.

Posteriormente, realizou-se a *análise multivariante de agrupamento* considerando-se, como variáveis, os parâmetros hidrogeológicos fundamentais que estão relacionados as características físicas do aquífero (espessura do aquífero, transmissividade, armazenamento, capacidade específica e a razão da capacidade específica pela espessura saturada). Esta análise de agrupamento teve a intenção de conhecer a influência simultânea de todos esses parâmetros hidrogeológicos em diversos locais da área. A partir de então, foi possível delimitar as zonas ou grupos de amostras em que os parâmetros utilizados tinham a mesma variabilidade.

Após a identificação desses grupos de amostras, realizou-se a *análise fatorial* em cada um deles, considerando-se os mesmos parâmetros hidrogeológicos da análise de agrupamento. Com a análise fatorial, procurou-se definir as inter-relações entre os parâmetros hidrogeológicos em cada grupo e estudar as causas das suas variabilidades.

Finalmente, procedeu-se a integração dos resultados e interpretações obtidas com as técnicas convencionais e as geomatemáticas. Inicialmente, esta integração foi realizada através da correlação dos coeficientes 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 morfoestruturais, além dos mapas dos parâmetros hidrogeológicos e hidroquímicos.

Os resultados obtidos puderam ser correlacionados e comprovados por meio de estudos de campo. Além destes estudos, foram abordados alguns aspectos da qualidade da água subterrânea para diversos usos.

Deste modo, as informações obtidas nos trabalhos de campo e de laboratório, além dos dados de foto-interpretação, foram tratados e interpretados por meio de várias técnicas. Este procedimento possibilitou fundamentalmente elaborar um zoneamento dos recursos hídricos subterrâneos da área.

1.4. AGRADECIMENTOS

Este trabalho tornou-se possível graças a uma série de colaborações prestadas por pessoas e entidades, ao longo das diferentes etapas do seu desenvolvimento, às quais o autor externa a sua mais sincera e profunda gratidão.

Aos professores Dr. Sérgio Estanislau do Amaral e Dr. Aldo da Cunha Rebouças pela orientação conferida, além da amizade, ajuda e estímulo oferecidos durante todas as etapas da pós-graduação.

À Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, nas pessoas do seu Presidente Dr. Milton de Lima Filho e de seus Diretores Dr. João Nelson de Senna, Dr. Carlos Armando Gontijo Cesar, Dr. Geraldo de Queiroz Cançado Sobrinho e Dr. Evaldo Abdala, por terem apoiado e subsidiado o autor durante a pós-graduação em São Paulo.

À Superintendência de Desenvolvimento Científico do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de auxílio para realização desta tese, processo nº 101.105-81.

À Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, através dos Diretores do Instituto de Geociências, Prof. Edézio Teixeira de Carvalho e Prof. Wolney Lobato e dos Chefes do Departamento de Geologia Prof. João Alberto Pratini de Moraes e Profa. Yoko Katoo, pelo apoio e por terem tornado possível o afastamento do autor para a pós-graduação.

Ao Programa Institucional de Capacitação de Docentes - PICD-da Coordenação e Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela ajuda oferecida.

Aos amigos Waldemir Barbosa da Cruz, Paulo Cyro Baptista

Escodino e Carlos Alberto de Mé^llo Peixoto, pelo apoio, ajuda e incentivo.

A todos os colegas do CETEC que colaboraram e participaram direta ou indiretamente na execução deste trabalho, especialmente os consultores Dr. Emilio Custodio Gimena e Dr. Antonio Plata Bedmar.

Aos professores Dr. Benjamim Bley de Brito Neves, Dr. Paulo Milton Barbosa Landim, Dr. Raphael Hypólito, Dra. Mária Szikszay e Dr. Gilberto Amaral, pela revisão do texto e pelas críticas e sugestões apresentadas.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo que franqueou suas instalações, laboratórios e, especialmente, os seus terminais de computador do Centro de Computação Eletrônica - CCE-USP.

Aos graduandos do IG-USP, Seiju Hassuda e Sueli Yoshinaga, pelo auxílio nos processamentos dos dados no computador. Às Sra. Sônia Maria da Costa Matoso e Miryam Davis Alves Barrio datilografia do texto, e Nelson Ramon Ferreira de Andrade, pela confecção dos desenhos. Ao setor gráfico do IG-USP, equipe Jayme Alves da Silva, pela colaboração na edição deste texto.

Enfim, a todos aqueles que de uma maneira ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho, o mais profundo reconhecimento do autor.

2. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Os sedimentos carbonatados e argilosos que afloram no vale do rio São Francisco vêm sendo descritos desde 1823, quando SPIX e MARTIUS (1823) realizaram viagens cruzando o divisor de água dos rios Tocantins e São Francisco. A partir daí, numerosos trabalhos foram realizados em áreas onde ocorrem essas rochas nos Estados de Goiás, Minas Gerais, Bahia e Mato Grosso. Um excelente histórico de evolução do conhecimento da ocorrência destas litologias foi feito por MOUTINHO DA COSTA e ANGEIRAS (1970) e por MOUTINHO DA COSTA et alii (1975).

Inicialmente estes sedimentos foram chamados de "Série Bambuí" por RIMANN (1917). Esta expressão ficou consagrada pelo uso na literatura geológica. Apesar do grande número de trabalhos realizados, desde então, sobre as litologias da "Série Bambuí", a primeira sequência litoestratigráfica concreta foi proposta por BRANCO e COSTA (1960), na qual separou várias formações e membros.

Modernamente, a soma de contribuições à geologia do agora denominado Grupo Bambuí, na região ocidental de Minas Gerais e Goiás, avoluma-se a cada ano. Destacam-se os trabalhos de BARBOSA (1963), ALMEIDA (1967 e 1969), OLIVEIRA (1967), CARVALHO e EPSTEIN (1967), CARVALHO e PFLUG (1968), BRAUN (1968) e SCHÖLL (1972), entre outros.

Recentemente o CETEC (1981), dentro de um estudo integrado de recursos naturais, fez o mapa geológico e de recursos minerais do noroeste do Estado de Minas Gerais, na escala de 1:250.000. Por outro lado, COSTA (1978) elaborou o mapa geológico, na escala de 1:100.000, das folhas de Januária, Japoré, Manga e Mata do Jaíba. Estas duas últimas folhas compreendem a área da tese.

Uma síntese e revisão completa da estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil central foi realizada por DARDENNE (1978). Nesta síntese foi proposta a subdivisão do Grupo Bambuí em seis formações:

- Formação *Jequitaí*, na base dos sedimentos, caracteriza-se por um conglomerado (tilito);

- Formação *Sete Lagoas*, representada por calcários e dolomitos lenticulares inseridos em uma sequência pelítica;
- Formação *Serra de Santa Helena*, essencialmente pelítica, com folhelhos e siltitos;
- Formação *Lagoa do Jacaré*, composta por calcários oolíticos e pisolíticos, siltitos e margas;
- Formação *Serra da Saudade*, constituída por folhelhos verdes, argilitos e siltitos;
- Formação *Três Marias*, no topo da sequência, com siltitos verdes e arcóseos.

No quadro 2.1 encontram-se algumas proposições de classificação da lito-estratigrafia do Grupo Bambuí desde a de BRANCO e COSTA (1960) até a de DARDENNE (1978):

2.1. LITO-ESTRATIGRAFIA

A área está situada dentro do craton do São Francisco e as rochas consolidadas, que afloram na região (Grupo Bambuí), constituem o complexo sedimentar superior da cobertura cratônica pré-cambriana idiomorficamente dobrada, (BARBOSA (1966); ALMEIDA (1967 e 1977); ALMEIDA et alii (1976, 1977 e 1981) e BRITO NEVES (1983)). Este material representa a sedimentação marinha resultante da submersão quase total do craton do São Francisco, por ocasião do desenvolvimento do segundo estágio estrutural dos geossinclíneos marginais a ele, no proterozóico superior.

Segundo MARCHESI (1974), esta sedimentação predominantemente pelítica e carbonatada sobre a área cratônica indica ambiente de águas marinhas rasas e planícies de maré e área subsidente, geralmente, de baixa e média energia.

Estas rochas da cobertura do craton foram consolidadas, com tectogênese variável no espaço e no tempo (500 a 700 m.a.), no final do pré-cambriano ao início do paleozóico, consoante à síntese dos dados radiométricos (Rb/Sr e K/Ar) disponíveis atualmente.

LITOLOGIAS	AUTORES	BRANCO E COSTA (1960)		OLIVEIRA (1967)	SCHÖLL (1972)	DARDENNE (1978)
		Membros	Formações	Formações	Formações	Formações
Siltitos e Folhelhos Verdes, Carbonáticos	Serra da Saudade	Três Marias	Rio Paraopeba	Três Marias	Três Marias(?)	Três Marias
Siltitos Verdes Acinzentados Lentes de Arcóseos Amarronzados Siltitos e Folhelhos Marron Acinzentados						Serra da Saudade
Calcário e Dolomito com Intraclastos Oolítico Siltitos e folhelhos Preto Acinzentados	Lagoa do Jacaré			Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré	Lagoa do Jacaré
Siltitos e Folhelhos Folhelho Cinza/Filitos Camadas e Lentes de Calcários Siltitos Subordinados	Serra de Santa Helena			Serra de Santa Helena	Serra de Santa Helena	Serra de Santa Helena
Mármore com Quartzo-Clorita, Filito Calcários finamente laminados, Preto Acinzentado Mármore com Quartzo e Clorita Dolomito e Filitos		Sete Lagoas	Sete Lagoas	Sete Lagoas	Sete Lagoas	
Conglomerados, Arcóseos e Filitos	Carrancas					Jequitaí

Gnaísses

QUADRO 2.1 - LITOESTRATIGRAFIA DO GRUPO BAMBUÍ (Segundo DARDENNE, 1978)

O embasamento destes sedimentos é constituído por complexos de alto grau, gnáissicos e plutoníticos (tonalitos e granodioritos), de idade entre 2.500 a 2.700 m.a. (Ciclo Jequié), conforme INDA e BARBOSA (1978). As rochas do embasamento afloram na região de Januária, localizada na margem esquerda do rio São Francisco e imediatamente a sudoeste do domínio do estudo.

As rochas do Grupo Bambuí, por sua vez, são parcialmente recobertas por sedimentos inconsolidados recentes de idade cenozóica, retratando produtos da elaboração do relevo (Terciário) e depósitos aluvionares e conexos (Quaternário).

2.1.1. Grupo Bambuí

Toda a área é constituída por rochas do Grupo Bambuí que, em sua maior parte, são recobertas por sedimentos inconsolidados de idade terciária e quaternária. Os principais afloramentos das rochas do Grupo Bambuí ocorrem na porção sul da área, na região do morro Catarino ao norte, e isoladamente nos arredores do povoado de Matias Cardoso (figura 2.1).

Na área do estudo, o Grupo Bambuí pode ser dividido informalmente em duas unidades sedimentares com características litológicas diferentes:

- unidade superior constituída de arcóseos carbonáticos, siltitos e graúvacas;
- unidade inferior representada por uma alternância de calcários oolíticos, margas e siltitos.

Estas duas unidades possuem litologias semelhantes, respectivamente, aos membros Três Marias e Lagoa do Jacaré da Formação rio Paraopeba proposta por BRANCO e COSTA (1960) ou as Formações Serra da Saudade e Lagoa do Jacaré propostas por DARDENNE (1978), (ver quadro 2.1.).

Na unidade inferior, os calcários são de cor preta e cinza-escura, finos, cristalinos a microcristalinos, oolíticos e pisolíticos, com abundante calcita preta recristalizada, preenchendo fraturas, ou em nódulos e pequenas lentes concordantes a estratificação. As margas são de coloração cinza-clara, com tons esverdeados.

dos bem laminados com bancos ondulados de 5 a 20 cm de espessura. Quando estão alteradas, sua coloração passa a ocre amarelada. Os siltitos mostram cor esverdeada quando frescos e, avermelhada quando alterados. São bem laminados, exibindo abundante mica nos planos de laminação. O topo do pacote de siltitos contém laminações arenosas como as que ocorrem na serra do Jaíba. Os calcários e margas da unidade desenvolvem-se em grandes lentes dentro dos siltitos, com passagens laterais de um a outro tipo de rocha, como ocorre na serra do Sabonetal, onde seu flanco noroeste tem uma predominância franca de níveis sílticos e margosos, enquanto que, na borda sudeste, há predomínio de calcários e margas. A espessura desses sedimentos não é conhecida na área. No entanto, pode-se estimar esta espessura na ordem de 250 metros, baseando-se em um perfil no morro da Mesa, situado 30 km a oeste da área, e em outras inferências do conhecimento regional.

Na unidade superior, os arcóseos são cinza-esverdeados, de granulação fina a média, micáceos, carbonáticos e estratificados em bancos de espessura variável entre 15 cm a 1 m, bem laminados e apresentando laminações cruzadas de baixo ângulo. Ocorrem, subordinadamente, siltitos arcoseanos esverdeados com estratificação fina e grauvas verdes, com fragmentos argilosos arreixados. Estes sedimentos ocorrem ao sul da área, no topo das serras do Sabonetal e do Jaíba, sobrepondo a sequência de sedimentos inferior em contato com discordância erosiva. A sua espessura é estimada em 120 metros, baseando-se no perfil da serra do Jaíba, entre outras.

2.1.2. Sedimentos Cenozóicos

Os sedimentos cenozóicos, que cobrem rochas do Grupo Bambuí, podem ser diferenciados e empilhados, considerando-se seus constituintes principais, granulometria, coesão e origem, em:

- Aluviões recentes da calha e leito maior dos rios São Francisco e Verde Grande, no topo;
- Aluviões antigas, depositadas sobre antigos terraços aluviais dos rios São Francisco e Verde Grande;

- Sedimentos argilosos avermelhados, derivados de decomposição de calcários e margas;
- Cobertura detrítica arenosa, de origem flúvio-pedimentar, na base dos sedimentos.

Todos estes sedimentos inconsolidados que ocorrem na área são de idade terciária a recente (COSTA, 1978). O pacote mais antigo constitui uma cobertura detrítica predominantemente arenosa, sobreposta ao Grupo Bambuí. São essencialmente areias de grãos finos, bem arredondados e esféricos, e argilas, resultantes da erosão dos arenitos da Formação Urucua localizados a aproximadamente 30 km a oeste da área. Esta cobertura detrítica arenosa tem origem essencialmente flúvio-pedimentar com distribuição das areias e argilas, produtos da erosão das formações pretéritas, sobre superfícies de pedimentos por fluxo laminar. A espessura média desses sedimentos foi calculada em 15 m, baseando-se em perfis de poços tubulares e em perfis geofísicos (CETEC, 1982).

Os sedimentos argilosos avermelhados são derivados da decomposição "in situ" de calcários, margas e siltitos do Grupo Bambuí. A parte superior destes sedimentos, com 1 a 1,5 metros de espessura, contém também importante fração de areia, derivada da cobertura detrítica arenosa. Este material, proveniente da cobertura, é retrabalhado e misturado com a porção superior das argilas, formando um sedimento argilo-arenoso de cor avermelhada. Tais rochas ocorrem sobre superfícies estruturais de calcários e margas do Grupo Bambuí, em áreas marcadas por intensa carstificação. A espessura das argilas avermelhadas é da ordem de 5 metros, observando-se, entretanto, poços tubulares com registros de até 20 m de espessura dessas rochas.

As aluviões antigas constituem outra unidade sedimentar mapeável na área. São areias, argilas e cascalhos inconsolidados que ocorrem nos paleo-vales dos rios São Francisco e Verde Grande. São comuns, nestes sedimentos, zonas com abundantes concreções calcárias de até 10 cm, de cor branca. As areias são de cor branca, com grãos de quartzo foscos e granulometria fina a média. As argilas são de cores amareladas e marrom-claras. Os cascalhos são mal selecionados e geralmente são formados de material proveniente de arenito silicificado e sílex. As aluviões antigas formam

faixas de até 15 km de largura ao longo dos rios. Estas faixas encontram-se pouco dissecadas, o que dificulta a observação das estruturas sedimentares. A espessura destes sedimentos é da ordem de 12 metros.

As aluviões antigas depositam-se indistintamente sobre as rochas anteriormente mencionadas, exceto sobre a sequência superior do Grupo Bambuí, em vista de sua altitude.

Os sedimentos mais recentes da área são as aluviões inconsolidadas das calhas e leitos principais dos rios São Francisco e Verde Grande. São constituídas por bancos de até 80 cm de areias brancas e amareladas, intercalando estratos argilo-arenosos de cor marrom-escura de até 20 cm de espessura. No topo deste material, ocorre de 1,5 a 2 metros de cobertura siltica-argilosa de coloração castanha-escura, bastante contínua ao longo das barrancas do Rio São Francisco.

2.2. GEOMORFOLOGIA

A figura 2.2 mostra o esboço geomorfológico da área. O relevo da área é aplainado com altitudes médias em torno de 500 metros. Os desníveis topográficos não ultrapassam, geralmente, 50 metros acima das cotas da planície aluvial do rio São Francisco. Sobressaem-se do relevo suave apenas as serras do Sabonetal, Azul e da Jaíba, ao sul, com elevação de 840, 720 e 765 metros de altitude, respectivamente, e o morro do Catarino, ao norte, com cota máxima de 598 metros.

A carstificação produziu, em algumas zonas, um relevo típico, sendo a característica mais marcante a densidade de dolinas, algumas orientadas segundo as direções das fraturas. A profundidade desta carstificação está condicionada à cota do máximo encaixamento do rio São Francisco que constitui o nível de base atual da área. O carste se caracterizou melhor nos locais onde a cobertura coluvial foi removida.

São comuns as dolinas de fundo plano e argiloso que aparecem de forma concentrada ou em coalescência, formando "uvalas" e, em alguns casos, chegando a formar "poljé". Normalmente essas dolinas de fundo plano, argiloso, evoluíram a partir de áreas de má

- ESTRADA
- RIO OU RIACHO
- CIDADE
- POVOADO
- PLANALTO DO SÃO FRANCISCO
- PATAMARES COM VERTENTES, RAVINADAS E VALES ENCAIXADOS
- DEPRESSÃO SANFRANCISCANA
- SUPERFÍCIE DE APLAINAMENTO PLEISTOCÊNICA
- ÁREAS ELABORADAS POR PROCESSOS DE CARSTIFICAÇÃO
- TERRAÇOS
- VÁRZEA E TERRAÇOS NÃO DIFERENCIADOS

FIGURA 2.2 - ESBOÇO GEOMORFOLÓGICO

drenagem. Por conseguinte, são comuns, nesta área, vales rasos intermitentes, como também os vales que se originam nas referidas dolinas.

As linhas gerais do relevo atual conformaram-se através de "ciclo erosivo Velhas" (KING, 1956) e por processos de erosão-sedimentação do tipo pedimentar. Basicamente este relevo é constituído de duas unidades: o *planalto do São Francisco*, com altitudes entre 700 e 850 metros e a *depressão Sanfranciscana* com cotas em torno de 500 metros.

O planalto do São Francisco é caracterizado por relevos tabulares que formam diversos interflúvios da drenagem do rio São Francisco. As serras do Sabonetal e do Jaíba são testemunhos do planalto do São Francisco na área. Estas serras formam patamares com vertentes ravinadas e vales encaixados, elaborados por processos de dissecação fluvial. É possível que estes patamares tenham sido preservados da erosão devido aos arcóseos e siltitos arcoseanos que encimam a sequência sedimentar naquela área.

A depressão Sanfranciscana é uma superfície de aplainamento representada por extensas áreas rebaixadas, desenvolvidas ao longo da drenagem do rio São Francisco. Estas áreas rebaixadas tiveram três etapas de evolução (BOAVENTURA et alii, 1976). Na primeira, houve um período de dissecação fluvial com o aprofundamento da drenagem controlada por fraturas. Posteriormente, na segunda etapa, ocorreu um alargamento da depressão a partir dos vales principais por processos de pedimentação, quando então desenvolveu-se uma extensa superfície de aplainamento que truncou litologias variadas do Grupo Bambuí. Esta superfície é considerada por PENTEADO e RANZANI (1973), RENNO (1974), BOAVENTURA et alii (1976), como pleistocênica. Esta datação parece ser corroborada pela existência de jazimentos fossilíferos em algumas dolinas nas proximidades da cidade de Janaúba (situados 90 km a sudoeste da área). Estes fósseis foram encontrados na base dos depósitos inconsolidados que recobrem a superfície onde CUNHA (1978) descreveu um mamífero (*Erimotherium*) de idade seguramente Pleistocênica. Os depósitos correlativos desta superfície são sedimentos coluviais arenosos, inconsolidados, e com escassa fração argilosa e poucas cascalheiras locais. A terceira etapa da evolução está relacionada

com os últimos encaixamentos fluviais e, indiretamente, com as oscilações climáticas no decorrer do quaternário. Estes fatores re-trabalharam a superfície pleistocênica, originando amplos terraços fluviais, várzeas e áreas rebaixadas de menor expressão topográfica.

2.3. ASPECTOS DA GEOLOGIA ESTRUTURAL

A estrutura geral observada na sequência pelítica-carbonatada do Grupo Bambuí na área em estudo, é de sub-horizontalidade com mergulhos normalmente para noroeste e menores que 5 graus. Localmente, esta sequência foi afetada por suaves movimentos diferenciais de acomodação de fundo de bacia que se traduziram em algumas fraturas orientadas, provavelmente, segundo zonas de fraqueza do embasamento cristalino. Na região de Januária, diques de rochas básicas e ultrabásicas cortam o bloco alto do embasamento. Estes diques são encaixados em fraturas regionais com direção de 140 a 150 graus (PAULSEN et alii, 1974). Esta seria uma das direções de fraturamento do embasamento que é refletida nos sedimentos sobrepostos. A outra tem azimuth de 90 graus e é observada em grandes falhamentos a sudoeste da área, na margem esquerda do rio São Francisco.

As rochas do Grupo Bambuí, na área em questão, foram submetidas a esforços tectônicos oriundos da faixa de dobramento Araçuai, marginal do craton do São Francisco (ALMEIDA, 1977). Esta faixa apresenta dobramentos lineares holomórficos e grandes falhamentos inversos, num conjunto estrutural que manifesta acentuadas vergências em direção ao craton. Tais vergências resultaram num transporte tectônico em direção a área em apreço, através de esforços de compressão sobre as rochas da cobertura do craton. Estes esforços agiram segundo uma direção geral variando de aproximadamente 130 a 140 graus e provocaram rupturas nas rochas mas não chegaram a originar dobramentos importantes na área.

As principais direções de fraturamentos encontradas na área, decorrentes dos esforços de compressão, são as seguintes: fraturas longitudinais (azimutes entre 40 e 50 graus e mais raramente atingindo 60 graus), fraturas diagonais (um sistema de azi

mates entre 110-120 e 10-20 graus e outro 180-190 e 100-110 graus) e fraturas transversais (azimutes entre 130 e 140 graus). A distribuição e intensidade desses diversos tipos de fraturas variam localmente e são derivadas fundamentalmente das reações das litologias aos esforços tectônicos.

Convém salientar ainda que na serra do Gurutuba, situada imediatamente a nordeste da área, uma intrusão de diabásio corta a sequência do Grupo Bambuí até alojar-se, provavelmente em forma de "sill", com afloramento visível de 10 metros de espesura por 120 metros de extensão, na base de um pacote de arcóseos correlacionados à Formação Três Marias. Esta intrusão provocou, localmente, algumas deformações tectônicas nas rochas do Grupo Bambuí.

Não se observam efeitos metamórficos macroscópicos na área. BONHOMME (1976), através do estudo da cristalinidade das illitas de sedimentos Bambuí, para delimitar zonas de metamorfismo, concluiu que a região de Januária não apresentava termo-tectonismo sensível suficiente para caracterizar metamorfismo regional. Devido as proximidades da área com esta região e as observações efetuadas a nível macroscópico, é possível extrapolar esta conclusão.

As variações laterais de fácies entre os pelitos, calcários e margas são visíveis mas difíceis de serem cartografadas, ora pelas suas pequenas extensões, ora pelos recobrimentos cenozóicos.

3. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS

O primeiro trabalho para o conhecimento das características hidrológicas da área foi realizado em 1975 pelo consórcio LASA-SENSORA para a RURALMINAS (Fundação Rural Mineira - Colonização e Desenvolvimento Agrário). O objetivo desse trabalho foi o reconhecimento dos recursos hidrogeológicos da área de Jaíba, com vista à implantação de um projeto de colonização e ocupação de terra naquela região. Assim, foi realizado um inventário de 39 poços tubulares e foram analisadas 23 amostras de água subterrânea. Com este material e observações de campo foi construído um esboço de piezometria da área e um mapa de resíduo seco das águas subterrâneas.

Posteriormente o CETEC (1981), dentro do estudo integrado de recursos naturais já referido anteriormente, realizou mapas de recursos hídricos, na escala 1:250.000, do noroeste do Estado de Minas Gerais, onde a área está inserida.

O estudo mais completo foi realizado pelo CETEC (1982) sob o patrocínio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq. Este estudo, que foi coordenado pelo autor, visou comparar técnicas de prospecção convencionais e de sensores remotos na avaliação dos recursos hídricos da área. Inicialmente foi realizado um estudo clássico dos recursos hídricos, visando o conhecimento mais preciso possível do funcionamento do aquífero e suas relações com as águas superficiais. Em seguida, foi preparado um modelo matemático de simulação do aquífero com objetivo de verificar a coerência dos dados existentes, simular a exploração do aquífero e subsidiar dados e informações para a pesquisa com sensores remotos e com outras técnicas de prospecção. Depois, desenvolveram-se pesquisas geofísicas, com isótopos ambientais, traçadores isotópicos e químicos, hidroquímicas, estimulação de poços e outras. Finalmente, foram construídos alguns poços tubulares para comprovar as hipóteses de trabalho e os dados obtidos com as técnicas de prospecção empregadas.

As principais características hidrológicas da área são descritas a seguir.

3.1. HIDROCLIMATOLOGIA

Para a caracterização hidroclimática da área em questão, foram utilizados os dados climatológicos e pluviométricos disponíveis (figura 3.1). Os postos climatológicos existentes em Manga e Januária pertencem ao Instituto de Meteorologia-INMET, enquanto que, os oito postos pluviométricos localizados na região pertencem, também, ao Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE ou a Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco-CODEVASF.

Para os dados pluviométricos, foi efetuada a análise de consistência usando o método de curvas de dupla massa. O período básico de dados pluviométricos adotado abrange os anos de 1956 e 1976, por ser esse o mais extenso e por apresentar um número de observações simultâneas na maioria das estações. Nesse intervalo foi efetuado o preenchimento das falhas de dados existentes usando-se a técnica da correlação e regressão linear, com postos vizinhos mês a mês e selecionando-se, para preenchimento, o de correlação linear mais forte.

Nos dados meteorológicos, não foi feita a análise de consistência e nem o preenchimento dos períodos com falhas de observação, em virtude da baixa densidade da rede de postos de observação existente.

A figura 3.1 mostra os histogramas da distribuição mensal das chuvas e os mapas de precipitação, temperatura e umidade relativa médias anuais da região, no período de 1956 a 1976. No quadro 3.1 tem-se os valores mensais dos principais parâmetros hidroclimáticos observados durante este período, nas duas estações meteorológicas (Manga e Januária) localizadas nas proximidades da zona de influência da área.

Pela classificação de "Köppen" (segundo SERRA, 1955) o clima da região se enquadra no tipo BSW, que corresponde a clima quente, seco, com chuvas de verão.

