

EDUARDO CHEMAS HINDI

**CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA E HIDROGEOLÓGICA
DAS FONTES CÁRSTICAS DAS BACIAS DOS RIOS
TUMIRI, ÁGUA COMPRIDA, FERVIDA
E DAS ONÇAS - COLOMBO, PR**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Geologia (Área de Concentração: Geologia Ambiental), Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho

Co-orientadores:

Prof. Dr. Donizeti Antônio Giusti

Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

CURITIBA

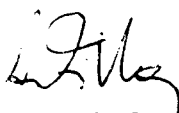
1999

TERMO DE APROVAÇÃO

EDUARDO CHEMAS HINDI

**Caracterização Hidroquímica e Hidrogeológica das Fontes
Cársticas das Bacias dos Rios Tumiri, Água Comprida, Fervida
e das Onças – Colombo – Pr**

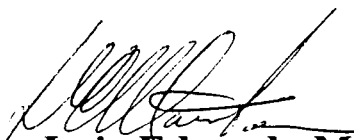
**Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em
Geologia, com área de concentração em Geologia Ambiental, da
Universidade Federal do Paraná, pela comissão formada pelos
Professores:**



Presidente: Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho



Prof. Dr. Uriel Duarte



Prof. Dr. Luiz Eduardo Mantovani

Curitiba, julho de 1999

A meus pais e irmãos

A minha esposa

A meus filhos

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho e ao Geólogo Álvaro Amoretti Lisboa, Coordenador do “Projeto Karst” por terem possibilitado a minha participação no referido projeto e por terem permitido a utilização dos dados, sem o que não seria possível a elaboração desta dissertação.

Ao Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho, pela orientação deste trabalho, pelas correções, sugestões e estímulos nas horas difíceis.

Ao Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt, pelas sugestões e discussões sempre esclarecedoras, bem como pela correção do texto.

Ao Prof. Dr. Augustinho Rigotti e ao Prof. Dr. Luíz Eduardo Mantovani, pelas sugestões e correções deste texto.

Aos colegas de jornadas pelo carste, Alessandra, Andréa, Lílian, Lydio e Stefan e aos colegas do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas, Alexsandro, Nicole e Zuleika, pela solidariedade durante o levantamento e análise de dados.

Às bibliotecárias do Centro Politécnico, pelas correções, pela amizade e pelo apoio na obtenção do material bibliográfico.

À Patrícia, Felipe e Tiago, companheiros sempre presentes, compreendendo, estimulando, sugerindo, corrigindo e vibrando em cada etapa vencida.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	4
2.1 LOCALIZAÇÃO.....	4
2.2 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS.....	4
2.3 CLIMA.....	7
2.4 VEGETAÇÃO.....	8
2.5 SOLO.....	9
2.6 GEOMORFOLOGIA.....	11
2.7 GEOLOGIA.....	11
2.8 HIDROLOGIA.....	14
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 HIDROQUÍMICA.....	16
3.1.1 Análises físico-químicas.....	17
3.1.1.1 Método de amostragem.....	18
3.1.1.2 Parâmetros analisados e procedimentos analíticos.....	19
3.1.1.3 Princípios de Termodinâmica.....	20
3.1.1.4 Relações iônicas características.....	26
3.1.2 Diagramas geoquímicos e classificação geoquímica da água.....	28
3.1.2.1 Classificação segundo a importância dos ânions e cátions.....	28
3.1.2.2 Representação gráfica de dados hidroquímicos.....	29
3.2 HIDROGEOLOGIA.....	31
3.2.1 Cadastramento de fontes.....	31
3.2.2 Nomenclatura das fontes.....	32
3.2.3 Medição de descarga das fontes.....	33
3.2.3.1 Medição direta (Método Volumétrico).....	33

3.2.3.2 Diluição química (Método de Integração).....	34
3.2.3.3 Velocidade x Área.....	36
3.2.4 Classificação das fontes.....	36
3.2.4.1 Quanto ao tipo de força que causa a emergência da água.....	37
3.2.4.2 Caráter das aberturas da rocha por onde a água emerge.....	38
3.2.4.3 Caráter litológico do aquífero.....	38
3.2.4.4 Quanto a variações sazonais, magnitude e variabilidade de descarga...	38
3.2.4.4.1 Quanto a variações sazonais de descarga.....	39
3.2.4.4.2 Quanto a descarga.....	39
3.2.4.4.3 Quanto a variabilidade.....	40
3.2.4.5 Quanto a natureza do fluxo subterrâneo.....	41
3.2.4.6 Classificação quanto a propriedades físicas e químicas.....	41
3.2.4.6.1 Quanto a temperatura da água.....	41
3.2.4.6.2 Sólidos totais dissolvidos (STD)	43
3.2.4.6.3 Grau de mineralização.....	44
3.2.4.6.4 Dureza total.....	45
3.2.4.6.5 Classificação quanto à composição mineral.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 HIDROQUÍMICA.....	49
4.1.1 Apresentação de dados hidroquímicos.....	49
4.1.2 Avaliação dos dados.....	50
4.1.3 Estatística descritiva.....	52
4.1.4 Caracterização química da água.....	54
4.1.4.1 Parâmetros hidroquímicos.....	54
4.1.5 Índice de saturação de calcita e relações interiônicas.....	78
4.1.6 Classificação geoquímica da água.....	84
4.2 HIDROGEOLOGIA.....	87
4.2.1 O aquífero cárstico e a ocorrência de fontes.....	87
4.2.2 Cadastramento e classificação das fontes.....	107

5 CONCLUSÕES.....	115
ANEXO I.....	118
ANEXO II.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	VALORES DE PRECIPITAÇÃO (mm).....	8
TABELA 2 -	TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	10
TABELA 3 -	PARÂMETROS ANALISADOS E MÉTODOS ANALÍTICOS.....	19
TABELA 4 -	CLASSIFICAÇÃO PELA IMPORTÂNCIA DE ÂNIONS E CÁTIOS.....	29
TABELA 5 -	CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA (K).....	29
TABELA 6 -	ESCALA DE MAGNITUDE DE FONTES.....	40
TABELA 7 -	ESCALA DE VARIABILIDADE.....	40
TABELA 8 -	CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O CONTEÚDO DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS.....	44
TABELA 9 -	CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE MINERALIZAÇÃO..	44
TABELA 10 -	CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE DUREZA.....	46
TABELA 11 -	ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ÁGUAS DAS FONTES.....	53
TABELA 12 -	CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS DAS FONTES..	86
TABELA 13 -	CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES CÁRSTICAS CADASTRADAS NAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
FIGURA 2 -	HORTAS E HABITAÇÕES RURAIS CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DA FERVIDA – COLOMBO, PR.....	6
FIGURA 3 -	ESTRATIGRAFIA DO GRUPO AÇUNGUI.....	12
FIGURA 4 -	VISTA DA REGIÃO DE BOTIATUMIRIM (COLOMBO, PR), DESTACANDO-SE ELEMENTOS MORFO-ESTRUTURAIS CARACTERÍSTICOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	15
FIGURA 5 -	RELAÇÃO ENTRE CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA, STD, HCO_3^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} E DUREZA TOTAL.....	56
FIGURA 6 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA DUREZA TOTAL NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	58
FIGURA 7 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DE TOTAL DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS (CALCULADO), PARA AS BACIAS DOS RIOS TUMIRI E FERVIDA.....	61
FIGURA 8 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE HCO_3^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	64
FIGURA 9 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Cl^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	67
FIGURA 10 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE NO_3^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	70
FIGURA 11 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Ca^{+2} NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	73
FIGURA 12 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Mg^{+2} NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	74
FIGURA 13 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Na^+ NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	76

FIGURA 14 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE K^+ NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	77
FIGURA 15 -	VARIAÇÃO TEMPORAL DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	80
FIGURA 16 -	RELAÇÃO ENTRE AS VARIAÇÕES TEMPORAIS DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA, PRECIPITAÇÃO E VAZÃO DE FONTES DA BACIA DO RIO FERVIDA.....	81
FIGURA 17 -	RELAÇÃO ENTRE A PRESSÃO PARCIAL DE CO_2 E O ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA.....	82
FIGURA 18 -	RELAÇÃO rMg^{+2}/rCa^{+2}	83
FIGURA 19 -	RELAÇÃO rNa^+/rK^+	83
FIGURA 20 -	RELAÇÃO rNO_3^-/rCl^-	84
FIGURA 21 -	DIAGRAMA DE PIPER DE ÁGUA DAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, DAS ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.....	85
FIGURA 22 -	AFLORAMENTO DE DOLOMITO APRESENTANDO FATURAS E CANAIS DE DISSOLUÇÃO (COLOMBO, PR).....	88
FIGURA 23 -	POÇO SURGENTE (P-14), NA BACIA DO RIO TUMIRI, PRÓXIMO À ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA – SANEPAR.....	90
FIGURA 24 -	HISTOGRAMAS DE PROFUNDIDADES DE ENTRADAS DE ÁGUA NOS POÇOS PERFORADOS NAS BACIAS DOS RIOS TUMIRI E FERVIDA.....	91
FIGURA 25 -	GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P - 02 (FERVIDA) E P - 07 (FERVIDA).....	96
FIGURA 26 -	GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P - 13 (FERVIDA) E P - 15 (TUMIRI).....	97
FIGURA 27 -	GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P - 04 E P - 12 (TUMIRI).....	98
FIGURA 28 -	DIAGRAMA DE PIPER DAS AMOSTRAS DE ÁGUA COLETADAS NOS POÇOS TUBULARES P-01, P-12, P-14 (FERVIDA) E P-01, P-03, P-04, P-08 E P-13 (TUMIRI).....	100

FIGURA 29 -	MODELO ESQUEMÁTICO DO FLUXO DA ÁGUA ATRAVÉS DO AQUIFERO E DA FORMA DE OCORRÊNCIA DE FONTES	102
FIGURA 30 -	FONTE DO TIPO FERVENTE (F-COFE-11), COM BLOCO DE DIABÁSIO E AREIA ESCURA (MAGNETITA) NO FUNDO. PODE-SE VER MARCAS CIRCULARES FORMADAS PELA ASCENSÃO DA ÁGUA (COLOMBO, PR).....	103
FIGURA 31 -	FONTE FORMADA PELA INTERCEPTAÇÃO DE CANAL DE DISSOLUÇÃO PELA ENCOSTA DO VALE (F-COFE-19). O SECAMENTO DESSA FONTE FOI CAUSADO PELA EXPLOTAÇÃO DO POÇO P-01 (TUMIRI) , COLOMBO, PR.....	103
FIGURA 32 -	REGULARIZAÇÃO DE FONTES POR MEIO DE BARRAGENS (a) OU DE GALERIAS (b).....	106

RESUMO

As fontes cársticas tem importância fundamental para o abastecimento de água para consumo doméstico e irrigação nas áreas urbana e rural de Colombo, PR. Apesar dessa importância, não havia sido realizado qualquer estudo para conhecer suas propriedades hidrogeológicas e químicas. Além disso, a exploração do aquífero cárstico para o abastecimento de água de Curitiba, por poços perfurados nas vizinhanças dessas fontes, vem causando impactos ambientais como subsidências, colapsos de terreno e diminuição ou secamento de fontes. Os objetivos deste estudo são cadastrar, classificar e caracterizar as fontes cársticas das bacias dos rios Fervida, Tumiri, Água Comprida e Onças, em função de suas propriedades hidrogeológicas e hidroquímicas. O aquífero cárstico que alimenta essas fontes é constituído pelos mármores dolomíticos da Formação Capiru do Grupo Açungui. As rochas carbonáticas formam os fundos aplainados dos vales sendo limitadas por faixas de filitos e cortadas por diques de diabásio. Os diques representam o controle estrutural para a ocorrência das fontes, interrompendo o fluxo subterrâneo e forçando a emergência de água na superfície. A maior parte das fontes cadastradas são do tipo fervente que formam, geralmente, um pequeno lago, onde a água ao surgir agita a areia do fundo, dando a impressão de estar fervendo. Em menor número, ocorrem fontes de fratura, onde estas são interceptadas por encosta de vale. A recarga do aquífero é, principalmente, autogênica, ocorrendo pela percolação de águas de chuva através do solo sobrejacente às rochas carbonáticas. O intervalo entre precipitações e a variação do nível da água medido em poços tubulares situados em compartimentos não explorados do aquífero, é de 60 a 90 dias na bacia do rio fervida e 90 a 120 dias na do Tumiri. A diferença desses intervalos se deve à maior espessura de inconsolidados que cobre o aquífero na bacia do Tumiri. Foram cadastradas 52 fontes, sendo 17 oriundas de filitos ou da cobertura de inconsolidados e 35 do aquífero cárstico. Destas últimas, foram selecionadas 16 para estudo detalhado das propriedades hidroquímicas e das características de descarga. Foram coletadas 122 amostras de água para análise físico-química no período de abril a novembro/1997 e em março/1998. Os resultados dessas análises serviram de base para a classificação geoquímica das águas, para o cálculo dos índices de saturação de calcita e dolomita e para avaliar a qualidade química da água. As águas das fontes são pouco mineralizadas e apresentam grau de dureza variando de moderadamente dura a dura. Segundo a classificação geoquímica por íons dominantes, são águas do tipo bicarbonatadas-magnesianas e as propriedades físico-químicas analisadas atendem aos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria N°36/1990 do Ministério da Saúde. Embora a concentração do íon nitrato esteja abaixo dos limites de potabilidade, ele ocorre em todas as fontes monitoradas. As fontes da bacia do Tumiri apresentam as concentrações mais elevadas de nitrato, cloreto e sódio, o que pode ser indicativo de contaminação por efluentes domésticos. As águas das fontes estão próximas do nível de saturação em calcita e dolomita na maior parte das amostras, passando a saturadas em consequência de variações sazonais. De acordo com as propriedades hidráulicas, as fontes apresentam fluxo artesianos, são perenes e, quanto a variabilidade, são variáveis (1), sub-variáveis (9), e constante (1). Com respeito à magnitude de descarga são classificadas em: 4ª (2), 5ª (8) e 6ª (1). A descarga média das fontes varia de 1 a 25 l/s.

ABSTRACT

Karstic springs are important sources of water for domestic and irrigation supplies in the rural and urban area of Colombo, Paraná State, Brazil. In spite of their importance for the local communities, these springs have never been investigated in order to know their hydrogeological and chemical properties. Besides, the exploitation of groundwater by tubular wells drilled in the neighborhood of those springs for the water supplying of Colombo and part of the city of Curitiba, has caused environmental impacts such as, ground collapses and drying or decreasing of spring flows. The main goals of the current study are to inventory, classify and characterize the karstic springs in the Fervida, Tumiri, Água Comprida and Onças basins (Colombo, PR), according to their hydrogeological and hydrochemical properties. The karstic aquifer consist in homogeneous dolomitic marble from Capiru Formation (Açungui Group), interbedded with phillites and cut by diabase dikes, forming a reticulate framework. The geologic structure is extremely important for the occurrence of springs, that are related to the diabase dikes that interrupt the water flow trough the aquifer, forcing the water upwards. Most of the karstic springs issue from tubular solution openings forming, at the bottom of flat valleys, the so called boiling springs. Others, in a minor number, issue from fractures at the valley walls. The groundwater is recharged mainly by precipitation percolating through the soil zone. The gap between precipitation and variation of the water level measured in tubular wells, is estimated in 60 to 90 days for the Fervida basin and 90 to 120 days for the Tumiri basin. The soil thickness that cover the aquifer explain the reason for that difference. 52 springs were inventoried in the study area, 35 issue from carbonatic rocks and 17 issue from phillites or from the soil coverage. 16 karstic springs were selected for detailed studies of the chemical properties and discharge characteristics. From April to November/1997 and March/1998, 122 water samples were collected for chemical analysis, which results are the basis for the geochemical classification, calcite and dolomite saturation index calculation, and chemical quality evaluation. According to the geochemical classification by predominant ions, the waters are bicarbonate-magnesian type. The water is low mineralized, moderately hard to hard and the chemical constituents are within the drinkable water standard stated by the Portaria N°36/1990 - MS. Although the nitrate concentration is below the limit for drinkable water, it is present in all observed springs. The springs issuing at the Tumiri basin show the highest nitrate, chloride and sodium contents which can be an indication of contamination by waste waters. Almost all the samples were nearly saturated with respect to calcite and dolomite and show seasonal variation. According to the hydraulic properties, the springs are artesian type, perennial; 1 is variable, 9 are sub-variable and 1 is constant. With respect to the magnitude of discharge, 2 springs are of 4th magnitude, 8 are of 5th and 1 is of 6th. The average discharge of the monitored springs varies from 1 to 25 l/s.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico e social de uma comunidade depende do abastecimento de água em quantidade e qualidade capazes de satisfazer suas necessidades alimentares, higiênicas e econômicas. A deterioração da qualidade dos mananciais ou a sua insuficiência para atender as demandas locais, faz com que se busque pontos de captação cada vez mais afastados dos centros consumidores. Isso implica na elevação dos custos de captação, adução e tratamento.

Atualmente, o abastecimento da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), com águas superficiais, é feito pela captação da barragem do rio Passaúna e, na bacia do Alto Iguaçu, pela captação direta dos rios Iraí e Iguaçu. A captação total desses mananciais é de $5,4 \text{ m}^3/\text{s}$, volume insuficiente para atender uma demanda de $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$. O crescimento da RMC, a uma taxa de cerca de 4% ao ano, projeta uma demanda superior a $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para o ano 2000 (DALARMI, 1995).

A exploração dos recursos hídricos armazenados no aquífero cárstico situado ao norte de Curitiba, complementa parte do déficit do abastecimento da RMC. Esse aquífero tem grande valor estratégico, pela proximidade e posição mais elevada que o centro abastecido, permitindo o aproveitamento do potencial gravitacional para o transporte da água.

As regiões cársticas, no entanto, são áreas instáveis do ponto de vista geotécnico e a exploração de águas subterrâneas, sem o conhecimento adequado das características hidrogeológicas do sistema aquífero, podem causar problemas sócio-econômicos e ambientais. Dentre eles se destacam subsidências ou colapsos

do terreno com perdas materiais e humanas, rebaixamento do nível de água subterrânea ao longo dos anos, diminuindo a produção dos poços e reduzindo a umidade do solo, com reflexos na vegetação natural ou cultivada e, interferência em mananciais de superfície perturbando os ecossistemas relacionados.

O programa de perfuração de poços para exploração do aquífero cárstico, denominado "Projeto Karst Emergencial", concebido para resolver de forma imediata os problemas de abastecimento de água da RMC, apresentava uma meta inicial de 600 l/s. A entrada em operação de alguns desses poços causou problemas de ordem ambiental e sócio-econômicos como colapsos de terreno, rachaduras em residências e secamento de fontes.

As fontes da região de Colombo são mencionadas pela primeira vez, por GONSALVES (1936) e, apesar de representarem um importante fator de desenvolvimento para a região, nunca foram descritas ou analisadas.

Neste trabalho são estudadas as fontes do aquífero cárstico que ocorrem nas microbacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças, município de Colombo (RMC). Essas microbacias apresentam tipos distintos de uso do solo. A do rio Tumiri tem ocupação urbana predominante e as demais têm ocupação urbana pouco densa e atividade agrícola intensa. Nas microbacias do Água Comprida, Fervida, Onças e do Tumiri, na região de Botiatumirim, a água utilizada na agricultura (irrigação, pulverizações e lavagem de hortaliças), criação de animais ou para abastecimento doméstico, é bombeada diretamente das fontes ou dos rios sustentados por elas. Levantamento feito na região, envolvendo 43 produtores rurais, mostra que mais de 80 % dos agricultores usam água das fontes ou dos rios

para fins agrícolas, mais de 60 % para criação de animais e mais de 60 % usam água das fontes para abastecimento doméstico (EMATER, 1997).

Pela importância que representam para o abastecimento doméstico e uso agrícola da comunidade local, procurou-se coletar e avaliar dados sobre a quantidade e qualidade da água das fontes, com vistas ao aproveitamento sustentável desses mananciais.

Os objetivos deste trabalho foram:

- Cadastrar e classificar as fontes do aquífero cárstico existentes na área de estudo;
- estudar as características hidrogeológicas e a forma de ocorrência das fontes;
- descrever as características hidroquímicas das fontes;
- comparar as características hidrogeológicas e hidroquímicas das fontes das diferentes microbacias.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo situa-se no município de Colombo, Região Metropolitana de Curitiba (RMC), sendo limitada pelos paralelos 25° 14' 33" S e 25° 17' 44" S e meridianos 49° 09' 09" W Gr e 49° 14' 34" W Gr (FIGURA 1). O acesso à área é feito pela estrada nova de Colombo (Rodovia da Uva), que liga Curitiba a Colombo, num percurso de 15 km.