A variação anual da precipitação apresenta um ciclo básico bem definido, com verão chuvoso e inverno seco (figura 3.1). Os meses de junho, julho e agosto são os mais secos e novembro,

HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO MENSAL DAS CHUVAS

- 800 — ISOIETAS MÉDIAS ANUAIS (mm)
- - - 24 - - - ISOTERMAS MÉDIAS ANUAIS (°C)
- ... 66 ... ISOHIGRAS MÉDIAS ANUAIS (%)
- POSTO CLIMATOLÓGICO
- POSTO PLUVIOMÉTRICO

NOTA:

Ilustrações elaborados com base na série de dados do período de 1956 a 1976

FIGURA 3.1 - PRECIPITAÇÃO, TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA MÉDIAS ANUAIS

E S T A Ç Õ E S	M A N G A				J A N U Á R I A			
	Latitude 140°45'S Altitude 415m Longitude 43°56'W				Latitude 15°29'S Altitude 434m Longitude 44°22'W			
M E S E S	Temp. média	Prec. pluv.	Evap. pot.	Bal. hídr.	Temp. média	Prec. pluv.	Evap. pot.	Bal. hídr.
	°C	mm	mm	mm	°C	mm	mm	mm
Janeiro	24.5	139	124	+ 15	28.1	154	127	+ 27
Fevereiro	24.6	106	110	0	25.4	104	118	- 1
Março	24.7	106	118	0	25.3	94	123	- 6
Abril	23.8	51	98	- 16	24.9	45	112	- 35
Maio	22.6	8	83	- 47	23.3	13	91	- 60
Junho	22.2	0	77	- 64	22.2	1	73	- 65
Julho	21.8	0	73	- 67	22.0	1	76	- 71
Agosto	22.8	3	88	- 80	23.5	1	96	- 95
Setembro	24.9	19	116	- 96	25.5	15	120	-105
Outubro	26.8	59	148	- 89	26.4	61	144	- 84
Novembro	25.4	174	134	0	25.4	161	128	0
Dezembro	24.0	206	121	+ 25	24.8	196	125	8
Ano	24.0	871	1290	+ 40 -459	24.5	846	1333	+ 35 -522

QUADRO 3.1 - MÉDIAS MENSAIS DE TEMPERATURA DO AR, PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA, EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E BALANÇO HÍDRICO EM JANUÁRIA E MANGA.

dezembro e janeiro, os mais chuvosos. A precipitação, normalmente, inicia-se no mês de setembro, atinge o máximo em dezembro e praticamente termina no mês de maio. O coeficiente de variação anual de precipitação chega a atingir 30% a 40%, acarretando sérias restrições às práticas agrícolas convencionais e sujeitando a região a períodos de estiagem prolongadas.

A pluviometria média anual, observada no período de 1956 a 1976, foi de 800 mm. A distribuição média trimestral das chuvas na área, neste período, foi a seguinte:

<u>Trimestre</u>	<u>Precipitação (mm)</u>	<u>%</u>
Janeiro - Março	350	43,75
Abril - Junho	40	5,00
Julho - Setembro	10	1,25
Outubro - Dezembro	400	50,00

A temperatura média anual no período de 1956 a 1976 foi de 23°C no leste da área e 24°C no oeste (figura 3.1). A época mais quente do ano ocorre nos meses de outubro a novembro, com valores de temperatura média mensal variando entre 24°C e 26°C. Os meses mais frios são junho e julho, com temperatura entre 21°C e 22°C. Nos meses mais quentes do ano a média das temperaturas máximas atinge valores entre 34°C e 38°C. Os valores médios anuais das mínimas médias são da ordem de 17°C.

A umidade relativa é caracterizada por uma grande variação durante o ano. Os valores mensais são relativamente altos durante o verão, da ordem de 75% a 80% e, no inverno, diminuem sensivelmente, atingindo índices de 50 a 60%. A média anual, para a série de dados disponíveis, é de 68% como pode ser observado na figura 3.1. Essa diminuição do teor de umidade do ar durante o inverno não pode ser explicada somente como resultado da queda de temperatura do ar. Segundo AUDAZ (1971), deve existir algum mecanismo dinâmico, atuando na região, que provoca, durante o inverno, a descida de ar seco de altos níveis atmosféricos.

Os valores anuais de evapotranspiração potencial, calculados segundo método de THORNTHWAITE (1958), normalmente são altos, da ordem de 1.333 mm em Januária. A evapotranspiração potencial apresenta um ciclo básico anual com intensidade máxima duran

te o verão e mínima durante o inverno.

A área apresenta deficiência hídrica durante a maior parte do ano, principalmente no inverno, graças à grande quantidade de horas com radiação solar à superfície, conforme mostra a figura 3.2. No posto de Januária a média anual de horas de sol é de 2.856 h/ano, para o período de observação entre 1956 e 1976.

Os valores dos balanços hídricos são encontrados no quadro 3.1. Os excedentes de água foram calculados pelo método de THORNTHWAITE e MATHER (1955) para uma retenção no solo de 100 mm. Verifica-se que há um excedente de água de 40 mm/ano em Manga e 35 mm/ano em Januária (período de 1956 a 1976).

Esse excedente se distribui entre infiltração profunda e escoamento superficial. Como a área é cárstica e com pouca drenagem superficial pode-se esperar que o excedente é quase todo infiltrado. Em zonas de solos com elevada retenção, a infiltração só se produz em anos muito chuvosos.

3.2. HIDROLOGIA DE SUPERFÍCIE

A área é drenada pelo *rio São Francisco*, que atravessa sua porção noroeste, e pelo *rio Verde Grande*. Este tem um curso predominantemente na direção sul-norte até receber, pela margem direita, as contribuições do seu afluente Verde Pequeno. A partir deste ponto, corre para oeste, servindo de divisor entre os Estados de Minas Gerais e Bahia, até desembocar no rio São Francisco.

Além do Verde Pequeno, o afluente de maior importância do rio Verde Grande é o rio Gurutuba, que corre na sua margem direita.

Os demais cursos d'água da área são secos na maior parte do ano e só tem água nas grandes enxurradas. O riacho Serraria, localizado no canto sudoeste da área, tem o curso perene nas suas cabeceiras e depois se infiltra nos calcários, tornando-se intermitente.

Dentro da área existe apenas uma estação fluviométrica no rio São Francisco que está situada na cidade de Manga e é operada pelo DNAEE e CODEVASF desde 1932. No rio Verde Grande exis

FIGURA 3.2 - BALANÇO HÍDRICO NOS POSTOS METEOROLÓGICOS DE JANUÁRIA E MANGA

te uma estação fluviométrica na localidade de Boca da Caatinga, situada a jusante da confluência do rio Verde Pequeno (figura 3.2), operada também pelo DNAEE e CODEVASF desde 1957, e outra, mais recente, da CODEVASF, em Colônia do Jaíba que opera a partir de 1962. Entre os meses de abril de 1978 e março de 1979, a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC efetuou medidas mensais de vazão do rio Verde Grande em 5 pontos localizados entre a Colônia do Jaíba e a embocadura do rio (figura 3.2).

O rio São Francisco ocupa um leito com largura de 800 a mais de 1000 metros e profundidade máxima da ordem de 15 metros. A cota da superfície média das suas águas é de 440 metros e o seu terraço aluvial chega à largura de 10 km e cota de até, aproximadamente, 445 metros.

Os dados característicos do rio São Francisco no posto fluviométrico de Manga, referentes ao período de 1932 a 1976, são os seguintes:

Vazão média (Q)	=	1.840 m ³ /s
Vazão mínima (Q ₉₀)	=	225 m ³ /s
Vazão máxima (Q ₁₀)	=	10.500 m ³ /s
Máxima elevação de nível	=	10 metros

Os valores de Q₉₀ e Q₁₀ foram calculados para tempo de recorrência de 50 anos.

A vazão mínima do rio São Francisco é muito maior que a contribuição subterrânea da área de estudo e, por isso, seu comportamento não é influenciado pela restituição do aquífero. Assim, ele constitui um limite de drenagem imposto ao aquífero da área.

As águas do rio Verde Grande correm num vale pouco profundo de no máximo 3 metros, com largura entre 200 e 400 metros, onde existem meandros bem marcados com lagoas abandonadas.

Os dados fluviométricos característicos do rio Verde Grande, nas estações fluviométricas da Colônia do Jaíba (período de 1962 a 1976) e Boca da Caatinga (período de 1957 a 1976), encontram-se no quadro 3.2.

ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	VAZÃO (m^3/s)			VAZÃO ESPECÍFICA ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)		
	Média	Máxima*	Mínima*	Média	Máxima	Mínima
Colônia do Jaíba	14	145	0,01	$1 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$0,04 \cdot 10^3$
Boca da Caatinga	28	295	0,50	$3 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$0,10 \cdot 10^3$

* Para tempo de recorrência de 50 anos.

QUADRO 3.2 - DADOS FLUVIOMÉTRICOS CARACTERÍSTICOS DO RIO VERDE GRANDE

Na figura 3.3 estão os gráficos da duração mensal de des cargas médias mensais do rio Verde Grande, construídos com os da dos das estações de Colônia da Jaíba e Boca da Caatinga.

Observa-se, nesta figura, que as vazões do rio Verde Gran de aumentam a partir do mês de novembro até atingir o máximo nos meses de fevereiro e março e daí diminuindo até o mês de outubro.

A interpretação dos dados fluviométricos do trecho do rio Verde Grande, compreendido entre o povoado de Barreiro do Jai ba (situado a 40 km a montante de Colônia do Jaíba) e a sua foz, permite tirar as seguintes conclusões (CETEC, 1982):

- Existe uma descarga subterrânea ao rio Verde Grande de $0,5$ a $1,0 \text{ m}^3/\text{s}$, entre Barreiro do Jaíba e Colônia do Jai ba, que representa um incremento da ordem de 10% na va zão do rio ou de até 20% na época de estiagem.
- Entre a Colônia do Jaíba e o povoado de Gado Bravo, pra ticamente não existe restituição de água do aquífero para o rio. Talvez ocorra uma pequena infiltração da água do rio para o aquífero da ordem de 20% da sua va zão.
- Entre Gado Bravo e a embocadura do rio Verde Grande, pa rece não haver troca importante entre o rio e o aquífe ro. Pode haver uma pequena perda por evaporação.
- A drenagem subterrânea deve ser preferencial para o rio São Francisco uma vez que, considerando a superfí cie de drenagem entre Colônia do Jaíba e Gado Bravo e

ESTAÇÃO EM COLÔNIA DO JAÍBA
(PERÍODO DE 1962 A 1976)

ESTAÇÃO EM BOCA DA CAATINGA
(PERÍODO DE 1957 A 1976)

FONTE : CETEC, 1981

FIGURA 3.3 - DESCARGAS MÉDIAS MENSAIS E ANUAIS DO RIO VERDE GRANDE

a recarga pluvial, a restituição do aquífero ali deve ria ser de ordem de 2 a 3 m³/s. Este acréscimo de água não aparece nas medidas fluviométricas.

- Na bacia do rio Verde Grande, entre Colônia do Jaíba e Barreiro do Jaíba, com uma área vertente de 1.350 km², o aporte subterrâneo de 0,5 a 1,0 m³/s equivale a uma infiltração profunda entre 10 e 20 mm/ano da pluviometria, ou seja, uma lâmina de água equivalente de 5 mm e uma porosidade média de $1,6 \cdot 10^{-4}$, em 30 metros de es pessura do aquífero.

As variações das vazões do rio Verde Grande, entre Barreiro do Jaíba e a sua embocadura, sugerem que o aquífero da área tem uma porosidade média muito pequena ou que a maior parte da água infiltrada fica na zona alterada da rocha e depois é evapora da. Por outro lado, mostram que há uma tendência de perda de água do rio para o aquífero no trecho imediatamente a jusante da Colô nia do Jaíba, indicando uma drenagem subterrânea preferencial pa ra o rio São Francisco.

3.3. HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA

O aquífero da área em estudo é cárstico, livre, hetero- gêneo, anisotrópico e de espessura variável. É limitado, a oeste, pelo rio São Francisco que constitui um nível de base regional, ao sul, pela serra do Sabonetal que corresponde a um divisor de águas permanente e, ao norte, pelo rio Verde Grande. O limite leste do aquífero encontra-se fora da área e, provavelmente, coincide com o leito do rio Gurutuba.

Os sistemas hidráulicos subterrâneos dos aquíferos cársticos apresentam características peculiares em vista da origem e evolução secundária dos vazios nas rochas carbonáticas. Estes va zios estão relacionados ao fraturamento, diáclases, dissolução da rocha e outros, e são eles que propiciam a infiltração, circula ção, armazenamento e descarga da água subterrânea.

A variação espacial dos parâmetros hidrogeológicos dos aquíferos cársticos (transmissividade, coeficiente de armazenamen to, permeabilidade, etc.) é grande e está influenciada por fatores

locais (dissolução, densidade de fraturamento, etc.). Em alguns casos esses fatores locais podem ter peso significativo na definição do valor de determinado parâmetro.

Em continuação, apresentam-se os aspectos mais significativos do carste da área e suas relações com a ocorrência e a circulação das águas subterrâneas, na tentativa de estabelecer as linhas gerais de um modelo físico-hidrogeológico do aquífero.

3.3.1. Piezometria

São disponíveis dados das oscilações piezométricas de outubro de 1977 a agosto de 1981. Desde o início das observações até maio de 1979, os níveis piezométricos foram medidos mensalmente em 104 pontos d'água (poços tubulares, cacimbas e fontes) localizados em diferentes pontos na área. Após esta data este número de pontos de observação periódica foi reduzido para 25.

Em vista de que o carste da área é constituído de um aquífero livre, as suas superfícies piezométricas foram construídas a partir de dados mensais de níveis piezométricos medidos nos pontos de observação periódica.

A superfície piezométrica da área, na época de estiagem, apresenta aproximadamente a mesma forma de superfície piezométrica na época chuvosa, diminuindo apenas seus gradientes piezométricos na serra do Sabonetal e no morro Catarino.

A superfície piezométrica da área na época chuvosa, em janeiro e fevereiro 1978, encontra-se na figura 3.4. Esta figura mostra uma elevação, ao norte, localizada na zona do morro Catarino, com gradiente piezométrico da ordem de 2 a 4 m/km, e outra, ao sul, na serra do Sabonetal, com gradiente piezométrico entre 3 a 5 m/km em direção ao leste e de aproximadamente 2 m/km para o norte. A partir do alto piezométrico da serra do Sabonetal, o gradiente diminui para 4 m/km, ou menos ainda, em direção aos rios Verde Grande e São Francisco e à planície central da área.

É difícil definir, com precisão, a situação na planície central e na margem direita do rio Verde Grande porque existem poucos pontos piezométricos. Os dados disponíveis mostram apenas que na planície central não existe um divisor de água subterrânea em

FIGURA 3.4 - PIEZOMETRIA DO FINAL DE PERÍODO CHUVOSO
(JAN-FEV., 1978)

tre os rios São Francisco e Verde Grande. Ali a superfície piezométrica ascende, com pequeno gradiente, desde o rio São Francisco até o rio Verde Grande, com faixas deprimidas em direção à Colônia da Jaíba e a montante da embocadura do rio Gurutuba (figura 3.4). Estas faixas de depressão piezométricas indicam zonas de maior transmissividade devido, provavelmente, a um maior desenvolvimento cárstico. Inclusive parece coincidir com áreas de maior densidade de dolinas. O gradiente piezométrico na planície central é menor que 0,5 m/km.

Analisando a relação rio Verde Grande-aquífero através da superfície piezométrica da figura 3.4, observa-se o seguinte: a) no trecho a montante da Colônia do Jaíba, o rio é efluente, drenando a água subterrânea do aquífero; b) da Colônia do Jaíba até aproximadamente 10 km a jusante, o rio provavelmente perde água para o aquífero ou está em equilíbrio; c) entre o trecho a jusante da Colônia do Jaíba até aproximadamente mais 15 km rio abaixo, o Verde Grande é fracamente efluente, podendo receber pouca restituição do aquífero, principalmente da sua margem direita; d) no trecho entre 25 km a jusante da Colônia do Jaíba até aproximadamente a confluência do rio Gurutuba, o Verde Grande perde água para o aquífero; e) da confluência com o rio Gurutuba até a sua embocadura, o rio Verde Grande é efluente e ao que tudo indica (pela variação da vazão do rio neste trecho e o gradiente piezométrico do aquífero) recebe apenas pequena quantidade de água do aquífero, principalmente no trecho a jusante do povoado de Gado Bravo.

Na figura 3.5 representam-se as oscilações entre as épocas chuvosa e seca. Observa-se, nesta figura, que as maiores variações de nível d'água no aquífero ocorrem na zona a leste do morro Catarino. Naquela zona, a variação medida em um poço foi de até 32 metros entre a época chuvosa, quando o poço chega a ser jorrante, e a época seca. Outro ponto de grande oscilação é localizado a noroeste da Colônia do Jaíba onde a variação piezométrica é superior a 10 metros. Isto sugere uma elevada permeabilidade vertical e, que as águas ali infiltradas, logo são restituídas ao rio Verde Grande ou são transferidas para a porção central da área.

A análise dos hidrogramas dos poços, onde foram observadas as oscilações piezométricas da área, permite destacar algumas

LEGENDA

— ESTRADA	INFLUÊNCIA DO RIO, RESPOSTA DOS NÍVEIS DEFASADA DA CHUVA
RIO OU RIACHO	ACUMULA ÁGUA, RESPOSTA DEFASADA
● CIDADE	RÁPIDA RECARGA E DESCARGA, NÃO ACUMULA ÁGUA
● POVOADO	BAIXA ACUMULAÇÃO, DESCARGA RÁPIDA
○ MA-400 POÇO E SEU NÚMERO	ACUMULA ÁGUA, RESPOSTA DEFASADA E SUAVE
— 5 ISOLINHA DE VARIAÇÃO DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO (m)	

FIGURA 3.5 - VARIAÇÃO PIEZOMÉTRICA ENTRE AS ÉPOCAS SECA E CHUVOSA EM 1978

zonas no aquífero onde a variação dos níveis de água subterrânea apresentam características semelhantes, conforme mostra a figura 3.5. Os limites aproximados destas zonas foram traçados considerando-se: o comportamento dos hidrogramas dos poços situados em cada zona em função dos períodos secos e chuvosos; de sua resposta às chuvas; do defasamento da oscilação do nível com o tempo e da relação entre a quantidade de chuva e a variação de nível.

Na figura 3.6 encontram-se os hidrogramas de níveis d'água típicos de cada uma destas zonas. As principais características destas zonas são as seguintes:

- a) Zona do morro Catarino: Marcada por uma pequena e rápida recarga e também por uma rápida descarga da água infiltrada. Uma chuva não muito intensa é suficiente para fazer subir os níveis dos poços até a superfície do terreno, refletindo assim uma grande permeabilidade vertical. É uma zona em que não há a acumulação de água subterrânea porque toda água infiltrada é transferida para as zonas adjacentes ou restituídas ao rio Verde Grande.
- b) Zona plana ao norte do morro Catarino: Tem possibilidades de acumular água em anos chuvosos. A restituição desta zona é típica de um aquífero com reserva de água subterrânea onde o rebaixamento dos níveis ocorre defasado do final das chuvas.
- c) Faixa na margem do rio São Francisco: É influenciada pela variação do nível do rio. A resposta do hidrograma às infiltrações é atrasada em relação às chuvas, suave e maior nos anos com muita pluviosidade.
- d) Zona da Colônia do Jaíba: É muito heterogênea e com algumas faixas de elevada permeabilidade. A resposta dos níveis às chuvas é defasada no tempo, suave e maior nos anos úmidos, sugerindo elevada capacidade de acumulação de água subterrânea e grande aptidão para infiltração de águas pluviais.
- e) Zona da serra do Sabonetal: Na parte alta a recarga é pequena e rápida. A descarga também é rápida. Esta zona estende-se ao norte da Colônia do Jaíba passando pela serra Azul. A acumulação de águas é pequena nos arredores da serra aumentando para leste e para o norte.

FIGURA 3.6 - HIDROGRAMAS DE POÇOS LOCALIZADOS EM DIVERSOS PONTOS DO AQUIFERO

Na porção central da área em estudo, existem poucos pontos de observação das oscilações piezométricas e, com os dados disponíveis, não é possível tirar conclusões seguras. Adianta-se que o hidrograma do poço de observação, localizado na parte leste desta zona, indica que ela tem grande capacidade de armazenamento de água subterrânea.

3.3.2. Características Dimensionais do Aquífero

As espessuras do aquífero foram estudadas através dos dados de profundidades das entradas de água em 42 poços tubulares, distribuídos na área. Estes dados foram obtidos através de perfilagens dos poços, utilizando-se o traçador radioativo Br-82 , (BEDMAR et alii, 1980) e o traçador químico NaCl (SILVA e ESCODINO, 1980). Estas entradas de água nos poços podem ser de correntes de fendas ou canais de dissolução da rocha. Assim, em alguns casos, as entradas de água mais profundas coincidem com a profundidade máxima de carstificação do aquífero e, em outros, coincidem com o final da zona saturada.

A superfície da base da zona de carstificação e de fraturamento, que corresponde à profundidade máxima de circulação da água subterrânea, é mostrada no mapa de isolinhas da figura 3.7. Este mapa mostra as altitudes das entradas de água mais profundas obtidas nas perfilagens dos poços. Observa-se, na referida figura, uma grande elevação na zona da serra do Sabonetal e no alto vale do riacho Serraria, que atinge cotas superiores a 530 metros, e diminui em direção à Colônia do Jaíba e ao vale do riacho Serraria. Esta elevação acompanha perfeitamente o alto topográfico daquela parte da área. Nota-se, também, que as menores altitudes da zona de circulação da água subterrânea encontram-se na porção central da área e no vale do riacho Tapera. Ali, os valores são da ordem de 300 metros de altitude, isto é, mais de 158 metros abaixo da zona da serra do Sabonetal. A zona do morro Catarino limita, ao norte, esta depressão com as fendas em altitudes por volta de 450 metros.

O mapa de espessura da zona fraturada ou carstificada do aquífero encontra-se na figura 3.8. Observa-se na referida fi

FIGURA 3.7 - MAPA DA SUPERFÍCIE DA BASE DA ZONA FRATURADA

FIGURA 3.8 - MAPA DE ESPESSURA DA ZONA FRATURADA

gura que as maiores espessuras, que atingem mais de 100 metros, encontram-se na porção central da área e as menores, que são da ordem de 30 metros, estão nas margens do rio São Francisco.

A espessura média calculada desta zona do aquífero é de 55 metros. É interessante notar, também, as pequenas espessuras no alto da serra do Sabonetal e no baixo vale do córrego Escuro. Isto indica que a circulação de água subterrânea é rasa naquela parte da área. Por outro lado, as maiores espessuras ocorrem na zona onde a carstificação e fraturamento são mais profundos.

3.3.3. Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero

Todos os valores dos parâmetros do aquífero foram obtidos de ensaios de bombeamento com ar comprimido em 60 poços existentes na área. Somente em dois ensaios foi possível dispor de piezômetro de observação. Nos outros casos, as observações de rebaixamento e recuperação dos níveis d'água foram feitos no próprio poço bombeado.

Os valores obtidos devem ser utilizados com restrições porque podem estar com incorreções devido, principalmente, à técnica utilizada no campo, aos métodos interpretativos dos resultados e às peculiaridades do aquífero cárstico. No primeiro caso, o bombeamento com equipamento de ar comprimido, muitas vezes, não permite, por exemplo, manter uma vazão constante durante todo o ensaio o que acarretará uma oscilação do nível d'água do poço. Por outro lado, as fórmulas propostas por THEIS (1935) e JACOB (1940), aplicadas na interpretação dos resultados do ensaio, podem dar erros uma vez que, no carste, o fluxo subterrâneo não é homogêneo nem radial, na maioria dos casos. Além disto, os rebaixamentos no próprio poço são influenciados pela possível presença de várias fendas de diferentes permeabilidades (ENSLIN e BREDEKAMP, 1963). Em certos casos, algumas dessas fendas podem ficar suspensas, o que acelera o rebaixamento, ou ainda, perdas de cargas nessas fendas podem diminuir as vazões de bombeamento, o que afetará a forma da curva de rebaixamento por tempo utilizada na interpretação dos resultados (SCHOELLER, 1965). No caso de observação em piezômetro, os problemas de conexão das fendas, por exemplo, podem aumentar o va

lor aparente da transmissividade e diminuir o do coeficiente de armazenamento (RASMUSSEN, 1963).

Desta maneira, os parâmetros do aquífero, calculados a partir de ensaios de bombeamento, servem para fixar uma ordem de grandeza, tanto para a sua utilização em escala local como, principalmente, em escala regional. Não obstante, como existe um grande número de dados de transmissividade, vazão de poços e capacidade específica é possível analisar as características médias e o grau de heterogeneidade do aquífero por meio estatístico.

a) Transmissividade

Os 38 valores das transmissividades (T) determinadas variam entre $1.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e $803.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. A média desses valores é de $104.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ com um desvio padrão de $176.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. A mediana é de $15.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ para uma assimetria de $2.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Estes resultados mostram que a distribuição dos dados é assimétrica e não é normal e que a maior ocorrência são de valores menores que a média. Por outro lado, 55% das transmissividades são menores que $10.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e 89% não atingem $80.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Considerando os resultados acima de $300.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, a média é $539.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e, para valores abaixo de $300.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, a média é de $47.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

De maneira geral pode-se afirmar que, nas zonas com transmissividades mais baixas, os valores de "T" são da ordem de 5.10^{-5} a $10.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ e, nas zonas com transmissividades mais elevadas, pode-se atingir $500.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Os valores médios encontram-se entre 30.10^{-5} e $50.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. As transmissividades maiores de $500.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ são anomalias que dependem de condições locais excepcionais.

Estes valores refletem a heterogeneidade do aquífero e sugerem que, em algumas zonas com carstificação bem desenvolvida, existem elevadas transmissividades.

Na figura 3.9 está representada a regressão linear entre "log q" (logaritmo da capacidade específica) e "log T" (logaritmo da transmissividade) para 27 poços que possuíam estes dois dados. Em sua maioria, estes poços encontram-se ao sul da

FIGURA 3.9 - RELAÇÃO ENTRE TRANSMISSIVIDADE E CAPACIDADE ESPECÍFICA DOS POÇOS

área, nos arredores da serra do Sabonetal e da Colônia do Jaíba. O coeficiente de correlação linear entre essas variáveis é de 0,69 e a equação da reta de regressão é:

$$\log T = 0,88 \log q + 1,78$$

Convém salientar que a dispersão dos pontos da figura 3.9 está influenciada principalmente pelos valores de "q", que são bastante dependentes de circunstâncias locais (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976 e REBOUÇAS, 1976). No entanto, esta equação pode ser aplicada para o cálculo de "T" naqueles poços onde se dispõe apenas de capacidade específica, principalmente no sul da área.

Na figura 3.10 encontra-se o mapa de *isolínhas de transmissividade* confeccionado a partir dos dados obtidos nos ensaios de bombeamento. Observa-se, neste mapa, uma faixa de direção sul-norte de elevada transmissividade cortando o vale do córrego Escuro a sudoeste da Colônia do Jaíba. Esta zona apresenta as maiores transmissividades da área em apreço. No vale do riacho Serraria, aparece uma faixa de alta transmissividade, principalmente ao sul da serra Azul.

Destaca-se, ainda, que as transmissividades aumentam a partir das cabeceiras do riacho Serraria em direção ao rio São Francisco e para a Colônia do Jaíba, sugerindo que o fraturamento ou carstificação aumentam nesta direção. Encontram-se, também, pontos isolados com elevada transmissividade, no riacho Tapera, em Manga e na parte centro-leste da área.

b) Armazenamento do aquífero na área

Foram obtidos os valores do coeficiente de armazenamento (S) em apenas dois poços onde existiam piezômetros de observação. Estes poços localizam-se 4 km a oeste e 9 km a noroeste da Colônia do Jaíba e apresentaram coeficiente de armazenamento de $2,0 \cdot 10^{-2}$ e $0,9 \cdot 10^{-5}$, respectivamente.

Para obter maiores informações sobre o coeficiente de armazenamento da área, CUSTÓDIO et alii (1981), calcularam a difusividade hidráulica do aquífero (T/S) a partir dos hidrogramas de níveis dos poços, aproveitando a curva de esgotamento no período chuvoso de 1978.

FIGURA 3.10 - ISOLINHAS DE TRANSMISSIVIDADE

Com estes valores de difusividades hidráulicas e com os das transmissividades, foram estimadas as ordens de grandeza dos coeficientes de armazenamento para diferentes zonas do aquífero. Os resultados encontram-se no quadro 3.3. Estes valores são de pouca precisão e devem ser utilizados com grande precaução. Os coeficientes de armazenamento são válidos apenas para pequenos rebaixamentos, uma vez que a transmissividade em calcários diminui muito com o rebaixamento.

ZONA DO AQUIFERO	DIFUSIVIDADE HIDRÁULICA (T/S) . 10^{-2} (m ² /s)	COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO (S)
- Zona alta do Morro Catarino	50 - 400 (150) *	0,001 - 0,030
- Zona ao norte do Morro Catarino	400 - 700 (470)	0,010 - 0,020
- Zona alta da serra do Sabonetal	15 - 040 (25)	0,002 - 0,005
- Zona próxima à Colônia do Jaíba	40 - 400 (350)	0,010 - 0,050
- Zona afastada da Colônia do Jaíba	40 - 100 (80)	0,002 - 0,004
- Margem do rio São Francisco	10	0,020 - 0,060

* Valor mais frequente.

QUADRO 3.3 - VALORES DE DIFUSIVIDADES HIDRÁULICAS E COEFICIENTES DE ARMAZENAMENTO

c) Capacidade específica

A capacidade específica (q) é um parâmetro importante porque é função das características do aquífero, principalmente da transmissividade, do coeficiente de armazenamento e, também, das características do poço.

A partir das capacidades específicas dos poços, em muitos casos, especialmente ao nível de estudos de reconhecimento,

podem-se estimar algumas propriedades hidráulicas dos aquíferos. Todavia, as capacidades específicas são afetadas por fenômenos de perdas de cargas, condições limites, raio do poço, penetração do poço no aquífero, equipamento de bombeamento, tempo de bombeamento, e outros, que influem ou mascaram os valores obtidos. Assim, por exemplo, os coeficientes de transmissividades obtidos a partir das capacidades específicas dos poços representam apenas uma ordem de grandeza com valores pessimistas (RASMUSSEN, 1963; CASTANY, 1971 e CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976).

Os valores dos coeficientes de armazenamento obtidos a partir das capacidades específicas, por sua vez, são de pouca precisão. Isto ocorre porque a capacidade específica varia com o logaritmo de $1/S$. Segundo WALTON (1970), no entanto, para grandes tempos de bombeamento (maiores de 180 dias) a capacidade específica se aproxima do coeficiente de armazenamento.

Os valores das capacidades específicas dos 77 poços que dispunham desse dado variam entre $0,006.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ e $18.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$. A média é de $1,5.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ e a mediana de $0,34.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$. Assim, a população de dados das capacidades específicas formam uma distribuição assimétrica, com maior ocorrência de valores menores que a média. A moda dessa distribuição é de $0,02.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$. As capacidades específicas de 78% dos poços são menores que a média, sendo que 70% dos poços tem capacidades específicas menores que $0,84.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$ e apenas 7% tem capacidades específicas maiores que $5.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

A grande variação das capacidades específicas na área ratifica o elevado grau de anisotropia do aquífero com algumas zonas permeáveis, onde os poços tem alta produtividade, e outras pouco produtoras. Isto é típico de aquíferos cársticos.

Na figura 3.11 tem-se a regressão linear entre a capacidade específica (q) e a profundidade do poço (P). Estas variáveis apresentam baixa correlação linear (0,22). A equação da reta de regressão é:

$$q = 2,00 - 0,012 P$$

Verifica-se, com esta correlação, que as capacidades específicas variam dentro de uma larga faixa, o que indica um bai

xo grau de certeza na previsão de vazão de poço na área. Por outro lado, há uma tendência de redução da capacidade específica com a profundidade. Além disso, pode-se observar na figura 3.11 que os altos valores de capacidade específica concentram-se numa faixa compreendida, aproximadamente, entre 40 e 90 metros de profundidade do poço.

Na figura 3.12 encontra-se o mapa de *isolinhas de capacidade específica* do aquífero. Observa-se uma faixa de capacidades específicas elevadas a sudoeste da Colônia do Jaíba. Esta faixa ocorre aproximadamente na mesma faixa de elevada transmissividade da figura 3.10. Existe também um aumento das capacidades específicas a partir das cabeceiras do riacho Serraria em direção ao seu baixo curso e para a Colônia do Jaíba.

Ao norte da área, destaca-se apenas uma pequena zona restrita ao sul do morro Catarino. Por outro lado, na porção central da área as isolinhas são, aproximadamente, segundo a direção leste-oeste, talvez, refletindo alguma faixa de circulação preferencial ao longo desta direção.

d) Razão da capacidade específica pela espessura do aquífero

Para homogeneizar os dados da capacidade específica, diminuindo os efeitos de perdas de carga no poço, tempo de bombeamento, etc., é preferível utilizar o valor da capacidade específica dividido pela penetração útil do aquífero (WALTON, 1963 e CSALLANY, 1965).

A capacidade específica dividida pela penetração útil, (espessura saturada atravessada pelo poço), reflete o efeito da penetração parcial do poço no aquífero. Este parâmetro é da mesma ordem de grandeza da permeabilidade (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976). A espessura saturada, aqui considerada, foi o comprimento entre o nível estático e a entrada de água mais profunda captada pelo poço.

O valor médio da capacidade específica por penetração útil no aquífero, de 59 poços com estes parâmetros, é de $87.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m/m}$ e a mediana é de $19.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m/m}$. Isto mostra uma grande assimetria com desvio para os valores mais baixos. O desvio padrão é de $168.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m/m}$ e o valor de assimetria é de 4. A curtose de

FIGURA 3.12 - ISOLINHAS DE CAPACIDADE ESPECÍFICA

20 reflete uma população com pouca dispersão na parte central e muito espalhamento nas caudas das curvas de distribuição. Isto indica que os valores menores de capacidade específica por metro de penetração concentram-se numa faixa restrita (78% são menores que $100.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}/\text{m}$ e 3% são maiores que $500.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}/\text{m}$).

Na figura 3.13 tem-se o mapa de *isolínhas das capacidades específicas por espessuras saturadas do aquífero*. Comparando-se este mapa com aquele de capacidade específica (figura 3.12) verifica-se que, em ambos, existe um aumento de produtividade dos poços a partir das cabeceiras do riacho Serraria em direção ao rio São Francisco e a Colônia do Jaíba. Isto ratifica que há um aumento de carstificação ou fraturamento segundo esta direção.

A zona de elevado valor no vale do córrego Escuro, mostrada na figura 3.13, fica restrita a uma pequena faixa a oeste de Colônia do Jaíba, indicando que a espessura do aquífero neste córrego é pequena. Por outro lado, esta figura ressalta ainda uma zona na porção central da área que reflete uma possível faixa de fluxo preferencial de direção leste-oeste.

A variação espacial, as anomalias e as tendências de ocorrência, na área, de todos esses parâmetros hidrodinâmicos do aquífero serão analisados no item 5.

3.3.4. Avaliação das reservas de águas subterrâneas

A avaliação quantitativa das reservas, conquanto a nível preliminar, é de fundamental importância para o planejamento da exploração dos aquíferos.

Consideram-se as reservas dos aquíferos sob três aspectos principais:

- Reserva reguladora : é o volume de água da zona de flutuação, anual ou sazonal, do nível de saturação. Corresponde ao volume de realimentação anual ou estacional.
- Reserva permanente : corresponde ao volume de água da parte do aquífero saturado abaixo da zona de flutuação anual ou estacional.

FIGURA 3.13 - ISOLINHAS DA RAZÃO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA E ESPESSURA SATURADA

- Recursos exploráveis: são os volumes de água que podem ser economicamente utilizados sem provocar exaustão ou degradação do aquífero. Estes recursos podem variar no espaço e no tempo, em função das condições hidrogeológicas, do efeito das explorações sobre o regime de fluxo nos aquíferos, da disposição e concepção das obras de captação e dos equipamentos de exploração, dentre outros fatores.

Dentro destes conceitos, pode-se afirmar que as reservas permanentes dão uma idéia da grandeza de volume da água armazenada no aquífero, enquanto as reservas reguladoras indicam as más condições de recarga. Por sua vez, os recursos exploráveis dependem de outros fatores além das condições hidrogeológicas naturais.

a) Reserva permanente

A reserva permanente da área, para a época de estiagem, é da ordem de $6,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, considerando um coeficiente de armazenamento de $2 \cdot 10^{-2}$ e uma camada superficial de 55 metros, que é a espessura saturada média na zona fraturada do aquífero. A espessura da lâmina d'água equivalente para a área em apreço é de 1,1 metro.

O volume de água de saturação do aquífero é avaliado tendo-se por base os seus parâmetros dimensionais e o coeficiente de armazenamento.

b) Reserva reguladora

A quantidade de água subterrânea que flui através de um aquífero depende de sua geometria, das suas características hidráulicas e das condições de recarga e descarga. Como o aquífero da área é livre, a recarga provém da infiltração das águas pluviais e a descarga é realizada para os rios, principalmente o São Francisco.

A recarga do aquífero na área em estudo é difícil de ser avaliada, tendo em vista as dificuldades de uma estimativa confiável, a partir do conhecimento das saídas ou descargas aos rios, ou ainda, através de cálculos de piezometria e transmissividade. Uma melhor avaliação poderia ser feita com base no ba

lanço de cloretos das águas da área com diferentes coeficientes de infiltração, conforme mostra o quadro 3.4. Esta avaliação abriga incerteza, especialmente devido ao pequeno número de determinações de cloretos das águas de chuvas usadas nos cálculos.

Por outro lado, a restituição anual do aquífero, calculada a partir de um modelo matemático de simulação da área (CRUZ e SILVA, 1980), é da ordem de $14,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, para o rio São Francisco, o que equivale a uma vazão contínua de apenas $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para o rio Verde Grande, as descargas do aquífero correspondem a $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ no seu trecho leste e $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ no seu trecho norte. Um balanço anual realizado pela simulação do aquífero mostrou que, para uma infiltração de $37,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, a restituição do aquífero era de $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Assim, o aquífero retinha $5,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Isto mostra que, para aquelas condições impostas ao modelo matemático, o aquífero tem uma grande capacidade reguladora, pois absorve os volumes de águas infiltradas nos primeiros meses do ciclo hidrológico e somente os libera, muito lentamente, ao longo de todo o ano.

Os hidrogramas dos poços na área também ratificam esta observação (figura 3.6). Nestes hidrogramas observam-se que os níveis dos poços tiveram um incremento no início de 1979, que foi um ano extraordinariamente chuvoso. A partir daí os níveis não retornaram, na maioria dos casos, à posição de antes das chuvas de 1979, de onde se deduz a capacidade reguladora do aquífero. Convém lembrar que níveis anteriores a 1979 correspondem ao final de uma série de 5 anos secos, com pluviometria anual abaixo da média. Este fato evidencia a variação de reserva reguladora de água no aquífero, de um ano para o outro, em função da pluviosidade anual.

Estas observações indicam, também, que o aquífero tem transmissividades baixas e pouco sensíveis às ações exteriores, de modo a provocar um rápido esvaziamento. Os hidrogramas mostram, também, que o balanço hídrico não se verifica necessariamente ao longo de um ano ou de um período de anos sucessivos, sem que sejam consideradas variações de reserva permanente.

Assim, para fixar-se uma grandeza, a reserva reguladora máxima da área é da ordem de $32 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, que corresponde ao

Z O N A	TEOR DE Cl^- NA ÁGUA SUBTERRÂNEA (mg/l)	COEFICIENTE INFILTRAÇÃO (I)		INFILTRAÇÃO PROFUNDA P-E = 800mm/ano	
		MÉDIO	EXTREMOS	MÉDIO	EXTREMOS
Faixa arenosa perto do Rio São Francisco	10	0,020	0,010-0,030	16	8 a 24
Bacia do Riacho Serraria	40	0,005	0,002-0,007	4	2 a 6
Serra do Sabonetal, parte alta	10	0,020	0,010-0,030	16	8 a 24
Zona leste da Serra do Sabo- netal e contorno norte da Serra Azul	15	0,015	0,007-0,020	12	6 a 16
Colônia do Jaíba	15	0,015	0,007-0,020	12	6 a 16
Plano Central	45	0,004	0,002-0,006	2	2 a 5
Plano Norte	5	0,040	0,040-0,060	24	12 a 48

QUADRO 3.4 - INFILTRAÇÃO ANUAL MÉDIA DE ÁGUA DE CHUVA PARA O AQUÍFERO

volume restituído de água subterrânea, considerando que o aquífero estivesse totalmente saturado antes da infiltração.

c) Recursos exploráveis

Os limites dos recursos exploráveis são bastante variáveis, como foi dito anteriormente, o que torna relativamente difícil estabelecer a quantidade global de água realmente capaz de ser utilizada na área. Além disto, a exploração das águas subterrâneas obedece a imperativos técnicos e econômicos e a princípios de conservação do aquífero.

Segundo CASTANY (1975), os recursos explotáveis estão de terminados por dois fatores principais: a política de exploração a longo prazo e as possibilidades de exploração do aquífero. Assim, em função desses fatores os recursos exploráveis podem ser superiores, iguais ou inferiores ao valor do aquífero no seu estado normal.

Em primeira aproximação, para se fixar uma ordem de grandeza, os recursos exploráveis podem ser considerados iguais às reservas reguladoras, principalmente por se tratar de um aquífero livre. Desta maneira, os recursos exploráveis potenciais são da ordem de 32.10^6 m^3 por ano.

O uso dos recursos hídricos subterrâneos na área, atualmente, é muito pequeno. Considerando a água extraída pelos poços existentes, o volume de água subterrânea explotado anualmente é de $3.0.10^6 \text{ m}^3$. Este valor é menor que a décima parte da recarga mínima estimada, de modo que os bombeamentos não afetam sensivelmente a piezometria e o aquífero na área está perto do regime natural. A única exceção pode ser a zona ao redor da Colônia do Jaíba, onde concentram-se as explorações mais importantes. Nesta zona, estima-se $0,13.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ em 40 km^2 , ou seja, $3,2 \text{ mm/ano}$, que pode chegar a ser da ordem de grandeza da infiltração da água de chuva. Assim, nos arredores da Colônia do Jaíba podem ocorrer modificações piezométricas por bombeamento, principalmente em épocas de estiagem, inclusive pode haver uma recarga induzida a partir do rio Verde Grande.

3.4. HIDROQUÍMICA

Para o estudo hidroquímico da área, foram utilizadas 114 análises químicas de águas superficiais e 220 de águas subterrâneas. Nas análises, foram determinados todos os constituintes maiores, compreendendo os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- e NO_2^- e os cátions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , além de Fe^{2+} , condutividade elétrica, pH, dureza total e alcalinidade de bicarbonatos e de carbonatos.

As análises das águas superficiais foram estudadas com objetivo de se obterem informações sobre a qualidade química e as relações de troca entre os rios e o aquífero. Foram coletadas amostras em diferentes pontos dos rios durante épocas chuvosas e de estiagem. Este procedimento visou a obtenção de dados sobre as modificações dos elementos químicos das águas superficiais em vários trechos dos rios, durante épocas com diferentes vazões.

As amostras de águas subterrâneas foram coletadas em diferentes pontos da área e repetidas em diversas épocas durante 3 anos, incluindo estações secas e chuvosas. O objetivo desta coleta foi o de estudar as variações espacial e temporal dos elementos químicos das águas subterrâneas. Convém salientar que existem vários fatores que podem produzir flutuação na composição química das águas subterrâneas e que estão relacionados com as características do aquífero. Estes fatores responsáveis pela evolução química das águas subterrâneas foram estudadas juntamente com outros dados do aquífero, tais como: parâmetros hidrológicos, geologia, etc.

A seguir, descrevem-se as principais informações obtidas com a utilização dos dados químicos.

3.4.1. Águas Superficiais

Foram utilizados os dados de análises químicas das águas dos rios São Francisco e Verde Grande. As principais características das águas destes rios são as seguintes:

a) Rio São Francisco

As amostras no rio São Francisco foram coletadas no trecho entre as cidades de Januária e Manga (Figura 1.1).

No quadro 3.5 encontram-se a composição média das águas do rio São Francisco na estiagem e os limites mais frequentes da variação nas 24 amostras analisadas.

VARIAÇÃO MAIS FREQUENTE (mg/l)						
PONTOS AMOSTRADOS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Entre Januária e Manga	6-15	1,5-3,5	1,7-2,5	1,5-3,0	3,0-4,0	25,0-65,0
COMPOSIÇÃO MÉDIA DO RIO SÃO FRANCISCO NA ESTIAGEM						
VALORES EM	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
mg/l	12	3	2	2	4	50
meq/l	0,60	0,25	0,10	0,50	0,10	0,80

QUADRO 3.5 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS ÁGUAS DO RIO SÃO FRANCISCO

A composição química das águas do rio São Francisco é praticamente constante, observando-se apenas uma ligeira tendência de aumento dos teores de Na⁺ e SO₄²⁻ e, secundariamente HCO₃⁻. As águas deste rio são tipicamente de região com clima semi-árido onde é baixo o conteúdo em HCO₃⁻ e Ca²⁺. Entre as épocas chuvosas e as épocas secas a relação rSO₄/rCl varia de 1 a 2, graças, provavelmente, a influência das chuvas.

A evolução química das águas do rio São Francisco entre Januária e Manga mostra que a contribuição subterrânea é muito pequena em relação à grande vazão do rio.

b) Rio Verde Grande

As amostras do rio Verde Grande foram coletadas em vários pontos localizados entre a Colônia do Jaíba e a sua embocadura (figura 3.2).

No quadro 3.6 encontram-se as variações mais frequentes das características químicas e a composição média das águas

V A R I A Ç Ã O M A I S F R E Q U E N T E (mg/ℓ)						
PONTOS AMOSTRADOS	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
- Barreiro do Jaíba	40-75	8-7	8-14	10-15	11-20	150-300
- Colônia do Jaíba	40-75	4-8	7-10	9-15	9-20	130-220
- Fazenda Barrinha	40-75	5-9	10-13	10-15	13-18	150-250
- Fazenda Campo Redondo	35-65	6-8	9-15	11-18	8-13	80-200

C O M P O S I Ç Ã O M É D I A D O R I O V E R D E G R A N D E N A E S T I A G E M

VALORES EM	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
mg/ℓ	55	7	11	12	14	200
meq/ℓ	2,8	0,6	0,5	0,3	0,3	3,3

QUADRO 3.6 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS ÁGUAS DO RIO VERDE GRANDE

do rio Verde Grande em 90 amostras analisadas.

A figura 3.14 mostra a *classificação química* triangular de PIPER (1944) para todas as análises das águas do rio Verde Grande. Predominam as águas bicarbonatadas cálcicas ou calcio-magnesianas e, secundariamente, aparecem bicarbonatadas mistas. Os ânions Cl^- e SO_4^{2-} são sempre minoritárias.

A *condutividade elétrica* das águas do rio Verde Grande, no trecho a montante da Colônia do Jaíba, permanece praticamente constante durante as épocas de enchentes e de águas baixas. Isto indica que há um aumento da contribuição subterrânea durante as enchentes. No trecho entre Colônia do Jaíba e o povoado de Gado Bravo a condutividade elétrica evolui paralelamente a vazões do rio. Isto é, nas épocas de estiagem (maio a outubro) as águas são mais condutoras, enquanto nas de chuva (outubro em diante) são menos condutoras, sugerindo pouca restituição do aquífero. A jusante do povoado de Gado Bravo até a embocadura a variação da condutividade elétrica das águas é grande. Esta maior variação pode ser explicada pelo aporte das águas com diferentes concentrações iônicas dos afluentes Gurutuba e Verde Grande.

Os *cloretos* das águas do rio Verde Grande, na maioria das vezes, evoluem de modo diferente ao da condutividade elétrica. Em alguns pontos do rio as épocas de maior condutividade elétrica coincidem com o menor conteúdo em cloretos. São nas épocas chuvosas é que esta evolução é semelhante. Isto é explicado pelo fato de que a condutividade elétrica é dominada pelos ions Ca^{2+} e HCO_3^- , que formam a maior parte do conteúdo iônico da água do rio, enquanto os cloretos estão mais relacionados à evaporação das águas de chuvas. Por outro lado, verifica-se que as águas restituídas nas primeiras chuvas são mais cloretadas que as do final do período úmido, porque na estiagem a concentração de Cl^- no solo é maior e as primeiras águas lixiviam o material evaporado.

O conteúdo em HCO_3^- relativamente elevado (alta pressão parcial de CO_2) da água do rio Verde Grande indica que até Gado Bravo o rio recebe ou mantém características de água subterrânea e que esse aporte pode ser nulo ou insignificante a jusante de Gado Bravo.

Nas épocas de estiagem, as águas do rio Verde Grande são similares em qualquer ponto do rio, diminuindo apenas o Ca^{2+} nos trechos próximos a sua embocadura.

O efeito das enchentes no rio Verde Grande, (diminuição de HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} e Mg^{2+}) é mais notável logo a montante da Colônia do Jaíba. Mesmo neste trecho este efeito é pequeno e em geral acarreta uma diluição moderada o que indica um predomínio ainda da contribuição subterrânea.

As análises químicas das águas do rio Verde Grande fornecem indicações sobre a influência da restituição do aquífero na vazão deste manancial. O elevado conteúdo em HCO_3^- das águas do rio Verde Grande, por exemplo, revela que a maior influência das águas subterrâneas ocorre até o povoado de Gado Bravo. A partir de Gado Bravo, o rio mantém as suas características químicas, diminuindo apenas a concentração de Ca^{2+} devido, provavelmente, à precipitação de CaCO_3 , à diluição com água do rio Gurutuba ou do rio Verde Pequeno ou, ainda, a fenômenos orgânicos.

Os dados químicos indicam, ainda, que o rio Verde Grande recebe uma restituição importante do aquífero a montante da Colônia do Jaíba. A jusante, o intercâmbio de água superficial-subterrânea parece pequeno. No seu trecho final, a jusante de Gado Bravo, o rio modifica ligeiramente a sua composição química, possivelmente, pelo fato de perder CO_2 por aquecimento e, consequentemente, precipitar CaCO_3 (GARRELS e CHRIST, 1965; STUMN e MORGAN, 1970).

Estas observações, a partir de dados químicos das águas superficiais, ratificam as conclusões tiradas dos dados de vazão para os diferentes trechos do rio Verde Grande.

3.4.2. Águas Subterrâneas

O estudo hidroquímico das águas subterrâneas visou dois aspectos fundamentais: caracterização física e química das águas e a análise da evolução química das águas no aquífero. A seguir são descritos os principais resultados obtidos.

a) Características físicas e químicas das águas subterrâneas

As análises químicas mostram uma notável variação de um ponto a outro e de uma época a outra. Em algumas zonas esta variação é muito grande, indicando uma forte influência local, decorrente de vários fatores entre os quais podem-se destacar a menor ou maior facilidade de infiltração, condição de exploração, gradiente hidráulico e outros.

No quadro 3.7 encontram-se as variações mais frequentes das características químicas e a composição média das águas subterrâneas da área em apreço.

VARIAÇÃO MAIS FREQUENTE						
Valores em	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
mg/l	110-450	5-66	13-27	6-37	6-29	339-552

COMPOSIÇÃO MÉDIA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS						
Valores em	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
mg/l	98	18	16	20	18	348
meq/l	4,9	1,5	0,7	0,6	0,4	5,7

QUADRO 3.7 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Comparando-se estes valores com aqueles das águas do rio Verde Grande (quadro 3.6) verifica-se, como era de se esperar, que as águas subterrâneas têm maior concentração iônica, principalmente de Ca²⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻.

A figura 3.15 mostra a *classificação química* triangular de PIPER (1944) de todas as análises químicas subterrâneas. Observa-se que predominam as águas do tipo bicarbonatadas cálcicas ou cálcio-magnesianas e subordinadamente às bicarbonatadas mistas, sódicas e cálcio-sódicas.

As *relações iônicas* (SCHOELLER, 1962) que predominam são do tipo: HCO₃ > SO₄ > Cl e Ca > Mg > Na. As águas bicarbonatadas sódicas ocorrem em áreas restritas na serra do Sabonetal, que possivelmente correspondem ou derivam de arcóseos com feldspatos sódicos.

FIGURA 3.15 - CLASSIFICAÇÃO QUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

cos (figura 2.1).

Numa pequena faixa que aparece desde a Colônia do Jaíba e estende-se em direção ao povoado de Mocambinho, ocorrem águas cloretadas cálcicas e, ocasionalmente, bicarbonatadas magnesianas. A disposição espacial desta faixa sugere a existência de uma circulação subterrânea preferencial que concentra águas poluídas pelas atividades humanas na zona da Colônia do Jaíba, (ver SCHOELLER, 1969).

Considerando-se os diagramas das figuras 3.14 e 3.15, verifica-se a congruência dos dados, sugerindo assim uma forte influência das águas subterrâneas na qualidade das águas do rio Verde Grande.

O processamento estatístico dos dados das análises das águas subterrâneas mostrou os seguintes resultados:

- Os sólidos totais dissolvidos variam desde 120 mg/l até 867mg/l. A média dos valores é de 526 mg/l e a mediana 530 mg/l. A salinidade típica, moda, é de 120 mg/l.
- A alcalinidade total média é de 274 mg/l de CaCO_3 e os valores extremos são 48 e 452 mg/l de CaCO_3 . A mediana e a moda são de 284 e 286 mg/l de CaCO_3 respectivamente.
- As condutividades elétricas variam desde 196 $\mu\text{mho/cm}$ até 1411 $\mu\text{mho/cm}$. A média da distribuição dos valores é de 728 $\mu\text{mho/cm}$, com um desvio de 222. A mediana é de 731 $\mu\text{mho/cm}$.
- As águas do aquífero são predominantemente duras, com valores máximos de dureza da ordem de 590 mg/l de CaCO_3 . A média, mediana e a moda são respectivamente 315, 312 e 380 mg/l de CaCO_3 .
- As águas subterrâneas da área são, em geral, alcalinas e incrustantes, com pH acima de 7,0, com uma média de 8,2 e máximo de 8,9.

A figura 3.16 mostra a regressão linear entre sólidos totais dissolvidos - STD, em mg/l, e as condutividades elétricas - CE, em $\mu\text{mho/cm}$, das águas do aquífero. Esta regressão tem um coeficiente de correlação linear de 84%. A equação da reta de regressão é:

$$\text{STD} = 0,58 \text{ CE} + 111,73$$

FIGURA 3.16 - RELAÇÃO ENTRE OS SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS E A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

A dispersão de alguns valores em relação à reta está relacionada às análises de águas de amostras coletadas em poços localizados em diferentes litologias.

Na figura 3.17 tem-se a relação entre os *cloretos* e a *condutividade elétrica* das águas subterrâneas da área. O coeficiente de correlação linear é muito baixo (41%), indicando que o comportamento da condutividade elétrica é diferente da variação de cloretos. A variação dos cloretos está mais relacionada às condições climáticas e a condutividade elétrica, às litologias (CRUZ e MELO, 1968).

Finalmente, os conteúdos em NO_2^- e Fe^{2+} são normalmente baixos e não apresentam anomalias significativas graças, respectivamente, à não contaminação orgânica do aquífero e à litologia.

b) Evolução química das águas subterrâneas

A evolução química das águas subterrâneas foi analisada sob o ponto de vista das *variações temporais* e da *distribuição espacial* dos íons.

Quanto às variações temporais, pode-se destacar que, de um modo geral, observam-se modificações nas concentrações dos constituintes químicos mas que não chegam a transformar o caráter químico da água. Estas variações são mais notáveis em algumas zonas.

Assim, por exemplo, na zona circunvizinha do morro Catariño, as análises químicas mostram grandes variações durante o ano em função da pluviosidade. Isto pode estar relacionado a uma pequena capacidade de armazenamento nesta zona e, também, refletem características de área de recarga. Outra zona que apresenta características destacáveis é a dos arredores da Colônia do Jaíba onde as amostras apresentam uma composição pouco variável ou com uma pequena diluição depois do início dos períodos de chuva. Esta característica indica que o aquífero, naquela zona, possui um armazenamento de água importante, uma vez que as águas infiltradas são logo diluídas. Por outro lado, na serra do Sabonetel, as águas mostram uma tendência de diluição após o início dos períodos chuvosos. É possível que, nesta zona, o armazenamento de

FIGURA 3.17 - RELAÇÃO ENTRE OS CLORETOS E AS CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS

água seja pequeno, aumentando em direção ao leste onde a variação química é menor. Finalmente, as variações temporais no baixo curso de riacho Serraria refletem mudanças rápidas nas mineralizações das águas. Tal fato está relacionado com influências locais do aquífero (poço captando fendas que drenam várias áreas e com diferentes equilíbrios hidrodinâmicos, contaminação do aquífero, aquíferos isolados com certo grau de conexão, e outros) e com uma pequena capacidade de armazenamento.

O estudo da distribuição espacial dos íons foi efetuado a partir da análise individual dos parâmetros químicos mais importantes, através de mapas de isolinhas. As principais observações são descritas em continuação.