As nascentes estudadas localizam-se nas microbacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças. Parte da bacia do rio Tumiri está situada na sede do município e parte na região de Botiatumirim. As demais bacias estão situadas na zona rural, nas comunidades Morro Grande, Poço Negro, Serrinha, São João-Fervida e Rio das Onças. O acesso a essas comunidades é feito por estrada parcialmente asfaltada que liga Colombo à Várzea do Capivari e Bacaetava.

2.2 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

A atividade econômica do município está fundamentada na agricultura, mineração e industrialização de calcário.

O município tem um total de 153.698 habitantes, sendo 145.988 na área urbana e 7.710 na rural (IBGE, 1997). Levantamento realizado pela EMATER (1997), nas comunidades rurais situadas nas microbacias dos rios Tumiri, Fervida e Onças, mostra que nessa região existem 123 propriedades rurais com área média de 4,94 ha, utilizando mão-de-obra familiar como força de produção. O padrão das moradias rurais, principalmente as da região da Fervida (FIGURA 2), mostra que o nível

econômico dos agricultores da região é muito superior ao de outras áreas agrícolas minifundiárias do Brasil.

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.

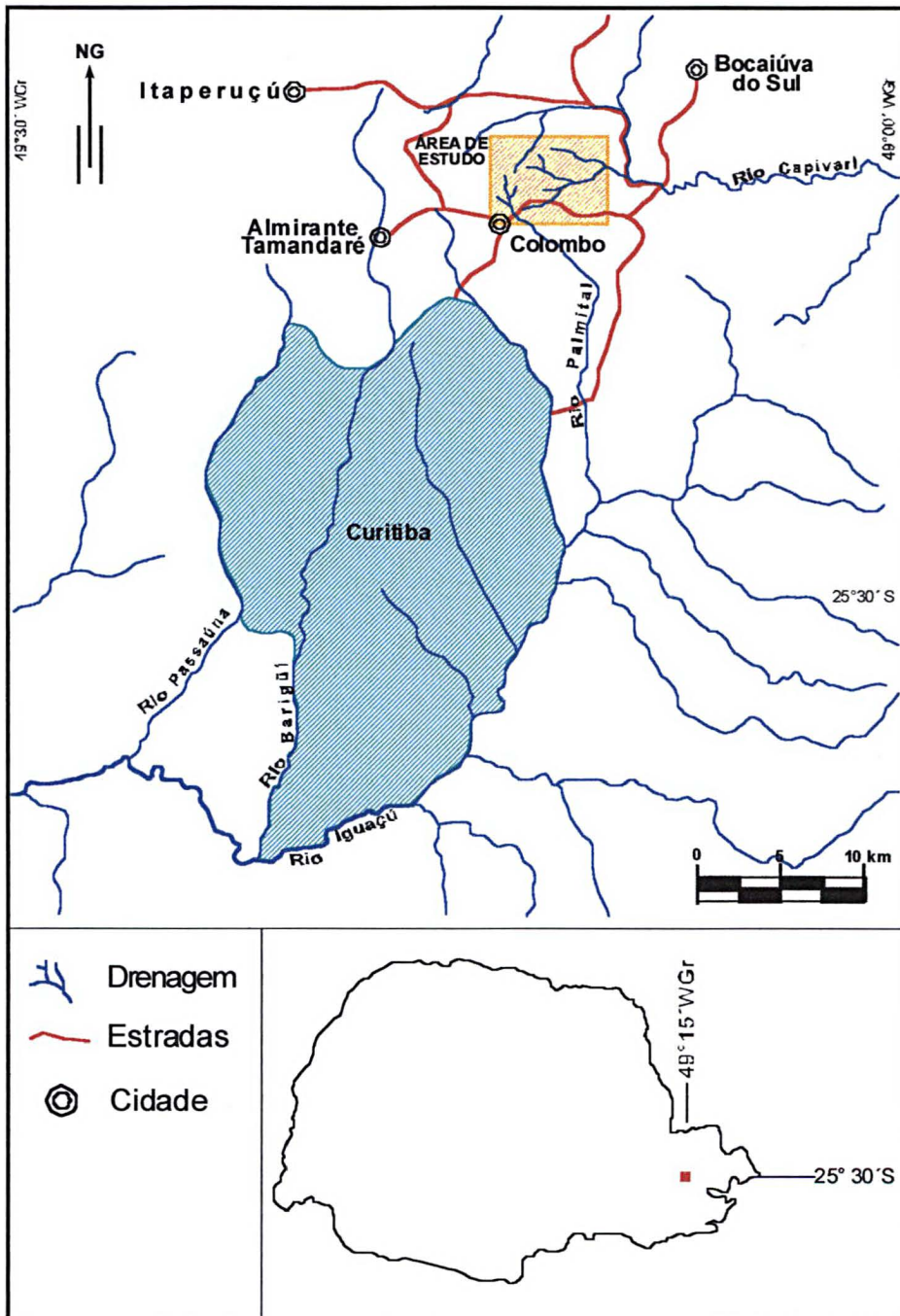


FIGURA 2 - HORTAS E HABITAÇÕES RURAIS CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO DA FERVIDA – COLOMBO, PR.



O município de Colombo é o maior produtor de hortaliças da RMC, com produção de 70.000 t/ano, equivalente a 7% da produção total de hortaliças do Estado do Paraná. Produz anualmente cerca de 160 t de produtos artesanais, 750.000 l de vinho, sendo o maior produtor de uva do Paraná, com 1.200 t/ano e o maior produtor nacional de couve-flor (COLOMBO. Prefeitura Municipal, 1996; MASCHIO, 1997).

A madeira produzida nas áreas reflorestadas com bracatinga (*Mimosa scabrella*), *Pinus* e *Eucalyptus* tem importância para a economia local sendo aproveitada, principalmente, como fonte de energia para as indústrias de calcário, restaurantes e padarias da RMC. O setor mineral responde pela exploração de calcário para a produção de cal virgem, cal hidratada e agrícola. Outras atividades rurais desenvolvidas na região, mas com menor peso na economia, são a piscicultura, cultivo de erva-mate e pecuária leiteira.

Em 1998, o governo municipal começou a investir no patrimônio espeleológico da região, para fins de turismo e lazer, com a implantação do Parque de Bacaetava.

2.3 CLIMA

O clima da região de Colombo é classificado, segundo Koeppen, como sendo do tipo Cfb, caracterizado por ser pluvial quente-temperado (C), sempre úmido (f), com temperaturas médias inferiores a 22 °C no mês mais quente e no mínimo 4 meses com temperaturas médias superiores a 10 °C (b) (MAACK, 1981).

A temperatura média anual, calculada com dados obtidos na estação climatológica da EMBRAPA *Florestas* (Lat.: 25° 20' S; Long.: 49° 14' W Gr; alt.: 915 m), no período de janeiro/97 a dezembro/98, é 16,9 °C. A temperatura média máxima é 28,9°C e a média mínima é 10,8 °C.

Segundo MAACK (1981), na região de Curitiba predominam ventos vindos dos quadrantes setentrionais (N, NE e NW). São ventos portadores de chuva e correspondem a 43,0% dos dias com vento. Os ventos dos quadrantes meridionais (S, SE e SW), correspondem a 30,6%. Os ventos marítimos de E e SE se elevam na passagem pela Serra do Mar, provocando chuvas orográficas. Os ventos de W correspondem a 7,9% e as calmarias a 15,5%.

As precipitações média, máxima e mínima mensal, calculadas por VAINÉ (1998), utilizando registros feitos no período de 1954 a 1997, em sete postos pluviométricos, dois deles situados no município de Colombo e os demais nas vizinhanças, estão apresentados na TABELA 1. A precipitação média anual é de cerca de 1400 mm, com chuvas concentradas nos meses de dezembro, janeiro e

fevereiro e os meses mais secos são junho, julho e agosto. A precipitação máxima anual ocorreu em 1983, com 1981 mm e a mínima em 1985 com apenas 860 mm.

TABELA 1 – VALORES DE PRECIPITAÇÃO (mm).

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Média	182,2	142,0	120,3	80,7	97,3	101,6	92,7	67,2	120,5	129,4	121,6	148,5
Mínima	42,7	57,2	37,7	2,1	2,3	0,1	4,5	1,5	8,2	43,9	18,5	61,6
Máxima	468,7	277,4	241,2	165,2	345,6	289,6	329,1	168,0	424,8	251,3	295,5	347,1

Fonte: VAINE (1998)

Os dados da estação pluviométrica instalada em janeiro/1997, na área de Fervida (Lat.: 25°16'30" S; Long.: 49°11'57" W Gr; alt.: 975 m), não foram utilizados nos cálculos acima por representarem uma série curta.

A evapotranspiração real (ETR) e potencial (ETP), calculadas com dados meteorológicos do período 1974-1993, pelos métodos de Morton (ETR), Penman (ETP), Thornthwaite-Mather (ETP) e Turc (ETR), apresentam, respectivamente, totais anuais de 1040,6 mm, 855,5 mm, 775,7 mm e 793,8 mm (VAINE, 1998).

2.4 VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal na área de estudo é constituída pelos quatro tipos descritos a seguir, em função da topografia e do tipo e aptidão do solo (EMATER, 1997):

-Áreas agrícolas: predominância de culturas comerciais de ciclo curto (horticultura). Essa atividade se desenvolve tanto em áreas planas como nas acidentadas, com uso intenso de agroquímicos.

-Áreas de mata: A floresta primária foi quase que totalmente substituída pela secundária, constituída por bosques de bracatinga.

-Áreas de mata ciliar: ocorre ao longo dos rios da região, sendo formada por espécies folhosas decíduas e semi-decíduas.

-Áreas de várzeas: geralmente cobertas por gramíneas e arbustos de pequeno porte. Muitas dessas áreas foram drenadas para a prática de horticultura.

2.5 SOLO

Os tipos de solo que ocorrem na área de estudo foram caracterizados pela EMATER (1997), com vistas à aplicabilidade desses solos para fins agrícolas. Para atender de forma mais adequada aos objetivos deste trabalho, procurou-se separar os tipos de solo com ênfase na capacidade de infiltração, relevo, litologias associadas e área ocupada, conforme apresentado na TABELA 2.

Os solos com baixa capacidade de infiltração correspondem a cerca de 31 % da área de estudo e apresentam, em geral, textura argilosa. São pouco desenvolvidos, pedregosos e ocorrem nos interflúvios e encostas formadas pelas camadas de filito e quartzito. Nas áreas baixas e pouco drenadas ocorrem solos hidromórficos com baixa capacidade de infiltração devido ao acúmulo de matéria orgânica e de argila.

Os solos com capacidade de infiltração baixa a moderada são os cambissolos distróficos que ocorrem no terço inferior das encostas formadas pelas camadas de filito e pelos solos resultantes da decomposição de rochas intrusivas básicas, localizados nos interflúvios e no terço superior das encostas formadas pelos diques de diabásio. Correspondem a cerca de 37% da área.

Os solos com capacidade de infiltração moderada a boa, ocorrem nos terços inferiores das encostas e nas superfícies aplainadas dos vales. São solos argilosos,

bem desenvolvidos, com horizontes A e B profundos. São formados pela alteração de filitos e mármore e correspondem a cerca de 32% da área.

TABELA 2 - TIPOS E CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DA ÁREA DE ESTUDO.

Capacidade de Infiltração	Tipo de Solo	Litologia Associada	Ocorrência e Relevo	Área (%)
Baixa	-Litólicos eutróficos e distróficos. -Cambissolos eutróficos e distróficos. -Litólicos eutróficos e distróficos.	Filito Quartzito	Interflúvios e nos terços médio e superior das encostas. Acidentado com declividades da ordem de 15 a 45%.	31,3
	-Hidromórficos gleyzados.	Mármore	Cotas mais baixas do terreno. Plano a suavemente ondulado.	
Baixa a Moderada	-Terra bruna roxa estruturada eutrófica.	Diabásio	Interflúvios e terço superior das encostas associadas aos diques. Ondulado a fortemente ondulado.	37,4
	-Cambissolos distróficos.	Filito Mármore	Terço médio das encostas associadas a filitos e mármore. Ondulado	
Moderada a Boa	-Cambissolos distróficos	Filito Mármore	Terço inferior das encostas associadas a filitos e mármore. Suavemente ondulado.	19,1
Boa	-Cambissolo latossólico álico.	Filito Mármore	Terço inferior das encostas associadas a filitos e mármore. Plano a suavemente ondulado.	12,6

Fonte: EMATER (1997).

2.6 GEOMORFOLOGIA

Situada no Primeiro Planalto Paranaense, a área tem relevo montanhoso, com altitudes variando de 900 m a 1200 m.

A morfologia do terreno reflete os fenômenos tectônicos ocorridos na área, com linhas de cristas de direção predominante NE-SW, formadas por faixas de filito e quartzito. Entre as linhas de cristas, aparecem áreas rebaixadas formadas por rochas carbonáticas. Na direção NW-SE ocorrem diques de diabásio que se manifestam no relevo, como elevações alongadas cortando a seqüência metassedimentar.

A ação erosiva em rochas de diferentes resistências, deu ao terreno uma feição reticular, com núcleo rebaixado limitado por elevações de direção preferencial NE-SW e NW-SE.

Os vales esculpidos nas rochas mais resistentes (filito ou quartzito), são estreitos e profundos enquanto que os entalhados nas rochas carbonáticas são largos e com fundo aplainado apresentando formas de relevo cárstico, como dolinas e uvalas. O vale do rio Água Comprida é bastante peculiar por ser formado por uma depressão estreita (100 m a 200 m de largura), com cerca de 3,5 km de extensão, encaixada entre cristas de filito e quartzito.

2.7 GEOLOGIA

Ocorrem na área de estudo rochas da Formação Capiru (Grupo Açungui) e intrusivas básicas.

Os estudos preliminares do Grupo Açungui foram realizados por BIGARELLA; SALAMUNI (1958), que propuseram a sua divisão nas formações Setuva, Capiru e

Votuverava. Estudos posteriores modificaram a estratigrafia do Grupo Açungui, baseados no grau de metamorfismo e complexidade estrutural dessas formações, conforme apresentado na FIGURA 3.

FIGURA 3 - ESTRATIGRAFIA DO GRUPO AÇUNGUI.

		BIGARELLA; SALAMUNI (1958)	MARINI et al. (1967)	FRITZONS Jr. et al. (1982)	DIAS; SALAZAR Jr. (1987)	FIORI (1992)
Pré- Cambriano Superior	G R U P O A Ç U N G U I	Fm. Votuverava	Fm. Água Clara	Fm. Votuverava	Seqüência Antinha	Fm. Antinha
			Fm. Votuverava		Fm. Votuverava	Fm. Antinha
		Fm. Capiru	Fm. Capiru	Fm. Capiru	Fm. Capiru	Fm. Capiru
Pré- Cambriano Inferior		Fm. Setuva	Fm. Setuva			

A estratigrafia do Grupo Açungui, atualmente aceita, foi proposta por FIORI (1992), sendo constituída pelas formações Capiru, Votuverava e Antinha. O contato entre essas formações é feito por falhamentos associados ao Sistema de Cavalgamento Açungui, de modo que a estratigrafia aqui considerada não corresponde à seqüência deposicional dessas rochas. FIORI (1992; 1994), subdivide essas formações em conjuntos litológicos, que apresentam características estratigráficas originais. Essas subdivisões são as seguintes:

- Formação Antinha: Conjuntos Tacaniça, Capivara e Vuturuvu.
- Formação Votuverava: Conjuntos Bromado, Coloninha e Saivá.
- Formação Capiru: Conjuntos Rio Branco, Morro Grande, Juruqui e Bocaina.

Os conjuntos litológicos da Formação Capiçu foram descritos em FIORI (1992; 1994), como segue:

-Conjunto Bocaina: é uma fatia tectônica posicionada sobre a Formação Setuva, cujos contatos inferior e superior são, respectivamente, a Formação Setuva e a falha do Queimadinho. As litologias predominantes são filito e quartzito.

-Conjunto Juruqui: é constituído por filito vermelho com lentes de quartzito. A característica deste conjunto é que as litologias estão deformadas e cortadas por um grande número de veios de quartzito.

-Conjunto Rio Branco: está posicionado tectonicamente sobre o conjunto Juruqui pelas falhas Colônia Venâncio e das Aranhas. Este conjunto ocupa a maior extensão areal, sendo constituído por mármore dolomítico com intercalações de filito e quartzito.

-Conjunto Morro Grande: é caracterizado pela alternância de camadas de filito e quartzito com uma espessura de centenas de metros. Na base desse conjunto ocorrem duas camadas de mármore dolomítico, com cerca de cem metros de espessura cada uma. Esse conjunto está em contato com o anterior pela falha de Tranqueira-Pessegueiro.

Na área de estudo, as rochas do Grupo Açungui estão cortadas por inúmeros diques de diabásio, sub-paralelos e com direção preferencial NW-SE. São diques de pouca espessura, raramente ultrapassando 100 m. Esses diques estão relacionados ao reativamento da plataforma brasileira durante o Mesozóico (Arco de Ponta Grossa). Esses diques influenciam tanto o escoamento superficial quanto o subterrâneo na região.

2.8 HIDROLOGIA

A rede de drenagem é controlada pelas feições morfo-estruturais da área apresentando padrões distintos nas bacias estudadas. O rio Tumiri apresenta padrão dendrítico, os rios Fervida e das Onças têm padrão sub-retangular, e o rio Água Comprida tem, também, padrão dendrítico, com poucos contribuintes e leito principal controlado por falhamento.

A linha de crista, onde se encontra o Morro da Cruz, com ponto culminante de 1204 m de altitude, constitui, na área, o divisor de águas das bacias dos rios Ribeira e Iguaçu, separando, no lado oeste, o rio Tumiri que flui para sul e deságua na bacia do Iguaçu e, no lado leste, as bacias dos rios Água Comprida, Fervida e das Onças que escoam em direção à bacia do Ribeira.

Os dados hidrológicos dessas bacias são recentes e começaram a ser registrados nos postos hidrométricos implantados a partir de março/97. Esses postos estão assim distribuídos: 1 na bacia do rio Tumiri e 5 na do rio Fervida. Além dessas estações, foram feitas medições de vazão em 18 pontos adicionais dessas bacias para determinar a descarga das fontes e investigar a existência de nascentes ou sumidouros nos cursos dos rios.

Esses rios são efluentes e de pequeno porte. As vazões máximas medidas entre março/97 e setembro/98 foram: rio Tumiri, 238 l/s; Água Comprida: 67 l/s e rio Fervida e das Onças somadas, 380 l/s.

O escoamento desses rios se deve, em grande parte, às fontes do aquífero cárstico. Os braços que nascem nas áreas de afloramento de filito, são alimentados por fontes difusas ou por água de chuva. O escoamento desses afluentes é influenciado por variações sazonais, chegando a secar em períodos de estiagem.

As águas do rio Tumiri são captadas para irrigação e abastecimento de uma indústria de cal, no trecho compreendido entre as nascentes da região de Butiatumirim-São Sebastião e o poço P-08 (Tumiri). O aumento da irrigação nos períodos de estiagem torna o regime do Tumiri intermitente no trecho citado. O escoamento do rio passa a ser perene após receber o afluente que nasce na sede do município de Colombo e que é alimentado por diversas fontes cársticas.

O bombeamento do poço P-01 (Tumiri), provocou o secamento das nascentes do rio Papanduvás até a confluência com o rio São João que, por sua vez, tem regime intermitente. A partir desse ponto, o Papanduvás recebe contribuição de algumas fontes cársticas, passando a escoar normalmente.

FIGURA 4 - VISTA DA REGIÃO DE BOTIATUMIRIM (COLOMBO, PR), DESTACANDO-SE ELEMENTOS MORFO-ESTRUTURAIS CARACTERÍSTICOS DA ÁREA DE ESTUDO.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 HIDROQUÍMICA

Os minerais e as rochas da crosta constituem a principal fonte da carga dissolvida nos sistemas aquáticos. A solubilidade e a taxa de dissolução de minerais é influenciada por diferentes fatores, tais como: pureza e tamanho dos cristais, textura e porosidade da rocha, estrutura regional, grau de fraturamento, tempo de contato e temperatura da água (HEM, 1970).