O mapa de isolinhas de *condutividade elétrica* da figura 3.18 mostra algumas zonas peculiares. Ao norte da serra do Sabonetal, na porção central da área, e nas margens do rio São Francisco, as condutividades elétricas normalmente são baixas. Uma faixa irregular, desde as cabeceiras do riacho Serraria e do córrego Escuro seguindo em direção ao norte, e, a partir da serra Azul vertendo para oeste, e outra, na Colônia do Jaíba, apresentam elevadas condutividades elétricas (850 $\mu\text{mho/cm}$). Ao norte da área as águas são pouco condutoras, exceto ao sul do morro Catarino e em pontos isolados, sujeitos à evaporação, nas margens do rio Verde Grande.

Graças ao fato de que os íons marcadamente dominantes são os HCO_3^- e Ca^{2+} , que procedem da dissolução de rochas do aquífero, as suas distribuições refletem características litológicas da área. Por outro lado, estes íons influem fortemente na condutividade elétrica que vai, conseqüentemente, ressaltar as características do aquífero, principalmente as litologias e as faixas preferenciais de circulação.

As zonas de elevada condutividade elétrica normalmente correspondem às de ocorrências de rochas mais carbonáticas com pouca fração argilosa e solo espesso, onde a dissolução é maior. Exceção ocorre onde existe evaporação e poluição mineral de origem humana, como nos arredores da Colônia do Jaíba. As zonas de baixa condutividade elétrica, ao norte da serra do Sabonetal e ao norte do morro Catarino, correspondem à ocorrência de afloramentos de rochas,

de solo pouco espesso e de rochas mais argilosas (margas, siltitos e arcóseos).

Vale ressaltar que as águas fortemente condutoras, ao norte da área, são restritas à zona ao sul do morro Catarino. Isto indica que a recarga ali não tem efeito regional e é, portanto, pequena. Por outro lado, ao sul da área, as isolinhas de condutividade elétrica mostram que as águas infiltradas na serra do Sabonetal circulam em direção à Colônia do Jaíba e, provavelmente, ao longo do riacho Serraria.

A figura 3.19 mostra o mapa de isolinhas de cloretos das águas subterrâneas. A distribuição espacial dos cloretos é diferente daquela da condutividade elétrica. Isto ocorre porque os cloretos são mais influenciados pelas condições climáticas, uma vez que o aporte de cloretos pelo terreno cárstico é desprezível. Além disto, os cloretos não dependem dos alcalinos terrosos que predominam na salinização das águas subterrâneas da área em estudo e, conseqüentemente, na condutividade elétrica.

O menor conteúdo em cloretos indica zonas de recarga ou menos retentivas de águas, como no morro Catarino, em algumas áreas próximas ao rio Verde Grande e na Colônia do Jaíba. As zonas de maior retenção (maior que 25 mg/l), onde a recarga seria menor, situam-se numa faixa no riacho Serraria; nas cabeceiras do córrego Escuro, entre a serra do Jaíba e a Colônia do Jaíba, e na porção central da área. Zonas com elevado conteúdo de cloretos, a nordeste da serra Azul (60 mg/l) e nos arredores da Colônia do Jaíba (100 mg/l), parecem estar relacionadas à poluição do aquífero, porque o aporte natural não poderia atingir aquelas concentrações (até 293 mg/l).

Por outro lado, vale ressaltar que as formas das isolinhas parecem refletir circulação preferencial ao longo do riacho Serraria; da Colônia do Jaíba em direção ao riacho Tapera; e outra, de direção leste-oeste, na porção centro-leste da área.

A dureza também reflete as variações litológicas e sua distribuição é semelhante a da condutividade elétrica, graças à dominância dos alcalinos terrosos. Exceção aparece no alto da serra do Sabonetal, onde ocorrem siltitos e arcóseos com solos con

FIGURA 3.19 - ISOLINHAS DE CLORETOS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

tendo maiores quantidades de cátions alcalinos. De modo geral, onde aparecem valores elevados de dureza ocorrem calcários.

A distribuição dos *sulfatos* é semelhante à da condutividade elétrica e à da dureza. Isto indica que os sulfatos procedem, na sua maioria, da dissolução de sulfetos das rochas e que o aporte pelas chuvas é pequeno.

A relação rSO_4/rCl também tem distribuição espacial semelhante à da condutividade elétrica e à da dureza, ratificando que o processo de incremento da dureza é o mesmo dos sulfatos e que é dependente da dissolução da rocha. Nas proximidades da Colônia do Jaíba, esta relação diminui muito sugerindo que os teores de cloretos são excepcionais e que procedem preferencialmente da poluição.

A dissolução de Ca^{2+} e de Na^+ são ressaltadas pela relação rNa/rCa . Os valores maiores que 1, que ocorrem na serra do Sabonetal e ao norte da serra Azul, indicam predomínio de silicatos sódicos sobre os carbonatos isto é, ocorrência de argilas sódicas, siltitos arcoseanos ou arcóseos. Baixos valores de relação indicam predomínio de calcário e apresentam boa coincidência com as durezas elevadas. Valores elevados, que ocorrem em pontos isolados na Colônia do Jaíba, Gado Bravo e Matias Cardoso, podem estar relacionados com a poluição das águas subterrâneas.

Outras características das distribuições espaciais dos íons serão tratadas no item 6.

4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DE DADOS MORFOESTRUTURAIS

Foram abordados, fundamentalmente, três aspectos: a distribuição espacial das fraturas geológicas e a das feições cársticas além da orientação destas fraturas.

Através de análises estatísticas tri-dimensionais, procurou-se sistematizar e integrar as informações derivadas da interpretação geomorfológica em aerofotos. A partir de então, processou-se a correlação e representação dos resultados, conforme conceitos e métodos estatísticos, hidrogeológicos e de geologia estrutural.

Um dos mais importantes problemas, relacionados com a aplicação de estatística à Hidrogeologia, é o estudo do comportamento espacial de variáveis que assumem valores definidos para cada ponto no espaço (ver KITANIDIS, 1983 e ABOUFIRASSI e MARINO, 1983).

Na estatística convencional, assume-se que os valores amostrais 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.

Quando se aplica a estatística espacial, presume-se, no entanto, que os valores amostrais não são realizações de funções causais. Assim, o valor de uma amostra é também uma função de sua posição no espaço (DELHOME, 1976).

A análise de superfícies de tendências é, hoje, uma das ferramentas de geomatemática mais utilizadas para o tratamento de dados distribuídos em área (ROYLE et alii, 1980). Os estudos aqui realizados, tiveram o intuito de se obterem informações sobre a tendência regional de parâmetros morfoestruturais fotointerpretados que estão relacionados com a circulação das águas subterrâneas em um aquífero cárstico. Assim, foram realizadas análises de superfícies de tendências e seus respectivos resíduos das fraturas e dolinas da área. As superfícies de tendências dos parâmetros estruturais mostram as variações regionais, separando os efeitos regionais das flutuações locais. Os mapas de resíduos dessas superfícies mostram os desvios em relação aos valores observados, de modo que se destacam os valores anômalos locais.

4.1. DOCUMENTOS UTILIZADOS

As análises das estruturas geológicas, orientação e densidade das fraturas e feições cársticas, e os processamentos estatísticos dos dados foram realizados a partir de interpretação feita no mapa na escala de 1:100.000.

Para a confecção deste mapa foram utilizadas fotos aéreas pancromáticas, na escala 1:60.000, obtidas em 1966 pela USAF-AST - 10 para o Serviço Geográfico do Exército (SGE) e na escala 1:50.000, obtidas no levantamento aerofotogramétrico, executado em 1974 pela Cruzeiro do Sul para a RURALMINAS-Fundação Rural Mineira - Colonização e Desenvolvimento Agrário.

A fotointerpretação foi feita com a utilização de estereoscópios de espelhos para extração de todos os elementos da rede de drenagem, lineações, formações cársticas e demais feições características. Os detalhes geológicos e morfoestruturais da interpretação das fotos aéreas foram transferidos por Sketchmaster, para uma base planimétrica na escala 1:100.000, obtida de mapas do Serviço Geográfico do Exército (SGE) de 1969.

4.2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Convém definir, inicialmente, os termos empregados para expressar as feições reconhecidas durante a interpretação das fotos aéreas, objetivando dar consistência às comparações dos resultados. Assim, foram utilizadas as seguintes conceituações:

- a) Lineação - Feição linear retilínea, individual, traçável nas fotos aéreas (BLANCHET, 1957; GARY et alii, 1972). Admitiu-se que as lineações nas fotos interpretadas são reflexos de fraturas ou falhas geológicas;
- b) Feição linear - Termo genérico referente ao arranjo de elementos texturais em fotos aéreas (O'LEARY et alii, 1976);
- c) Feição cárstica - Forma de relevo resultante de processos de carstificação (LLADÓ, 1970).

A interpretação do significado geológico e hidrogeológico das lineações depende das indicações ou argumentos extraídos diretamente das fotos aéreas ou das relações com dados de campo ou obtidos com outras técnicas de prospecção (BAECHER, 1983). Os primeiros exigem áreas de condições geológicas bastante favoráveis, onde, através de aspectos morfológicos, pode-se observar reflexos de fenômenos geológicos de deslocamentos de camadas, isto é, interrupção de feições lineares; continuidades de zonas fraturadas ou concentração de lineações, segundo determinada direção; e outros.

Inúmeros são os trabalhos publicados que demonstram que a linhamentos observados em fotos aéreas refletem um fundamental controle por fenômenos geológicos (HENDERSON, 1960; SCHEIDEGGER, 1965; HOWARD, 1967; NEUCHATEL, 1969; BEASLEY, 1981 e SOARES et alii, 1981 e 1982). É importante salientar, também, que a determinação do significado de uma lineação não pode ser confiada apenas ao exame de condição geológica no campo. Estudos geofísicos e outros são necessários para afirmar a validade e a significância de muitas lineações.

Neste trabalho, foi realizado o controle de campo de algumas lineações fotointerpretadas. Além disto, ESCODINO e SILVA (1980) realizaram uma pesquisa de eletroresistividade em lineações fotointerpretadas na área. Convém salientar que as feições cársticas fotointerpretadas, mesmo sem comprovação de campo, constituem uma soma valiosa de informações potenciais que, rapidamente, podem ser extraídas das fotos aéreas e de outros sensores remotos.

Considerando-se, por outro lado, as condições geológicas e estruturais da área, aceita como uma unidade tectônica sem evidência de grandes perturbações estruturais, verificou-se que não existe geração de estruturas muito variadas. É possível, assim, que as lineações representem reflexos em superfície dos esforços laterais sofridos pelo Grupo Bambuí após a sua consolidação.

Em continuação, serão discutidos os tratamentos estatísticos das distribuições espaciais das feições morfoestruturais e das orientações das fraturas.

4.3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS FEIÇÕES MORFOESTRUTURAIS

As análises da distribuição espacial das feições morfoestruturais foram realizadas através do estudo estatístico das fraturas e das dolinas. Neste estudo, as lineações e as dolinas fotointerpretadas foram submetidas a um tratamento estatístico tridimensional envolvendo as análises de superfícies de tendências. Os dados utilizados neste tratamento foram as densidades de ocorrência. Isto é, a relação entre a frequência do parâmetro, no caso os comprimentos das lineações ou áreas das dolinas, e a área de sua ocorrência.

4.3.1. Procedimentos adotados

Os dados dos parâmetros morfoestruturais, como já foi citado, foram obtidos no mapa da área na escala 1:100.000. Este mapa foi dividido em 60 quadrículas, ou células, através de uma malha de 10 linhas e 6 colunas delimitadas por coordenadas geográficas de 5 minutos. Cada uma destas quadrículas abrange uma superfície de aproximadamente 81 km².

Em cada quadrícula, foram medidos os comprimentos das fraturas e as áreas das dolinas existentes. Posteriormente, foram calculadas as densidades das fraturas e das dolinas. As primeiras foram obtidas somando-se os comprimentos de todas as fraturas dentro de uma quadrícula e, em seguida, dividindo-se esta soma pela área da quadrícula. As outras foram calculadas somando-se todas as áreas das dolinas dentro de uma quadrícula e, depois, dividindo-se esta soma pela área da quadrícula.

Para uma melhor comparação entre os diferentes mapas de densidades de fraturas e entre os de dolinas, todos os valores foram uniformizados. Esta uniformização foi obtida através da transformação de todos os valores para um intervalo de variação entre 1 e 2. Assim, o menor valor de distribuição ficou igual a 1 e o maior igual a 2, os demais ficaram distribuídos neste intervalo.

A equação utilizada foi a seguinte:

$$Zoi = ((Xi - Xmin)/(Xmax - Xmin)) + 1$$

onde:

Zoi = valor uniformizado;

Xi = valor original;

Xmin = menor valor original da distribuição dos dados;

Xmax = maior valor original da distribuição dos dados.

Efetuarão-se os seguintes processamentos:

a) Utilizando-se as densidades das fraturas.

- 1 - tendência das densidades de *todas as fraturas*;
- 2 - tendência das densidades das *grandes fraturas*, isto é, aquelas com comprimento maior ou igual ao comprimento médio (3km) de todas as fraturas fotointerpretadas;
- 3 - tendência das densidades de *fraturas associadas às dolinas*.

b) Utilizando-se as densidades das dolinas.

- 1 - tendência das densidades de *todas as dolinas*;
- 2 - tendência das densidades das *grandes dolinas*, isto é, com diâmetro maior ou igual ao diâmetro médio (600m) de todas as dolinas;
- 3 - tendências das densidades de *dolinas associadas às fraturas*.

Este procedimento visou o estudo dos efeitos dos tamanhos das fraturas e dolinas na carstificação ou na circulação das águas subterrâneas.

Foi considerado que uma fratura (lineação) estava associada com dolinas e vice-versa, quando existiam três ou mais dolinas alinhadas ao longo da lineação.

4.3.2. Descrição dos procedimentos matemáticos

O programa de computador TRENDSUP (LANDIM et alii, 1978-B, modificado pelo autor), usado nos processamentos estatísticos dos dados morfoestruturais, utiliza os métodos polinominais não ortogonais para o cálculo das superfícies de tendências. Neste programa é aplicado um modelo linear geral dos mínimos quadrados, tentando-se encaixar, a princípio, uma superfície linear (plano) aos dados, em seguida, uma quadrática, uma cúbica e assim sucessivamente.

Com o método dos mínimos quadrados, são calculados os coeficientes que melhor definem uma superfície, e que se ajustem ao conjunto de pontos. Com estes coeficientes e com as coordenadas U_i e V_i de cada ponto é possível, então, obter-se o valor calculado " Z_{ci} " da variável dependente " Z ". Este valor difere do observado " Z_{oi} " de uma quantidade " R_i ", que é o resíduo. Quanto menor for este resíduo, melhor será o ajuste da superfície, matematicamente definida, aos dados observados. A partir de Z_{oi} , Z_{ci} e R_i , são calculadas as variações totais, explicada e não explicada que estão relacionadas pela equação:

$$\sum_{i=1}^n (Z_{oi} - \bar{Z}_o)^2 = \sum_{i=1}^n R_i^2 + \sum_{i=1}^n (Z_{ci} - \bar{Z}_c)^2$$

Esta equação mostra que a variação total é igual à soma da variação não explicada mais a variação explicada.

Com este procedimento tenta-se definir, além das grandes e sistemáticas mudanças existentes na área, aquelas pequenas flutuações. Maiores informações sobre os cálculos dos coeficientes dos polinômios das superfícies de tendências e sobre a técnica utilizada são encontradas em: HARBAUGH e MERRIAN (1968); DAVIS (1973); AMARAL (1976); HERTZ e AMARAL (1976); LANDIM (1979); e JAMBU (1981).

Em linhas gerais, o programa utilizado tem as características a seguir descritas. Para cada superfície de grau " p " são obtidos os coeficientes " C_i ", através de duas subrotinas desenvolvidas pela IBM (1971). Uma dessas subrotinas fatoriza uma matriz quadrada (A) não singular em fatores não superiores (U) e inferiores (L), sendo ($A = LU$). Inclui a pivotação de linhas e equilíbrio parcial e também o sinal do determinante. O método empregado nesta subrotina é o algoritmo de Crout (LANDIM et alii, 1978-B). A outra subrotina resolve o sistema de equações lineares, dados os fatores triangulares L e U e a matriz dos coeficientes.

Este programa também faz a análise estatística das superfícies de tendências. Primeiro calcula a média dos valores observados, a soma dos quadrados dos desvios dos valores observados

em relação à média e a variância desses valores. Em seguida, para cada superfície calcula a soma dos quadrados dos resíduos, a variância dos resíduos, o coeficiente de correlação e o coeficiente de determinação.

Estes cálculos são utilizados para analisar a validade das superfícies de tendências e determinar quanto da variabilidade da variável dependente é explicada pela regressão. Essa variabilidade é quantificada pela soma total dos quadrados devido à média, aos resíduos e a regressão.

Para medir o quanto a variável dependente é explicada pela regressão, pode-se usar a razão entre a soma dos quadrados devido à regressão e a soma dos quadrados em relação à média. Essa razão é chamada de coeficiente de determinação (R^2). Se a equação da regressão for tal que todos os valores calculados da variável dependente forem iguais aos respectivos observados, a somatória dos quadrados dos resíduos será igual a zero. Então, o coeficiente de determinação (R^2) é igual a um. Por outro lado, se a equação de regressão não explicar nenhuma variação da variável dependente, ter-se-á: $R^2 = 0$. Assim, quanto mais próximo R^2 for de um, melhor será a aderência de regressão aos dados. O coeficiente de correlação amostral é: $R = \sqrt{R^2}$. O intervalo de R é de: $-1 \leq R \leq +1$; uma vez que o de R^2 é: $0 \leq R^2 \leq 1$.

Vale salientar que o ajuste da superfície de tendência depende de vários fatores, como número de pontos, distribuição espacial dos pontos, variabilidade e outros. LANDIM (1979), cita alguns cuidados que devem ser tomados: a) o número de pontos deve ser maior que o número de coeficientes do polinômio a ser calculado; b) as observações devem ser feitas apenas em relação à área coberta pelos pontos, evitando-se as extremidades dos mapas; c) o arranjo dos pontos deve ser casual. HOWARTH (1967), ao analisar várias distribuições de dados gerados ao acaso, preconizou certos critérios para o uso das superfícies de tendências até o terceiro grau. Estabelece, por exemplo, que o número de dados deve ser no mínimo três vezes superior ao número de coeficientes da superfície. Além disso, a percentagem da soma total dos quadrados ($100 \cdot \text{variação explicada} / \text{variação total}$), para o ter

ceiro grau, deve ser superior a 16,2%. AMARAL (1976), por sua vez, considera que o coeficiente de determinação ou o seu equivalente a porcentagem de soma total dos quadrados é o parâmetro mais sensível para avaliar o ajuste das superfícies de tendências.

Para uma distribuição aleatória, à medida que o grau do polinômio aumenta o ajuste melhora e à medida que o número de pontos aumenta o ajuste diminui. Assim, um ajuste perfeito é obtido quando o número de pontos é igual ao número de termos do polinômio utilizado.

Esses limites estabelecidos e os cuidados propostos, servem para orientação dos usuários das técnicas de superfícies de tendências quanto à possibilidade ou não de existência de fatores controladores de uma variação regional de dados geológicos. Tais limites não devem ser utilizados como barreiras rígidas, mas sim, como indicadores na interpretação dos resultados obtidos. Um ajuste fraco não significa, necessariamente, que não existe tendência. O que pode acontecer é que as observações estejam sujeitas a uma distorção, às vezes local, que resultará numa maior magnitude dos resíduos.

Por outro lado, uma superfície com coeficiente de determinação próximo de 1 não apresenta resíduos suficientes para destacar as anomalias que por acaso ocorram na distribuição dos pontos. Por estes motivos, é que foram utilizadas superfícies de até terceiro grau na interpretação dos mapas de resíduos.

4.3.3. Tendência da distribuição espacial das fraturas

No quadro 4.1 encontram-se as estatísticas das superfícies matemáticas, até o terceiro grau, das densidades de lineações da área. Observa-se que, a média dos valores observados de todas as lineações é quase igual a das lineações relacionadas com dolinas. No entanto, a soma dos quadrados dos desvios em relação à média desses valores são bastante diferentes. Este quadro mostra, ainda, que a soma dos quadrados dos resíduos das densidades de todas as lineações é sempre menor que os das grandes lineações e a das lineações relacionadas com dolinas. Daí o me

L I N E A Ç Õ E S	T O D A S			G R A N D E S			R E L A Ç Ã O C O M D O L I N A S		
S U P E R F Í C I E D E G R A U	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Média dos valores observados	1,30	1,30	1,30	1,19	1,19	1,19	1,31	1,31	1,31
Soma dos quadrados dos des - vios em relação a média (ob - servado)	2,61	2,61	2,61	2,58	2,58	2,58	4,43	4,43	4,43
Variância dos valores observa dos	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,07
Soma dos quadrados dos resí- duos	1,75	1,69	1,49	2,10	2,06	1,95	4,01	3,06	2,96
Variância dos resíduos	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,07	0,05	0,05
Coeficiente de correlação	0,57	0,59	0,65	0,43	0,44	0,49	0,31	0,56	0,58
Coeficiente de determinação	0,33	0,35	0,43	0,18	0,20	0,24	0,09	0,31	0,33

QUADRO 4.1 - ESTATÍSTICAS DAS DENSIDADES DE LINEAÇÕES DA ÁREA

lhor ajuste obtido na superfície de tendência de todas as lineações e os maiores valores dos coeficientes de determinação.

A figura 4.1 mostra as superfícies de tendência de primeiro grau, e os seus resíduos, das densidades das lineações da área. Observam-se, nestas superfícies de tendência, que os maiores densidades de fraturas encontram-se na porção sul da área. Por outro lado, os resíduos dessas superfícies sugerem que as principais zonas de baixas densidades são as localizadas nas serras Azul e do Jaíba e em Gado Bravo.

A tendência quadrática é quase igual a linear, uma vez que os coeficientes de determinação variam muito pouco de uma para outra (quadro 4.1).

A análise das superfícies de tendência de terceiro grau, e seus resíduos, permite as observações a seguir descritas:

a) Densidade de todas as lineações

A figura 4.2 mostra os mapas de tendência de terceiro grau e de resíduo da densidade de todas as lineações.

A superfície cúbica (figura 4.2-A) destaca toda zona sudoeste da área, a partir da Colônia do Jaíba, como sendo a mais fraturada, sugerindo, ainda, que as densidades de fraturamento diminuem para nordeste e noroeste.

Observam-se, na figura 4.2-B, anomalias positivas na serra do Sabonetel, nos arredores da Colônia do Jaíba, a sudeste de Matias Cardoso e no baixo curso do córrego Vereda das Éguas. Estas seriam as zonas mais fraturadas do aquífero. É importante destacar também a faixa de elevada densidade de fraturamento do córrego Escuro e ao norte do morro Catarino. Por outro lado, ao sul e a leste do morro Catarino há baixa densidade do fraturamento. Isto sugere que as águas infiltradas na zona do morro Catarino são drenadas em direção ao norte e nordeste para o rio Verde Grande.

É interessante observar que o riacho Tapera constitui aproximadamente um limite de zona de alta e baixa densidade de fraturamento.

Coef. correl. = 0,57

A - TODAS AS LINEAÇÕES

Coef. correl. = 0,43

B - GRANDES LINEAÇÕES

Coef. correl. = 0,31

C - LINEAÇÕES RELACIONADAS COM DOLINAS

RIO DO RIACHO

ISOLINHA

RESÍDUO NEGATIVO

FIGURA 4.1 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DAS LINEAÇÕES

b) Densidade das grandes lineações

Na figura 4.3 encontram-se os mapas de tendência de terceiro grau e de resíduo de densidade das grandes lineações. Estes mapas praticamente ressaltam as mesmas anomalias da figura 4.2, aparecendo, contudo, novas informações. Por exemplo, a parece no baixo vale do riacho Serraria (figura 4.3-B) valores de densidade maiores que os observados, sugerindo a existência de grandes fraturas naquela faixa.

As anomalias da margem direita do rio Verde Grande e a nordeste da Colônia do Jaíba, permanecem, enquanto que as situadas ao norte da Colônia do Jaíba e no baixo córrego Escuro (figura 4.2) não são destacadas, indicando que na primeira predominam grandes fraturas. Da mesma maneira, as anomalias do córrego Vereda das Éguas e sudeste de Matias Cardoso parecem estar relacionadas a pequenas fraturas.

Observa-se ainda uma faixa entre Colônia do Jaíba e serra Azul que não havia sido destacada na figura 4.2, e outra de direção leste-oeste na porção central da área. Nestas faixas provavelmente predominam os grandes fraturamento.

c) Densidade das lineações relacionadas com dolinas

Os mapas de tendência de terceiro grau e de resíduo da densidade das lineações relacionadas com dolinas encontram-se na figura 4.4.

Observam-se poucas fraturas relacionadas com dolinas no vale do riacho Serraria, nas serras Azul e do Jaíba e ao sul do morro Catarino. Por outro lado, aparecem altas anomalias ao sul e nordeste da Colônia do Jaíba, no córrego Vereda das Éguas, a leste de Mocambinho e a nordeste de Matias Cardoso.

Comparando-se estas anomalias com as das figuras 4.2 e 4.3 pode-se afirmar: 1) no córrego Escuro e sudeste de Matias Cardoso as dolinas estão relacionadas com pequenas e grandes fraturas; 2) no córrego Vereda das Éguas as dolinas são controladas preferencialmente por pequenas fraturas; 3) a nordeste da Colônia do Jaíba, na margem direita do rio Verde Grande e a nordeste de Matias Cardoso as grandes fraturas controlam as dolinas.

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.3 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DAS GRANDES LINEAÇÕES

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.4 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3^o GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DE LINEAÇÕES ASSOCIADAS A DOLINAS

4.3.4. Tendência da distribuição espacial das dolinas

As estatísticas das superfícies de tendências linear a cúbica das densidades de dolinas encontram-se no quadro 4.2. Obser - va-se que as médias dos valores observados nas três distribuições amostrais são diferentes. O mesmo acontece com a soma dos quadra - dos dos desvios em relação à média dos valores observados, à soma dos resíduos e às suas respectivas variâncias. Isto indica que as três distribuições são diferentes entre si. Os melhores ajustes fo - ram obtidos com os dados das densidades de todas as lineações.

A figura 4.5 contém as superfícies de tendência de pri - meiro grau e os seus resíduos das densidades das dolinas da área. Os planos de tendência linear mostram que as maiores densidades de dolinas encontram-se ao sul da área. Os mapas de resíduos ressal - tam zonas com anomalias negativas localizadas nas serras Azul e do Jaíba e em Gado Bravo. Estas zonas de baixa densidade de dolinas correspondem, aproximadamente, aquelas de baixa densidade de fratu - ras (figura 4.1).

As tendências quadráticas e os seus resíduos permitem, pra - ticamente, as mesmas observações de tendências de primeiro grau.

As principais observações feitas nas várias superfícies de tendências cúbicas e seus resíduos são descritas a seguir.

a) Densidade de todas as dolinas

A figura 4.6 mostra a tendência de terceiro grau e o resí - duo das densidades de todas as dolinas. Esta figura destaca altas densidades nas cabeceiras do córrego Escuro, arredores da Colônia do Jaíba, baixo curso do córrego Vereda das Águas, a leste de Mo - cambinho e a nordeste do morro Catarino. As zonas com baixa densi - dade de dolinas são as situadas ao sul do morro Catarino e Gado Bra - vo, em Matias Cardoso, e nas serras Azul e do Jaíba.

b) Densidade das grandes dolinas

Na figura 4.7 encontram-se os mapas de tendência e de re - síduo da superfície de terceiro grau das grandes dolinas.

D O L I N A S	T O D A S			G R A N D E S			RELAÇÃO COM LINEAÇÕES		
SUPERFÍCIE DE GRAU	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Média dos valores observados	1,36	1,36	1,36	1,16	1,16	1,16	1,19	1,19	1,19
Soma dos quadrados dos des - vios em relação à média (ob - servado)	3,96	3,96	3,96	2,99	2,99	2,99	3,14	3,14	3,14
Variância dos valores observa - dos	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Soma dos quadrados dos resí - duos	3,35	2,42	2,22	2,76	2,52	2,31	2,88	2,69	2,45
Variância dos resíduos	0,06	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Coeficiente de correlação	0,39	0,62	0,66	0,28	0,40	0,48	0,29	0,38	0,47
Coeficiente de determinação	0,15	0,39	0,44	0,08	0,16	0,23	0,08	0,14	0,22

QUADRO 4.2 - ESTATÍSTICAS DAS DENSIDADES DE DOLINAS DA ÁREA

Coef. correl. = 0,39

A - TODAS AS DOLINAS

Coef. correl. = 0,28

B - GRANDES DOLINAS

Coef. correl. = 0,29

C - DOLINAS RELACIONADAS COM FRATURAS

0 10 20 km
ESCALA

RIO DO RIACHO

ISOLINHA

RESÍDUO NEGATIVO

FIGURA 4.5 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DAS DOLINAS

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.6 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DE TODAS AS DOLINAS

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.7 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 32º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DAS GRANDES DOLINAS

Estes mapas mostram que as grandes dolinas são restritas ou predominam na cabeceira do vale do córrego Escuro, na margem direita do rio Verde Grande e numa faixa entre o riacho Tapera e Matias Cardoso.

Comparando-se a figura 4.7 com a 4.6 podem-se fazer as seguintes observações:

- na porção central da área, no médio córrego Escuro e no baixo córrego Vereda das Éguas predominam pequenas dolinas;
- no alto córrego Escuro, norte e nordeste da Colônia do Jaíba e sudeste de Matias Cardoso predominam as grandes dolinas;
- como era de se esperar as grandes anomalias negativas da figura 4.6 são preservados na figura 4.7.

c) Densidade de dolinas relacionadas com lineações

A superfície de tendência cúbica das dolinas associadas as lineações e o mapa de resíduo encontram-se na figura 4.8.

O mapa de resíduo da superfície cúbica da figura 4.8 é parecido com o da figura 4.6, sugerindo que, de uma maneira geral, não há relação entre o tamanho das dolinas e o alinhamento ao longo de lineações. Existem porém algumas excessões, como por exemplo, a sudeste de Matias Cardoso e no alto curso do córrego Escuro, onde as grandes dolinas estão mais relacionadas com as lineações. Por outro lado, o alinhamento de pequenas dolinas parece predominar no baixo córrego Vereda das Éguas e na porção central da área próxima ao rio Verde Grande.

4.3.5. Correlação entre as superfícies de tendência das feições morfoestruturais

Para analisar as similaridades entre as superfícies de tendências das densidades de fraturas e de dolinas foram realizadas regressões lineares entre os coeficientes dos polinômios das superfícies de terceiro grau, (ver HARBAUGH E MERRIAM, 1968).

A maior correlação (0,99) ocorre entre as superfícies

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.8 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DE DOLINAS ASSOCIADAS A LINEAÇÕES

de densidades de fraturas relacionadas com dolinas e as de densidades de dolinas relacionadas com fraturas. Isto sugere que a carsificação está predominantemente instalada no fraturamento apenas em algumas zonas bem definidas na área.

A correlação linear entre os coeficientes dos polinômios da superfície cúbica de todas as lineações com as das lineações relacionadas com dolinas é de 0,95, e dessa última, com grandes lineações é de 0,69. Por outro lado, a superfície das densidades das grandes lineações tem correlação de 0,77 com a de todas as lineações e com a das lineações relacionadas com dolinas, ratificando a observação de que as dolinas estão relacionadas a pequenas e grandes fraturas, e que existe um sistema de pequenas fraturas independente das grandes fraturas ou que predominam em alguns locais da área.

Quanto às feições cársticas verifica-se que a melhor similaridade é entre a superfície de densidade das grandes dolinas e a de todas as dolinas (0,68). Contudo, a correlação dessas superfícies com as superfícies de densidades de lineações e com a de dolinas relacionadas com fraturas é muito pequena (0,12), sugerindo que estatisticamente existem fraturas que não tem correlação com dolinas como também que em várias partes da área existem dolinas, que não estão condicionadas às fraturas. Esta baixa similaridade entre as superfícies de densidades de dolinas com as densidades de lineações ratifica também a observação de que não há uma relação entre o tamanho das dolinas e o alinhamento ao longo de lineações.

4.3.6. Relação entre as feições morfoestruturais e as características do aquífero

Em todas as figuras de resíduos das densidades de lineações da área, aparecem anomalias negativas na serra do Jaíba, sudoeste de Gado Bravo e nos arredores de serra Azul. Isto sugere que estas zonas são as que possuem menores densidades de fraturamento. No caso específico dos arredores de serra Azul, é possível que muitas fraturas estejam cobertas pelo solo espesso que ocorre naquela zona e conseqüentemente não foram fotointerpretadas. Nos demais casos as rochas realmente são pouco fraturadas.

Pode-se ainda dizer que a serra do Sabonetal constitui uma zona importante de infiltração do aquífero, no sul da área, graças à sua elevada topografia e alta densidade de fraturamento. As águas ali infiltradas provavelmente são drenadas para o riacho Serraria e para o córrego Escuro.

Outras áreas com elevadas densidades de fraturas aparecem no vale do córrego Vereda das Êguas, sudeste de Matias Cardoso e em pontos isolados a norte e nordeste de Colônia do Jaíba.

Quanto às densidades das dolinas pode-se afirmar que a zona com baixa densidade, ao norte da serra Azul, localiza-se na área de ocorrência de margas e siltitos onde se instalou uma fraca carstificação. No morro Catarino também existem grandes extensões de afloramentos de margas e siltitos ou rochas com espesso (+ 20 metros) manto de decomposição. A densidade de dolinas é pequena também na serra do Jaíba, porque há uma camada de arcóseo no seu topo que inibiu a carstificação. O mesmo acontece na serra do Sabonetal. No entanto, os mapas de resíduos não identificam anomalias nesta serra provavelmente porque os seus valores estão influenciados pela forte anomalia do alto córrego Escuro.

Comparando-se a figura 4.6 com a figura 4.2 e considerando-se a topografia, pode-se sugerir que as zonas das cabeceiras do córrego Escuro - serra do Sabonetal e o baixo curso do córrego Vereda das Êguas constituem importantes zonas de infiltração do aquífero, graças às altas densidades de fraturamento e/ou de dolinas ali encontradas. Pelo mesmo motivo, a zona dos arredores da Colônia do Jaíba e ao norte do riacho Tapera, constituem zonas de infiltração do aquífero. Contudo, parece que as águas logo são restituídas aos rios Verde Grande e São Francisco respectivamente.

A anomalia de alta densidade de dolinas na porção central da área parece ser uma continuação da encontrada no córrego Vereda das Êguas. Esta anomalia também é observada na densidade de fraturas.

Verifica-se também que os riachos Tapera e Serraria não estão relacionados com dolinas.

As principais áreas onde existem as melhores associações de fraturas com dolinas são as seguintes: vale do córrego Escuro, córrego Veredas das Éguas, oeste e sudoeste da Colônia do Jaíba, sudeste de Matias Cardoso e parte da porção central da área.

Comparando-se a figura 4.8 com a figura 4.2 pode-se destacar o seguinte:

- no alto curso do córrego Escuro e sudeste de Matias Cardoso as grandes dolinas estão mais relacionadas com as fraturas, sendo estas, contudo, grandes ou pequenas;
- no baixo córrego Veredas das Éguas as pequenas dolinas são preferencialmente alinhadas ao longo de pequenas fraturas;
- nas demais partes da área não ficam claras as relações do alinhamento com os tamanhos das fraturas ou dolinas.

Em todas as figuras de resíduos das densidades de dolinas apareceram anomalias negativas principalmente nos arredores da serra Azul, ao sul do morro Catarino, em Gado Bravo, na serra do Jaíba e no vale do riacho Serraria. Tal fato sugere que estas zonas são as que possuem menores densidades de dolinas, isto é, onde foram menores os efeitos de carstificação do aquífero.

4.4. ANÁLISE DAS ORIENTAÇÕES DAS FRATURAS

A análise das orientações das fraturas foi efetuada utilizando-se os azimutes das lineações marcadas nos mapas obtidos das fotointerpretações. Esses azimutes foram submetidos a um tratamento estatístico tri-dimensional através de programa de computador, envolvendo a análise de superfícies de tendências de 0° ao 360° e de seus resíduos. Essa análise de tendência vetorial, foi usada para representar o padrão de tendência regional dos azimutes e os mapas de resíduos para mostrar as anomalias locais ou deflexões de tendência regional.

4.4.1. Procedimentos adotados

Para este tratamento estatístico foram medidos 633 azi mutes no mapa na escala de 1:100.000. Este mapa foi dividido em 60 quadrículas (celulas) através de uma malha de 10 linhas e 6 co lunas. Os limites e as áreas dessas quadrículas coincidem com as utilizadas no processamento das densidades das feições morfoes-
truturais.

Os azimutes das lineações fotointerpretadas foram medi dos no mapa utilizando-se transferidor. Esses ângulos foram medi dos, a partir do norte do mapa, no sentido dos ponteiros do relô-
gio e com variação de 0 a 180 graus.

Foram realizadas três tratamentos estatísticos. No pri meiro foram considerados *todos os azimutes* medidos e no segundo apenas os azimutes das *grandes lineações*, isto é, aqueles cujo com primento era maior ou igual ao comprimento médio (3 km) de todas as lineações. Este procedimento visou o estudo do efeito do ta manho das lineações na estrutura global da área. Posteriormente, um terceiro processamento foi realizado considerando-se os azimu tes das lineações que estavam *relacionadas ao alinhamento de do-*
linas. Este ulterior processamento visou o estudo da influência do fraturamento na carstificação.

4.4.2. Descrição dos procedimentos matemáticos

O programa de computador utilizado no processamento es tatístico dos azimutes foi o "VECTOR TREND ANALYSIS" elaborado por FOX (1967) e modificado pelo autor.

Este programa faz a análise regional dos azimutes médios das malhas utilizando superfícies de tendências obtidas por poli nômios ortogonais e respectivos mapas de resíduos.

Para calcular os azimutes médios das malhas o programa utiliza os cosenos das direções das lineações, de acordo com o método proposto por STEINMETZ (1962). Este método é baseado numa série de equações desenvolvidas por FISHER (1953) para calcular a dispersão de pontos numa esfera. Por outro lado, a magnitude do

vetor resultante (R) de cada malha serve como medida de dispersão. Se todos os ângulos de uma malha são iguais, (R) é igual ao número de observação (N) na malha. Se os azimutes da malha não são iguais o valor de (R) é menor que (N). E, se os azimutes dentro da malha divergem muito o valor de (R) é pequeno.

É calculado também um círculo de confiança na esfera ao redor do vetor resultante. Este cálculo é feito para os níveis de significância de 0,05 e 0,01.

O raio do círculo de confiança assemelha-se ao intervalo de confiança de uma regressão de duas variáveis ou de uma superfície de tendência. Por exemplo, o nível de significância de 0,05 quer dizer que a probabilidade da direção verdadeira do azimute desviar "teta" graus da direção do vetor resultante é de 5 por cento. A avaliação do raio do círculo de confiança é calculado pela seguinte equação, (FISHER, 1953):

$$\cos \theta = c$$

$$c = 1 - ((N-R) (X)/R)$$

onde X é determinado por:

$$X = (1/p)^{\frac{1}{N-1}} - 1$$

Nesta equação p assume os valores dos níveis de significância, isto é: 0,05 e 0,01.

Este programa calcula também a soma dos quadrados dos desvios de azimute médio do vetor resultante em cada malha. Calcula, ainda, a soma dos quadrados de todos os desvios de cada superfície de tendência.

Os coeficientes dos polinômios, que são usados para a construção das diversas superfícies de tendência, são calculados através do método dos polinômios ortogonais descrito por DE LURY (1950) e KRUMBEIN e GRAYBILL (1965). Estes polinômios são usados para calcular o valor de tendência de cada malha. Os valores dos resíduos são obtidos, para cada malha, através da subtração do valor de tendência do respectivo valor de vetor resultante.

A seguir são descritos os principais resultados obtidos.

4.4.3. Tendências das direções das fraturas na área

Na figura 4.9 encontram-se plotadas as direções dos azi mutos médios, em cada malha, obtidos nos três processamentos efe tuados. Nesta figura, pode-se comparar as direções predominantes das lineações nos diversos pontos da área em apreço. Observa-se, por exemplo, na parte central da figura 4.9-A que as direções mê dias das lineações são aproximadamente, leste-oeste. É notável também a predominância de azimutes médios das grandes lineações entre 130 a 150 graus na porção central da área (figura 4.9-B). Exceções ocorrem nas malhas atravessadas pelo rio Verde Grande onde os ângulos médios das grandes lineações são da ordem de 40 graus. No riacho Serraria a direção 130 graus do seu vale asseme lha-se a das grandes lineações. O mesmo ocorre nas malhas próxi mas a Mocaminho onde as grandes lineações têm azimutes (15 graus) paralelos ao rio São Francisco. Finalmente, a oeste da Colônia do Jaíba e no vale do córrego Escuro as grandes lineações têm azi mutos entre 70 e 95. graus.

Por outro lado, é perceptível na figura 4.9-C uma ligei ra tendência regional numa faixa próxima a diagonal sudeste-noro este da área onde os azimutes médios são da ordem de 120 graus e outra próxima na diagonal nordeste-sudoeste onde os azimutes mê dias variam ao redor de 20 graus. Localmente, na parte centro-sul da área, os azimutes mostram uma tendência para ângulos da ordem de 70 graus, com variação entre 60 e 90 graus. Na porção central da área, aparentemente, existem dois sistemas de lineações com azi mutos de 50 e 135 graus respectivamente. Finalmente, observa-se que nas malhas próximas ao rio São Francisco as lineações asso ciadas as dolinas são paralelas ao seu vale. Esta mesma observa ção havia sido feita no mapa das grandes lineações (figura 4.9-B) donde se conclui que as dolinas nesta zona são relacionadas pre dominantemente com este tipo de lineações.

São mostrados também na figura 4.9 as malhas onde o azi mute médio calculado tem pouca significância estatística. Isto é, os círculos de confiança ao redor dos vetores resultantes são

A - TODAS AS LINEAÇÕES

B - GRANDES LINEAÇÕES

C - LINEAÇÕES RELACIONADAS COM DOLINAS

- LEGENDA
- DIREÇÃO DO AZIMUTE MÉDIO
 - CENTRO DA MALHA
 - ⊙ AZIMUTE MÉDIO COM POUCA SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

FIGURA 4.9 - DIREÇÕES DOS AZIMUTES MÉDIOS DAS LINEAÇÕES EM CADA MALHA

grandes, maiores que 75 graus, e os valores dos comprimentos dos vetores resultantes (R) são pequenos, menores que 2,5. Isto significa que os azimutes das lineações naquelas malhas são muito diferentes e não há nenhuma predominância estatística.

A figura 4.10 contém os mapas de tendência de primeiro grau e seus respectivos resíduos dos azimutes das lineações. Essas superfícies de tendência mostram uma diminuição dos azimutes de sudeste para noroeste. Os valores de tendências calculados variam entre 72 e 115 graus.

Os mapas de resíduos da figura 4.10 salientam zonas com valores negativos na região de Gado Bravo e em uma faixa entre o córrego Escuro e o povoado de Mocambinho. Este fato sugere que, nestas zonas, as lineações possuem padrões de direção com azimutes menores que os das demais lineações na área.

As superfícies de tendência quadrática dos azimutes e os resíduos não permitem outras observações.

A seguir, serão analisadas as superfícies de tendência cúbica e seus respectivos mapas de resíduos dos azimutes das lineações da área.

a) Azimutes de todas as lineações

Na figura 4.11 encontram-se os mapas de tendência e de resíduo de terceiro grau dos azimutes de todas as lineações (coeficiente da correlação de 67%).

Observam-se, neste mapa, várias zonas com padrões de azimutes definidos das quais destacam-se as seguintes: 1) zona do córrego Escuro, compreendida entre as cabeceiras do riacho Serraria e a Colônia do Jaíba; 2) zona a nordeste da serra Azul; 3) zona no baixo vale do riacho Serraria, que apresenta elevada anomalia positiva; 4) zona na porção central da área com anomalia positiva; 5) zona situada entre Matias Cardoso e o centro da área; 6) anomalia positiva na região de Gado Bravo.

Na região de Gado Bravo, as lineações tendem a ter azimutes pequenos, de 50 a 60 graus, que correspondem a direção do rio Verde Grande naquela zona. A partir daí, em direção ao morro Catarino, os ângulos tornam-se menores, de 20 a 30 graus, saindo do

Coef. correl. = 0,37

A - TODAS AS LINEAÇÕES

Coef. correl. = 0,27

B - GRANDES LINEAÇÕES

Coef. correl. = 0,43

C - LINEAÇÕES RELACIONADAS COM DOLINAS

RIO OU RIACHO

ISOLINHA

RESÍDUO NEGATIVO

FIGURA 4.10 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DOS AZIMUTES DAS LINEAÇÕES

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.11 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DOS AZIMUTES DE TODAS AS LINEAÇÕES

padrão próximo ao rio Verde Grande.

Os ângulos das lineações entre o morro Catarino e as cabeceiras do riacho Tapera (sudeste de Matias Cardoso) parecem indicar que, naquela zona, existe um padrão predominante cujo valor é da ordem de 120 a 130 graus.

Verifica-se, ainda, que na porção central da área a tendência é para que os ângulos variem entre 85 a 102 graus.

O baixo curso do riacho Serraria, provavelmente, deve estar encaixado em fraturas cujas lineações têm azimutes ao redor de 130 graus. Por outro lado, não se observa nenhuma relação clara entre o alto curso do riacho Serraria e as lineações.

A sudoeste da Colônia do Jaíba, as lineações tem azimutes da ordem de 50 a 60 graus, os quais coincidem com a direção do córrego Escuro.

A zona do baixo curso do riacho Tapera, na margem centro-oeste da área, fica prejudicada porque os valores calculados nas malhas correspondentes não têm significância estatística.

É provável que esta zona esteja influenciada pelo padrão de lineações paralelo ao rio São Francisco e pelo padrão leste-oeste, paralelo ao médio e baixo curso do riacho Tapera.

b) Azimutes das grandes lineações

A superfície de tendência cúbica dos azimutes das grandes lineações (coeficiente de correlação de 61%) e o mapa de resíduos encontram-se na figura 4.12.

As superfícies de tendência de terceiro grau das grandes lineações (figura 4.12) e de todas as lineações (figura 4.11) apresentam algumas diferenças. Certos aspectos dessas diferenças podem ser justificados pela predominância de grandes lineações em determinadas áreas. É o que acontece, por exemplo, na porção nordeste da área onde predominam apenas as grandes lineações. Nesta parte da área as superfícies de todas e das grandes lineações são semelhantes. O mesmo não acontece no sudoeste da área em estudo onde existem sistemas de pequenas lineações com azimutes menores que os das grandes lineações acarretando diferen

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.12 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DOS AZIMUTES DAS GRANDES LINEAÇÕES

ças nas superfícies. Por outro lado, na zona da serra do Jaíba as grandes lineações tem azimutes menores (± 120 graus) que as pequenas lineações (± 135 graus), mas mesmo assim provoca pequenas mudanças na superfície de tendência calculada. Nas partes central-norte e noroeste da área a interpretação fica prejudicada porque o nível de significância estatística dos azimutes médios calculados é muito baixo. Finalmente, na zona central da área há uma forte influência das lineações leste-oeste que tendem a azimutes calculados entre 90 e 100 graus.

Comparando-se ainda as figuras 4.11 e 4.12, verifica-se que em ambas é realçada a tendência positiva das lineações na porção central da área. No entanto, a figura 4.12 não indica a anomalia do baixo vale do córrego Escuro. Isto significa que padrão do córrego Escuro está influenciado pelas pequenas lineações, cujos azimutes, naquela zona, são menores que os azimutes calculados para essa superfície de tendência. No alto vale do riacho Serraria ocorre o inverso, isto é, os azimutes calculados das tendências são maiores que os observados. Por outro lado, como era de se esperar, na zona nordeste da área existe anomalia positiva nas duas figuras. Verifica-se, também, que na figura 4.12 fica mais clara a faixa de isoazimutes entre a Colônia do Jaíba e a serra do Jaíba. Os demais padrões, de uma maneira geral, são comuns às duas figuras.

c) Azimutes das lineações associadas as dolinas

A figura 4.13 mostra os mapas de tendência de terceiro grau e de resíduo dos azimutes das lineações associadas a dolinas. A superfície cúbica explica 58% da variabilidade dos pontos.

Comparando-se as figuras 4.11, 4.12 e 4.13 podem-se tecer as seguintes considerações:

- 1 - O padrão positivo, na porção centro-leste da área, não aparece na figura 4.13 porque é baixa a significância estatística dos azimutes das lineações associadas as dolinas naquelas malhas;
- 2 - O padrão localizado a sudeste de Matias Cardoso é claro nas

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 4.13 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DOS AZIMUTES DAS LINEAÇÕES ASSOCIADAS A DOLINAS

três figuras;

- 3 - No canto nordeste da área (região de Gado Bravo) aparecem anomalias positivas nas três figuras, indicando que ali há uma predominância de grandes fraturas;
- 4 - As formas das isolinhas da figura 4.13 se aproximam mais daquelas de todas lineações (figura 4.11). Assim, é provável que fraturas pequenas e grandes tenham condicionado a disposição das dolinas, em grande parte da área. No entanto, existem grandes e pequenas fraturas, que não são relacionados ao alinhamento de dolinas. Estes dois casos são provavelmente os responsáveis pelas diferenças entre as superfícies das figuras 4.12 e 4.13.

4.4.4. Relação entre as orientações das fraturas e as características do aquífero

Algumas observações feitas anteriormente, nos diversos mapas de tendência dos azimutes das lineações e nos de seus respectivos resíduos, podem ser relacionadas às características do aquífero da área.

As lineações no vale do riacho Serraria, por exemplo, têm a mesma direção de seu talvegue indicando que, provavelmente, este curso d'água está controlado por fraturas, isto é, no alto e médio curso por fraturas de 180 graus e no baixo de 130 graus.

Por outro lado, é possível que o riacho Tapera esteja relacionado a um fraturamento regional, com direção aproximadamente leste-oeste, que condicionou as lineações da porção central da área. Próximo ao rio São Francisco há um outro sistema de lineação (15°) paralelo ao rio que sobrepõe-se ao padrão leste-oeste tornando esta uma zona sem tendência estatística definida e provavelmente intensamente fraturada.

A faixa de isoazimutes da Colônia do Jaíba até o povoado de Mocambinho corresponde aproximadamente a zona de fluxo preferencial de águas subterrâneas revelada pelos mapas hidroquímicos.

As anomalias na porção nordeste da área (Gado Bravo)

indicam que o rio Verde Grande está controlado por fraturamentos de diferentes direções à montante e a jusante do povoado de Gado Bravo.

As direções divergentes das lineações nos arredores do morro Catarino podem ser reflexos de diferentes esforços que teriam atuado naquela zona. É possível que um esforço de compressão de direção aproximadamente 140° tenham gerado ali um sistema de fraturas transversais (140°), longitudinais (50° - 60°) e diagonais (90° - 100°)

O padrão leste-oeste observado nas figuras 4.11 e 4.12 (não observado nas fraturas associadas com dolinas) parece estar relacionado a grandes fraturamentos. Estes fraturamentos seriam registros de falhas profundas que não afetaram a carstificação superficial na área. A drenagem ali provavelmente é profunda e por fraturas, sem boa comunicação com a superfície.

A faixa a sudeste de Matias Cardoso indica que as dolinas ali são relacionadas com pequenas e grandes lineações, ou seja, a carstificação foi imposta ao fraturamento superficial e profundo.

No córrego Escuro as lineações têm a mesma direção do vale. Além disso, o mapa piezométrico e os mapas hidroquímicos indicam uma direção preferencial de fluxo de água subterrânea ao longo do vale desse córrego. Por outro lado, no córrego Escuro a carstificação não têm relação com as grandes lineações. É provável que exista apenas uma carstificação superficial relacionada a pequenos sistemas de fraturas.

4.4.5 - Análise das frequências dos azimutes das fraturas

A análise das frequências foi realizada através de dados dos azimutes das lineações fotointerpretadas. Na figura 4.14 encontram-se os vários diagramas de frequências dos azimutes.

Considerando-se todas as lineações, tem-se as maiores frequências nos azimutes entre 30-40 graus, que correspondem às fraturas longitudinais e 110-120 graus às fraturas diagonais (cizalhamento). Por sua vez, as grandes lineações têm maiores fre-

FIGURA 4.14 - DIAGRAMAS DE FREQUÊNCIA DAS DIREÇÕES DAS LINEAÇÕES

quências as fraturas diagonais de cisalhamento com azimutes entre 10-20 e 110-120 graus e secundariamente as fraturas longitudinais 30-40 graus e as transversais com 130-140 graus.

Com estes dados verifica-se que existe um sistema de fraturas longitudinais pequenas e grandes com azimutes entre 30 e 40 graus e outro de fraturas transversais predominantemente de grandes lineações com azimutes entre 130 e 140 graus.

Já nas *lineações relacionadas com dolinas* os azimutes mais frequentes são de fraturas diagonais de cisalhamento com 10-20 e 110-120 graus ou transversais de distensão com 140-150 graus. Por outro lado, há uma boa congruência dos azimutes das grandes lineações com aqueles das lineações relacionadas com dolinas. No entanto, há um outro sistema de lineações relacionado com dolinas, (fraturas transversais com azimutes entre 140-150 graus), que independe do tamanho das lineações.

Do exposto, verifica-se que a maioria das dolinas são impostas às fraturas transversais com azimutes entre 140 e 150 graus e as diagonais com azimutes entre 10 e 20 e entre 110 e 120 graus. Esta imposição por sua vez independe do tamanho das fraturas pré-existent e provavelmente deve estar mais relacionada a inter-comunicação dessas fraturas. Estes fatos sugerem a existência de uma carstificação mais superficial relacionada às fraturas transversais e outra mais profunda relacionada às fraturas diagonais.

Quanto ao *tamanho das fraturas* pode-se afirmar que de uma maneira geral as frequências dos azimutes das pequenas e grandes fraturas são semelhantes. As melhores congruências entre pequenas e grandes fraturas ocorrem entre as diagonais com azimutes 110-120 graus e subordinadamente entre as longitudinais com azimutes 30-40 graus. Observa-se, ainda, uma predominância de grandes fraturas transversais com azimutes entre 130 e 140 graus.

5. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DO AQUÍFERO

O tratamento estatístico dos parâmetros do aquífero vi sou 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 ou tro aspecto teve o objetivo de estudar as *interligações* desses parâmetros utilizando-se análises classificatórias multivariantes (análise de agrupamento e análise fatorial).

A análise de tendência foi aqui realizada tendo em vis ta 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.*

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

5.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Nos estudos hidrogeológicos, normalmente, são utilizados mapas de isolinhas dos parâmetros do aquífero que permitem uma visão da distribuição espacial e também ressalta certas rela ções 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 permitem uma adequada interpretação, (KOCH e LINK, 1970; e ORR e DUTTON, 1983).

A utilização de *mapas de tendência* e seus respectivos resíduos pode ser um conveniente e efetivo método da interpreta

ção 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.

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

A análise de agrupamento é uma técnica classificatória utilizada quando se deseja estudar as similaridades entre indivíduos ou entre 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 seja 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 PUROY (1962); IMBRIE e VAN ANDEL (1964); KLOVAN (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); WILLIAN (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.

5.2. DESCRIÇÃO DAS TÉCNICAS ESTATÍSTICAS UTILIZADAS

A seguir serão descritos os princípios básicos das três técnicas estatísticas empregadas nos processamentos dos parâmetros do aquífero (*análise de tendência, agrupamento e fatorial*).

1) Análise de Tendência

Os princípios básicos da análise de tendência foram discutidos no item 4.

2) Análise de Agrupamento

A análise de agrupamento é uma técnica classificatória multivariante que se utiliza quando se deseja explorar as similaridades entre amostras (modo Q) ou entre variáveis (modo R) definindo-os em grupos. No primeiro caso (modo Q), consideram-se simultaneamente todas as variáveis medidas em cada amostra e, no segundo (modo R), todas as amostras nos quais foram feitas as mesmas mensurações. Com este método procura-se por agrupamentos de itens representados por pontos num espaço n-dimensional, em um número conveniente de grupos, relacionando-os através de coe-

ficientes de similaridade ou semelhança.