A geoquímica das águas naturais é controlada por processos climáticos, geológicos, biológicos e antrópicos. Destes, o mais importante é o clima, responsável pelos processos de distribuição de precipitações e subsequente alteração das rochas e formação de solos. Além disso, os padrões climáticos tendem a produzir comunidades específicas de plantas e caracterizar a composição da água que drena uma região (HEM, 1970; ANGINO, 1983).

A decomposição química dos minerais das rochas se caracteriza por envolver reações simples como, ionização, adição de água e dióxido de carbono, hidrólise e oxidação. Tais reações são extremamente lentas, incompletas e muitas vezes irreversíveis e estão relacionadas a fatores ambientais que influenciam a taxa e o sentido de cada reação. A água acelera os processos químicos pois facilita, por sua própria natureza, o contato com a superfície do sólido e mantém em solução ácidos como H_2CO_3 e HNO_3 , formados por ação microbiológica durante a decomposição da matéria orgânica no solo. Esses compostos acidificam a água de percolação, aumentando a capacidade de dissolução dos minerais das rochas. Essas reações dependem, ainda, da concentração dos íons, do raio iônico, das propriedades

dielétricas do meio, da temperatura, pressão e pH e ocorrem nas interfaces sólido-líquido, podendo ser de dois tipos (HEM, 1970; KRAUSKOPF, 1972; ANGINO, 1983):

- 1 - reações cujas relações de energia são favoráveis ao equilíbrio químico. Dividem-se em três categorias:
 - 1.a - reações de solução e deposição reversíveis, nas quais a água não sofre alteração química. Envolvem substâncias cristalinas, gases, compostos orgânicos, espécies ou complexos aquosos, reações de troca iônica, sorção e desorção;
 - 1.b - reações reversíveis de solução e deposição, nas quais a molécula da água é quebrada em H^+ e OH^- ;
 - 1.c - reações reversíveis de solução e deposição, que envolvem mudanças no estado de oxidação do íon dissolvido.
- 2 - reações pouco ou não reversíveis nas condições em que ocorreram. As barreiras para reverter essas reações resultam da necessidade de catalisadores ou de fornecimento de energia.

3.1.1 Análises físico-químicas

O estudo do equilíbrio termodinâmico entre os minerais e a água, bem como a classificação da água quanto ao seu conteúdo iônico, dependem de análises físico-químicas que representem fielmente a composição da água no seu estado natural. Os procedimentos de coleta e análise das amostras estão descritos a seguir.

3.1.1.1 Método de amostragem

As amostras de água foram coletadas na fonte, o mais próximo possível do ponto de emergência, com frascos de polietileno de 2,5 l, lavados e esterilizados previamente no laboratório. No momento de coleta, o frasco era enxaguado com água da fonte e enchido completamente, evitando-se a presença de bolhas de ar no interior do frasco. Não se fez nem acidificação nem filtração de amostras no campo. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor e transportadas, no mesmo dia, para o Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da Universidade Federal do Paraná, onde eram mantidas refrigeradas a 4 °C. As análises físico-químicas foram iniciadas num intervalo de tempo sempre inferior a 24 horas, com relação ao momento de coleta.

As medidas de pH, temperatura e condutância específica da água foram feitas no campo, utilizando-se um condutivímetro modelo LF-325 e um pH-metro modelo pH-325. Esses aparelhos são da marca WTW, com precisão de medidas, especificadas pelo fabricante, de $\pm 0,5\%$ para condutividade, $\pm 0,1$ °C para temperatura e, $\pm 0,01$ unidades de pH.

3.1.1.2 Parâmetros analisados e procedimentos analíticos

As substâncias dissolvidas na água estão na forma de íons simples ou de associações iônicas (complexos). As concentrações totais dessas espécies e dos parâmetros físicos e organolépticos foram determinadas conforme descrito na TABELA 3.

TABELA 3 - PARÂMETROS ANALISADOS E MÉTODOS ANALÍTICOS.

Parâmetro	Método analítico
Acidez	Titulometria
Alcalinidade à Fenolftaleína	Titulometria
Alcalinidade total	Titulometria
Bicarbonatos	Titulometria
Bióxido de carbono livre	Titulometria
Cálcio	Titulometria
Carbonatos	Titulometria
Cloretos	Titulometria
Coliformes fecais	Substrato cromogênico definido
Coliformes totais	Substrato cromogênico definido
Condutância específica	Condutivímetro
Cor	Colorímetro
Dureza total	Titulometria
Ferro solúvel	Absorção atômica
Ferro total	Absorção atômica
Fluoretos	Espectrofotometria UV
Fosfatos	Espectrofotometria UV
Hidróxidos	Titulometria
Magnésio	Titulometria
Nitratos	Espectrofotometria UV
Nitritos	Espectrofotometria UV
Nitrogênio amoniacal	Espectrofotometria UV
Nitrogênio Kjendal total	Espectrofotometria UV
Nitrogênio orgânico	Espectrofotometria UV
Oxigênio consumido em meio ácido	Titulometria
Oxigênio dissolvido (OD)	Titulometria
pH	pH-metro
Potássio	Fotometria de chama
Sílica dissolvida	Espectrofotometria UV
Sódio	Fotometria de chama
Sólidos suspensos totais	Gravimetria
Sólidos totais a 103 °C	Gravimetria
Sólidos totais dissolvidos	Gravimetria
Sulfato	Turbidimetria*
Temperatura	Termômetro
Turbidez	Turbidímetro

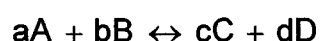
* Método turbidimétrico adaptado ao espectrofotômetro visível (420 nm), com limite de detecção de 1mg/l.

3.1.1.3 Princípios de Termodinâmica

Os princípios de termodinâmica aplicados ao estudo do equilíbrio na interface sólido-líquido, apresentados aqui com ênfase no equilíbrio da calcita e dolomita, podem ser encontrados em GARRELS; CHRIST (1965); HEM (1961; 1970), KRAUSKOPF (1972); FREEZE; CHERRY (1979); DREVER (1988); FORD; WILLIAMS (1991) e FETTER (1994).

O equilíbrio químico das espécies em solução é expresso pela Lei da Ação das Massas, que estabelece que a taxa de uma reação química é proporcional à concentração dos reagentes.

Considerando a reação:



quando essa reação atingir o ponto de equilíbrio, a lei de ação das massas é expressa por:

$$K_{eq} = \frac{[C]^c \cdot [D]^d}{[A]^a \cdot [B]^b}$$

Onde K_{eq} é a constante de equilíbrio termodinâmico; [A], [B], [C] e [D] representam as concentrações termodinamicamente efetivas ou atividades de reagentes e produtos e a , b , c , d , os respectivos números de moles.

Em estudos hidroquímicos, é necessário que as concentrações das substâncias determinadas nas análises físico-químicas, normalmente expressas em mg/l, sejam convertidas para molalidade, uma vez que a combinação entre os elementos ocorre na relação direta entre o número de moles e não de massa.

Nas soluções diluídas, como as águas potáveis naturais, a atividade é um pouco menor do que a concentração dos solutos determinada nas análises físico-químicas, porque as forças eletrostáticas interiônicas dão a essas águas um caráter

de solução não ideal. Para aplicar a lei de ação das massas no estudo do equilíbrio das reações químicas entre sólidos e solutos na água subterrânea, deve-se aplicar o fator de correção γ_i , indicado por:

$$a_i = \gamma_i \cdot m_i$$

Onde, a_i e m_i são, respectivamente, atividade e concentração molal da espécie i e γ_i , o coeficiente de atividade calculado pela equação de Debye-Hückel:

$$-\lg \gamma_i = \frac{A \cdot z_i \cdot \sqrt{I}}{1 + a_i^\circ \cdot B \cdot \sqrt{I}}$$

Onde A e B são constantes características do solvente para pressões e temperaturas determinadas; a_i° é o diâmetro efetivo do íon em solução; z_i é a valência do i -ésimo íon em solução e I é a força iônica, definida como:

$$I = \frac{\sum m_i \cdot z_i^2}{2}$$

m_i e z_i , estão definidos acima.

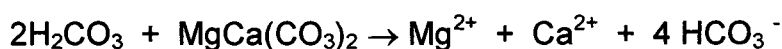
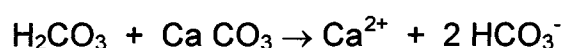
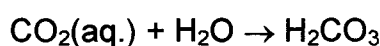
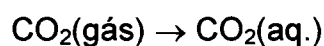
A equação de Debye-Hückel permite calcular, com boa aproximação, os coeficientes de atividade para soluções com força iônica de até 0,1. Isso corresponde a uma solução de 5.800 mg/l de NaCl.

Com os dados das análises físico-químicas das águas, calcula-se a força iônica e os valores individuais de atividade iônica. Assim, é possível determinar o produto de atividade iônica K_{pai} , das espécies envolvidas nas reações de equilíbrio químico das espécies dissolvidas.

Conhecendo-se as espécies minerais que controlam o quimismo da água subterrânea, pode-se avaliar as condições de equilíbrio (índice de saturação) entre as fases minerais e a fase líquida, pela relação entre o produto de atividade iônica

(K_{pai}), obtido com dados da análise da água e o produto de solubilidade do mineral (K_{eq}), determinado experimentalmente.

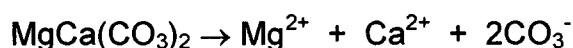
Os minerais predominantes em áreas de rochas carbonáticas são calcita e dolomita. A dissolução desses minerais resulta do conjunto das seguintes reações químicas:



O produto de atividade iônica para a calcita e a dolomita são:



$$K_{pai}(\text{cal}) = \gamma_{\text{Ca}^{+2}}(\text{Ca}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{CO}_3^{-2}}(\text{CO}_3^{-2})$$



$$K_{pai}(\text{dol}) = \gamma_{\text{Mg}^{+2}}(\text{Mg}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{Ca}^{+2}}(\text{Ca}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{CO}_3^{-2}}(\text{CO}_3^{-2})^2$$

O índice de saturação é definido como o logaritmo da relação entre o produto de atividade iônica e o produto de solubilidade do mineral considerado. Para a calcita e para a dolomita esses índices são calculados como segue (JACOBSON; LANGMUIR, 1970):

$$IS = \log \left(\frac{K_{pai}}{K_{ps}} \right)$$

$$IS_{\text{cal}} = \lg \left(\frac{\gamma_{\text{Ca}^{+2}}(\text{Ca}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{CO}_3^{-2}}(\text{CO}_3^{-2})}{K_{ps}(\text{cal})} \right)$$

$$IS_{\text{dol}} = \lg \left(\frac{\gamma_{\text{Mg}^{+2}}(\text{Mg}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{Ca}^{+2}}(\text{Ca}^{+2}) \cdot \gamma_{\text{CO}_3^{-2}}(\text{CO}_3^{-2})}{K_{\text{ps}}(\text{dol})} \right)^{1/2}$$

A solução estará insaturada, saturada ou supersaturada com respeito a um determinado mineral se $IS < 0$, $IS = 0$ e $IS > 0$, respectivamente.

Experiências de laboratório com o objetivo de precipitar dolomita, a partir de soluções saturadas desse mineral, em condições atmosféricas normais, resultaram em um precipitado constituído pela mistura de calcita e hidromagnesita, compostos de estrutura cristalina mais simples que a da dolomita, cuja estrutura apresenta uma distribuição altamente ordenada dos átomos de Ca e Mg. O tempo muito longo para a formação dessa estrutura cristalina tem sido uma das restrições para a determinação da constante de equilíbrio desse mineral. Os experimentos mostraram que, após um rápido aumento da concentração, esta permanece praticamente constante, sendo assumida como a concentração de equilíbrio. Porém, como não ocorre a precipitação de dolomita, em tempos experimentais plausíveis, não há a certeza de que se tenha atingido o ponto de saturação. Assim, a determinação experimental da constante de equilíbrio resulta numa gama de valores variando na faixa de 10^{-17} a 10^{-20} e, o produto de solubilidade da dolomita, conforme definido anteriormente representa uma condição de equilíbrio apenas aparente (HSU, 1963; KRAUSKOPF, 1972)

Os fatores fundamentais nos processos de dissolução de minerais carbonáticos são: pressão parcial de CO_2 presente na fase gasosa em contato com a água, temperatura do gás e da água, pressão hidrostática agindo sobre o gás e a

água, volume relativo de ar no solo e de água de percolação, velocidade de percolação e tempo de residência da água no aquífero (DRAKE; WIGLEY, 1975; TRAINER; HEATH, 1976; DRAKE, 1983).

GARRELS; CHRIST (1965), apresentam cinco modelos de dissolução de calcita em presença de CO_2 . Os modelos de interesse hidrogeológico são os genericamente classificados como sistema aberto e fechado. No sistema aberto, a quantidade de CO_2 disponível para a dissolução é constante e quase infinita enquanto que no sistema fechado, a quantidade de CO_2 inicialmente presente na solução diminui continuamente durante a dissolução dos minerais carbonáticos. DRAKE (1983), propõe os termos coincidente e seqüencial para os sistemas aberto e fechado, respectivamente. O sistema coincidente ocorre em áreas de solo raso com substrato carbonático ou áreas com regolito rico em material carbonático. O sistema sequencial ocorre nas situações onde o substrato carbonático está coberto por uma camada espessa de material não carbonático ou quando a zona saturada é muito profunda.

A zona vadosa pode ser considerada um sistema aberto, enquanto um aquífero confinado representa um sistema fechado. Entretanto, qualquer modelo de evolução química deve envolver esses dois sistemas, devendo-se esperar que o caráter químico da água dependa, não só das condições prevaletentes durante infiltração e percolação, mas também, da proporção de evolução química em sistema aberto e fechado (DRAKE; WIGLEY, 1975).

DRAKE; WIGLEY (1975) consideram que o melhor parâmetro para refletir as variações climáticas na química de carbonatos em águas subterrâneas são o índice de saturação de calcita e a pressão parcial de CO_2 . FORD; WILLIAMS (1991),

consideram a pressão parcial de CO_2 de equilíbrio como um parâmetro significativo, por fornecer indícios sobre a origem ou a história da água, ilustrando o uso do índice de saturação de calcita e pCO_2 , através de gráficos $\text{pCO}_2 \times \text{ISc}$, onde a linearidade entre amostras indicaria condições de infiltração e recarga semelhantes.

Águas subterrâneas carbonáticas podem ser diferenciadas quimicamente, pelo uso do índice de saturação de calcita ou dolomita em função da pCO_2 . A solução de minerais carbonáticos é dependente do tempo; assim, o grau de saturação de uma amostra, com respeito à calcita ou dolomita pode ser tomada como uma medida aproximada da idade da água (JACOBSON; LANGMUIR, 1970; DRAKE; WIGLEY, 1975).

A significância do IS como um parâmetro discriminador está relacionada à classificação do aquífero em sistemas de fluxo de conduto ou difuso. O de conduto é definido como o fluxo através de um sistema interconectado de condutos da ordem de centímetros a metros de abertura, por onde a água flui em regime turbulento. Está associado a infiltração rápida, tempos de residência curtos e fontes com águas insaturadas em calcita e dolomita. O difuso corresponde ao fluxo através de planos de fraturas e de acamamentos ou outras aberturas medidas em centímetros ou menos. O fluxo difuso tende a ser laminar, estando associado a recarga por percolação lenta, tempos de residência relativamente longos e fontes com águas saturadas ou próximas da saturação. As fontes de fluxo difuso exibem pequena variação seja em temperatura ou no quimismo das águas no decorrer do ano hidrológico. Fontes alimentadas por fluxo de conduto respondem rapidamente às flutuações na descarga. A maior ou menor agressividade das águas está

relacionada à intensidade da atividade biológica no solo e subsequente produção de CO₂ (SHUSTER; WHITE, 1971; SHUSTER; WHITE, 1972).

As concentrações de CO₂ nas águas das fontes refletem as condições de percolação de água na área de recarga. Concentrações baixas de CO₂ podem significar área de recarga com solos arenosos, com solos orgânicos rasos e cobertura vegetal fina. Fontes com recarga em áreas com cobertura de solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica apresentam, geralmente, pressão parcial de CO₂ elevada, com variações sazonais decorrentes de intensa atividade biológica no solo em períodos quentes e úmidos. A variação do conteúdo de CO₂ de uma fonte para outra pode ser explicada comparando as concentrações de CO₂ nas áreas de recarga, ou por mistura de água de percolação rica em CO₂ com quantidades variáveis de água alogênica com pressões parciais aproximadamente constantes de CO₂, ou ainda, por alterações na composição química da água subterrânea que afetem a concentração de CO₂. No caso de exsolução de CO₂, o equilíbrio da solução se desloca no sentido da saturação, podendo ocorrer precipitação de minerais carbonáticos (SHUSTER; WHITE, 1972).

Os índices de saturação de calcita e dolomita e a pressão parcial de CO₂ foram calculados utilizando-se o programa PHREEQC (PARKHURST; 1995).

3.1.1.4 Relações iônicas características

A relação entre as concentrações, expressas em meq/l, de certos íons dissolvidos, fornece informações sobre a constituição do aquífero, forma de recarga e fluxo das águas subterrâneas. As relações ou índices geoquímicos normalmente aplicados em estudos hidroquímicos são rMg^{+2}/rCa^{+2} , rSO_4^{-2}/rCl^{-} e rNa^{+}/rCl^{-} , embora

outras relações iônicas possam ser estabelecidas de acordo com as peculiaridades do aquífero estudado (SCHOELLER, 1962; CASTANY, 1975; CUSTÓDIO, 1983b).

A variação dos valores dessas relações permite avaliar as mudanças na composição química das águas subterrâneas, devido a mudanças litológicas ou processos modificadores da composição da água. Para as águas oriundas de aquíferos cársticos, destaca-se a relação rMg^{+2}/rCa^{+2} .

Se a água que flui através de um aquífero constituído por calcário dolomítico estiver em equilíbrio com as fases minerais calcita e dolomita, a razão entre as atividades de magnésio e cálcio devem ser constantes para pressão e temperatura determinadas, com base nas seguintes considerações (HSU, 1963):

$$K_{pai(cal)} = \gamma_{Ca^{+2}}(Ca^{+2}) \cdot \gamma_{CO_3^{-2}}(CO_3^{-2})$$

$$K_{pai(dol)} = \gamma_{Mg^{+2}}(Mg^{+2}) \cdot \gamma_{Ca^{+2}}(Ca^{+2}) \cdot \gamma_{CO_3^{-2}}(CO_3^{-2})^2$$

$$\frac{\gamma_{Mg^{+2}}(Mg^{+2})}{\gamma_{Ca^{+2}}(Ca^{+2})} = \frac{K_{pai(dol)}}{[K_{pai(cal)}]^2}$$

Para soluções diluídas, a relação entre os coeficientes de atividade do cálcio e do magnésio é aproximadamente igual a 1. Desta forma tem-se:

$$\frac{\gamma_{Mg^{+2}}(Mg^{+2})}{\gamma_{Ca^{+2}}(Ca^{+2})} = \frac{[Mg^{+2}]}{[Ca^{+2}]}$$

onde $[Mg^{+2}]$ e $[Ca^{+2}]$ são as concentrações desses íons expressas em molalidade.

A razão molal $[Mg^{+2}]/[Ca^{+2}]$, em torno de 1 tem sido observada em águas percolando por terrenos dolomíticos. Isso porque na dissolução de dolomita pura, a razão entre as concentrações resultantes de Ca^{+2} e Mg^{+2} , em molalidade, é igual a

1. As águas que não estão em equilíbrio com calcita e dolomita apresentam grande variação na razão rMg^{+2}/rCa^{+2} enquanto as que tendem a entrar em equilíbrio com ambos minerais apresentam um valor quase constante para essa razão, mesmo que as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} variem (HSU, 1963; JACOBSON; LANGMUIR, 1970).

3.1.2 Diagramas geoquímicos e classificação geoquímica da água

A classificação de águas subterrâneas procura informar, de forma breve, a composição química ou algum outro aspecto das mesmas. As classificações podem ser simples ou geoquímicas. As classificações simples dão uma informação global com vistas a seu uso doméstico, urbano, industrial ou agrícola. As classificações geoquímicas apresentadas em forma numérica ou gráfica, contem informações de caráter geoquímico e procuram expressar de forma concisa os dados hidroquímicos através de agrupamentos de ânions e cátions predominantes, expressos de forma absoluta ou em porcentagens de miliequivalentes ou de processos de troca de base. Podem ser citados como exemplos de classificação geoquímicas, as de Chase Palmer, de Souliné, de Alekine, de Schoeller e de Piper entre outras.

A classificação geoquímica das águas das fontes estudadas neste trabalho leva em conta a importância dos ânions e cátions e está descrita a seguir.

3.1.2.1 Classificação segundo a importância dos ânions e cátions

A classificação e denominação da água é definida pelo cátion ou ânion dominante. Se nenhum cátion ou ânion corresponder a mais de 50% da soma dos cátions ou ânions, dá-se o nome dos mais abundantes, com o nome dos ânions

precedendo o nome dos cátions. As relações entre ânions são referenciadas com algarismos e entre cátions com letras. Os tipos possíveis estão apresentados na TABELA 4, que combinados entre si dão um total de 36 classes de água (SCHOELLER, 1962; CUSTÓDIO, 1983b).

TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO PELA IMPORTÂNCIA DE ÂNIONS E CÁTIONS.

Tipo	Ânions	Tipo	Cátions
1	$rCl^- > rSO_4^{-2} > rHCO_3^-$	a	$rNa^+ > rMg^{+2} > rCa^{+2}$
2	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{-2}$	b	$rNa^+ > rCa^{+2} > rMg^{+2}$
3	$rSO_4^{-2} > rCl^- > rHCO_3^-$	c	$rMg^{+2} > rNa^+ > rCa^{+2}$
4	$rSO_4^{-2} > rHCO_3^- > rCl^-$	d	$rMg^{+2} > rCa^{+2} > rNa^+$
5	$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{-2}$	e	$rCa^{+2} > rNa^+ > rMg^{+2}$
6	$rHCO_3^- > rSO_4^{-2} > rCl^-$	f	$rCa^{+2} > rMg^{+2} > rNa^+$

Fonte: SCHOELLER (1962)

Quando se tem interesse em ressaltar a mineralização total da água, pode-se acrescentar uma escala de condutância específica à classificação por íons dominantes, conforme sugerido por CUSTÓDIO (1983b) e apresentada na TABELA 5.

TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA (K).

Classe	K ($\mu S/cm$ a 25 °C)
C-1	0 a 250
C-2	250 a 750
C-3	750 a 2250
C-4	acima de 2250

Fonte: CUSTÓDIO (1983b)

3.1.2.2 Representação gráfica de dados hidroquímicos

A representação gráfica de dados hidroquímicos permite a avaliação, interpretação e comparação dos processos envolvidos na evolução química da água, a partir de amostras de um mesmo ponto, coletadas em épocas diferentes ou,

de amostras coletadas em vários locais. Os principais tipos de diagramas hidroquímicos são os colunares; os circulares e de setores; os poligonais e radiais; os de colunas verticais aritméticas e logarítmicas; os triangulares, os gráficos x-y, e os mapas hidrogeoquímicos, cujas aplicações e modo de construção são encontrados em SCHOELLER (1962); CUSTÓDIO (1983b) e LLOYD; HEATHCOTE (1985).

Para a classificação geoquímica da água será aplicado o diagrama triangular múltiplo criado por PIPER (1945), baseado na abundância relativa dos íons mais comuns nas águas naturais. Esse diagrama permite relacionar 8 variáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$, Cl^{-} , SO_4^{-2} , $\text{HCO}_3^{-} + \text{CO}_3^{-2}$), em dois campos triangulares, um para cátions e outro para ânions, onde são lançados valores percentuais relacionados ao total de cátions e ânions (Σ cátions = 100% e Σ ânions = 100%). Os dois pontos gerados são projetados no losango central para mostrar, através de um único ponto, o caráter químico geral da água, de acordo com as concentrações relativas de seus íons maiores expressas em miliequivalentes/l. Serão utilizados também, gráficos X-Y, que são gráficos de dispersão, que mostram as relações entre íons, entre íons e determinadas propriedades físicas, como por exemplo, a condutividade. Para várias amostras de um único ponto ou de pontos distintos, pode-se observar, pela nuvem de pontos, se existem correlações entre as variáveis, variações temporais ou agrupamentos distintos, indicando classes diferentes de água.

3.2 HIDROGEOLOGIA

3.2.1 Cadastramento de fontes

Para o cadastramento das fontes utilizou-se equipamentos básicos de mapeamento como: mapas geológicos, cartas plani-altimétricas, fotografias aéreas, bússola, altímetro e martelo, e outros mais adequados ao mapeamento hidrogeológico como recipientes graduados (volumes: 1 e 20 l) para medição direta de vazão, cronômetro, tubos plásticos para construção de vertedouros, frascos para coleta de amostras de água, condutivímetro e medidor de pH.

A maioria das fontes da área de estudo são conhecidas e usadas pela população local para irrigação e abastecimento doméstico. As informações obtidas com os moradores da região facilitaram o trabalho de cadastramento das fontes. A localização das fontes foi precedida pelo traçado da rede de drenagem, utilizando cartas plani-altimétricas e fotografias aéreas. Verificou-se que águas provenientes de tipos litológicos distintos apresentam diferenças significativas no valor da condutância específica, em função da carga iônica dissolvida (quartzito: $\approx 20 \mu\text{S}/\text{cm}$; filito: $40\text{-}80 \mu\text{S}/\text{cm}$ e rochas carbonáticas: $>150 \mu\text{S}/\text{cm}$). Nos cruzamentos das drenagens com estradas, mediu-se a condutância específica, para verificar o tipo litológico ao qual essa água poderia estar associada. Onde a condutância específica da água era característica de rochas carbonáticas, media-se a vazão e a drenagem era seguida em direção à cabeceira, controlando, de tempo em tempo, a condutividade e a vazão para verificar a existência de possíveis surgências ou sumidouros no trecho entre as medições.

Para cada fonte cadastrada, era feita a descrição de suas características, tipo de uso e atribuído um código de identificação. As medidas de pH, temperatura e

condutividade eram feitas no ponto de surgência. Não foi possível medir a vazão em algumas fontes, devido à topografia do terreno, proteção de alvenaria construída sobre a fonte, ou por impedimento pelo proprietário. As fontes selecionadas para o programa de monitoramento foram preparadas para coleta de amostras de água e medição de vazão através de vertedouros construídos com tubos de PVC, nas de vazão menor que 2-3 l/s e, para as de maior vazão escolheu-se um trecho do canal para ser feita a medição por diluição química ou com micromolinete.

As fontes cadastradas na área de estudo estão apresentadas no mapa geológico-estrutural (ANEXO I).

3.2.2 Nomenclatura das fontes

As fontes da área de estudo não têm denominação característica, estando associadas ao nome do proprietário do terreno. Pelo grande número de fontes cadastradas, tornou-se necessário um critério de identificação que fosse lógico e fácil de aplicar.

OTTON; HILLEARY (1985), apresentaram um sistema de numeração de fontes utilizando uma seqüência alfa-numérica composta por quatro letras e dois algarismos. As duas primeiras letras correspondem à cidade ou região. As duas letras seguintes referem-se a um sistema de coordenadas cartesianas, com eixos vertical e horizontal subdivididos em intervalos de 05' de latitude e longitude, respectivamente. Cada par de letras equivale a um quadrado de 05' de lado. A parte numérica do nome indica a ordem cronológica de mapeamento.

ROSENAU et al. (1978), apresentam um sistema com 15 dígitos, baseado nas coordenadas geodésicas da fonte. Os treze primeiros dígitos representam a

latitude e a longitude, tendo entre elas o algarismo zero. Os dois últimos dígitos correspondem à ordem cronológica de mapeamento.

Neste trabalho, cada fonte é identificada por cinco letras e dois algarismos. A primeira letra “F” para indicar fonte, as duas seguintes “CO” identificam o município de Colombo e as duas restantes a bacia hidrográfica onde se localiza a fonte, sendo “FE” para rio Fervida, “TU”, Tumiri, “AC”, rio Água Comprida e “RO”, rio das Onças. Os algarismos indicam a ordem cronológica de mapeamento.

3.2.3 Medição de descarga das fontes

Foram realizadas medições de vazão para estimar o potencial hídrico das fontes monitoradas e classificá-las quanto a magnitude e variabilidade de descarga, aplicando-se os seguintes métodos:

3.2.3.1 Medição direta (Método Volumétrico) (DNAEE, 1987)

Nos locais de medição, onde foi possível a construção de vertedouros com tubos de PVC, a vazão foi determinada cronometrando-se o tempo necessário para encher um recipiente de volume conhecido. A descarga é dada pela razão entre o volume e o tempo gasto para encher o recipiente. Esse procedimento foi abandonado em quase todos os pontos pois os vertedouros eram constantemente destruídos por enxurradas ou vandalismo, tendo de ser reconstruídos a cada etapa de medição.

3.2.3.2 Diluição química (Método de Integração)

A determinação de descargas líquidas por diluição química, pelo método de integração consiste na injeção instantânea de um volume v de uma solução de sal de concentração C_0 , em um rio cuja descarga Q se quer determinar.

O cálculo da vazão por diluição de sal baseia-se na conservação da massa do soluto entre o ponto de injeção e a seção de medição. Sendo v o volume de uma solução de sal de concentração C_1 injetado no rio e C_2 a concentração média das n amostras coletadas durante o intervalo de tempo T , a equação resultante será (ANDRÉ, 1960):

$$V.C_1 = Q.T.C_2 = Q.T \int \frac{c(t)dt}{T}$$

$$Q = \frac{V.C_1}{\int \frac{c(t)dt}{T}}$$

onde $c(t)$ é a concentração instantânea do sal no tempo t , no ponto de coleta.

Estudos aprofundados sobre o método de diluição química para medição de descargas líquidas podem ser encontrados em DUMAS (1952); DODERO (1953); ANDRÉ (1960); ANDRÉ; RICHER; DOUILLET (1970); BARNES; KILPATRICK (1970); DAY (1976) e FISHER et al. (1994).

A vazão é calculada pela equação fundamental do método. Se a água do rio considerado apresentar, naturalmente, algum teor do traçador usado, essa concentração de base deverá ser subtraída da concentração medida. Neste caso, a equação é a seguinte:

$$Q = \frac{m}{\int (c_i - c_0)dt}$$

onde, Q é a vazão do rio (l/s), m é a massa de sal (g), c_i é a concentração instantânea medida na seção de medição (g/l) e c_0 é a concentração de base da água do rio (g/l).

A aplicação de cloreto de sódio como traçador, possibilita o uso da propriedade que esse sal tem de aumentar a condutância específica da água proporcionalmente à concentração de NaCl. Com isso, mede-se a condutância específica da água, ao invés da concentração do sal, o que facilita e agiliza o trabalho de medição da vazão. A relação entre a concentração do sal e a condutividade da água, é obtida pela calibragem do método, sendo numericamente igual ao coeficiente angular da reta de concentração *versus* condutância específica.

Fazendo as transformações necessárias e substituindo a integral definida por uma soma finita de áreas de retângulos, chega-se à expressão utilizada para o cálculo da vazão:

$$Q = \frac{m}{\alpha \cdot \Delta t \cdot (\sum K_i - n \cdot K_0)}$$

onde, Q é vazão do rio (l/s), m é a massa de sal (g), K_i é a condutância específica instantânea medida na seção do rio ($\mu\text{S/cm}$), K_0 é a condutância específica de base da água do rio ($\mu\text{S/cm}$), Δt corresponde ao intervalo de tempo entre duas leituras consecutivas (s), α é o coeficiente angular da reta onde está relacionada a concentração em função de K ($\mu\text{S/cm}$) e n é o numero de medidas de condutividade realizadas.

3.2.3.3 Velocidade x Área (DNAEE, 1987)

O volume de água escoado por unidade de tempo através da seção transversal de um rio é igual ao produto da área da seção pela velocidade média da água que passa pela seção.

$$Q = A.V_m$$

A medição de vazão com molinete é feita pela determinação da velocidade média em várias verticais espaçadas regularmente ao longo da seção transversal. Desta forma, a seção fica subdividida em vários segmentos de área a_i , com velocidades médias de escoamento v_i . O volume escoado através de cada um desses segmentos é igual a

$$q_i = v_i \cdot a_i$$

A vazão total é dada pela soma das vazões parciais:

$$Q_{Total} = \sum q_i$$

Sendo, $q_i = v_i \cdot a_i$ e, $a_i = h_i \left(\frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2} \right)$, resulta:

$$Q_{Total} = \frac{1}{2} \sum v_i \cdot h_i \cdot (d_{i+1} - d_{i-1})$$

Onde, Q_{Total} é a descarga do rio medida na seção de medição, v_i a velocidade média na vertical i , h_i , a profundidade do rio na vertical i e, d_i , a distância entre a vertical i e o ponto inicial de medição.

3.2.4 Classificação das fontes

A classificação das fontes tem por objetivo agrupar fontes de origem e características semelhantes. A combinação de critérios para classificação de fontes

pode gerar uma variedade de tipos muitas vezes, sem qualquer significado prático. Alguns critérios são locais ou são irrelevantes para este trabalho, como: fontes glaciais (ALFARO; WALLACE, 1994), ou considerações sobre o horizonte geológico ou esfera onde a fonte deságua (MEINZER, 1923).

A classificação de fontes adotadas neste trabalho baseia-se em critérios estabelecidos por BRYAN (1919); MEINZER (1923); TOLMAN (1937); SCHOELLER (1962); e SHUSTER; WHITE (1971), e agrupa os tipos de fonte pelas características de descarga, tipo de fluxo, litologia e estruturas associadas, forma de ocorrência e parâmetros físico-químicos considerados representativos.

3.2.4.1 Quanto ao tipo de força que causa a emergência da água

BRYAN (1919) separa as fontes em duas grandes classes. Uma classe compreende as fontes alimentadas por águas movidas por forças não-gravitacionais, estando associadas, geralmente, a áreas de vulcanismo recente ou a fraturas que se estendem pelas profundezas da crosta. Tais fontes são de origem complexa, com águas de origem superficial, conatas ou juvenis. A outra classe compreende as fontes alimentadas por águas subterrâneas propriamente ditas, isto é, água derivada de precipitações na superfície do terreno e armazenada nos poros e fraturas da rocha. O fluxo da água subterrânea pelos poros ou aberturas da rocha é devido à pressão hidráulica, transmitida através de um corpo contínuo de água.

As fontes gravitacionais podem ser divididas em dois tipos gerais: artesianas e não-artesianas. Nas fontes não-artesianas, a água flui livremente através da rocha, surgindo quando a superfície do terreno intercepta o nível de água subterrânea. A surgência pode ocorrer em canais, vales, linhas de quebra de relevo ou na linha de

contato entre rochas permeáveis e impermeáveis. Estas apresentam, normalmente, vazão baixa e variável.

Fontes artesianas ocorrem em áreas sujeitas a fluxo artesiano, isto é, onde a superfície potenciométrica está acima da superfície do solo e a pressão hidráulica é suficiente para elevar a água através de aberturas naturais na camada confinante.

3.2.4.2 Caráter das aberturas da rocha por onde a água emerge

Segundo este critério, podem ser agrupadas em três classes:

-Fonte de poros: na qual a água percola através de inúmeras pequenas aberturas em material permeável. São normalmente fontes de pequena vazão.

-Fonte de fratura ou fissura: a água surge de aberturas relativamente largas da rocha, formadas por diáclases ou outros tipos de fraturas.

-Fonte tubular: corresponde a fontes onde as aberturas são arredondadas, tais como canais de dissolução em rochas carbonáticas, gipso ou outro tipo de rocha solúvel, ou túneis naturais em lavas basálticas.

3.2.4.3 Caráter litológico do aquífero.

As fontes são classificadas com respeito ao tipo litológico que compõe o aquífero. São as fontes de rochas carbonáticas (ou cársticas), de filito, de quartzito entre outras.

3.2.4.4 Quanto a variações sazonais, magnitude e variabilidade de descarga

O volume e a uniformidade de escoamento são parâmetros fundamentais no estudo para aproveitamento de fontes para abastecimento público. Esses

parâmetros, principalmente o coeficiente de variabilidade, só serão confiáveis, se as medidas feitas representarem uma série de vários anos. Desta forma, ao se tratar do coeficiente de variabilidade de uma fonte, é aconselhável que se faça referência ao período observado (MEINZER, 1923).

3.2.4.4.1 Quanto a variações sazonais de descarga

As fontes estão sujeitas a variações sazonais de descarga, em consequência de flutuações sazonais na taxa de recarga dos aquíferos associados. São denominadas (SCHOELLER, 1962):

Perenes: fontes que apresentam continuidade de escoamento, por drenarem aquíferos extensos e permeáveis. São as mais importantes do ponto de vista de abastecimento de água

Sazonais: as que fluem durante certos períodos do ano;

Episódicas: o fluxo não apresenta qualquer periodicidade. Aparece e desaparece rapidamente, devido a ocorrência de chuvas intensas.

Intermitentes: apresentam variação de fluxo independente de sazonalidades climáticas. Essas variações estão associadas a fenômenos de sifonamento, desprendimento de gases ou superaquecimento da água subterrânea.

3.2.4.4.2 Quanto a descarga

Para minimizar o caráter subjetivo da classificação de fontes quanto à descarga, MEINZER (1923), apresentou uma escala decimal para avaliação de vazões (TABELA 6), que passou a ser adotada na maioria dos estudos de fontes.

TABELA 6 - ESCALA DE MAGNITUDE DE FONTES.

Magnitude	m ³ /s	l/s
Primeira	≥10	>10.000
Segunda	1 a 10	1.000 a 10.000
Terceira	0,1 a 1	100 a 1000
Quarta	0,01 a 0,1	10 a 100
Quinta	0,001 a 0,01	1 a 10
Sexta	0,0001 a 0,001	0,1 a 1
Sétima	0,00001 a 0,0001	0,01 a 0,1
Oitava	<0,00001	<0,01

3.2.4.4.3 Quanto a variabilidade

MEINZER (1923), define a variabilidade de uma fonte como sendo a razão entre a flutuação de descarga e a descarga média, expressa em porcentagem, calculada pela seguinte equação:

$$V = \frac{100(a - b)}{c}$$

onde, V é o coeficiente de variabilidade; a, descarga máxima; b, descarga mínima; e c, descarga média.

Já SCHOELLER (1962) define o índice de variabilidade (R) como a relação entre as vazões máxima e mínima para um período de vários anos.

As classes propostas por esses autores estão apresentadas na TABELA 7.

TABELA 7 - ESCALA DE VARIABILIDADE.

MEINZER (1923)		SCHOELLER (1962)	
Classe	Variabilidade (%)	Classe	Variabilidade (R)
Constante	< 25	Constante	1 a 2
Sub-variável	25 a 100	Medianamente variável	2 a 10
Variável	>100	Variável	10 a 50
		Muito variável	> 50

Embora não se tenha encontrado referência sobre qual classe de fonte seria a mais adequada para fins de abastecimento público, neste trabalho foi adotada a escala proposta por MEINZER (1923), sendo consideradas as classes sub-variável e constante indicadas para fins de abastecimento de água.

3.2.4.5 Quanto a natureza do fluxo subterrâneo

SHUSTER; WHITE (1971), após analisarem as flutuações sazonais de vários parâmetros hidroquímicos em fontes com fluxos difuso (laminar) e de conduto (não-laminar), concluem que o coeficiente de variação de dureza total é o parâmetro mais significativo para classificar o padrão de fluxo subterrâneo.

O coeficiente de variação da dureza total (CV_{DT}), expresso em porcentagem, é definido pela equação:

$$CV_{DT} = \frac{100 \sigma}{DT_m}$$

onde σ é o desvio padrão e DT_m , o valor médio de dureza total.

As fontes com fluxo difuso apresentam $CV_{DT} \leq 5\%$. As de fluxo de conduto apresentam CV_{DT} maiores que 5%.

3.2.4.6 Classificação quanto a propriedades físicas e químicas

3.2.4.6.1 Quanto a temperatura da água

A termalidade foi a primeira propriedade a ser observada nas águas de fontes e aplicada com fins terapêuticos através dos banhos termais (CUSTÓDIO, 1983b). As fontes são classificadas com relação a tal propriedade em frias, não-termais e termais.

As fontes frias são alimentadas, principalmente, por águas de degelo. As fontes termais são subdivididas em fontes quentes, que apresentam temperaturas acima de 37,8 °C e, temperadas, as que têm temperaturas abaixo de 37,8 °C. O aquecimento das águas está relacionado a atividades magmáticas, tectônicas ou radiativas nas proximidades das zonas de ocorrência dessas fontes (ALFARO; WALLACE, 1994).

A maior parte das fontes são não-termais, com temperatura da água próxima da temperatura média anual da atmosfera no ambiente da fonte. Isso pode indicar que as águas são de origem relativamente rasa ou que o movimento da água através do aquífero foi suficientemente lento para que o equilíbrio térmico entre a água e a rocha fosse atingido (TOLMAN, 1937). A temperatura da água pode, também, ser controlada pelos seguintes fatores (SCHOELLER, 1962): exposição aos raios solares, cobertura vegetal, altitude, latitude, pluviometria, situação da área de recarga e profundidade de origem da água.