O processamento de dados na análise de agrupamento é realizado a partir de uma matriz simétrica de coeficientes de associação entre itens. Para a combinação desses itens, segundo níveis hierárquicos de similaridades, utiliza-se um procedimento aglomerativo de tal modo que cada ciclo de agrupamento obedeça a uma ordem sucessiva no sentido do decréscimo de similaridade.

Várias medidas de similaridade têm sido propostas. Todavia, apenas duas são geralmente usadas: *coeficiente de correlação linear do produto momento* (Pearson) e *coeficiente de distância*. O primeiro, mede o grau de associação entre valores pela representação de pontos num sistema de coordenadas e suas respectivas posições em relação a uma linha reta. O coeficiente de distância, expressa o grau de similaridade como distâncias em um espaço multi-dimensional. Quanto menor a distância, maior o grau de similaridade e vice-versa.

A função distância será limitada a valores entre 0 (maior similaridade) e 1.0 (menor similaridade).

Para representar o agrupamento hierárquico dos itens em duas dimensões utiliza-se uma simplificação gráfica chamada *dendrograma*. Este gráfico pode trazer algumas distorções quanto à similaridade. A medida de tal distorção pode ser obtida por um coeficiente de correlação, chamada *cofenético*, entre os valores da matriz inicial de similaridade e aqueles derivados do dendrograma. Maiores detalhes podem ser vistos em SOKAL e SNEATH (1963) e DAVIS (1973).

3) Análise Fatorial

A análise fatorial é outra técnica classificatória multivariante. Ela procura encontrar o número mínimo de causas ou fatores necessários para explicar, ao máximo, a variabilidade observada num conjunto de dados, identificá-los e verificar a contribuição relativa de cada uma delas (ASHLEY e LLOYD, 1978). Por outro lado, em função desses fatores principais, o método é ainda capaz de mostrar o relacionamento de amostras entre si em um espaço n-dimensional.

Nesta técnica pode-se utilizar de dois procedimentos básicos: a análise dos componentes principais e a análise de fatores.

A análise dos componentes principais é feita através do cálculo dos autovetores (eigenvectors) de uma matriz de variância/covariância. Nessa matriz simétrica, os elementos da diagonal principal são as variâncias para os pares de variáveis. O cálculo consiste numa transformação linear das "m" variáveis em "m" novas variáveis, de tal modo que a primeira nova variável computada seja responsável pela maior variação possível e existente no conjunto de dados, a segunda, pela maior variação possível restante, e assim por diante, até que toda a variação do conjunto tenha sido explicada.

A análise de fatores é uma técnica estatística que supõe que as relações existentes dentro de um conjunto de "m" variáveis seja o reflexo das correlações de cada uma dessas variáveis com "p" fatores, mutuamente não correlacionáveis entre si, sendo "p" menor que "m".

O modelo pode ser expresso por:

$$X_j = \sum_{r=1}^p i_{jr} f_r + l_j,$$

onde:

X_j = variável original, existindo mX_j ;

p = número de fatores;

i_{jr} = coeficiente que representa o carregamento da j 'ésima variável sobre o r 'ésimo fator;

f_r = r 'ésimo fator;

l_j = variação casual relativa a variável original X_j .

Na análise de fatores todas as variáveis são expressas em termos de vetores num sistema de coordenadas ortogonais em que o comprimento do vetor representa a magnitude da variável. Estes vetores agrupar-se-ão conforme o relacionamento entre si. Por estes agrupamentos poderão passar eixos, denominados fatores. O

valor da projeção dos vetores sobre estes eixos é a carga fatorial (factor loading). Estes fatores representam o número mínimo de causas que condicionam um máximo de variabilidade existente.

A *comunalidade* (communality) h^2 , é a soma dos quadrados das cargas fatoriais das variáveis sobre cada fator. Ela indica a eficiência de cada fator na explicação da variabilidade total. A comunalidade reflete também a proporção da contribuição de cada variável na variância total.

Muitas vezes, o padrão de carregamento para cada componente pode não favorecer dimensões facilmente interpretáveis. Assim, haverá necessidade de uma rotação dos eixos fatoriais, de maneira a colocá-los numa posição tal que cada fator possa ser interpretado pelos maiores carregamentos possíveis relacionados com o menor número de variáveis possível.

Finalmente, para se conhecerem as contribuições dos vários fatores a cada observação original calcula-se uma matriz dos "factor score". Essa matriz é obtida através da multiplicação da matriz fatorial rotada pela matriz inicial dos dados.

A análise fatorial também é aplicada como técnica de agrupamento entre amostra (modo Q), porém é de muito mais difícil manuseio e muito mais dispendioso, quanto ao tempo de computação. Por isso, quando o objetivo de uma análise multivariante for a classificação de amostras em grupos, deve-se utilizar a análise de agrupamento (cluster analysis).

Informações adicionais sobre análises multivariantes são encontradas em: COOLEY e LOHNES (1962); WILKES (1962); KRUMBEIN e GRAYBILL (1965); PARKS (1966); KOCH e LINK (1970); TILL (1974); MCCAMMON (1975); JORESKOG et alii (1976); CARRARA (1983) e SABOURIN (1983), entre outras bibliografias existentes.

5.3. PROCEDIMENTOS ADOTADOS

A *análise de tendência* foi realizada utilizando-se os mesmos dados empregados na confecção dos mapas de isolinhas dos parâmetros hidrogeológicos do item 3.

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 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 processamento 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).

A seguir são descritas as principais informações obtidas.

5.4. ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Nas figuras 5.1 e 5.2 encontram-se os mapas de tendência linear e de resíduo dos parâmetros hidrogeológicos.

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, a seguir serão destacadas algumas observações importantes obtidas nas

Coef. correl. = 0,31

A - SUPERFÍCIE DA ZONA FRATURADA (Altitude em metros)

Coef. correl. = 0,49

B - ESPESSURA SATURADA (E em metros)

Coef. correl. = 0,13

C - TRANSMISSIVIDADE (T em $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

RIO OU RIACHO

ISOLINHA

RESÍDUO NEGATIVO

FIGURA 5.1 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DE T E DAS CARACTERÍSTICAS DIMENSIONAIS DO AQUIFERO

Coef. correl. = 0,73

A - ARMAZENAMENTO (S)

Coef. correl. = 0,54

B - CAPACIDADE ESPECÍFICA (q em $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)

Coef. correl. = 0,56

C - RAZÃO CAPACIDADE ESPECÍFICA / ESPESSURA (q/E em $10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}/\text{m}$)

RIO OU RIACHO

ISOLINHA

RESÍDUO NEGATIVO

FIGURA 5.2 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º GRAU E DE RESÍDUO DE S, q e q/E

análises das tendências cúbicas, que refletem as propriedades hidrogeológicas da área em estudo.

5.4.1 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.

A figura 5.3 mostra as isolinhas da tendência e dos resíduos da tendência cúbica da superfície da base da zona fraturada do aquífero.

Esta figura destaca principalmente algumas anomalias que podem constituir zonas de fluxo preferencial de águas subterrâneas. Estas 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.

É interessante observar na figura 5.3 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.

A superfície de tendência cúbica e os resíduos das espessuras do aquífero encontram-se na figura 5.4. O mapa dos resíduos dessa superfície ratifica as observações do item 3 de que as maiores espessuras do aquífero encontram-se na porção central da área. Observam-se, também, que as menores espessuras 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,

FIGURA 5.3 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA SUPERFÍCIE DA BASE DA ZONA FRATURADA

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 5.4 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DE ESPESSURA DA ZONA FRATURADA

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. Esta anomalia confirma a hipótese de que ali encontram-se as menores espessuras do aquífero de toda a área, excetuando-se, é claro, as margens do rio São Francisco e o trecho do rio Verde Grande ao norte da área, que são os níveis de base na área.

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.

5.4.2 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. Na figura 5.5 observam-se a tendência e os resíduos da superfície de terceiro grau.

Esta figura resalta uma faixa de anomalia negativa entre a serra do Jaíba e Colônia do Jaíba e daí para a serra Azul. Outra faixa anômala negativa corresponde aproximadamente ao divisor de águas superficiais entre o riacho Serraria e o córrego Escuro.

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.

Quanto as transmissividades no morro Catarino e arredores de Manga, verifica-se que não há destaque nos resíduos da su

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 5.5 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DAS TRANSMISSIVIDADES

perfície de tendência cúbica (Figura 5.5).

5.4.3 Armazenamento do aquífero na área

Os mapas de tendências mostram que o armazenamento na área também aumenta de sudeste para noroeste. Observa-se, na figura 5.6, 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. Este fato ratifica as observações anteriores de que ali a carstificação foi pequena e que a água subterrânea está condicionada apenas às fraturas.

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 ($\pm$ 60 metros) capeamento detrítico que ocorre naquela parte da área e aos fraturamentos e carstificações das rochas carbonáticas subjacentes.

FIGURA 5.6 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DO COEFICIENTE DE ARMAZENAMENTO

5.4.4 Capacidade específica dos poços

A superfície de tendência cúbica da capacidade específica (figura 5.7) apresenta 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 citados anteriormente (item 3), que influem na capacidade específica. Como a área é um aquífero cárstico estes fatores são mais relevantes.

Os resíduos da capacidade específica (figura 5.7) ressaltam ainda uma faixa de resíduos positivos na porção central da área que se espalha até o morro Catarino. Por outro lado, não aparece a anomalia negativa no divisor de água entre o riacho Serra e córrego Escuro, sugerindo que ali os valores das capacidades específicas estão muito influenciados por fenômenos locais.

5.4.5 Razão da capacidade específica e espessura do aquífero

A figura 5.8 sugere que as zonas mais permeáveis da área encontram-se numa faixa na porção central da área 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 da 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.

5.4.6 Similaridade entre as superfícies de tendências

Com a análise de tendência foi possível observar o comportamento espacial e destacar anomalias dos principais parâme

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 5.7 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA CAPACIDADE ESPECÍFICA

A - TENDÊNCIA

B - RESÍDUO

FIGURA 5.8 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA RAZÃO CAPACIDADE ESPECÍFICA E ESPESSURA SATURADA

tros do aquífero. É possível agora verificar as similaridades entre as diversas superfícies de tendência de 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 baixas transmissividades e independem das espessuras.

5.5 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 coefi-

ciente 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 5.9 é o dendrograma das amostras com 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 5.1.

A figura 5.10 mostra a distribuição espacial dos grupos de amostras (malhas) que apresentam correlação entre as variabilidades dos parâmetros hidrogeológicos. Observa-se nesta figura e na figura 5.9 que a malha ao sul da Colônia do Jaíba (9.4) apresenta baixo coeficiente de similaridade em relação a outras amostras do mesmo grupo. Isto sugere que aquela zona apresenta características próprias e cujos parâmetros apresentam variabilidade diferentes das malhas circunvizinhas. Esta variabilidade se aproxima mais daquela do Grupo D.

5.6 ANÁLISE FATORIAL

A análise fatorial foi aplicada para cada um dos cinco grupos separados no dendrograma da análise de agrupamento (figuras 5.9 e 5.10), 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 5.11 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).

FIGURA 5.9 - DENDROGRAMA DE AMOSTRAS COM DADOS HIDROGEOLÓGICOS

GRUPO	A			B			C			D			E		
VALOR	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MÁX.	MIN.	MÉD.	MAX.	MIN.	MÉD.	MAX.
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
Coeficiente 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 específi ca 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
Coeficiente 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 5.1 - CARACTERÍSTICAS DOS GRUPOS IDENTIFICADOS NO DENDROGRAMA DA ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

FIGURA 5.10 - DISTRIBUIÇÃO DOS GRUPOS SEGUNDO O DENDROGRAMA

A - G R U P O A

B - G R U P O B

C - G R U P O C

D - G R U P O D

E - G R U P O 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 5.11 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL

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

a) GRUPO A

Este grupo é composto de 13 espécimes e situa-se nas margens do rio São Francisco e no riacho Tapera. No quadro 5.2 encontram-se a matriz dos coeficientes de correlação e as estatísticas da matriz de correlação. Observa-se que o fator 3 já explica 93,9 por cento da variância dos dados e que a espessura tem o maior valor de comunalidade, enquanto o coeficiente de armazenamento tem o menor.

Por outro lado, os autovalores (HARMAN, 1970) sugerem que praticamente três parâmetros determinam a variabilidade do sistema (espessura, transmissividade e capacidade específica).

No quadro 5.3 encontram-se as estatísticas de matriz de fatores não rotada e a matriz de fatores final rotada.

O gráfico da figura 5.11-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;*
- 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 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.

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO					
VARIÁVEL	E	T	q	q/E	S
E	1,000				
T	-0,700	1,000			
q	-0,373	0,518	1,000		
q/E	0,446	-0,010	0,434	1,000	
S	0,671	-0,519	0,042	0,396	1,000
E S T A T Í S T I C A S					
VARIÁVEL	COMUNALIDADE ESTIMADA	FATOR	AUTOVALOR	% DE VARIÂNCIA	ACUMULADA DA VARIÂNCIA
E	0,893	1	2,577	51,5	51,5
T	0,774	2	1,629	32,6	84,1
q	0,681	3	0,488	9,8	93,9
q/E	0,739	4	0,244	4,9	98,7
S	0,580	5	0,063	1,3	1,000

QUADRO 5.2- COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO GRUPO A

M A T R I Z D E F A T O R E S					
N A O R O T A D A				R O T A D A	
VARIÁVEL	FATOR 1	FATOR 2	COMUNALIDADE FINAL	FATOR 1	FATOR 2
E	0,902	0,081	0,991	0,995	-0,029
T	-0,838	0,300	0,792	-0,800	0,390
q	-0,375	0,740	0,689	-0,292	0,777
q/E	0,330	0,768	0,698	0,412	0,727
S	0,661	0,296	0,524	0,689	0,222
Autovalor	2,374	1,322	-	-	-
% Variância	64,2	35,8	-	-	-
Acumulada da Variância	64,2	100,0	-	-	-

QUADRO 5.3 - ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE FATORES NÃO ROTADA E MATRIZ DE FATORES FINAL ROTADA DO GRUPO A

Ressalta-se ainda que as transmissividades e as capacidades específicas variam muito (ver quadro 5.1). Além disso, há valores muito baixos de espessura saturada graças ao fato de que aquela é uma zona de nível de base do aquífero.

b) GRUPO B

Este grupo contém 18 amostras e aparece ao norte da Serra Azul e sul de Gado Bravo (figura 5.10). A matriz dos coeficientes de correlação entre variáveis dessas amostras e as estatísticas da matriz de correlação encontram-se no quadro 5.4. Observam-se baixos valores das comunalidades estimadas para as diversas variáveis. A maior comunalidade é do coeficiente de transmissividade e a menor espessura. 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.

As estatísticas da matriz de fatores não rotada e a matriz final de fatores rotada encontram-se no quadro 5.5.

Verifica-se que apenas dois fatores explicam a totalidade da variância dos vetores das variáveis e que a maior comunalidade final é da capacidade específica e da espessura saturada. A matriz de fatores rotada mostra que os maiores valores no fator 1 são de capacidade específica e da transmissividade e no fator 2 a espessura saturada. O armazenamento tem carga nos dois fatores, sugerindo sua correlação com a espessura saturada e a capacidade específica.

Observa-se na figura 5.11-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 $145.10^{-7} \text{ m}^3/\text{s/m/m}$), sugerindo uma grande variação e de maneira aleatória.

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO					
VARIÁVEL	E	T	q	q/E	S
E	1,000				
T	0,262	1,000			
q	-0,033	0,650	1,000		
q/E	-0,374	-0,259	-0,091	1,000	
S	0,337	0,504	0,360	-0,426	1,000
E S T A T Í S T I C A S					
VARIÁVEL	COMUNALIDADE ESTIMADA	FATOR	AUTOVALOR	% DE VARIÂNCIA	ACUMULADA DA VARIÂNCIA
E	0,213	1	2,363	47,3	47,3
T	0,530	2	1,203	24,1	71,3
q	0,452	3	0,641	12,8	84,1
q/E	0,247	4	0,489	9,8	93,9
S	0,371	5	0,305	6,1	100,0

QUADRO 5.4 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO GRUPO B

M A T R I Z D E F A T O R E S					
N A O R O T A D A				R O T A D A	
VARIÁVEL	FATOR 1	FATOR 2	COMUNALIDADE FINAL	FATOR 1	FATOR 2
E	0,394	-0,415	0,327	0,058	0,569
T	0,802	0,202	0,685	0,759	0,331
q	0,678	0,521	0,730	0,855	0,002
q/E	-0,468	0,460	0,431	-0,089	-0,651
S	0,682	0,200	0,505	0,418	0,575
Autovalor	1,943	0,736	-	-	-
% Variância	72,5	27,5	-	-	-
Acumulada da Variância	72,5	100,0	-	-	-

QUADRO 5.5 - ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE FATORES NÃO ROTADA E MATRIZ DE FATORES FINAL ROTADA DO GRUPO B

Outra característica desse grupo são os, normalmente, baixos valores dos coeficientes de armazenamento ($0,004$ a $0,035$) 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.

Assim, esta é a parte da área onde as condições hidrogeológicas são mais desfavoráveis.

c) GRUPO C

Este é o grupo que possui o menor número de amostras (sete). Apesar disso, ele aparece bem destacado no dendrograma (figura 5.9), 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.

No quadro 5.6 estão os valores dos coeficientes de correlação entre as variáveis e as características da matriz de correlação. Observa-se que a maior comunalidade estimada é da espessura ($0,88$) e a menor capacidade específica ($0,33$). Os autovalores mostram que a variabilidade do sistema é determinada pelos mesmos quatro parâmetros do grupo B.

Os dados da matriz final rotada dos fatores e as estatísticas da matriz de fatores não rotada estão no quadro 5.7.

A matriz de fatores rotada mostra a correlação entre a espessura e armazenamento no fator 1. No fator 2, a maior carga é da razão capacidade específica/espessura do aquífero. Este parâmetro tem pouca carga no fator 1 sugerindo baixa correlação com a espessura saturada. A transmissividade e capacidade específica tem variabilidade bastante diferente entre si neste grupo. Observa-se no gráfico da figura 5.9-C a boa correlação entre a espessura e armazenamento. Por outro lado, há baixa correlação entre a transmissividade e a capacidade específica.

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO					
VARIÁVEL	E	T	q	q/E	S
E	1,000				
T	-0,651	1,000			
q	-0,096	0,196	1,000		
q/E	-0,042	-0,146	0,151	1,000	
S	0,739	-0,238	-0,212	0,190	1,000
E S T A T Í S T I C A S					
VARIÁVEL	COMUNALIDADE ESTIMADA	FATOR	AUTOVALOR	% DE VARIÂNCIA	ACUMULADA DA VARIÂNCIA
E	0,881	1	2,188	43,8	43,8
T	0,737	2	1,150	23,0	66,8
q	0,328	3	0,839	16,8	83,5
q/E	0,446	4	0,764	15,3	98,8
S	0,811	5	0,059	1,2	100,0

QUADRO 5.6 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO GRUPO C

M A T R I Z D E F A T O R E S					
N A O R O T A D A				R O T A D A	
VARIÁVEL	FATOR 1	FATOR 2	COMUNALIDADE FINAL	FATOR 1	FATOR 2
E	0,979	-0,128	0,975	0,976	-0,149
T	-0,578	-0,013	0,334	-0,578	-0,002
q	-0,195	0,204	0,080	-0,100	0,208
q/E	0,103	0,649	0,432	0,118	0,641
S	0,722	0,125	0,536	0,724	0,109
Autovalor	1,863	0,496	-	-	-
% Variância	74,0	21,0	-	-	-
Acumulada da Variância	74,0	100,0	-	-	-

QUADRO 5.7 - ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE FATORES NÃO ROTADA E MATRIZ DE FATORES FINAL ROTADA DO GRUPO C

É provável que os valores da capacidade específica sejam 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 daquelas do armazenamento e da espessura.

Este grupo é caracterizado também por baixos coeficientes de armazenamentos (0,004 a 0,007) e grandes valores dos coeficientes de transmissividades (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 infiltradas na serra do Sabonetal seriam transferidas para os rios São Francisco e Verde Grande através desta zona.

d) GRUPO D

Este grupo é constituído de 12 amostras localizadas na zona do morro Catarino e ao sul da Colônia do Jaíba (figura 5.10). Os dados estatísticos e as matrizes usadas na análise fatorial estão nos quadros 5.8 e 5.9.

Os autovalores mostram que apenas três variáveis (espessura, transmissividade e capacidade específica) determinam a totalidade da variabilidade do sistema.

A matriz de fatores rotada mostra que as maiores cargas no fator 1 são de espessura saturada e da capacidade específica e no fator 2 da transmissividade e armazenamento. Isto indica um relacionamento da espessura saturada com a capacidade específica e da transmissividade com o armazenamento.

Na figura 5.11-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

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO					
VARIÁVEL	E	T	q	q/E	S
E	1,000				
T	-0,021	1,000			
q	0,691	0,100	1,000		
q/E	0,290	0,080	0,502	1,000	
S	-0,609	0,657	-0,358	0,159	1,000
E S T A T Í S T I C A S					
VARIÁVEL	COMUNALIDADE ESTIMADA	FATOR	AUTOVALOR	% DE VARIÂNCIA	ACUMULADA DA VARIÂNCIA
E	0,790	1	2,291	45,8	45,8
T	0,109	2	1,634	32,7	78,5
q	0,664	3	0,762	15,2	93,7
q/E	0,642	4	0,260	5,2	98,9
S	0,897	5	0,053	1,1	100,0

QUADRO 5.8 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO GRUPO D

M A T R I Z D E F A T O R E S					
N A O R O T A D A				R O T A D A	
VARIÁVEL	FATOR 1	FATOR 2	COMUNALIDADE FINAL	FATOR 1	FATOR 2
E	0,828	0,242	0,764	0,800	-0,323
T	-0,334	0,676	0,569	0,157	0,738
q	0,710	0,482	0,737	0,856	-0,061
q/E	0,267	0,513	0,344	0,528	0,237
S	-0,830	0,547	0,988	-0,312	0,943
Autovalor	2,061	1,310	-	-	-
% Variância	61,1	38,9	-	-	-
Acumulada da Variância	61,1	100,0	-	-	-

QUADRO 5.9 - ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE FATORES NÃO ROTADA E MATRIZ DE FATORES FINAL ROTADA DO GRUPO D

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.

e) GRUPO E

Este grupo é constituído de 10 amostras situadas na porção central da área. Nos quadros 5.10 e 5.11 estão as matrizes da análise fatorial e os dados estatísticos desse grupo.

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 maior influência é do armazenamento.

Analisando-se a matriz de fatores rotada, verifica-se as grandes cargas dos valores de capacidade específica e transmissividade, no fator 1, e da razão da capacidade específica por espessura saturada, no fator 2. Isto reflete a boa correlação da transmissividade com a capacidade específica como também a dissociação destas variáveis com a razão da capacidade específica por espessura saturada. Contudo, como era de se esperar, há correlação desta última variável com a espessura saturada.

Nota-se na figura 5.11-E um agrupamento entre capacidade específica, transmissividade e armazenamento, sugerindo

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO					
VARIÁVEL	E	T	q	q/E	S
E	1,000				
T	-0,876	1,000			
q	-0,845	0,884	1,000		
q/E	0,246	-0,489	-0,091	1,000	
S	-0,678	0,332	0,338	-0,026	1,000
E S T A T Í S T I C A S					
VARIÁVEL	COMUNALIDADE ESTIMADA	FATOR	AUTOVALOR	% DE VARIÂNCIA	ACUMULADA DA VARIÂNCIA
E	0,956	1	3,135	62,7	62,7
T	0,974	2	1,071	21,4	84,1
q	0,934	3	0,729	14,6	98,7
q/E	0,811	4	0,050	1,0	99,7
S	0,799	5	0,016	0,3	100,0

QUADRO 5.10 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO E ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO GRUPO E

M A T R I Z D E F A T O R E S					
N A O R O T A D A				R O T A D A	
VARIÁVEL	FATOR 1	FATOR 2	COMUNALIDADE FINAL	FATOR 1	FATOR 2
E	-0,982	-0,190	0,999	-0,978	0,207
T	0,961	-0,237	0,980	0,793	-0,592
q	0,852	0,148	0,748	0,843	-0,195
q/E	-0,350	0,738	0,666	-0,035	0,816
S	0,517	0,334	0,379	0,606	0,107
Autovalor	3,004	0,770	-	-	-
% Variância	79,6	20,4	-	-	-
Acumulada da Variância	79,6	100,0	-	-	-

QUADRO 5.11 - ESTATÍSTICAS DA MATRIZ DE FATORES NÃO ROTADA E MATRIZ DE FATORES FINAL ROTADA DO GRUPO E

similaridades entre essas variáveis. Observa-se, ainda, que a es pes sura saturada não tem correlação com estas três variáveis. Por outro lado, em relação ao fator 2, verifica-se a baixa cor rela ção positiva da razão capacidade específica/espessura sat ura da com a espessura saturada e armazenamento, e negativa com capacidade específica e transmissividade, sugerindo que a es pes sura tem variabilidade completamente diferente dos demais parâmetros.

Os valores dos coeficientes de transmissividades des te 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, conforme mostra o quadro 5.1. É importante salientar, os altos valores da razão da 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.

6. INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

A conjunção de todas as informações sobre o comportamento do aquífero permitiu delimitar zonas com características semelhantes, classificá-las e selecionar as mais promissoras do ponto de vista de recursos hídricos.

Assim, partindo-se de um zoneamento hídrico, obtido da integração dos estudos das *feições morfoestruturais* superficiais, que são reflexos de características geológicas e hidrogeológicas de subsuperfície de um aquífero cárstico; dos *parâmetros hidrogeológicos*; além de um zoneamento *hidroquímico*, que reflete algumas características do aquífero a partir da salinização das águas subterrâneas, chegou-se a uma síntese das características hidrogeológicas da área.

No estudo das feições morfoestruturais dois aspectos são importantes: a frequência de ocorrência da feição (densidade de lineação ou de dolinas) e os padrões de orientação das lineações (azimutes). A análise espacial e de tendência matemática da frequência de ocorrência e da orientação das feições morfoestruturais, permitiu destacar zonas de variabilidades semelhantes do ponto de vista estrutural e de carstificação.

Por sua vez, a análise espacial de tendência matemática e do interrelacionamento entre os diversos parâmetros hidrogeológicos permitiu selecionar zonas homogêneas do ponto de vista de características do aquífero.

Finalmente, a análise espacial da variabilidade dos constituintes químicos das águas subterrâneas permitiu identificar algumas características físicas do aquífero, além de fornecer indicação sobre a qualidade da água.

A seguir, são descritos os zoneamentos *hídricos*, *hidroquímicos* e de *potencialidades*, obtidos da integração das análises espaciais e de tendência matemática das feições morfoestruturais, parâmetros hidrogeológicos e análises químicas das águas subterrâneas.

6.1. ZONEAMENTO HÍDRICO

Para a integração das informações das características dimensionais e hidrodinâmicas do aquífero foram cotejados os dados e observações efetuadas nas análises das feições morfoestruturais (orientação e densidade) e os parâmetros hidrogeológicos da área.

Em continuação encontram-se os resultados obtidos.

6.1.1 Padrões de orientação das fraturas

O zoneamento dos padrões de orientação das fraturas , é decorrente da predominância de determinados azimutes de lineações fotointerpretadas em algumas zonas da área. Esta predominância, no entanto, não implica na ausência de fraturas com outras direções. Por outro lado, como foi visto anteriormente, a relação entre o tamanho das fraturas e os seus azimutes, é variável em diversos pontos da área, não havendo influência do comprimento das fraturas sobre uma determinada direção do fraturamento.

O quadro atual do sistema de fraturas é o resultado do quebramento das rochas da área em diferentes direções, graças ao esforço tectônico, de direção de aproximadamente 130-140 graus, a que foram submetidas. Este esforço tectônico de compressão provocou o quebramento diferenciado das rochas na área em virtude de vários fatores, dos quais destacam-se: a plasticidade das rochas, estratificação, espessura das camadas e outros. Assim, o comprimento das fraturas e a predominância de algumas direções de fraturamento em certas zonas da área refletem localmente a reação das rochas à ação dos esforços tectônicos.

Vale ressaltar no entanto, que as fraturas decorrentes do esforço tectônico de compressão (130-140 graus) ocorrem in distintamente em toda área. Isto é importante do ponto de vista hidrogeológico, porque estas fraturas são de distensão e consequentemente abertas. Desta maneira, as fraturas segundo esta

direção são as mais favoráveis à circulação de águas subterrâneas e à instalação de carstificação. Outro aspecto a ressaltar, conforme visto anteriormente, é que as fraturas mais frequentes são as longitudinais de 30 a 40 graus. Contudo, estas fraturas aparecem concentradas em determinadas zonas. Apesar disso, elas também são hidrogeologicamente importantes, porque são normalmente abertas.