Em geral, as classificações quanto à temperatura são relativas ou apresentam limites de temperatura amplos ou grande número de classes. A classificação de Bogomolov propõe a seguinte divisão (CUSTÓDIO, 1983b):

Muito fria:	$\theta \leq 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Fria:	$5 < \theta \leq 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Moderadamente fria:	$10 < \theta \leq 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Morna:	$18 < \theta \leq 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Moderadamente morna:	$25 < \theta \leq 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Quente:	$37 < \theta \leq 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Muito quente:	$\theta > 42 \text{ }^{\circ}\text{C}$

SCHOELLER (1962) propõe a seguinte classificação para fontes não termais:

Hipertemal ou Termal:	$\theta \geq \theta_{ma} + 4^{\circ}\text{C}$
Ortotermal ou normal:	$\theta_{ma} \leq \theta < \theta_{ma} + 4^{\circ}\text{C}$
Hipotermal ou fria:	$\theta \leq \theta_{ma}$

onde θ é a temperatura da água da fonte e θ_{ma} , é a temperatura média anual da atmosfera na área da fonte.

A classificação de Schoeller foi adotada neste trabalho, por levar em consideração características climáticas da área de ocorrência das fontes, enquanto que a de Bogomolov considera apenas a temperatura absoluta da água.

3.2.4.6.2 Sólidos totais dissolvidos (STD)

A concentração de material dissolvido é determinada a partir do peso do resíduo seco resultante da evaporação de um litro de água, em temperatura fixa e constante, seguida de secagem em estufa.

A concentração total de sólidos dissolvidos é uma indicação geral da adequabilidade da água para diferentes usos. De um modo geral, considera-se a água contendo menos de 500 mg/l de sólidos totais dissolvidos satisfatória para uso doméstico e industrial (BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, 1986).

A classificação de águas, em função do conteúdo de sólidos dissolvidos, segundo alguns autores, está apresentada na TABELA 8. A escala adotada foi a proposta por DAVIS; DEWIEST (1966), por ser específica para águas subterrâneas.

TABELA 8 - CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO O CONTEÚDO DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS.

DAVIS; DEWIEST (1966)	STD (mg/l)	HEM (1970)	STD (mg/l)
Água doce	0 - 1.000	Levemente salina	1.000 - 3.000
Água Salobra	1.000 - 10.000	Moderadamente salina	3.000 - 10.000
Água Salgada	10.000 - 100.000	Muito salina	10.000 - 35.000
Salmoura	>100.000	Salmoura	> 35.000

3.2.4.6.3 Grau de mineralização

Condutância específica é a capacidade de um cubo de um centímetro de aresta conduzir corrente elétrica (DAVIS; DEWIEST, 1966). No estado natural a água apresenta condutividade elétrica diretamente proporcional à quantidade de íons em solução. Essa propriedade permite conhecer de forma rápida e aproximada o grau de mineralização de uma determinada água. A TABELA 9 é uma modificação da classificação apresentada por CASTANY (1975), e mostra os diversos graus de mineralização em função da condutância específica.

TABELA 9 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE MINERALIZAÇÃO.

Mineralização	Condutância Específica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Muito Baixa	$\sigma < 100$
Baixa	$100 \leq \sigma < 200$
Média Baixa	$200 \leq \sigma < 335$
Média	$335 \leq \sigma < 665$
Alta	$665 \leq \sigma < 1000$
Muito Alta	$1000 \leq \sigma$

3.2.4.6.4 Dureza total

Denomina-se dureza total (D_T) ou título hidrotimétrico, a soma das durezas individuais dos íons de cálcio, magnésio, na forma de carbonatos e bicarbonatos. A dureza da água depende dos solos e rochas atravessadas. Em geral, águas provenientes de regiões de basalto, arenito ou granito são brandas ou moles e aquelas provenientes de regiões de calcários, dolomitos ou depósitos de gipso são, em geral, duras. O conteúdo de sais de cálcio e magnésio na água correspondem à dureza total, que pode ser expressa nas seguintes unidades (ESTRADA, 1986):

-Grau alemão ($^{\circ}d$): todos os componentes de dureza são determinados como CaO (10 mg de CaO/l = 1 $^{\circ}d$).

-Grau francês ($^{\circ}f$): todos os componentes de dureza são expressos em mg/l de CaCO_3 (10 mg de CaCO_3 /l = 1 $^{\circ}f$).

-ppm de CaCO_3 : mg/l de carbonato de cálcio.

A dureza causada pelos íons Ca^{+2} e Mg^{+2} associados a HCO_3^- e CO_3^{-2} é considerada como temporária (D_C), porque ao ferver a água, o bicarbonato se dissocia liberando CO_2 e água, precipitando carbonato de cálcio e de magnésio. Denomina-se dureza permanente (D_P) ao conteúdo total de Ca^{2+} e Mg^{2+} , depois da ebulição da amostra, ou seja, após a precipitação dos carbonatos. A dureza total pode ser expressa pela soma das durezas temporária e permanente (CUSTÓDIO, 1983a).

A dureza total apresentada nas análises físico-químicas das fontes estudadas foi calculada conforme citado em TODD (1959), sendo o teor de cálcio e magnésio

presente na água, expresso em carbonato de cálcio, e calculado pela equação abaixo:

$$D_T = [Ca^{+2}] \cdot \frac{(CaCO_3)}{(Ca)} + [Mg^{+2}] \cdot \frac{(CaCO_3)}{(Mg)}$$

$$D_T = 2,497[Ca^{+2}] + 4,115[Mg^{+2}]$$

onde $[Ca^{+2}]$ e $[Mg^{+2}]$ são as concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} , expressas em mg/l, determinadas nas análises químicas.

Os graus de dureza variam de muito dura a mole ou branda, e são expressos em mg/l de $CaCO_3$, ao invés de °d ou °f. Os graus de dureza e as faixas correspondentes dos teores de $CaCO_3$ variam de autor para autor, como mostra a TABELA 10.

TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO QUANTO AO GRAU DE DUREZA.

HEM (1970)		CUSTÓDIO (1983a)	
Grau	$CaCO_3$ (mg/l)	Grau	$CaCO_3$ (mg/l)
Mole	$D_T < 60$	Mole	$D_T < 50$
Moderadamente Dura	$60 \leq D_T < 120$	Ligeiramente Dura	$50 \leq D_T < 100$
Dura	$120 \leq D_T < 180$	Moderadamente Dura	$100 \leq D_T < 200$
Muito Dura	$D_T > 180$	Muito Dura	$D_T > 200$

3.2.4.6.5 Classificação quanto à composição mineral

A Resolução Nº 25/1976 (BRASIL. Ministério da Saúde, 1976), estabelece os padrões de classificação mineral das águas de fontes, de acordo com a composição química da água. As classes são denominadas segundo o íon ou íons predominantes. No caso de mais de um íon predominante, as águas são classificadas como mistas, recebendo o nome das substâncias predominantes. As classes são as seguintes:

Oligominerais	Aquelas que não apresentarem os limites estabelecidos nestes padrões, mas forem classificadas como minerais por suas propriedades favoráveis à saúde.
Alcalino-bicarbonatadas	As que apresentarem concentração de elementos alcalinos equivalentes a no mínimo 0,200 g/l de bicarbonato de sódio.
Alcalino-terrosas	As que apresentarem concentração de elementos alcalino-terrosos equivalentes a no mínimo 0,12 g/l de bicarbonato de cálcio.
a) alcalino-terrosas cálcicas	As que apresentarem conteúdo mínimo de 0,048 g/l de Ca^{+2} na forma de bicarbonato de cálcio.
b) alcalino-terrosas magnesianas	As que apresentarem conteúdo mínimo de 0,030 g/l de Mg^{+2} na forma de bicarbonato de magnésio.
Sulfurosas ou sulfatadas	As que apresentarem concentração mínima de 0,100 g/l de SO_4^{-2} combinado com Na^+ , K^+ e Mg^{+2} .
Sulfetadas	As que apresentarem concentração mínima de 0,001 g/l de S^{-2} .
Ferruginosas	As que apresentarem concentração mínima de 0,005 g/l de Fe^{+2} .

Radioativas	As que apresentarem radônio em solução. Dividem-se em:
a) fracamente radioativas	As que apresentarem teor de radônio compreendido entre 5 a 10 unidades maches.
b) radioativas	As que apresentarem teor de radônio compreendido entre 10 a 50 unidades maches.
c) fortemente radioativas	As que apresentarem teor de radônio compreendido acima de 50 unidades maches.
Carbogasosas	As que apresentarem concentração mínima de 200 ml/l de CO ₂ livre e dissolvido, a 20°C e pressão de 1 atm.

A unidade Mache não é internacionalmente aceita. A unidade de medida de radioatividade adotada pelo Sistema Internacional é o Curie, que equivale a $3,7 \times 10^{10}$ desintegrações por segundo. Uma unidade Mache corresponde a $0,364 \times 10^{-9}$ Curies.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 HIDROQUÍMICA

4.1.1 Apresentação de dados hidroquímicos

Foram coletadas 122 amostras de água de fontes cársticas situadas nos domínios das bacias estudadas, em intervalos aproximadamente mensais, no período de abril/97 a novembro/97 e uma coleta única em março/98, para atender aos objetivos do Projeto Karst. Desse total, foram aproveitadas 114 para este estudo, as demais foram descartadas pelos motivos apresentados adiante.

Foram determinados, para cada amostra, pelos métodos de análise estabelecidos pela *American Public Health Association* (APHA, 1995), os seguintes parâmetros: HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , F^- , PO_4^{+3} , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Fe^{+2} , Fe (total), turbidez, cor, alcalinidade total ao metilorange e à fenolftaleína, dureza total, acidez, bióxido de carbono livre, oxigênio consumido em meio ácido, nitrogênio Kjeldahl total, nitrogênio amoniacal, nitrogênio orgânico, sólidos totais dissolvidos e sílica dissolvida.

A detecção de concentrações mínimas de alguns parâmetros está limitada pela precisão e acurácia do método analítico aplicado. A concentração dos íons F^- , PO_4^{-3} , NO_2^- , Fe(total), SO_4^{-2} e N(amoniacoal), apresentaram em quase todas as análises, concentrações abaixo do limite de detecção expresso em mg/l (F^- : LD < 0,01; PO_4^{-3} : LD < 0,03; NO_2^- : LD < 0,006; Fe(total): LD < 0,01; SO_4^{-2} : LD < 1,0; e N(amoniacoal): LD < 0,01). Para a classificação hidroquímica ou tratamento estatístico dos dados atribuiu-se a esses parâmetros o valor correspondente à metade do valor de detecção conforme recomendam DEMAYO; STEEL (1996).

Os resultados dessas análises físico-químicas estão apresentados no ANEXO II.

4.1.2 Avaliação dos dados

O resultado da análise e interpretação de dados hidroquímicos dependem da qualidade dos métodos analíticos, dos procedimentos de coleta, transporte e conservação das amostras.

Os dados foram padronizados segundo os seguintes critérios:

Algarismos significativos

Os parâmetros medidos são variáveis contínuas que, por sua própria natureza, representam apenas aproximações dos valores verdadeiros. O número de algarismos significativos dos resultados dependem da precisão dos aparelhos utilizados e do método analítico aplicado (DEMAYO; STEEL, 1996). Os resultados dos parâmetros costumam ser apresentados nas fichas de análises físico-químicas, com um número variado de casas decimais. Para efeito de uniformidade, os valores numéricos dos parâmetros analisados foram expressos com número de casas decimais correspondente ao dos limites de detecção de cada parâmetro.

Valores atípicos

Numa seqüência histórica, espera-se que os valores observados se distribuam em torno da média com certa regularidade (DEMAYO; STEEL, 1996). Os valores muito acima ou abaixo da média deverão ser considerados com cuidado para verificar se são valores atípicos ou erros analíticos dentro do conjunto de dados e que precisam ser excluídos para não causar distorções nas análises realizadas.

O resultado das análises da água de oito fontes realizadas em abril/1997, apresentam concentrações de Ca^{+2} , Mg^{+2} e SO_4^{-2} muito acima dos obtidos nas análises subseqüentes e o Na^+ mostra valores muito abaixo. Essas diferenças são decorrentes de erros analíticos, principalmente na determinação de SO_4^{-2} , que nessas análises foi feita pelo método turbidimétrico. Os teores de PO_4^{-3} e NO_2^- das análises de março/98 apresentam valores elevados em relação à média da série precedente e foram considerados como erros analíticos. Todas as análises físico-químicas de abril/97 e as concentrações de PO_4^{-3} e NO_2^- de março/98, foram consideradas atípicas e não incluídas nas análises estatísticas e geoquímicas realizadas.

Os sólidos totais dissolvidos correspondem à soma de cátions e ânions em solução, sem considerar sedimentos em suspensão, colóides ou gases dissolvidos (DAVIS; DEWIEST, 1966)

Os valores analíticos de STD apresentam diferenças elevadas, quando confrontados com a soma das concentrações de cátions e ânions. O método gravimétrico, adotado para fazer tal determinação é a principal causa dessas discrepâncias. Por isso, os valores de STD determinados nas análises foram substituídos pela soma das concentrações de cátions e ânions.

Balanço iônico

Devido à neutralidade elétrica da água, a análise química completa deve apresentar a concentração total de cátions, expressa em meq/l igual a de ânions. As diferenças entre os totais de cátions e ânions pode ser causada por erros acumulados na determinação individual dos íons e/ou por não se levar em conta a

contribuição dos íons menores que, em certos casos, pode ser significativa. (CUSTÓDIO, 1983a).

O erro percentual do balanço iônico (EBI), da análise pode ser expresso por (SCHOELLER, 1962; LLOYD; HEATHCOTE, 1985):

$$EBI(\%) = 100 \frac{(\sum \text{cátions} - \sum \text{ânions})}{(\sum \text{cátions} + \sum \text{ânions})}$$

CUSTÓDIO (1983a), considera que o erro de balanço iônico cresce com o aumento da concentração iônica e aplica a proporcionalidade entre condutância específica e concentração iônica, para estabelecer os erros de balanço iônico admissíveis da seguinte forma:

Condutância específica ($\mu\text{S/cm}$):	50	200	500	2000	>2000
Erro admissível (%):	30	10	8	4	4

O EBI médio para as 114 análises utilizadas neste trabalho é 4,3 % e o máximo, 8,8%. Como o valor médio de condutância específica medido nas fontes foi 322 $\mu\text{S/cm}$, os erros de balanço iônico das análises físico-químicas foram considerados aceitáveis.

4.1.3 Estatística descritiva

Os dados hidroquímicos das fontes das bacias estudadas estão resumidos na TABELA 11. Os parâmetros estatísticos descritivos usados foram média aritmética, desvio padrão e valores máximos e mínimos de cada variável.

TABELA 11 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DAS ÁGUAS DAS FONTES

	pH	T	K	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Fe ⁺²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	F ⁻	PO ₄ ⁻³	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ⁻²	Dureza Total	STD	SiO ₂
	(°C)	(µS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
BACIA DO RIO DA FERVIDA																		
n	67	67	67	67	67	67	67	32	67	67	48	48	48	48	67	67	67	40
Média	7,47	18,2	310	27,4	18,6	1,5	0,9	0,1	191,4	2,2	0,03	0,1	4,0	0,01	0,50	144,4	253,4	13,5
Mínimo	6,77	17,0	212	18,0	12,5	1,2	0,5	0,01	130,7	0,9	0,01	0,01	1,2	0,00	0,50	97,0	170,7	7,9
Máximo	7,96	19,6	404	37,5	24,9	2,2	1,4	0,6	250,9	5,6	0,2	0,5	11,0	0,05	0,50	195,1	344,1	20,6
σ	0,22	0,6	49	4,9	3,2	0,2	0,2	0,2	31,3	0,7	0,05	0,1	2,0	0,01	0,00	25,0	40,8	2,8
BACIA DO RIO DA ONÇA																		
n	14	14	14	14	14	14	14	9	14	13	10	10	10	10	14	13	14	8
Média	7,58	18,0	282	24,3	17,0	1,3	0,6	0,04	175,3	1,9	0,06	0,07	3,2	0,01	0,50	129,6	228,8	10,1
Mínimo	7,28	17,3	277	22,1	16,0	0,9	0,4	0,01	168,1	1,4	0,01	0,02	1,5	0,00	0,50	125,5	217,1	7,3
Máximo	7,70	18,6	290	25,6	19,0	1,6	0,9	0,1	181,8	2,4	0,2	0,2	5,8	0,07	0,50	136,6	238,3	13,7
σ	0,11	0,4	4	0,9	0,9	0,3	0,2	0,1	3,9	0,3	0,09	0,06	1,6	0,02	0,00	3,6	7,2	2,6
BACIA DO RIO ÁGUA COMPRIDA																		
n	12	12	12	12	12	12	12	10	12	12	10	10	10	10	12	11	12	8
Média	7,62	18,1	276	22,8	16,14	2,2	1,2	0,1	159,0	2,9	0,06	0,09	7,9	0,01	0,5	120,8	222,1	16,0
Mínimo	7,30	17,2	244	18,8	13,05	1,8	1,0	0,01	138,6	2,0	0,01	0,02	5,2	0,00	0,5	101,8	188,9	14,3
Máximo	7,98	19,9	305	27,4	18,32	2,7	1,3	0,2	180,6	3,7	0,31	0,4	10,1	0,03	0,5	144,0	248,3	17,7
σ	0,19	0,7	27	2,9	1,80	0,3	0,1	0,1	16,6	0,5	0,10	0,10	1,8	0,01	0,0	14,5	20,3	1,2
BACIA DO RIO TUMIRI																		
n	21	21	21	21	21	21	21	11	21	21	15	15	15	15	21	21	21	12
Média	7,19	18,2	413	37,0	24,9	3,2	1,2	0,1	246,7	4,0	0,02	0,04	11,8	0,01	0,5	194,5	332,6	11,5
Mínimo	7,02	17,7	322	30,1	19,9	1,6	0,5	0,01	204,7	2,5	0,01	0,02	4,3	0,00	0,5	156,9	270,5	8,7
Máximo	7,80	18,8	493	45,5	30,3	5,0	2,0	0,4	288,8	5,7	0,22	0,10	20,9	0,04	0,5	236,0	405,8	14,0
σ	0,16	0,3	60	5,2	3,7	1,1	0,5	0,1	32,00	1,2	0,06	0,03	4,9	0,01	0,0	27,6	46,9	1,8

n: número de amostras; σ: desvio padrão

4.1.4 Caracterização química da água

As variações climáticas sazonais podem influenciar as características físico-químicas da água e a descarga das fontes de forma mais ou menos intensa, em função do tipo de recarga do aquífero e da proximidade do nível da água subterrânea com relação à superfície do terreno. É de se esperar que, quanto mais rápida a resposta do aquífero às variações climáticas, sobretudo à precipitação, maior será a variação relativa da concentração das substâncias dissolvidas e da descarga. As características do fluxo da água através do aquífero também influenciam o caráter químico das águas. Fluxos rápidos podem resultar em variações de concentração de alguns íons, devido ao tempo insuficiente para que ocorra o equilíbrio químico entre a água e o material que constitui o aquífero.

As propriedades hidroquímicas das fontes estudadas encontram-se descritas a seguir. Para avaliar o comportamento temporal e permitir comparações entre as fontes de diferentes bacias, os parâmetros mais significativos foram apresentados na forma de gráficos de dispersão X-Y, com os parâmetros físico-químicos lançados no eixo das ordenadas e o tempo nas abcissas.

4.1.4.1 Parâmetros hidroquímicos

O pH e a temperatura da água são parâmetros fundamentais para o estudo do equilíbrio termodinâmico em soluções aquosas. Os valores das constantes de equilíbrio dependem da temperatura. Assim, qualquer variação do equilíbrio químico e da solubilidade dos minerais das rochas do aquífero interfere neste parâmetro. O pH controla as reações de dissolução de carbonatos e, conseqüentemente, a

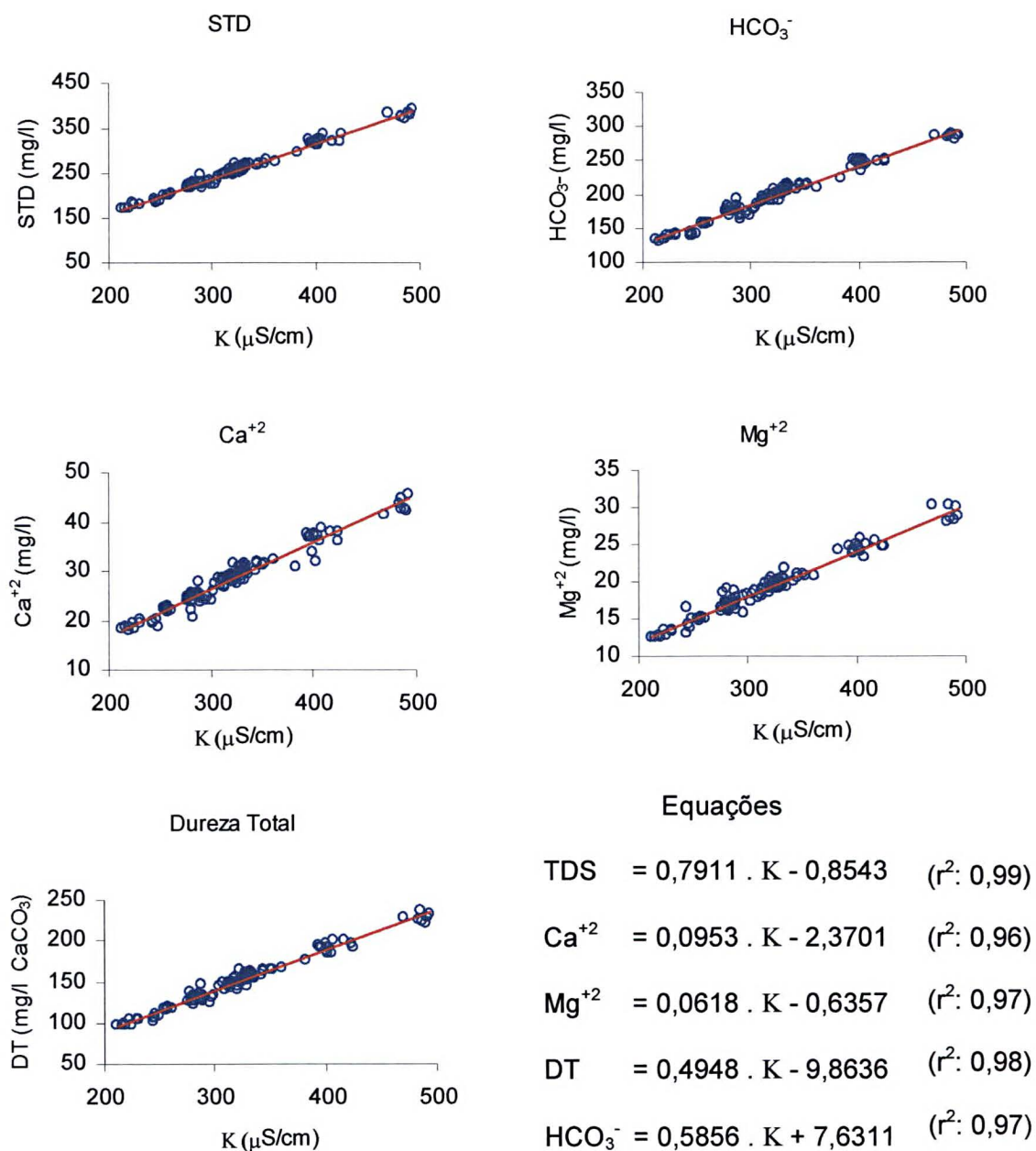
espécie iônica em solução. A temperatura, pH e condutância específica da água foram medidas diretamente na fonte.

A temperatura média da água oscila em torno de 18 °C em todas as bacias, com mínima de 17 °C e máxima de 19,9 °C. O pH dessas águas varia de 6,77 a 7,98 com média de 7,45. A faixa de variação desses parâmetros é muito estreita, não sendo úteis para individualizar as bacias.

No estado natural, a água apresenta condutividade elétrica diretamente proporcional à quantidade de íons dissolvidos (STD). Tal propriedade pode ser usada para conhecer de forma rápida e aproximada, o grau de mineralização das águas da área de estudo. Nas bacias estudadas, as águas das fontes cársticas são medianamente mineralizadas, com condutância específica variando de 212 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 493 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com média de 322 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As fontes da bacia do Tumiri apresentam condutância específica média de 413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor muito acima da média geral ($\cong 290$ $\mu\text{S}/\text{cm}$) das outras bacias. Isso se deve ao grau de mineralização mais elevado dessas águas, como será discutido adiante.

A condutância específica apresenta correlação linear alta com os teores de Ca^{+2} , Mg^{+2} , HCO_3^- , dureza total e STD (calculado). Pela medida da condutância específica da água e aplicando-se as equações das retas ajustadas às nuvens de pontos, pode-se calcular, de forma rápida e com boa aproximação, as concentrações desses parâmetros nas fontes das bacias estudadas. Na FIGURA 5 são apresentadas as relações entre a condutância específica e os referidos parâmetros.

FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA, STD, HCO_3^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} E DUREZA TOTAL



Obs: K = condutância específica em $\mu\text{S/cm}$; r^2 = coeficiente de correlação

Alcalinidade

Mede a capacidade da água para neutralizar ácidos fortes em função da concentração de íons carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. É apresentada nas

análises como alcalinidade à fenolftaleína, que mede a alcalinidade devido à presença de carbonatos e hidróxidos e, alcalinidade ao metilorange ou alcalinidade total, que mede a alcalinidade devido a carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (APHA, 1995).

As água analisadas apresentam alcalinidade média de 160 mg/l (HCO_3^-), com valores mínimo e máximo de 107 mg/l (HCO_3^-) e 237 mg/l (HCO_3^-). As fontes da bacia do Tumiri apresentam alcalinidades mais elevadas com média de 200 mg/l (HCO_3^-) e as fontes do Água Comprida, as mais baixas, com média de 130 mg/l (HCO_3^-).

Fluoreto

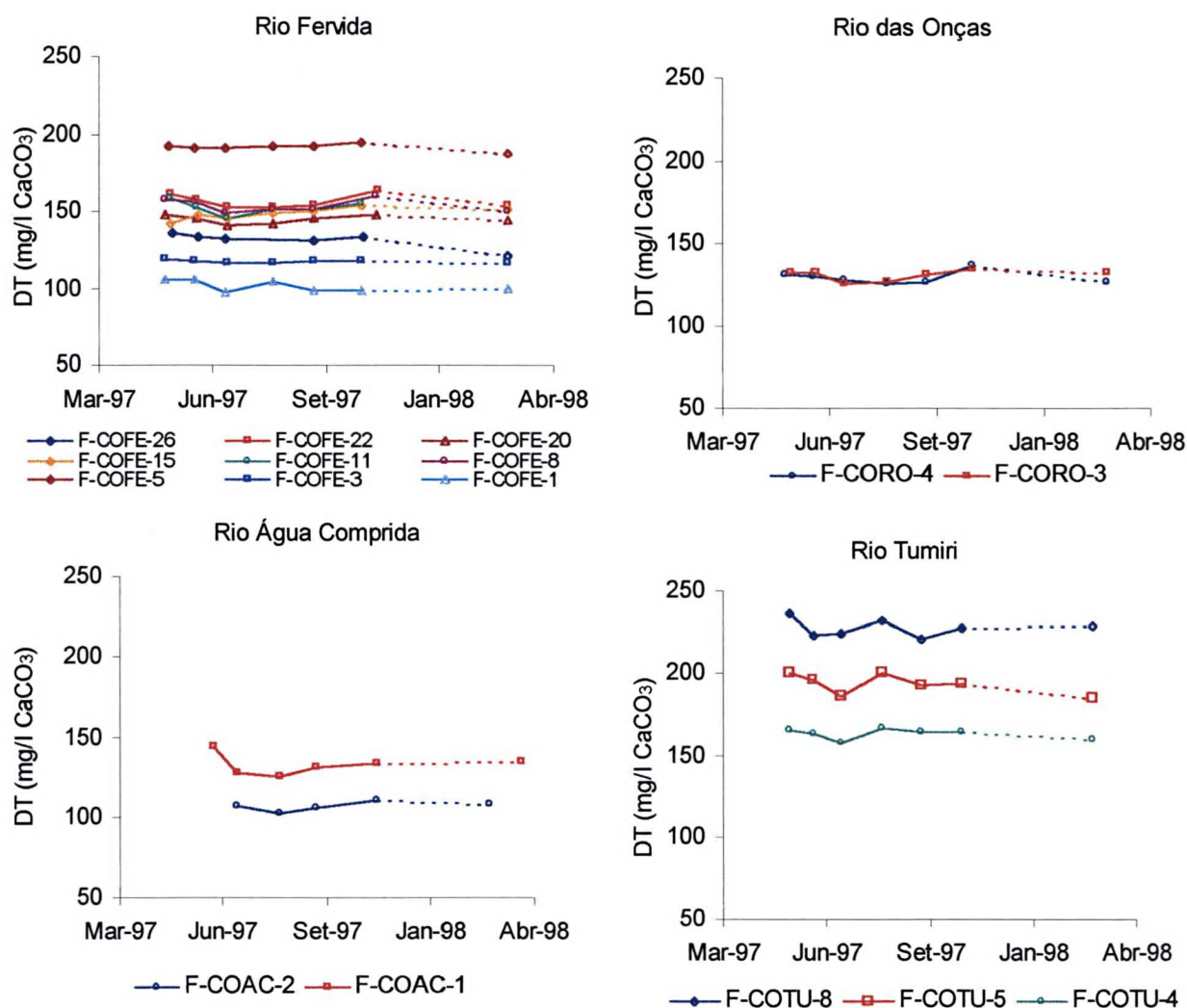
As principais fontes de flúor são os minerais contendo tal elemento na sua composição, como fluorita, apatita e hornblenda entre outros. Os fluoretos são, em geral, pouco solúveis, daí a baixa concentração desse íon nas águas naturais (HEM, 1970).

O teor de flúor na água das fontes da área de estudo está compreendido entre 0,005 mg/l e 0,31 mg/l, com média de 0,03.

Dureza Total

O grau médio de dureza da água das fontes foi de 150 mg/l de CaCO_3 , com mínimo de 97 e máximo de 236. As fontes das bacias da Fervida, Onça e Água Comprida são moderadamente duras a duras e da bacia do Tumiri são duras a muito duras. A variação temporal da dureza nas águas das fontes estudadas está apresentada na FIGURA 6.

FIGURA 6 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA DUREZA TOTAL NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



Acidez

A acidez da água é causada pela presença de ácidos minerais fortes, ácidos fracos como o carbônico e por sais de ácidos fortes e bases fracas. Corresponde à quantidade de base forte padrão necessária para elevar o pH da água até 8,3, para neutralizar a acidez causada pela presença de ácido carbônico ou outros ácidos (APHA, 1995). É expressa em mg/l de CaCO₃.

A acidez média encontrada foi 11,0 mg/l de CaCO_3 , com valores extremos variando de 2,0 mg/l de CaCO_3 a 33,0 mg/l de CaCO_3 . As fontes da bacia do Tumiri apresentam acidez mais elevadas com média de 16 mg/l (CaCO_3). A acidez mostra correlação linear forte com o CO_2 livre, com coeficiente de correlação de 0,98.

Nitrogênio Kjeldahl, Amoniacal e Orgânico

O nitrogênio é um elemento essencial para os seres vivos entrando na composição das proteínas e do material genético. Ocorre na natureza, em função do estado de oxidação, na forma dos seguintes compostos: N_2 , NO_3^- , NO_2^- , NH_3 , NH_4OH e NH_4^+ . Essas espécies podem ocorrer naturalmente nas águas superficiais, em decorrência da decomposição de matéria orgânica. É um componente indesejável na água, sendo indicativo de poluição por efluentes domésticos ou industriais (CHAPMAN; KIMSTACH, 1996).

O Nitrogênio Kjeldahl total expressa o conteúdo total de nitrogênio de origem biológica, isto é, devido à amônia e ao nitrogênio orgânico, não incluindo o nitrogênio decorrente de nitritos e nitratos.

O nitrogênio amoniacal é produzido por atividade microbiológica. Sua origem está relacionada, predominantemente, à poluição por efluentes domésticos e industriais, fertilizantes e, em menor escala, a processos naturais de redução de N_2 .

O nitrogênio orgânico consiste, principalmente, em produtos de processos biológicos, tais como, proteínas, aminoácidos, e no produto das suas transformações bioquímicas. Embora esteja relacionado a fenômenos naturais, o aumento do conteúdo de nitrogênio orgânico pode ser indicativo de poluição por efluentes domésticos ou industriais (APHA, 1995).

Os teores médios de nitrogênio total e orgânico são semelhantes em todas as bacias, oscilando em torno de 0,18 mg/l. O maior valor médio, 0,21 mg/l, ocorre na bacia do Tumiri e o menor, 0,17 mg/l, na bacia do Fervida.

O nitrogênio amoniacal, indicador de contaminação por atividades antrópicas, está abaixo do limite de detecção ($LD < 0,01$ mg/l) em 82% das amostras. As demais apresentam teores médios de 0,02 mg/l. A maior frequência relativa (N° de análises com $N_{\text{amoniacal}} > LD / N^{\circ}$ de análises de N_{Kjeldal}), ocorre na bacia do Tumiri, onde 33% das análises de nitrogênio total apresentaram nitrogênio amoniacal detectável, em teores iguais ou menores que 0,02 mg/l.

As análises para determinação de nitrogênio Kjeldahl foram feitas de julho a novembro de 1997.

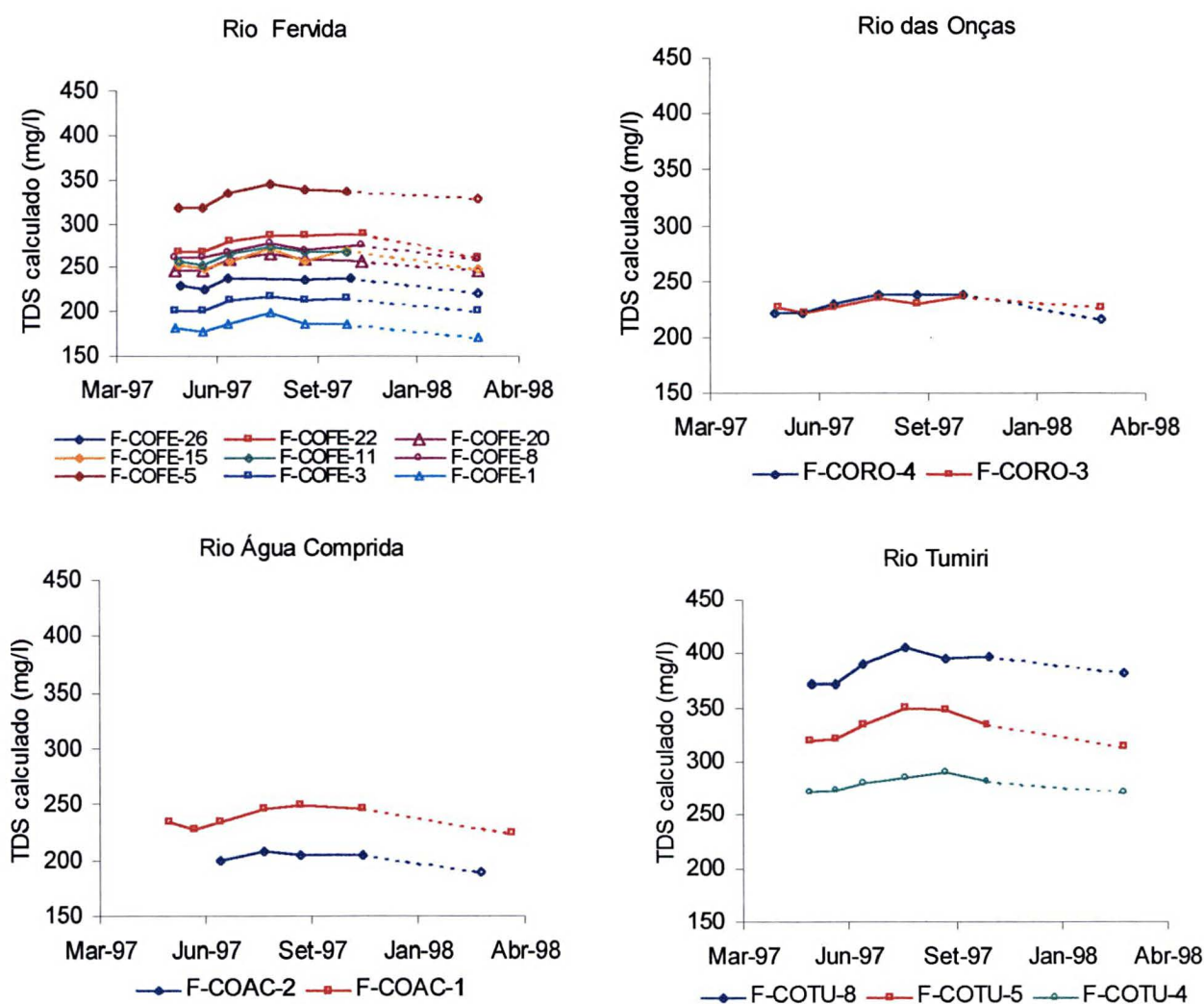
Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

A concentração de material dissolvido é determinada a partir do peso do resíduo seco resultante da evaporação, à temperatura fixa e constante seguida de secagem em estufa, de uma alíquota da amostra de volume conhecido.

O resíduo seco varia com a temperatura de evaporação utilizada, sendo conveniente fixá-la entre 100 a 110 °C ou 180 °C. Na temperatura de 100 - 110 °C podem existir alguns bicarbonatos, água de hidratação e alguma matéria orgânica. A 180 °C os bicarbonatos passam a carbonatos, a maior parte da matéria orgânica volatiliza ou é queimada e, toda a água de hidratação se desprende (CUSTÓDIO, 1983a; HEM, 1970). A temperatura usada para determinação do STD foi de 103 °C. No entanto, os valores analíticos não foram utilizados pelos motivos já mencionados.

O STD calculado, variou de 171 mg/l a 406 mg/l, com média de 261 mg/l. A bacia do Tumiri apresenta fontes com águas mais mineralizadas, com teor médio de sólidos dissolvidos de 332 mg/l. Para as outras bacias, a média fica em torno de 235 mg/l.

FIGURA - 7 VARIAÇÃO TEMPORAL DE TOTAL DE SÓLIDOS DISSOLVIDOS (CALCULADO), PARA AS BACIAS DOS RIOS TUMIRI E FERVIDA.



Sílica

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta. O quartzo, forma mais comum de sílica (SiO_2), é o principal constituinte de muitas rochas ígneas,

metamórficas e sedimentares, sendo um dos minerais mais resistentes ao intemperismo químico, com solubilidade muito baixa nas condições ambientais. A sílica amorfa ou criptocristalina, tais como chert, opala ou calcedônia, são mais solúveis. No entanto, a sílica dissolvida, presente nas águas naturais resulta, provavelmente, da decomposição química de silicatos pelos processos de intemperismo. A sílica dissolvida nas águas naturais encontra-se na forma de ácido silícico H_4SiO_4 ou $Si(OH)_4$ (HEM, 1970; KRAUSKOPF, 1972).

O teor de sílica nos mármore dolomíticos da Formação Capiru, determinados por MARINI; BIGARELLA (1967) é inferior a 4%. O teor médio de SiO_2 dissolvido nas águas analisadas é 13,1 mg/l e os valores extremos são 7,3 mg/l e 20,7 mg/l. A bacia do Água Comprida apresenta a concentração média mais elevadas, com 16,0 mg/l e a menor média ocorre na bacia do rio das Onças, com 10,1 mg/l.

Sulfato

O enxofre está amplamente distribuído na crosta, tanto em rochas ígneas como sedimentares, na forma de sulfetos metálicos. Em contato com água, em ambiente oxidante, esses sulfetos se transformam em sulfatos que são solubilizados e lixiviados. As mais importantes fontes de sulfatos estão nos depósitos de gipso e de anidrita (HEM, 1970). Podem ser consideradas, ainda, como fontes de sulfatos, nas águas naturais, os efluentes industriais e as chuvas ácidas.

Em todas as amostras analisadas, a concentração do íon SO_4^{-2} , esteve sempre abaixo do limite de detecção ($LD < 1$ mg/l).