Na figura 6.1 encontra-se o zoneamento dos padrões de orientação das lineações que refletem os padrões de fraturamento das rochas na área. Este zoneamento foi obtido a partir da interpretação e integração dos mapas de tendência dos azimutes das lineações. As principais características das zonas desta figura, são as seguintes:

a) ZONA RIACHO SERRARIA - Predominam fraturas de distensão (130-140 graus) e subordinadamente fraturas de cisalhamento com azimutes entre 180 e 190 graus. Estas fraturas de cisalhamento controlam o médio e alto curso do riacho Serraria, enquanto as de distensão, controlam o baixo curso. Os poços locados no baixo Serraria, normalmente, apresentam elevada capacidade específica, o que comprova a importância hidrogeológica das fraturas de distensão.

b) ZONA CÓRREGO ESCURO - Nesta zona, há grande incidência de fraturas longitudinais com azimutes entre 50 e 60 graus. Como estas fraturas, normalmente, são abertas e superficiais a carstificação ali instalada, provavelmente, não atinge grandes profundidades. Por outro lado, estas fraturas condicionam o fluxo subterrâneo do córrego Escuro segundo este azimute.

c) ZONA CENTRAL - As grandes fraturas transversais de distensão de 130 a 140 graus são as mais frequentes. Secundariamente, ocorrem fraturas de cisalhamento com azimutes entre 90 e 100 graus, principalmente, ao longo do riacho Tapera e na parte centro-leste desta zona. Estas fraturas de cisalhamento proporcionam uma carstificação mais profunda na porção central da área. Além disso, as fraturas transversais dirigem o fluxo de água subterrânea mais superficial nesta parte da área.

FIGURA 6.1 - ZONEAMENTO DOS PADRÕES DE ORIENTAÇÃO DOS FRATURAMENTOS DAS ROCHAS

d) ZONA MOCAMBINHO - Ocorrem principalmente três padrões de orientação de fraturas. O padrão de maior frequência resulta de fraturas de cisalhamento de 10 a 20 graus, paralelas ao rio São Francisco. O outro padrão é formado por fraturas longitudinais com azimutes de 30 a 40 graus. Finalmente, o terceiro padrão é constituído por fraturas de cisalhamento com azimutes da ordem de 90 graus. Apesar desses três padrões de orientação esta zona não é muito fraturada.

e) ZONA VEREDA DAS ÉGUAS - Esta zona apresenta-se intensamente fraturada. Ocorrem fraturas transversais (130 - 140 graus), longitudinais (40 a 50 graus) e de cisalhamento, com dois padrões de orientação, um de 180-190 graus e outro de 100-110 graus. As dolinas nesta zona ocorrem alinhadas ao longo de fraturas com estas diferentes orientações.

f) ZONA MORRO CATARINO - É uma zona onde ocorrem grandes fraturas. As mais frequentes são as fraturas de cisalhamento com azimutes entre 10 e 20 graus. Subordinadamente, aparecem fraturas longitudinais com orientação entre 30 e 40 graus.

g) ZONA GADO BRAVO - A característica principal desta zona é a predominância de fraturas de distensão, com 130 graus, paralelas ao leito do rio Verde Grande. Ocorrem também fraturas longitudinais com azimutes entre 30 e 40 graus, semelhantes às zonas morro Catarino. Não há intenso fraturamento nesta zona.

6.1.2 Distribuição das feições morfoestruturais

A distribuição espacial das feições morfoestruturais e suas anomalias foi obtida através de correlação e integração das interpretações das superfícies de tendências e respectivos resíduos das densidades de dolinas e de fraturas.

A figura 6.2 mostra a síntese das análises realizadas nas interpretações dos mapas de tendências e respectivos mapas de resíduos. Esta síntese, ressalta as zonas onde os pro

FIGURA 6.2 - SÍNTESE DA ANÁLISE DAS DENSIDADES DE FRATURAS E DE DOLINAS

cessos de carstificação foram intensos, e cujo resultado foi a alta densidade de dolinas.

Ressalta ainda, quatro zonas onde as elevadas densidades de fraturas e de dolinas ou de ambas facilitaria a infiltração de água pluviais. Estas zonas são: cabeceiras do córrego Escuro, arredores da Colônia do Jaíba, porção centro-leste da área e norte do vale do riacho Tapera.

As zonas de baixa densidade de fraturas e de dolinas mostrados na figura 6.2 correspondem àqueles onde as condições hidrogeológicas de circulação, armazenamento e recarga, não são favoráveis. São as zonas da serra do Jaíba, norte da serra Azul e de Gado Bravo.

Todavia, vale lembrar que os limites numéricos utilizados na classificação das densidades em grandes, médias e baixas são arbitrários, e que podem ser aumentados ou diminuídos em função do interesse no melhor ou menor detalhamento ou, ainda, em função dos dados utilizados, como tamanho da malha, números de fraturas fotointerpretadas, grau de certeza das lineações fotointerpretadas e outras. Além disso, os contornos dessas zonas são aproximados e foram baseados em superfícies de tendência matemática. Isto implica em possíveis distorções inerentes ao método de cálculo. Uma melhor avaliação dos contornos dessas zonas poderá ser feita através de processamento de dados das densidades das feições morfoestruturais obtidas em mapas com diferentes escalas.

6.2. ZONEAMENTO HIDROQUÍMICO

A geohidroquímica de rochas carbonatadas, na maioria das vezes, não é simples em vista das características peculiares dos carstes. Um dos problemas principais é a não saturação em carbonato de cálcio, que pode influenciar na evolução química das águas subterrâneas. Segundo JACOBSON E LANGMUIR (1970), esta não saturação é consequência da circulação rápida que pode ocorrer nos carstes, fazendo com que o tempo de contato água-rocha seja reduzido. Alguns autores (HOSTETLER, 1964; HANSHAW, BACK e RUBIN, 1965), sugerem ainda que a evolução do grau de saturação

de carbonato de cálcio é um bom indicador do movimento da água em terrenos carbonáticos, e que as áreas com menor saturação cor respondem a zonas de recarga preferencial.

Vale salientar, também, que a geologia e a geomorfologia de uma zona cárstica condicionam a circulação da água subterrânea e a distribuição das áreas de recarga e descarga. Inclusive, podem existir sistemas de fluxos locais e regionais misturados, cujas águas drenam diferentes distâncias e profundidades com várias temperaturas e pressões. Como consequência, existe a possibilidade de notáveis variações na hidrogeoquímica da água segundo a zona de profundidade onde foi obtida a amostra (DIXEY, 1962; MORGAN, 1972 e TOTH, 1973).

Assim, tendo em vista o exposto acima, foi realizada a síntese dos estudos hidroquímicos da área para o conhecimento das características do aquífero, considerando-se as seguintes informações: variação espacial dos diferentes íons, variação temporal das águas subterrâneas em um mesmo ponto de observação, variação das relações iônicas e variação das características químicas das águas em função da profundidade. Estas informações foram comparadas e analisadas conjuntamente com os diversos parâmetros hidrogeológicos e com as diferentes litologias mapeadas na área.

6.2.1 Características geohidroquímicas

O estudo geohidroquímico foi realizado com objetivo de identificar características do aquífero a partir das interpretações hidroquímicas das análises de águas subterrâneas.

Na figura 6.3 encontra-se o zoneamento da área obtido a partir da síntese das interpretações hidroquímicas. Este zoneamento é qualitativo e tem caráter meramente indicativo de características do aquífero, não devendo, portanto, ser usado isoladamente para elaborar modelos de funcionamento do aquífero.

O zoneamento hidroquímico da figura 6.3 destaca alguns aspectos importantes ao conhecimento do aquífero. No morro Catarino, por exemplo, há uma zona de recarga pluvial mas de efeito

FIGURA 6.3 - SÍNTESE DOS ESTUDOS GEOHIDROQUÍMICOS

local e restrito. Ao norte do morro Catarino, na margem do rio Verde Grande, há uma zona de descarga (elevada *condutividade elétrica* e alto teor em *cloreto*), sugerindo que parte da recarga no morro Catarino é restituída logo em seguida ao rio Verde Grande. Por outro lado, as demais zonas com elevada recarga destacadas na figura 6.3 situam-se próximo ao rio Verde Grande, indicando que as águas de chuva infiltradas são também logo restituídas aos rios. Assim, nas demais partes da área, a recarga pluvial ocorre através de zonas com moderada a reduzida capacidade de infiltração.

Vale ressaltar que a zona das cabeceiras do córrego Escuro e riacho Serraria e a zona na porção centro-leste da área apresentam características típicas de zonas de recarga (grande densidade de fraturamento e de dolinas e curvas piezométricas divergentes), mas não possuem baixo conteúdo de *cloreto*, sugerindo, em princípio, uma maior retenção de cloretos no terreno. (HEM, 1959; SCHOELLER, M., 1963; e CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976).

A zona ao norte do riacho Tapera, que no estudo da distribuição das feições morfoestruturais mostrou características de zona de recarga local do aquífero, não é destacada pelo estudo hidroquímico. É possível que isto tenha ocorrido em vista do número reduzido de análises químicas que existe naquela zona. As análises disponíveis não foram suficientes ou não refletiram bem o comportamento químico naquela parte da área.

A forma das isolinhas de *cloretos*, corroboradas, em alguns casos, com as de *condutividade elétrica*, parecem refletir faixas de fluxos preferenciais de águas subterrâneas. As faixas melhores ressaltadas são as seguintes: ao longo do riacho Serraria; no vale do córrego Escuro; da Colônia da Jaíba em direção ao povoado de Mocambinho; e uma faixa de direção leste-oeste na porção central da área. Estas faixas são congruentes com as observadas no estudo das estruturas geológicas.

As aluviões no rio São Francisco podem apresentar águas semelhantes às do rio, mas isto ocorre principalmente graças ao efeito das enchentes. Também não se percebem saídas de águas do aquífero para o rio São Francisco. Isto é explicável

pela grande vazão do rio, que dilui imediatamente todo o aporte. Contudo, não existem dúvidas da existência destas saídas.

Outro aspecto que deve ser lembrado é que as variações temporais da composição química das águas subterrâneas estão intimamente relacionadas às condições geohidrológicas. Assim, aquelas zonas onde as variações químicas são mais notáveis podem ser reflexos de certas propriedades locais do aquífero, principalmente as condições de armazenamento. O estudo das variações temporais das mineralizações das águas subterrâneas, em algumas zonas do aquífero, permite as seguintes observações:

a) ZONA DO MORRO CATARINO : apresenta pequena capacidade de armazenamento e as águas infiltradas são logo restituídas. Estas características são deduzidas das grandes variações estacionais patenteadas pelas análises químicas.

b) ZONA DA COLÔNIA DO JAÍBA : o aquífero possui um armazenamento importante, uma vez que a composição química das águas é pouco variável ao longo do tempo ou apresenta pequena diluição após o início das chuvas.

c) ZONA DA SERRA DO SABONETAL : a variação da mineralização da água subterrânea indica que esta zona tem pequeno armazenamento, mas que aumenta progressivamente em direção a leste, onde a variação química é menor.

d) ZONA DO BAIXO CURSO DO RIACHO SERRARIA : a grande variação nas mineralizações da água, nesta zona, reflete duas características principais: pequena capacidade de armazenamento e influências locais no aquífero (poço captando fendas que drenam várias áreas e com diferentes equilíbrios hidrodinâmicos; contaminação do aquífero por poluentes; aquíferos isolados com pequeno grau de conexão e outros).

O zoneamento hidroquímico também destaca algumas zonas com indícios de poluição mineral (CASTANY, 1975), provavelmente, proveniente da utilização de fertilizantes agrícolas nas áreas ru

rais e outras fontes de poluição na zona urbana da Colônia do Jaíba. É importante lembrar que o aquífero é vulnerável à poluição, porque além das feições cársticas e estruturais (dolinas, fraturas, etc.), a área possui, comumente, solo pouco espesso ou as rochas são aflorantes. Acrescenta-se a isto a elevada permeabilidade vertical das rochas (variação rápida do nível piezométrico após as chuvas), em alguns locais, que facilita a percolação das substâncias poluidoras.

6.2.2 Qualidade da água

Quanto aos aspectos da qualidade de água subterrânea para uso podem-se adiantar algumas propriedades que são importantes na definição adequada de sua utilização.

Convém notar, no entanto, que as concentrações salinas das águas subterrâneas da área são superiores às das águas superficiais. Isto é uma decorrência natural da oportunidade que têm as águas subterrâneas de dissolverem minerais das rochas do aquífero. Em contrapartida, estas águas tem pouco material em suspensão e material de origem orgânica. Enfim, a qualidade da água subterrânea natural, sem poluição, é definida pela sua composição química.

A adequação da água subterrânea para determinada utilização é função dos efeitos de um ou mais constituintes químicos que podem afetar o uso proposto. Assim, existem diversos padrões com limites sugeridos para a utilização no consumo humano, industrial ou agrícola. Contudo, para definir o uso da água, estes padrões requerem, em alguns casos, outros parâmetros que devem ser considerados junto com a composição química, o que foge ao objetivo desse trabalho.

A seguir, têm-se algumas indicações para os principais usos da água:

a) CONSUMO HUMANO

No quadro 6.1 encontram-se os valores das principais características químicas e físicas que afetam a potabilidade,

	V A L O R E S D E T E R M I N A D O S					L I M I T E S D E P O T A B I L I D A D E *	
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIO	MEDIANA	MODA	ACEITÁVEL	MÁXIMO
D U R E Z A (mg/ℓ de CaCO_3)	30	590	315	312	380	150	500
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA ($\mu\text{mho/cm}$)	196	1411	728	731	800	750	2200
SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS (mg/ℓ)	120	7	526	530	120	500	1500
Ca^{2+} (mg/ℓ)	5	450	98	96	112	75	200
Mg^{2+} (mg/ℓ)	1	66	18	14	4	50	150
Cl^- (mg/ℓ)	2	293	20	20	6	250	600
SO_4^{2-} (mg/ℓ)	1	340	18	18	6	250	400
NO_3^- (N) (mg/ℓ)	0,01	9	0,75	0,04	0,01	-	10

* Segundo: LOGAN, 1965; CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976 e FREEZE e CHERRY, 1979.

QUADRO 6.1 - CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E LIMITES DE POTABILIDADE

que foram determinadas nas águas subterrâneas da área, além dos limites de potabilidade adotados em diversos países. As características bacteriológicas, biológicas e os contaminantes orgânicos não foram determinados.

De uma maneira geral, as águas subterrâneas da área são adequadas para o consumo humano. Salvo aquelas com indícios de poluição e em alguns casos de águas naturais onde os íons sulfato, cloroeto ou cálcio ultrapassaram os limites aceitáveis dos padrões de potabilidade (250, 250 e 75 mg/l respectivamente, segundo FREEZE e CHERRY (1979)).

A dureza, como era de se esperar em um aquífero cárstico, é elevada, com graus de dureza superiores que 150 mg/l de CaCO_3 . Em algumas amostras foram também determinadas quantidades de sólidos totais dissolvidos maiores que os limites dos padrões de potabilidade.

b) USO AGRÍCOLA

A análise química da água subterrânea não é suficiente para definir sua possível utilização na irrigação. Outros parâmetros e dados são necessários tais como: permeabilidade e qualidade do solo, tipo de cultivo, métodos de irrigação, drenagem do solo, variação da temperatura, pluviosidade (MATTHEWS, 1983).

O problema da qualidade de água para irrigação é bastante complexo e deve ser analisado de modo específico, a nível de projeto, levando-se em conta as técnicas a serem implantadas, as culturas selecionadas e as condições de solo, etc.

Uma maneira de se obter indicações gerais das águas para irrigação pode ser feita com base nas principais características químicas que têm influência direta, ou que podem oferecer restrições à sua utilização na irrigação. Entre estas características pode-se destacar a concentração total de sais solúveis e a proporção relativa de sódio com outros cátions. As concentrações de boro e de outros elementos tóxicos as plantas não foram consideradas, uma vez que as análises de água disponíveis não incluem a determinação destes constituintes.

A figura 6.4 mostra o gráfico de classificação das águas para irrigação, proposto pelo Laboratório de Salinidade do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (LOGAN, 1965). Neste gráfico, o "*perigo de salinidade*" relativo a salinização é analisado a partir da condutividade elétrica. O "*perigo de sódio*", referente a proporção relativa de sódio em outros catios, é analisado através de razão de adsorção de sódio (RAS). A concentração de sódio é importante na classificação uma vez que este elemento substitui o cálcio do solo reduzindo sua permeabilidade (FREEZE e CHERRY, 1979).

Analisando a figura 6.4 pode-se chegar as seguintes conclusões:

. As águas subterrâneas da área têm, normalmente, valores baixos de sódio. Os valores da RAS mais comuns são: mínimo=0,13, máximo = 4,0, médio = 0,66. O limite máximo aceitável da RAS para irrigação é 26 e o máximo suportável por determinadas culturas é 30. Águas com RAS menores de 10 podem ser usadas, na maioria dos solos, com poucas possibilidades de concentrar e levadas quantidades de sódio no terreno.

. Com relação à condutividade elétrica, as águas subterrâneas da área ocorrem principalmente na categoria C 2 (condutividade elétrica entre 250 e 750 umnho/cm), ou mesmo, na categoria C 3 (condutividade elétrica entre 750 e 2.250 umnho/cm).

. A maioria das águas subterrâneas da área ocorrem em duas classes. As águas incluídas na classe C2S1, não têm restrições quanto aos perigos de sódio. Quanto à salinidade, podem ser utilizadas para irrigação somente se uma quantidade moderada de lixiviação ocorrer (LOGAN, 1965). As águas do tipo C3S1 não podem ser utilizadas em solos com drenagem deficiente e devem ser aplicados somente em culturas com uma alta tolerância salina.

FIGURA 6.4 - CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA IRRIGAÇÃO

Assim, os *perigos de salinização* do terreno vão depender das elevadas condutividades elétricas (sólidos totais dissolvidos) da água. Na maior parte da área não há risco de *sódio*.

c) USO INDUSTRIAL

O uso industrial da água subterrânea da área depende do tipo de indústria e qual a utilização da água. Os requisitos de qualidade de água utilizados em diferentes processos industriais são muito variados. As águas usadas para fins de *resfriamento* na indústria, por exemplo, têm larga tolerância, no que se refere às suas propriedades químicas. Mas em outros *requisitos* industriais, há uma variedade de especificações e exigidas e critérios estabelecidos e, muitas vezes, pequena *faixa* de tolerância.

Na literatura são encontrados diversas indicações de limites de tolerâncias para vários tipos de indústrias (ver TODD, 1959; LOGAN, 1965; CUSTÓDIO e LLAMAS, 1976; e MATTHESS, 1982).

Tendo em vista que se trata de um aquífero cárstico, estas águas não podem ser usadas em determinados processos industriais, porque elas são altamente *incrustantes*. As propriedades das águas de serem corrosivas ou incrustantes afetam muitas instalações industriais, especialmente os sistemas de *aquecimento*.

A *dureza* das águas pode ser, também, um fator limitante, principalmente, para utilização em caldeiras. Outra característica limitante é a *alcalinidade* que, normalmente, é elevada. Uma baixa alcalinidade é comumente exigida para águas nas indústrias de bebidas carbonatadas, cervejaria, cortumes e outras. Além disso, devem ser considerados os *sólidos totais dissolvidos*, o pH e as concentrações de *cloretos*, ferro e manganês, para definir o emprego da água em indústrias. Alguns desses dados não são disponíveis.

6.3. ZONEAMENTO DAS POTENCIALIDADES HÍDRICAS

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

Assim, a área pode ser dividida em várias zonas com características hidrogeológicas diferentes, conforme mostra a figura 6.5. Estas zonas foram delineadas a partir da integração dos resultados dos padrões estruturais, distribuição das feições morfoestruturais, parâmetros característicos do aquífero, análise multivariante dos parâmetros hidrogeológicos e dos estudos geohidroquímicos.

As principais características destas zonas são as seguintes:

a) ZONA COLÔNIA DO JAÍBA : é a de maior potencialidade da área, tendo em vista o intenso processo de carstificação a que foi submetida. Nesta zona, ocorrem as maiores densidades de dolinas e de fraturas. Além disso, há um condicionamento da carstificação (dolinas) ao fraturamento, isto é, nesta zona as dolinas estão normalmente dispostas ao longo de fraturas, refletindo em superfície os fluxos de águas subterrâneas. Convém salientar, no entanto, que esta zona não é homogênea do ponto de vista hidrogeológico, de modo que os parâmetros do aquífero variam em diversos pontos dentro da zona.

Os maiores coeficientes de armazenamento (até 0,03), por exemplo, encontram-se nos arredores da Colônia do Jaíba, córrego Escuro, na porção centro-leste e ao norte do Riacho Tapera.

As maiores transmissividades (superiores a $300 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) são encontradas no córrego Escuro, partes oeste e sudoeste da Colônia do Jaíba e no vale do riacho Tapera. Os poços com maiores capacidades específicas, de até $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$, estão perfurados a sudoeste da Colônia do Jaíba.

FIGURA 6.5 - SÍNTESE HIDROGEOLÓGICA

A espessura de carstificação, por outro lado, varia muito. No vale córrego Escuro o aquífero é pouco espesso (até 30 metros), e ao redor da Colônia do Jaíba a espessura de carstificação é da ordem de 50 metros. As maiores espessuras são encontradas na porção centro-leste, onde a carstificação é superior a 100 metros de profundidade. Finalmente, ao norte do riacho Tapera as espessuras do aquífero variam em torno de 60 metros.

Outra característica importante dessa zona é a ocorrência de várias áreas de recarga preferenciais de águas pluviais, que é uma decorrência natural do intenso processo de carstificação. Estas áreas de recarga são localizadas próximas aos rios Verde Grande e São Francisco, sugerindo que as águas têm pouco tempo de residência no aquífero, isto é, após a infiltração podem ser logo restituídas aos rios. Exceção, talvez, seja a área de recarga na porção centro-leste, que parece estar conectada a uma carstificação mais profunda. As águas infiltradas ali não são restituídas ao rio Verde Grande, mas sim, diretamente ao rio São Francisco. A forma das curvas piezométricas ratificam estas interpretações.

Esta zona também é alimentada por águas infiltradas na serra do Sabonetal e nas cabeceiras do córrego Escuro. Esta recarga escoia subterraneamente pelo vale desse córrego até o rio Verde Grande a montante e a jusante da Colônia do Jaíba.

Vale destacar que entre as estradas para Matias Cardoso e para Gado Bravo desenvolve-se uma faixa de permeabilidade preferencial (carste) que conduz o fluxo de água para o plano central da área.

É importante ressaltar ainda que em parte dessa zona, mais precisamente nas proximidades do povoado da Colônia do Jaíba, há indícios de poluição do aquífero decorrentes da ocupação humana.

b) ZONA PORÇÃO CENTRO-LESTE : esta zona foi bem destacada na análise multivariante dos parâmetros hidrogeológicos. Trata-se de uma transição entre a zona pouco favorável ao norte e a zona Colônia do Jaíba, mas que apresenta características próprias. Uma consequência disso é que os limites dessa zona são pouco precisos.

A característica principal dessa zona é a grande espessura da carstificação, que chega aos 100 metros na sua parte leste.

Os valores, normalmente altos, dos coeficientes de armazenamento e transmissividade variam muito. Esta variação é de 0.015 a 0.05 no armazenamento e de 52.10^{-5} a $200.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ na transmissividade. As capacidades específicas dos poços também variam muito, de $1,9.10^{-3}$ a $3,8.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$.

c) ZONA SERRA DO SABONETAL : situa-se na parte sudoeste da área, passando também pela serra Azul e pela região a noroeste da Colônia do Jaíba. Constitue-se de uma zona de recarga moderada, com armazenamento reduzido e pouca significação hidrológica. Na parte noroeste e sudeste dessa zona a situação muda para uma menor difusividade hidráulica e maior armazenamento de água, com circulação para o rio São Francisco através do vale do riacho Serraria, e para o rio Verde Grande, através do córrego Escuro.

As maiores transmissividades (até $230.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) são encontradas no baixo riacho Serraria, ao sul da serra Azul e no córrego Escuro.

As capacidades específicas dos poços aumentam da serra do Sabonetel em direção ao baixo riacho Serraria e ao córrego Escuro. A carstificação nesta zona foi branda, atingindo mais o vale do córrego Escuro. No riacho Serraria a circulação da água subterrânea é realizada essencialmente através das fraturas das rochas.

O aquífero tem espessura que varia entre 50 e 75 metros. No baixo córrego Escuro a espessura pode ser menor, da ordem de 30 metros.

d) ZONA NORTE DA ÁREA : localiza-se ao norte da área entre os rios Verde Grande e São Francisco e arredores do morro Catarino. É uma zona de difusividade hidráulica moderada, que armazena água em períodos chuvosos.

O coeficiente de armazenamento varia pouco, sendo da ordem de 0,03 a 0,04. Entre Matias Cardoso e o morro Catarino há uma diminuição no coeficiente de armazenamento em virtude da menor carstificação ali encontrada.

A água é descarregada nos rios Verde Grande e São Francisco, com gradiente inferior a 0,4 m/km.

A espessura do aquífero nesta zona varia entre 27 e 63 metros, e as transmissividades de $120 \cdot 10^{-5}$ a $270 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Em algumas partes desta zona existem grandes densidades de dolinas, quase sempre alinhadas ao longo de fraturas.

e) ZONA MORRO CATARINO : caracteriza-se por uma recarga moderada e tem pouca significação hidrológica. A pequena quantidade de água infiltrada em épocas chuvosas é transferida rapidamente para a zona norte da área e para porção central da área. Os níveis de águas nos poços variam muito após as chuvas. Esta variação chega a 32 metros, entre a época de estiagem e períodos de chuva, refletindo a grande permeabilidade vertical do aquífero naquela região.

Esta zona é caracterizada também pela pequena espessura do aquífero e alta transmissividade. As pequenas capacidades específicas dos poços variam muito em virtude das oscilações piezométricas entre as épocas secas e úmidas. As produtividades dos poços diminuem muito quando o nível da superfície piezométrica fica muito baixo nas épocas de estiagem.

f) ZONA DO RIO SÃO FRANCISCO : esta zona é influenciada pelas variações de nível do rio São Francisco. Consiste de uma faixa nas margens desse rio com uma largura de 2 a 5 km onde predominam aluviões.

A espessura do aquífero é da ordem de 30 metros , abrangendo as aluviões e o calcário carstificado sotoposto. É importante ressaltar que esta espessura varia muito de ponto a ponto da zona, como também variam muito as transmissividades e as capacidades específicas dos poços. Por outro lado, o armazenamento varia linearmente com a espessura do aquífero.

g) ZONA SERRA DO JAÍBA : esta denominação compreende três partes da área. Uma parte onde está localizada a serra do Jaíba, outra a sudoeste do povoado de Gado Bravo e finalmente a parte logo ao norte da serra Azul. Esta zona é a mais desfavorável do ponto de vista hidrogeológico. Possui baixa densidade de dolinas e fraturas, como também, pequeno armazenamento (0,004).

A transmissividade média calculada é de $80.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, mas devem-se esperar pequenos valores de transmissividades nesta zona (menores que $10.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

A média das capacidades específicas é de $1,2.10^{-3} \text{ m}^3/\text{s/m}$, mas um grande número de poços têm capacidades específicas menores que esta média.

Este zoneamento de potencialidades 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.

7. CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos serviram para ressaltar os aspectos fundamentais das condições hidrogeológicas e hidroquímicas da área e delinear as potencialidades dos seus recursos hídricos subterrâneos.

A análise estatística das feições morfoestruturais (fraturas e dolinas) serviu para evidenciar zonas com diferentes características do ponto de vista tectônico e de carstificação. Estas análises, realizadas através da correlação e integração das superfícies matemáticas de tendência das densidades de fraturas e de dolinas, permitem as seguintes conclusões:

- A associação de fraturas e dolinas independem, de uma maneira geral, do comprimento das fraturas ou do tamanho das dolinas. Isto é, grandes ou pequenas dolinas instalaram-se em fraturas regionais ou locais. É provável que esta associação tenha sido influenciada por outros fatores. Por exemplo : distância da dolina ao nível de base do aquífero, litologia local, topografia, intercomunicação entre as fraturas e outros.