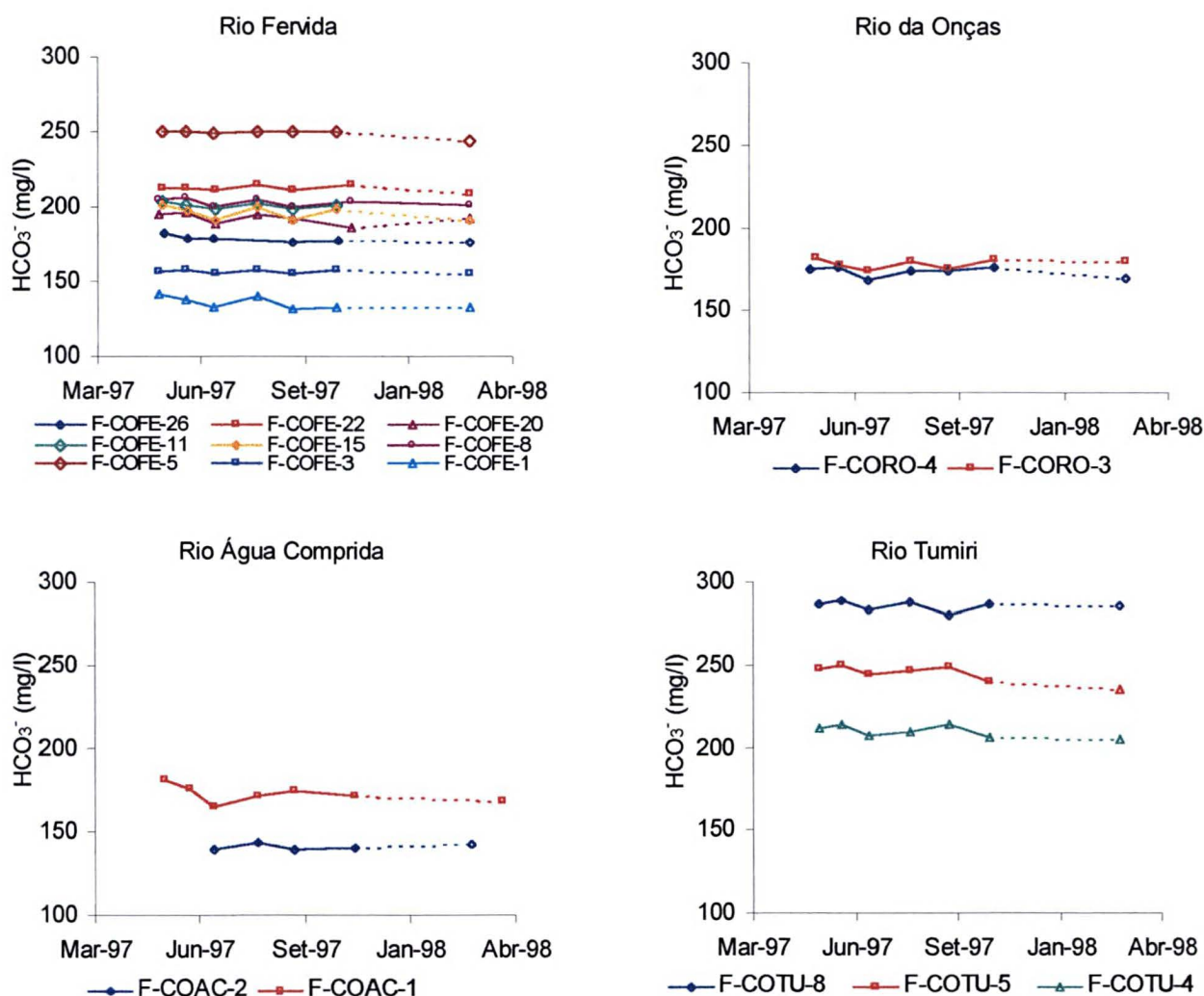
Carbonato e Bicarbonato

O dióxido de carbono dissolvido naturalmente na água aparece nas análises químicas, principalmente, na forma dos íons carbonatos e bicarbonatos. A ocorrência de H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} está relacionada ao pH da seguinte maneira (CUSTÓDIO, 1983a; FREEZE; CHERRY, 1979; FETTER, 1994):

pH < 4,5	H_2CO_3
4,5 < pH < 8,3	Bicarbonato + H_2CO_3
8,3 < pH < 12,6	Bicarbonato + Carbonato
pH > 12,6	Carbonato

Os valores de pH medidos nas fontes estiveram sempre abaixo de 7,98, de modo que o ânion CO_3^{2-} não está presente em nenhuma das análises. O íon bicarbonato é o íon mais importante, sendo responsável, juntamente com o cálcio e o magnésio, por cerca de 90% da mineralização da água em todas as bacias estudadas. As concentrações de HCO_3^- , mostram relação linear com valores de STD, com alto coeficiente de correlação ($r^2 = 0,98$). As concentrações de HCO_3^- variam de 130,7 mg/l a 288,2 mg/l, com média de 196,2 mg/l. A variação temporal da concentração de bicarbonatos nas águas das fontes estudadas está apresentada na FIGURA 8.

FIGURA 8 – VARIACÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE HCO_3^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



Fósforo

Os fosfatos e compostos de fósforo se encontram em pequenas concentrações nas águas naturais, provavelmente, na forma de ânion fosfato ou formando complexos com íons metálicos e partículas coloidais. O fósforo é freqüentemente relatado em termos de uma quantidade equivalente de ortofosfato (PO_4^{-3}) (CHAPMAN; KIMSTACH, 1996).

O fosfato é um nutriente básico das plantas, sendo usado intensamente como fertilizante. O fosfato derivado da apatita ou de outros minerais contendo fósforo, é insolúvel ou pouco solúvel, sendo por isso mais aplicado em culturas perenes. Para culturas de rotação mais rápida, são aplicados os superfosfatos, que são solúveis em água. No entanto, após a aplicação desses compostos, reações químicas com o solo reduzem a solubilidade desse composto, diminuindo a sua disponibilidade tanto para as plantas quanto para a água de percolação (WILD, 1995).

Por ser pouco solúvel, o fósforo ocorre na água subterrânea em concentrações muito baixas. No entanto, podem ocorrer concentrações elevadas de fosfatos nas águas superficiais e subterrâneas resultantes de atividades, tais como: rejeitos de fábricas de fertilizantes lixiviados ou carreados para mananciais de superfície ou subterrâneos; aplicação demasiada de fertilizantes fosfatados e efluentes domésticos contendo detergentes (HEM, 1970).

Nas bacias estudadas, as concentrações de ortofosfato (PO_4^{-3}), estão compreendidas entre 0,005 mg/l e 0,46 mg/l, com média de 0,07 mg/l. Embora os teores encontrados sejam baixos, a bacia do Tumiri, situada em área urbana, apresenta teor médio de ortofosfato mais baixo e a menor amplitude de variação em relação às demais bacias, onde a prática agrícola é mais intensa. Essa diferença nos teores de ortofosfato pode ser consequência da utilização de fertilizantes.

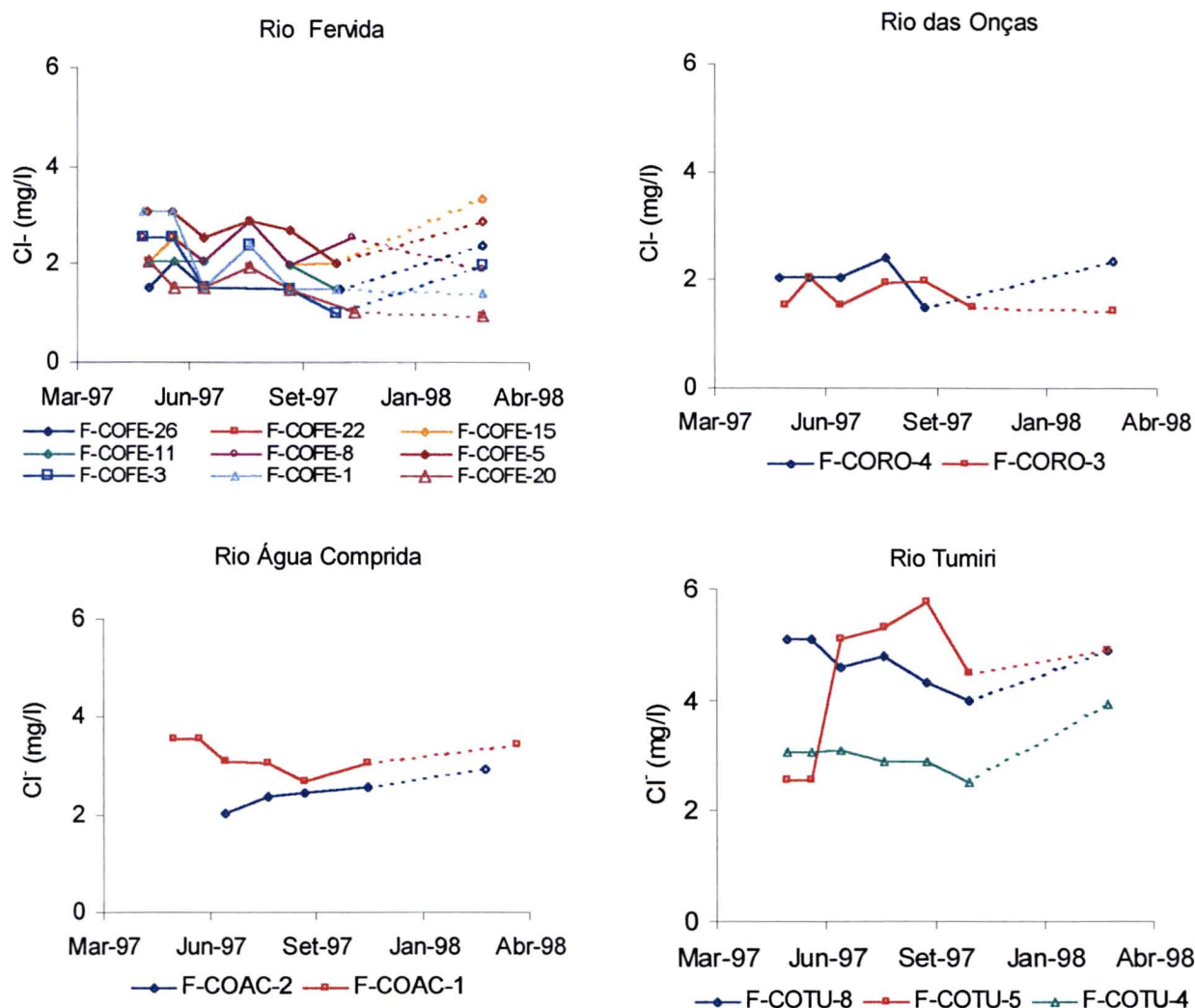
Cloreto

Em geral, o ânion Cl^- está associado ao Na^+ , sendo muito solúvel, estável e dificilmente precipitável. A ocorrência desse íon na água está associada a intrusões

salinas em zonas costeiras, passagem da água por rochas sedimentares formadas em ambiente marinho ainda não totalmente isentas do sal retido durante a diagênese, infiltração de água e lixiviação de solos em ambientes de clima árido, solubilização de depósitos de halita ou outros evaporitos, além de aerossóis do *spray* marinho. As fontes antrópicas são os efluentes domésticos e industriais.

Das bacias estudadas, a do rio Tumiri apresenta a maior concentração média de cloreto com 4,0 mg/l seguida pela do rio Água Comprida com 2,9 mg/l. Essas concentrações elevadas de cloreto combinadas com outros parâmetros, como se verá adiante, podem ser um indicio de contaminação por efluentes domésticos, principalmente as fontes do Tumiri, situadas em área urbana. A variação temporal do ânion Cl^- nas águas das fontes estudadas está apresentada na FIGURA 9. As diferenças no padrão de variação do cloreto entre pontos distintos de uma mesma bacia sugerem sua origem por atividade antrópica.

FIGURA 9 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Cl^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



Ferro

É um dos elementos mais abundantes na crosta. A forma mais freqüente de ferro nas águas subterrâneas é o íon ferroso Fe^{+2} . A estabilidade dos íons Fe^{+2} , Fe^{+3} , $\text{Fe}(\text{OH})^{+2}$ e $\text{Fe}(\text{OH})^{+}$ depende do pH, Eh e da composição da solução. O complexo FeOH^{+} ocorre em soluções com concentrações baixas de dióxido de carbono dissolvido. Com pH elevado praticamente não existe ferro dissolvido (HEM, 1970; CUSTÓDIO, 1983a).

Os teores de Fe total são, em geral, bastante baixos, com média de 0,06 mg/l. Alguns valores anômalos foram registrados nas fontes F-COFE-1, F-COFE-5 e F-COTU-5, esses valores, acima do valor máximo permitido de 0,3 mg/l estabelecido na PORTARIA Nº 36 (BRASIL. Ministério da Saúde, 1990), devem ser tomados com precaução, podendo ser atribuídos a erros de análise.

Nitrato e Nitrito

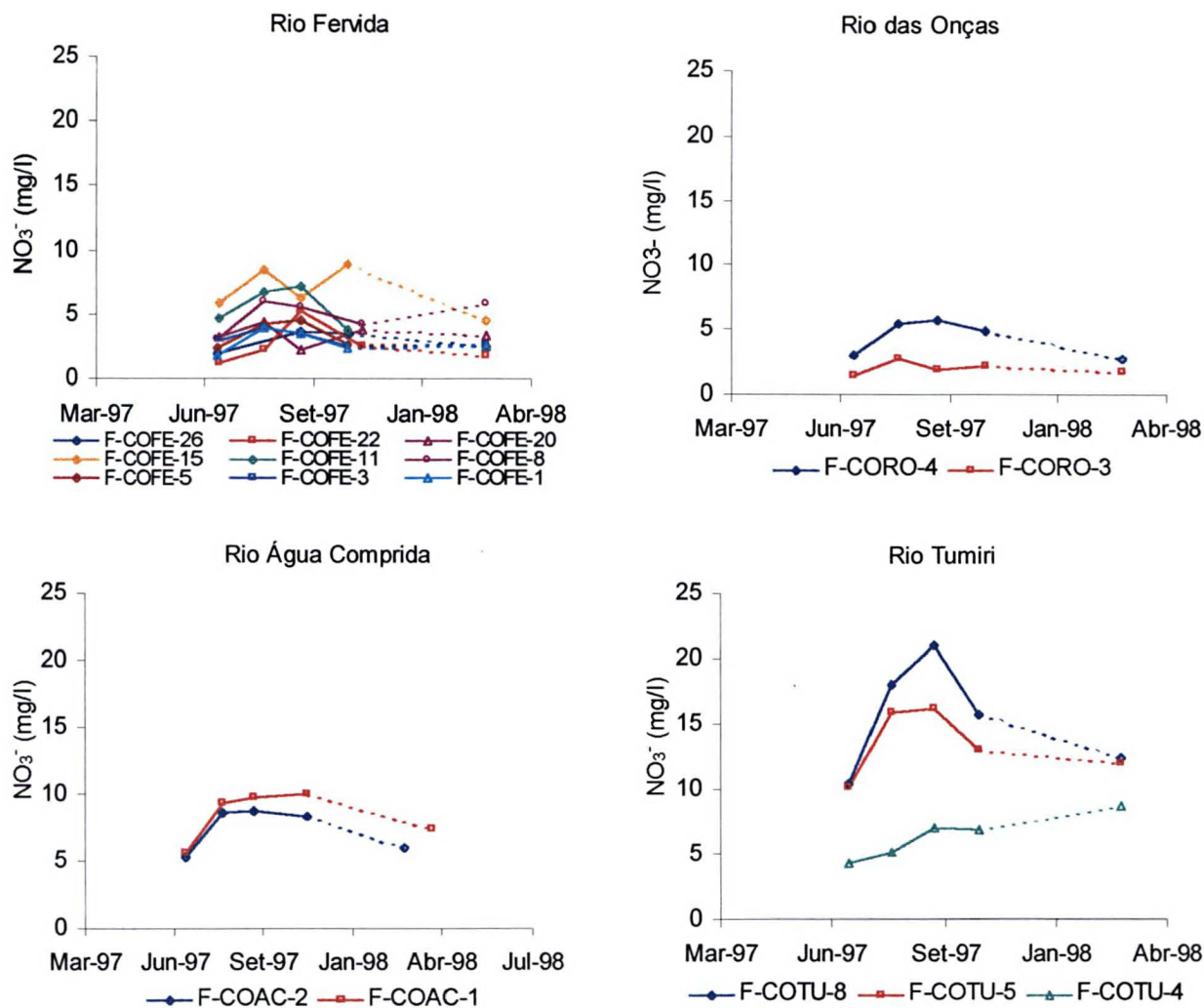
O nitrogênio é um elemento essencial para todos os tipos de vida e, na forma de nitrato dissolvido é um macronutriente para os vegetais. Alguns tipos de bactérias podem retirar nitrogênio da atmosfera e fixá-lo no solo, na forma de nitrato. As plantas retiram nitratos do solo, que são devolvidos ao solo, em parte, quando a planta morre. Perdas de nitrato nesse ciclo ocorrem por lixiviação ou escoamento superficial, aparecendo nas águas subterrâneas e nos rios. A oxidação e redução das espécies aquosas de nitrogênio estão intimamente ligadas à atividade biológica. Por oxidação, as espécies reduzidas de N podem converter em gás N_2 , ou em nitrito NO_2^- e, finalmente, em nitrato NO_3^- (HEM, 1970).

As fontes de nitrato e nitrito nas águas naturais são similares. São componentes indesejáveis na água, podendo indicar contaminação antrópica causada por efluentes domésticos, industriais ou fertilizantes. Fazendas de criação de animais podem produzir quantidades consideráveis de rejeitos orgânicos nitrogenados, concentrados nos locais de confinamento de animais, que causam a contaminação do aquífero freático pela lixiviação, por água de chuva, desses rejeitos orgânicos. O uso de adubo orgânico e a prática rotineira de irrigação são atividades capazes de enriquecer o teor de nitratos da água subterrânea (HEM, 1970).

O conteúdo de nitrato das amostras analisadas é um dos parâmetros mais discriminantes das bacias estudadas. Os valores médios das bacias do rio das Onças, da Fervida, do Água Comprida e do Tumiri são, respectivamente, 3,2 mg/l, 4,0 mg/l, 7,9 mg/l e, 11,8 mg/l. Duas das três fontes da bacia do Tumiri apresentam teores médios de NO_3^- acima de 13,0 mg/l. É possível que a origem do NO_3^- , na bacia do Tumiri, esteja relacionada a efluentes domésticos uma vez que ocorrem associados a outros indicadores de contaminação por esgotos como Cl^- e Na^+ .

Embora as bacias do rio das Onças e da Fervida sejam áreas de intensa prática agrícola, os teores de NO_3^- nas amostras analisadas são ainda baixos. Somente a fonte F-COFE-17, ao lado da qual existe um depósito de esterco de galinha, apresentou teor muito acima da média das bacias da Fervida e do Onça, com cerca de 11,0 mg/l. Deve-se considerar que esse é o resultado de uma única amostra e que existe a possibilidade de contaminação por escoamento superficial de chorume da pilha de esterco de galinha, para dentro do tanque da fonte. A variação temporal da concentração de nitrato nas águas das fontes estudadas está apresentada na FIGURA 10.

FIGURA 10 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE NO_3^- NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



Cálcio e Magnésio

O cálcio é um constituinte essencial de muitos minerais formadores de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, como os feldspatos plagioclásios representados pela série albita-anortita, piroxênios, anfibólios, calcita, dolomita, gipso e anidrita entre outros. Pode aparecer também, na forma de cimento carbonático em alguns arenitos. O intemperismo de rochas contendo tais minerais

irá liberar cálcio que será solubilizado e lixiviado por águas que entrem em contato com essas rochas, desde que as condições de pH sejam favoráveis (HEM, 1970; KRAUSKOPF, 1972).

A origem natural de íons magnésio está relacionada à alteração de rochas contendo minerais ferromagnesianos tais como, olivinas, piroxênios, anfibólios e micas escuras. Em rochas sedimentares o magnésio ocorre na forma de carbonatos, como magnesita, brucita e dolomita. Ocorre ainda, no solo na forma de clorita e montmorilonita. A ocorrência de magnésio na água é causada pela passagem da água através de rochas e solos contendo os minerais citados, e as concentrações resultantes dependem das quantidades e formas disponíveis e do pH (HEM, 1970).