- As zonas onde as dolinas estão predominantemente alinhadas ao longo de fraturas são : sul e sudoeste da Colônia do Jaíba, vales dos córregos Escuro e Vereda da Éguas, porção central da área e ao nordeste de Matias Cardoso.

- Na área ocorrem também fraturas que não são associadas a dolinas, principalmente nos locais de predominância de margas e siltitos. Por outro lado, existem dolinas que não estão alinhadas ao longo de fraturas.

- A carstificação, como era de se esperar, agiu diferentemente em vários pontos da área. Isto resultou um aquífero cárstico com zonas de diferentes potencialidades hidrogeológicas. As zonas com maiores densidades de dolinas, que refletem uma maior carstificação, situam-se nos arredores da Colônia do Jaíba, vales dos córregos Escuro e Vereda das Éguas, porção central da área e ao norte do riacho Tapera. As menores densidades de dolinas encontram-se principalmente nas zonas das serras do Sa

bonetal e Azul, no vale do riacho Serraria e ao sudoeste de Gado Bravo.

- Em determinadas partes da área os esforços tectônicos provocaram maiores deformações. Nestas partes são encontradas grandes densidades de fraturamentos e as fraturas são dispostas em várias direções. Podem-se destacar, por exemplo, a zona do morro Catarino e o vale do córrego Vereda das Éguas. Em outras partes existem grandes densidades de fraturas mas predominam algumas direções. São os casos do córrego Escuro, serra do Sabonetal, norte da Colônia do Jaíba e sudeste de Matias Cardoso. As menores densidades de fraturas ocorrem nas serras do Jaíba e Azul e a sudoeste de Gado Bravo.

- As principais drenagens da área são controladas por fraturamentos. Exceção pode ser feita ao rio São Francisco onde são foram observadas tais evidências. No baixo vale do riacho Serraria, por exemplo, a circulação de água subterrânea é feita essencialmente através de fraturas, uma vez que a carstificação ali não foi intensa.

- De uma maneira geral ocorrem pequenas e grandes fraturas distribuídas em toda a área. Contudo, em algumas partes predominam grandes fraturamentos. São os casos do extremo nordeste da área e do alto vale do riacho Serraria.

A análise espacial dos azimutes das fraturas e o estudo dos seus diagramas de frequência permitiram a delimitação de zonas de diferentes padrões estruturais e a identificação das direções predominantes das fraturas. Podem-se destacar algumas conclusões, tais como:

- Estatisticamente as fraturas que mais ocorrem na área são as longitudinais com azimutes de 30 a 40 graus e as diagonais com azimutes de 110 a 120 graus. Secundariamente aparecem as fraturas diagonais com azimutes entre 10 e 20 graus e as transversais com azimutes de 130 a 140 graus. Acrescenta-se que as transversais de 130 a 140 graus são, predominantemente, grandes fraturas.

- As fraturas associadas às dolinas mais frequentes são as diagonais de cisalhamento de 10 a 20 e 110 a 120 graus e as transversais de distensão de 140 a 150 graus. Verifica-se assim, que as fraturas longitudinais de compressão, que normalmente não atingem grandes profundidades, não são frequentemente relacionadas ao alinhamento de dolinas. Este tipo de deformação condicionou a instalação de um carste mais raso, como é o caso do vale do córrego Escuro. Por outro lado, como as fraturas diagonais e transversais normalmente são profundas, a carstificação ao longo dessas discontinuidades podem ter atingido grandes profundidades. Vale ressaltar ainda que as fraturas associadas às dolinas indicam os locais onde existem as maiores probabilidades da ocorrência e circulação de águas subterrâneas. No entanto, nos trabalhos de locação de poços na área deve-se primeiro considerar os efeitos das deformações estruturais e depois os da carstificação. Assim, deve-se dar prioridades às fraturas abertas (distensão) e entre estas escolher as relacionadas com dolinas.

- As diferentes direções das fraturas existentes na área, aliadas ao conceito de que a região em estudo é uma unidade tectônica sem evidências de grandes perturbações estruturais, ratificam o modelo de deformação estrutural proposto. Neste modelo um esforço tectônico de compressão, com direção entre 130 e 140 ou até 150 graus, provocou o quebramento das litologias gerando fraturas nas direções citadas anteriormente.

- O zoneamento obtido a partir dos azimutes, onde foram identificadas várias zonas com padrões estruturais próprios, pode ser uma importante ferramenta para prospecção hidrogeológica no campo. Assim, nas locações de poços para captação de água subterrânea em uma dessas zonas, por exemplo, as pesquisas seriam resumidas apenas naquelas fraturas com os azimutes que definiram o padrão da zona. Além disso, este zoneamento também pode ser usado como subsídio para definição do modelo hidrogeológico de uma região, entre outras possíveis aplicações.

A análise de tendência dos parâmetros do aquífero forneceu informações complementares ao estudo dos dados hidrogeológicos disponíveis. A integração de todas as interpretações

permitiu indentificar 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, ten

do 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 dos 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 obtêm as melhores informações.

O zoneamento de potencialidades hídricas da área elaborado a partir da integração de todas as interpretações oferece as condições para o planejamento de utilização, manejo e proteção dos recursos hídricos subterrâneos da área.

A metodologia aplicada nesta investigação permitiu traçar, em escala regional, as linhas gerais do comportamento hidrogeológico e hidroquímico na área de estudo. As interpretações e hipóteses levantadas basearam-se na escala de trabalho, nos dados disponíveis e nas observações de campo. Um maior detalhamento e confirmação será possível quando houver maior densidade e melhor distribuição dos dados de poços ou quando utilizarem-se mapas de trabalhos em escalas maiores.

As reservas avaliadas, conquanto a nível preliminar, podem ser consideradas como ordens de grandeza pessimistas. Os recursos exploráveis, estimados em $32.10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, são acessíveis em vista da pouca profundidade do aquífero. Contudo, considerando-se a heterogeneidade e anisotropia do aquífero a exploração das águas subterrâneas na área requer acurados estudos hidrogeoló-

gicos. Por sua vez, as reservas reguladoras variam em diversos locais da área. Isto ocorre porque várias zonas de infiltração estão situadas próximas aos rios Verde Grande e São Francisco. Assim, as águas pluviais infiltradas, nestas zonas, são logo restituídas aos rios.

A área estudada tem uma disponibilidade de recursos hídricos de grande potencial e em condições favoráveis de exploração através de poços. Convém notar que, em alguns locais, o aquífero tem capacidade de produção limitada ou outros fatores restritivos, tais como: níveis de água profundos, pequena espessura saturada, etc. Todavia, os poços nestes locais com restrições podem ser utilizados para abastecimentos pecuários ou urbanos de pequena demanda.

As águas subterrâneas da área, de uma maneira geral, não apresentam restrições ao uso agrícola, humano e a alguns tipos de indústrias. As principais restrições ao uso das águas são relativos a dureza e alcalinidade.

Não foram detectados graves problemas de poluição. Apenas nos arredores da Colônia do Jaíba e ao norte da serra Azul é que foram verificados alguns focos de contaminação decorrentes da ocupação humana. Este fato indica a grande vulnerabilidade do aquífero e sugere que é importante desde já serem observados, na região, os aspectos relacionados a conservação e preservação dos recursos hídricos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUFIRASSI, M. e MARINO, M.A. - 1983 - Kringing of water levels in the Souss aquifer, Morocco. *Mathematical Geology*, 15(4):537-551.
- ALMEIDA, F.F.M. - 1967 - Origem e evolução da plataforma brasileira. DNPM/DGM, (241):1-36, Rio de Janeiro.
- _____ - 1969 - Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador-BA. Anais da SBG, pp. 25-46.
- _____ - 1977 - O craton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7(4):349-364.
- _____; HASUI, Y. e BRITO NEVES, B.B. de - 1976 - The upper precambrian of South America. *Bol. IG., Inst. Geociências, USP*, 7:45-80.
- _____; HASUI, Y. e BRITO NEVES, B.B. de - 1977 - Províncias estruturais brasileiras. In: VIII Simp. Geol. do Nordeste da SBG, Campina Grande - PB, 1977. Atas, pp. 363-391.
- _____; HASUI, Y. e BRITO NEVES, B.B. de - 1981 - Brazilian structural provinces: An introduction. *Special Issue Earth Sc. Rev.*, 17(1/2):1-30.
- AMARAL, G. - 1976 - Teste de análise de superfícies de tendência para distribuições aleatórias. In: XXIX Cong. Bras. de Geologia, Ouro Preto-MG, Anais da SBG, 3:233-237.
- 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.
- AUDAZ, L. - 1971 - Caracterização parcial do regime de chuvas no Brasil. Departamento Nacional de Meteorologia, Rio de Janeiro, 49 pp.
- BAECHER, G.B. - 1983 - Statistical analysis of rock mass fracturing. *Mathematical Geology*, 15(2):329-348.
- BARBOSA, O. - 1963 - Geologia econômica e aplicada a uma parte do planalto central brasileiro. Prospec/DNPM, Rio de Janeiro.

ro (Inédito).

- BEASLEY, A.J. - 1981 - A computer program for printing geometrically accurate structural fabric diagrams. *Computer Geosciences*, 7(3): 215-227.
- BEDMAR, A.P.; SILVA, A.B. e ESCODINO, P.C.B. - 1980 - Perfila-gens de poços tubulares utilizando-se isótopos artificiais. In: I Cong. Bras. de Águas Subterrâneas, Recife-PE. Anais da ABAS, pp. 131-146.
- BETTENCOURT, J.S. e LANDIM, P.M.B. - 1974 - Estudo geoquímico de óxidos e elementos traços de rochas calcárias do Grupo Açungui pela análise fatorial. In: XXVIII Cong. Bras. de Geologia, Porto Alegre-RS. Anais da SBG, 2:153-160.
- BLANCHET, P.H. - 1957 - Development of fracture analysis as exploration method. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, 41(8):1748-1759.
- BOAVENTURA, R.S. et alii - 1976 - Mapeamento geomorfológico da área do Projeto RADAR. Secretaria de Planejamento e Coordenação Geral do Estado de Minas Gerais. Instituto de Geociências Aplicadas. 63 pp. Belo Horizonte.
- BOBÉE, B.; LACHANCE, M. e POTVIN, L. - 1981 - Analyse multivariée et interpretation geochemique de la variabilité spatiale de la qualité de l'eau des rivières du Québec Meridional. *Journal of Hydrology*, 53:95-116.
- BONHOMME, M.G. - 1976 - Mineralogie des fractions fines et datation Rb-Strontion dans le Groupe Bambui, Brésil. *Rev. Bras. Geociências*, 6(4):221-222.
- BRANCO, J.J. e COSTA, M.T. - 1960 - Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília. In: XIV Cong. Bras. Geol., Escola de Engenharia, Univ. Minas Gerais, Publ. nº 15, Belo Horizonte.
- BRAUN, O.P.G. - 1968 - Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambui. In: XXII Cong. Bras. Geol., Belo Horizonte-MG. Anais da SBG, pp. 219-222.
- BRITO NEVES, B.B. de - 1983 - O mapa geológico do nordeste oriental do Brasil, escala 1:1.000.000, São Paulo, 177 pp.

(Tese ao Concurso de Livre Docência do Departamento de Geologia Geral do IG-USP), circulação restrita.

CARRARA, A. - 1983 - Multivariate models for landslide hazard evaluation. *Mathematical Geology*, 15(3):403-426.

CARVALHO, R.T. e EPSTEIN, A. - 1967 - A geologia da folha Pirapora. Rel. Int. DNPM nº 118, 52 pp. Rio de Janeiro.

_____ e PFLUG, R. - 1968 - Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, MG. DGM/DNPM, Notas Prel. e Est. nº 142, 20pp. Rio de Janeiro.

CASTANY, G. - 1971 - Tratado práctico de las aguas subterráneas. Ediciones Omega S/A. Barcelona, 672 pp.

_____ - 1975 - Prospección y explotación de las aguas subterráneas. Ediciones Omega S/A. Barcelona, 738 pp.

CETEC-FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - 1981 - 2º Plano de desenvolvimento integrado do nordeste Mineiro. Série de Publicações Técnicas, CETEC/SPT-002, Belo Horizonte, 357 pp.

_____ - 1982 - Pesquisa e avaliação de recursos hídricos subterrâneos em Karst, por meio de sensores remotos - Relatório Final. Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia do Estado de Minas Gerais, 465 pp. Belo Horizonte. (Inédito).

COOLEY, W.W. e LOHNES, P.R. - 1962 - Multivariate procedures for the behavioral sciences. John Wiley Sons Inc., New York, 297 pp.

COSTA, P.C.G. - 1978 - Geologia das folhas de Januária, Mata da Jaíba, Japoré e Manga, Minas Gerais. In: XXX Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, PE. Anais da SBG, 1:83-97.

CRUZ, W.B. e MELO, F.A.F.de - 1968 - Estudo geoquímico preliminar das águas subterrâneas do nordeste do Brasil, SUDENE. Série: Brasil.SUDENE.Hidrogeologia, 19, 146 pp.

_____ e SILVA, A.B. - 1980 - Modelo de simulação digital do aquífero cárstico do Jaíba. In: I Cong. Bras. de Águas Subterrâneas, Recife-PE. Anais da ABAS, 1:359-374.

- CSLLANY, S.C. - 1965 - The hydraulic properties and yields of dolomite and limestone aquifers. IASH-UNESCO. In: Simposio de Dubrovnik, 1:120-138.
- CUNHA, F.L.S. - 1978 - Explorações paleontológicas no Pleistoceno do Rio Grande do Norte. Escola Superior de Agricultura de Mossoró, vol. LXX, 165 pp. Coleção Mossoroense, RN.
- CUSTÓDIO, E. e LLAMAS, M. R. - 1976 - Hidrologia Subterrânea. Ediciones Omega S/A, Barcelona, vol. I e II, 2359 pp.
- ; CRUZ, W.B.; SILVA, A.B. e ESCODINO, P.C.B. - 1981 - Datos de base para un modelo matematico de simulación del area de Jaiba-río São Francisco (Minas Gerais, Brasil). In: IV Asamblea Nacional de Geodésia y Geofísica, Zaragoza, España. Anais, 1:1-19.
- DARDENE, M.A. - 1978 - Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: XXX Cong. Brasileiro Geologia, Recife, PE. Anais da SBG, 2:597-610.
- DAVIS, J.C. - 1973 - Statistics and data analysis in Geology. John Wiley Sons Inc., New York, 549 pp.
- DELHOMME, J.P. - 1976 - Application de la théorie des variables regionalisées dans les sciences de l'eau. Paris, 160 pp. (Thèse de docteurs-ingenieur presentee à l'Université Pierre et Marie Curie, Paris), circulação restrita.
- DE LURY, D.B. - 1950 - Values and intergals of the orthogonal polynomials up to n-26. Univ. Toronto Press, Toronto, Canadá, 33 pp.
- DIXEY, F. - 1962 - Geology, geomorphology and groundwater hydrology: the problems of the aride zone. Aride Zone Research, vol. XVIII, Proc. Paris Symposium UNESCO, Paris, 44pp.
- ENSLIN, J.F. e BREDENKAMP, D.P. - 1963 - The value of pumping tests for the assessment of groundwater supplies in secondary aquifers in South Africa. Inter. Ass. of Scientific Hydrology Symposium, Berkeley, 37pp.
- ESCODINO, P.C.B. e SILVA, A.B. - 1980 - Aplicação de métodos de prospecção geo-elétricos na pesquisa de aquíferos cársticos. In: Cong. Bras. de Águas Subterrâneas, Recife-PE.

Anais da ABAS, 1:337-349.

- FISHER, R.A. - 1953 - Dispersion on a sphere. Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, 217:295-306.
- FOX, W. - 1967 - Fortran IV program for vector trend analysis of directional data. Computer Contribution 11. State Geological Survey. The University of Kansas, Lawrence, 11:1-35.
- FREEZE, R.A. e CHERRY, J.A. - 1979 - Groundwater. Prentice - Hall Inc., New Jersey, 604 pp.
- GARRELS, R.M. e CHRIST, C.L. - 1965 - Solutions Minerals and Equilibria. Harper e Row Co., New York, 449 pp.
- GARY, M.; MAFEE, R.Jr. e WOLF, C.L. - 1972 - Glossary of geology. Am. Geological Institute, 805 pp., Washington, D.C.
- HANSHAW, B.B.; BACK, W. e RUBIN, M. - 1965 - Carbonate equilibria and radiocarbon distribution related to groundwater flow in the Floridan limestone aquifer. USA. IASH-UNESCO, Hydrologie des roches fissurées, vol. II, pp. 601-614.
- 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.
- HEM, J.D. - 1959 - Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geol. Survey, Water-supply paper, nº 1473, 269 pp.
- HENDERSON, G. - 1960 - Air-photo lineaments in Mpanda area, western province, Tanganyika, Africa. Am. Ass. of Petroleum Geologists. Bull, 44(1):53-71.
- HERTZ, R. e AMARAL, G. - 1976 - Aplicação da análise de superfície de tendência a granulometria de fundo da lagoa dos Patos. RS. In: XXIX Cong. Bras. Geol., Ouro Preto, MG. Anais da SBG, 3:239-248.
- HOSTETLER, P.B. - 1964 - The degree of saturation of magnesium and calcium carbonate minerals in natural water. IASH-UNESCO, General Assembly of Berkeley 64:34-49.

- HOWARD, A.D. - 1967 - Drainage analysis in geologic interpretation a summation. Am.Ass.Petroleum Geologists, 51(11):2246-2259.
- HOWARTH, R.J. - 1967 - Trend-surface fitting to radom data: an experimental test. Am. Journal Science, 265(7):619-625.
- IBM - 1971 - IBM System/360 and system/370, IBM 1130 and 1800, subroutine Library. Mathematics, User's Guide, USA, 587 pp.
- IMBRIE, J. e PURDY, E.G. - 1962 - Classification of modern Bahamian carbonate sedments. 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.
- INDA, H.A.V. e BARBOSA, J.F. - 1978 - Texto explicativo para o mapa geológico do Estado da Bahia, escala 1:1.000.000. Governo do Estado da Bahia. Secretaria das Minas e Energia . Coordenação da Produção Mineral, 112 pp.
- JACOB, C.E. - 1940 - On the flow of water in an elastic artesian aquifer. Trans. Am. Geophys. Union, 21:574-586.
- JACOBSON, R.L. e LANGMUIR, D. - 1970 - The chemical history of spring waters in carbonate rocks. Groundwater, 8(3):5-9.
- JAMBU, M. - 1981 - Fortran IV computer program for rapid hierarchical classification of large data sets. Computers Geosciences, 7(3):297-310.
- JORESKOG, K.G.; KLOVAN, J.E. e REYMENT, R.A. - 1976-Geological factor analysis. Elsevier Co., 185 pp.
- KING, L.C. - 1956 - A geomorfologia do Brasil Oriental. Rev. Bras. de Geografia, ano 28, 18(2):53-70.
- KITANDIS, P.K. - 1983 - Statistical estimation of polynomial generalized covariance functions and Hydrologic applications. Water Resources Research, 19(4):909-921.
- KLOVAN, J.E. - 1966 - The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distributions. Journal of Sedimentary Petrology, 36:115-125.

- KOCK, Jr., G.S. e LINK, R.F. - 1970 - Statistical analysis of geological data. John Wiley Sons Inc., New York, vol. 1, 375 pp.
- KRUMBEIN, W.C. e GRAYBILL, F.A. - 1965 - An introduction to statistical models in geology. McGraw. Hill Co., New York, 475 pp.
- LANDIM, P.B.M. - 1979 - Análise estatística de dados geológicos. Centro de Estudos Geológicos-CEGEO, UNESP-Rio Claro, São Paulo, 102 pp (Brochura).
- ; PISANI, J.F. e BÓSIO, 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).
- LASA-SENSORIA - 1975 - Estudo de avaliação qualitativa e quantitativa dos recursos hidrogeológicos da área de Jaíba-MG. RURALMINAS-Fundação Rural Mineira-Colonização e Desenvolvimento Agrário, 191 pp. Belo Horizonte (Inédito).
- LLADÓ, N.L. - 1970 - Fundamentos de hidrogeologia carstica-Introdução a la geoespeleologia. Editorial Blume, Madrid, 269 pp.
- LOGAN, J. - 1965 - Interpretação de análises químicas de águas. USAID, Recife, 67 pp (Brochura).
- MARCHESE, H.G. - 1974 - Litoestratigrafia y petrologia del grupo Bambuí en los estados de Minas Gerais y Goias, Brazil. Rev.Bras.Geoc., 4:172-190.
- MATTHESS, G. - 1982 - The properties of groundwater. John Wiley Sons Inc., New York, 405 pp.

- MATTHEWS, G. - 1983 - Geology and groundwater resources of the Longford Tertiary basin. Tasmania Department of Mines. Geological Survey. Bull 59, 149 pp.
- MCCAMMON, R.B. - 1975 - Concepts in geostatistics. Springer - Verlag, 168 pp.
- MORGAN, K.H. - 1972 - The relationship between rainfall, geomorphology development and the occurrence of groundwater in Precambrian rocks of western Australia. In:XXIV Int. Geol.Congr., Montreal, 11:108-117.
- MOUTINHO DA COSTA, L.A. e ANGEIRAS, A.G. - 1970 - Novos conceitos sobre o Grupo Bambuí e sua divisão em tectonogrupos. Univ.Fed. Rio de Janeiro, Inst.Geoc., B.Geol.(5):3-34.
- _____ et alii - 1975 - Projeto leste do Tocantins/oeste do Rio São Francisco(LETOS). DNPM/CPRM/PROS-PEC, Relatório Final Integrado. Petropolis(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.
- NEUCHATEL, L.K. - 1969 - Statistical analysis of fractures (orientation and density). Geol.Rdsch., 59(1):125-151.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D. e POHN, H.A. - 1976 - Lineament linear lineation:some proposed new standars for old terms. Geol.Soc.Am.Bull., 87(10):1463-1469.
- OLIVEIRA, M.A.M. - 1967 - Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobrás, Série Ciência Técnica-Petróleo, (3):71-105.
- ORR, E.D. e DUTTON, A.R. - 1983 - An application of geostatistics to determine regional groundwater flow in the San Andres formation, Texas and New Mexico. Ground Water, 21(5):619-624.
- PARKS, J.M. - 1966 - Cluster analysis applied to multivariate geologie problems. Jour.Geol., 74:703-715.
- PAULSEN, S.; PAULINO, J.; BOSSUM, W. e LIMA, J.E.S. - 1974 - Ocorrência de rochas cristalinas no norte de Minas Gerais. In:XXVIII Cong.Bras.Geol., Porto Alegre. Anais da SBG. 4:183-188.

- PENTEADO, M.M. e RANZANI, G. - 1973 - Relatório de viagem ao Vale do rio São Francisco, Geomorfologia. USP, Instituto de Geografia, Publicação 40, São Paulo.
- PIPER, A.M. - 1944 - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. Trans.Am.Geophysical Union, 25:914-923.
- RASMUSSEN, W.C. - 1963 - Permeability and storage of heterogeneous aquifers in the United States. Int.Ass. of Scientific Hydrology Symposium, Berkeley, 64:317-325.
- REBOUÇAS, A.C. - 1976 - Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná - análise de pré-viabilidade. São Paulo, 143 pp. (Tese de Livre Docência apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo), circulação restrita.
- RENNÓ, C.V. - 1974 - Uso de imagens de radar no mapeamento de superfície de aplainamento: um exemplo do nordeste de Minas Gerais. In: Cong.Bras.de Geografia. Anais 3:67-75.
- RIMANN, E.A. - 1917 - A Kimberlita no Brasil. Anais Escola de Minas de Ouro Preto, 15:27-32.
- ROYLE, A.G.; BROOKER, P.I.; CLARK, I.; GRANT, D.C.; JOURNEL, A.G.; MOUSSET-JONES, P.; PARKER, H.; RENDU, J.M. e SANDEFUR, R.J. - 1980 - Geostatistics. McGraw-Hill Inc., New York, 168 pp.
- SABOURIN, R. - 1983 - Geostatistics as a tool to define various categories of resources. Mathematical Geology, 15(1):131-143.
- SCHEIDEGGER, A.E. - 1965 - On the statistics of the orientation of bedding planes grain axes and similar sedimentological data. US Geol.Survey.Prof.paper, 525-C:164-167, USA.
- SCHOELLER, H. - 1962 - Les eaux souterraines. Ed.Masson, Paris, 429 pp.
- _____ - 1965 - Hydrodinamique dans le karst, hydrologie des roches fissurées. Colloque du Dubrovnik. Int.Ass.Hydrol. Scien., 1:3.20.
- _____ - 1969 - Pollution artificielle des eaux souterraines.

- Bull. Inter. Ass. Hydrol. Scien., 14(3):179-183.
- SCHOELLER, M. - 1963 - Recherches sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. Imp. E. Drouillard Bordeaux, 231 pp.
- SCHOLL, W. U. - 1972 - Der Sudwestliche randbereich der Espinhaço Zone, Minas Gerais, Brasilien. Geol. Rdsch., 61(1):201-216.
- SERRA, A. - 1955 - Atlas climatológico do Brasil. Instituto Nacional de Meteorologia, vol. 1, Rio de Janeiro.
- SILVA, A.B. e ESCODINO, P.C.B. - 1980 - Desenvolvimento de um método de perfilagem de poços tubulares utilizando-se traçador químico. In: I Congr. Bras. de Águas Subterrâneas, Recife. Anais da ABAS, 1:119-129.
- SOARES, P.C.; BARRETO, M.L.K. e REDAELLI, R. - 1981 - Aplicação da análise morfoestrutural em semi-detalle com fotos aéreas na bacia do Paraná. In: III Simp. Regional de Geol., Curitiba, 13 pp.
- _____; BARCELLOS, P.E.; CSORDAS, S.M.; MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G. e MENESES, P.R. - 1982 - Lineamentos em imagens de Landsat e radar, suas implicações no conhecimento tectônico da bacia do Paraná. In: II Simp. Bras. de Sensoriamento Remoto, Brasília, Anais 22 pp.
- SOKAL, R.R. e SNEATH, P.H.A. - 1963 - Principles of numerical taxonomy. W.H. Freeman Co., New York, 239 pp.
- SPIX, J.B. e MARTIUS, C.F.P. VON - 1823 - Reise in Brasilien in 1817 bis 1820 gemacht und beschrieben. v.3, Atlas 1, in folio Gedruckt bei M. Lindauer, München - 1823-1831. "Através da Bahia". Trad. M. Pirajá da Silva e P. Wolf, Nacional-Brasileira, Bibli. Pedag. Bras. Série 5, V118, 342 pp. Cia Editora Nacional, 1938, São Paulo.
- SPSS-STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCES - 1975-User's Guide. Second Edition, McGraw-Hill Inc., New York, 675 pp.
- STEINMETZ, R. - 1962 - Analysis of vectorial data. Jour. Sed. Pet., 32(4):801-812.

- STUMM, W. e MORGAN, J.J. - 1970 - Aquatic chemistry - An introduction emphasizing chemical equilibria in natural water. Willey-Intersciences Co., New York, 583 pp.
- THEIS, C.V. - 1935 - The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans.Am.Geophys.Union, 16:519-524.
- THORNTHWAITE, C.W. - 1958 - An approach toward a rational classification of climate. Geogr.Rev., 38:55-94.
- _____ e MATHER, J.R. - 1955 - The water budget and its use in irrigation. Water the year book of agriculture, Washington. US Department of Agriculture, 290 pp.
- TILL, R. - 1974 - Statistical methods for the earth scientist-an introduction. Ed.Macmillan, New York, 154 pp.
- TODD, D.K. - 1959 - Hidrologia de Águas Subterrâneas. Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 319 pp.
- TOTH, J. - 1973 - Properties and manifestations of regional ground water movement. In:XXIV Int.Geol.Congr., Montreal, 11:153-163.
- WALTON, W.C. - 1963 - Estimating the infiltration rate of a stream-bed by aquifer-test analysis. Int.Ass. of Scien. Hydrology Symposium, Berkeley, 63:409-418.
- _____ - 1970 - Groundwater resource evaluation.McGraw - Hill Inc., New York, 664 pp.
- WILKES, S.S. - 1962 - Mathematical statistic. John Wiley Sons Inc., New York, 252 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.