Os íons Ca^{+2} e Mg^{+2} são incorporados à água em concentrações que dependem das quantidades e formas disponíveis, do tempo e modo de interação entre a água e a rocha e das condições ambientais, todas ligadas à concentração de CO_2 , que controlam o equilíbrio químico dos minerais carbonáticos conforme descrito a seguir (HEM, 1970; KRAUSKOPF, 1972):

- pH: quanto mais ácido o meio, mais intensa é a dissolução, ocorrendo precipitação para pH básico;

- concentração de CO_2 : aumento da concentração de CO_2 aumenta a acidez da água, favorecendo a dissolução e, no caso inverso, precipitação;

- temperatura: a solubilidade diminui com o aumento da temperatura. Esse comportamento, oposto ao da maioria dos solutos não gasosos, se deve à diminuição da concentração do CO_2 com o aumento da temperatura;

- pressão: a solubilidade aumenta com a elevação da pressão;

- decomposição de matéria orgânica: ocorrendo em condições aeróbicas, libera grandes quantidades de CO₂, tornando o meio favorável à dissolução.

Embora cálcio e magnésio tenham comportamento químico semelhante, sendo ambos os principais causadores da dureza da água, geoquimicamente, esses elementos são substancialmente diferentes. Os íons de magnésio são menores do que os de cálcio e, por isso, tem uma densidade de carga mais forte e maior atração sobre as moléculas da água. O íon Mg⁺² é, normalmente, a forma predominante de magnésio em soluções aquosas, estando, provavelmente, circundado por seis moléculas de água formando uma camada de hidratação, podendo ser representado como Mg(H₂O)₆²⁺ (HEM, 1970).

O cálcio é o cátion predominante, com concentrações variando de 18,0 mg/l a 45,5 mg/l, com média de 28,3 mg/l. As concentrações mais altas ocorrem nas fontes do Tumiri, média de 37,0 mg/l, enquanto a média das outras bacias fica em torno de 24 mg/l.

A mesma situação se verifica com o magnésio que apresenta teores mais elevados nas fontes do Tumiri, onde a concentração média é 25 mg/l, enquanto a média das outras bacias é de 17 mg/l. A variação temporal das concentrações de Ca⁺² e Mg⁺² nas águas das fontes estudadas está apresentada nas FIGURAS 11 e 12.

FIGURA 11 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Ca^{+2} NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.

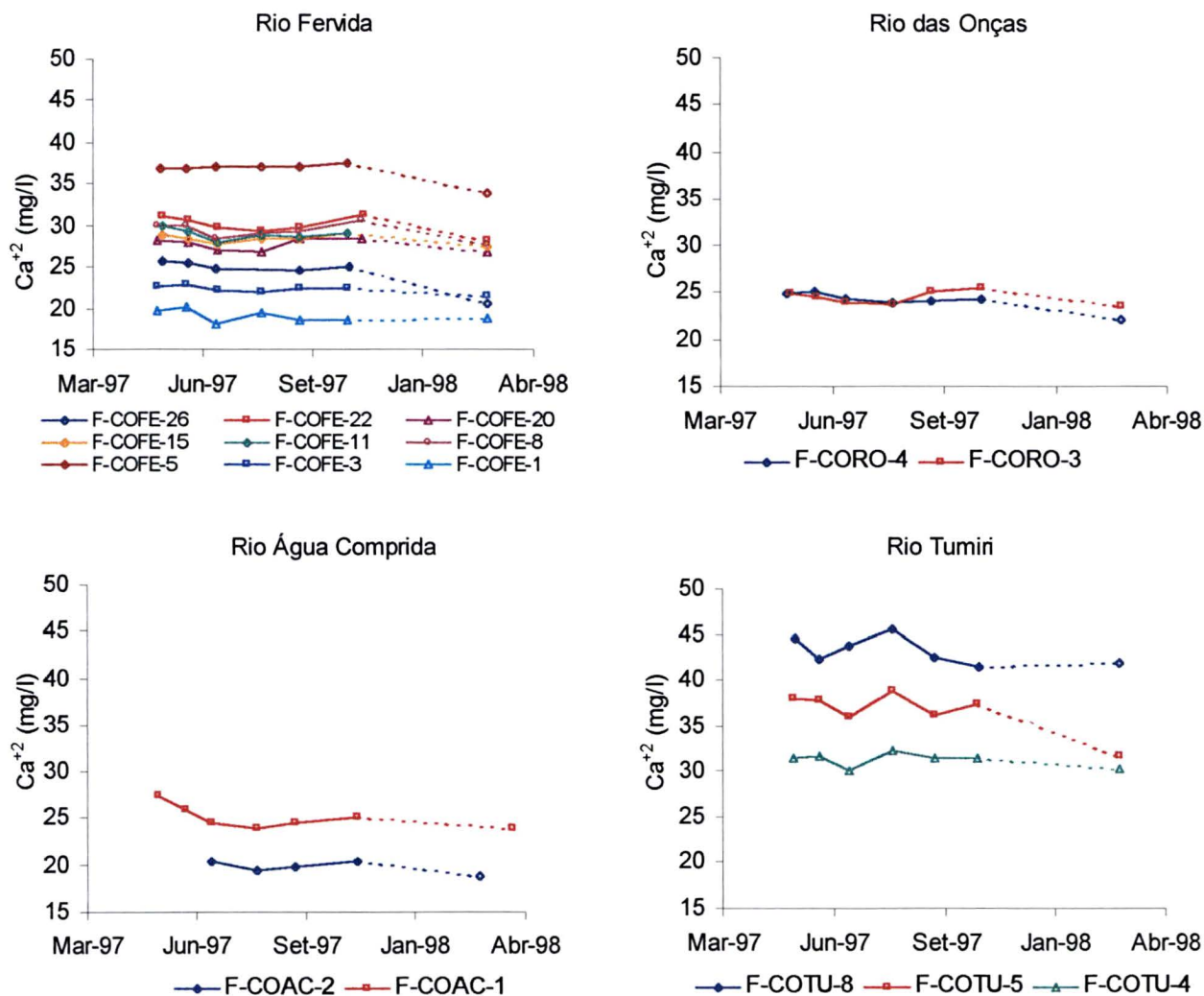
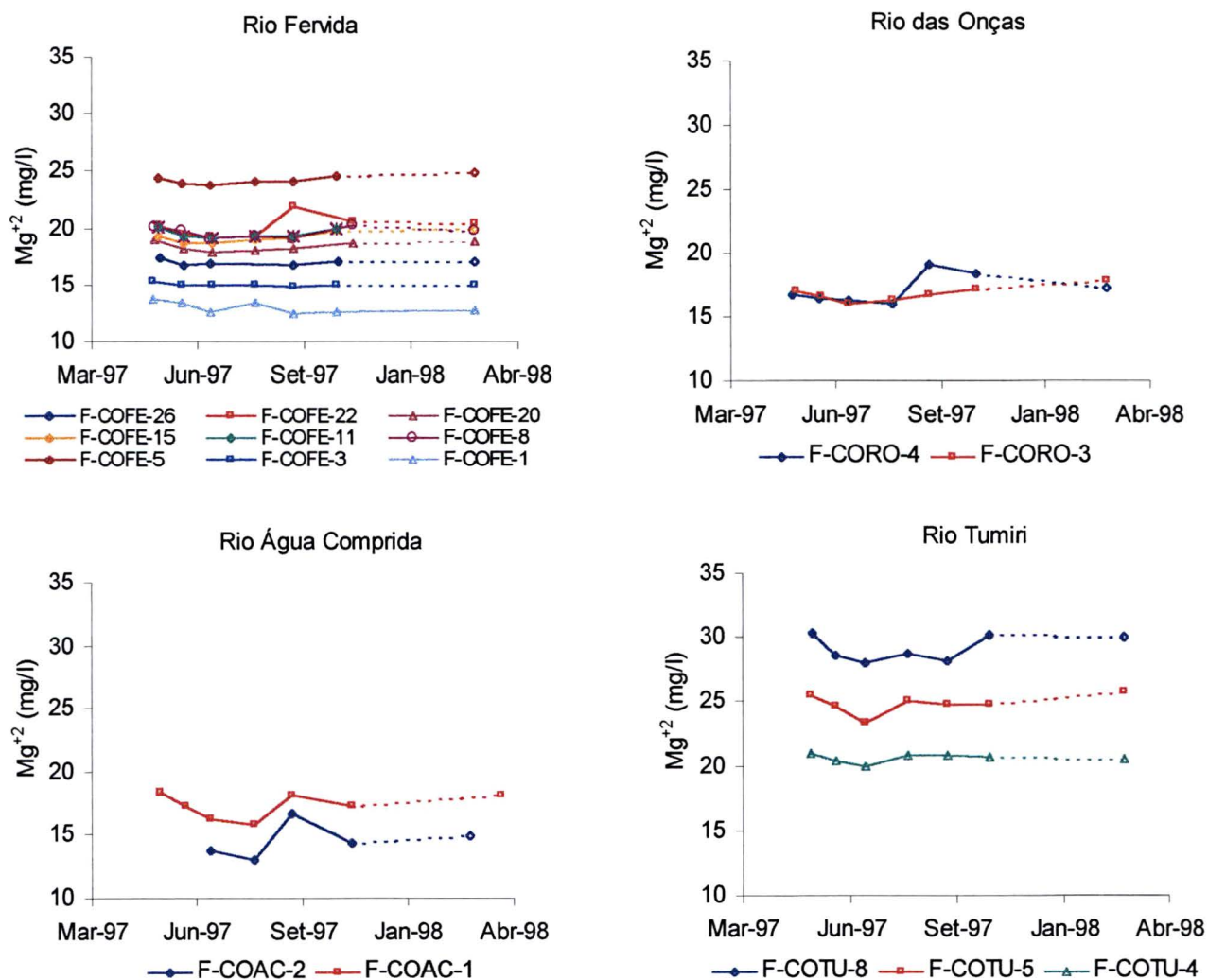


FIGURA 12 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Mg^{+2} NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



Sódio e Potássio

A quantidade de potássio na crosta é aproximadamente igual à do sódio, mas em águas naturais, a quantidade de potássio é muito baixa comparada com a de sódio. Isto é explicado porque enquanto o sódio tende a ficar em solução desde que foi liberado da estrutura mineral, o potássio é liberado com mais dificuldade, além de

ter a tendência de ser reincorporado na estrutura dos minerais de argila (HEM, 1970).

Os principais minerais que contém potássio são os feldspatos ortoclásio e microclínio, leucita e biotita, já os feldspatos plagioclásios podem ser considerados como a fonte mais importante de sódio. Evaporitos podem incluir, localmente, lentes de sais de sódio e potássio. As cinzas dos vegetais podem fornecer ao ambiente altas taxas de potássio, uma vez que esse elemento é um macronutriente essencial das plantas (HEM, 1970).

A concentração média de sódio é de 1,88 mg/l e os máximo e mínimo são, respectivamente, 4,98 mg/l e 0,85 mg/l. Os teores de sódio apresentam características semelhantes às de nitrato para as bacias estudadas. As bacias do Tumiri e do Água Comprida apresentam médias superiores às do rio das Onças e da Fervida. O sódio quando correlacionado com cloreto tem coeficiente de correlação de 0,78. Isso pode indicar uma associação entre os dois e que sua origem esteja associada a efluentes domésticos. A variação temporal das concentrações de Na^+ e K^+ nas águas das fontes estudadas estão apresentadas nas FIGURAS 13 e 14.

FIGURA 13 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE Na^+ NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.

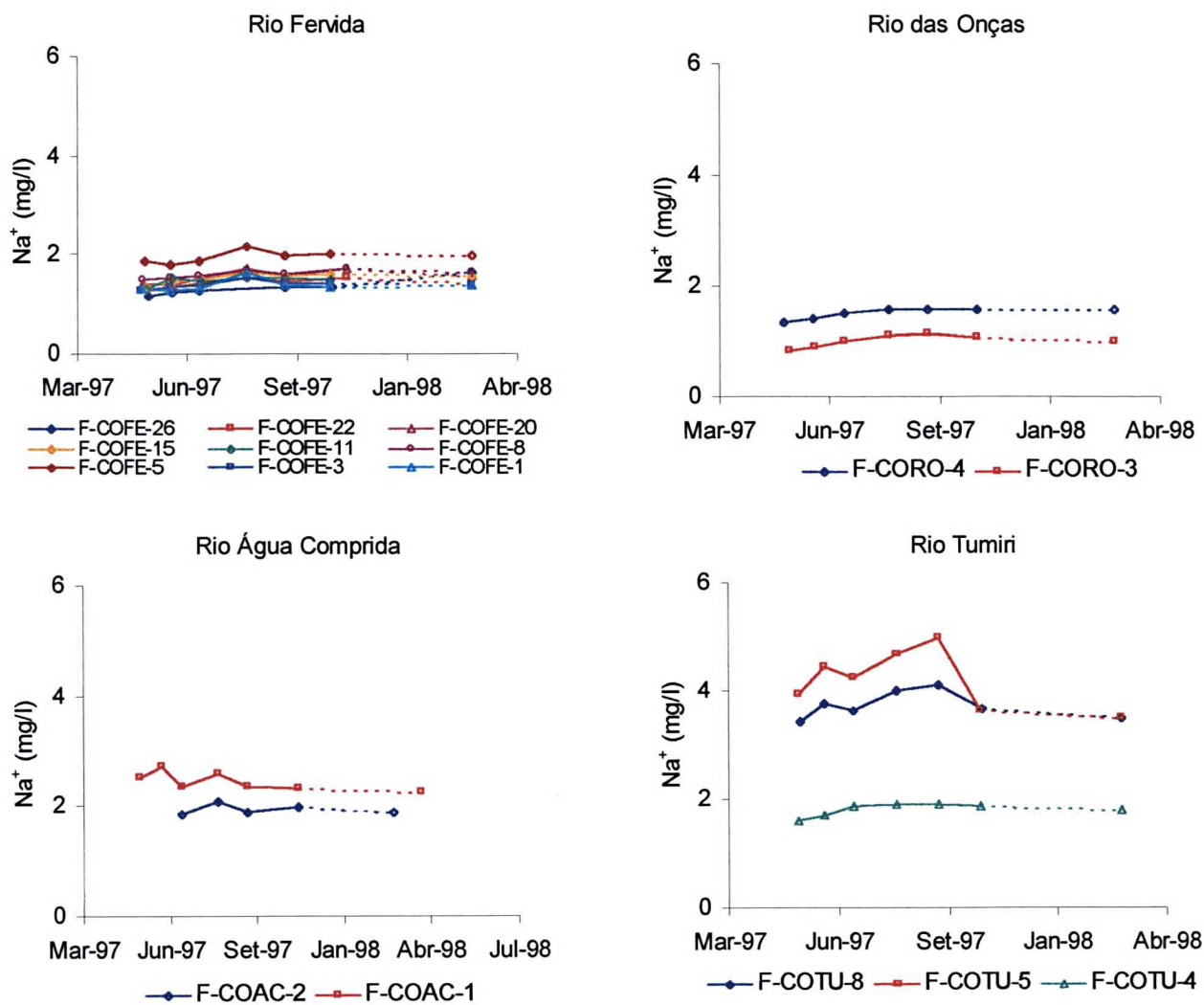
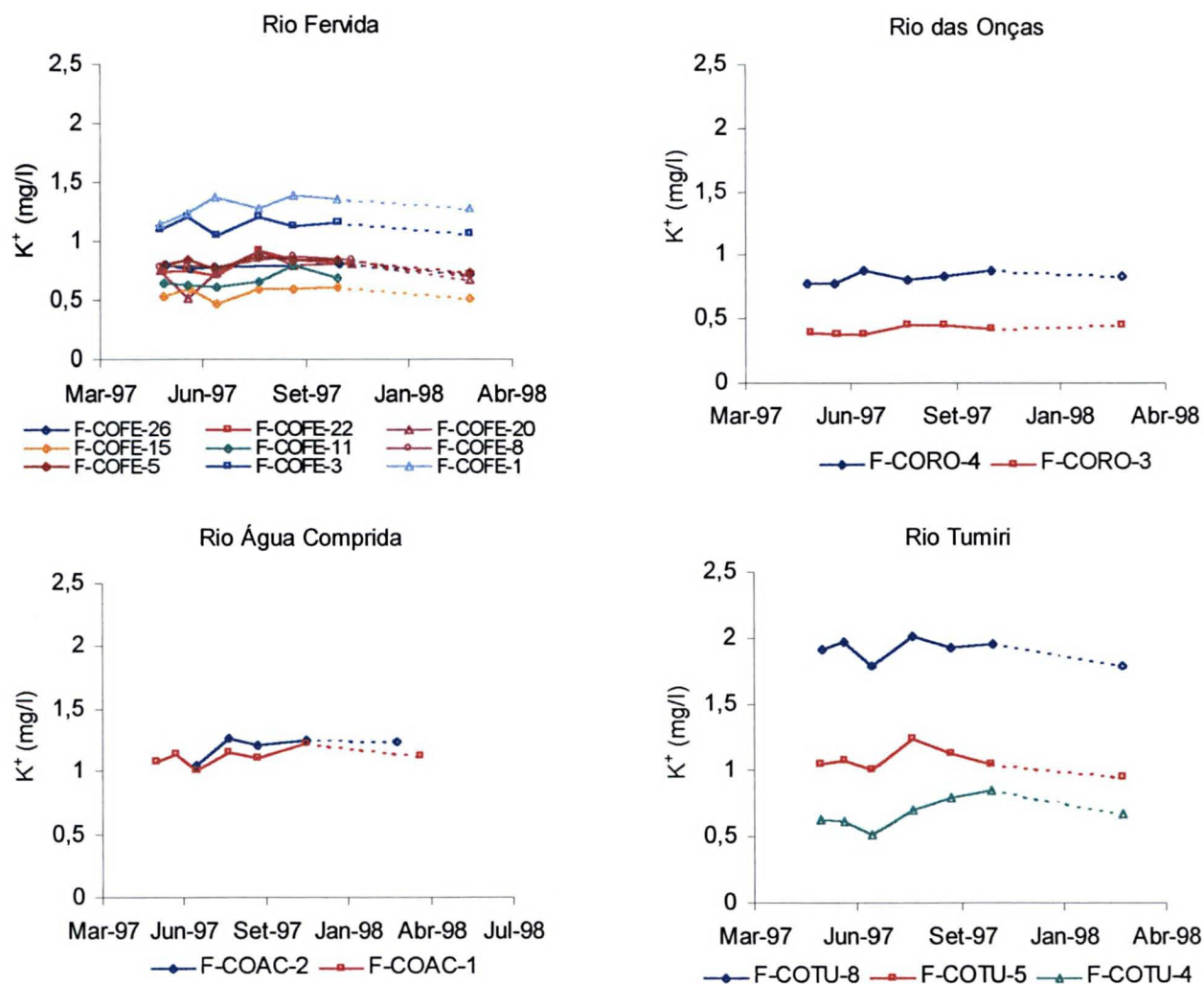


FIGURA 14 – VARIACÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE K^+ NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



4.1.5 Índice de saturação de calcita e relações interiônicas

As condições de equilíbrio entre as fases minerais e a fase líquida foram avaliadas utilizando-se o índice de saturação da calcita. O índice de saturação da dolomita, por indicar uma condição de equilíbrio aparente, não foi utilizado. SHUSTER; WHITE (1971), informam que erros de medida de pH da ordem de 0,04 unidades causam um erro no cálculo do índice de saturação de 0,1. Sendo $\pm 0,05$ o erro de medida do pH-metro utilizado, considerou-se, neste trabalho, que águas com IS entre +0,1 e -0,1 estariam saturadas com relação a calcita. Essa faixa está representada nos gráficos da FIGURA 15, por duas linhas tracejadas, paralelas ao eixo das abcissas.

Os índices de saturação com relação à calcita para as fontes estudadas estão apresentados na FIGURA 15. A maior parte das fontes apresentam índices próximos à saturação. Esses índices sofrem variações sazonais de modo que durante um período a água é um solvente potencial passando a ser incrustante em outros. As causas dessas variações não foram estudadas neste trabalho mas devem ter como origem variações sazonais de atividade orgânica no solo e, também, influências climáticas, sobretudo precipitações pluviométricas e temperatura ambiente.

As águas da fonte F-COFE-1 estavam insaturadas com relação a calcita em todas as amostras. Essa fonte está localizada em um compartimento pequeno e com 70% de sua bacia de captação coberta por filito. A FIGURA 16(a), mostra a relação inversa entre a descarga da fonte e o índice de saturação. Ou seja, o aumento da descarga da fonte corresponde a uma diminuição no índice de saturação e vice-versa. Isso pode estar sendo causado pela diluição das águas do aquífero por infiltração de águas de chuva. Pode-se ver ainda na FIGURA 16 (a), que a variação

de vazão na fonte acompanha a curva de precipitação com defasagem de cerca de 1 mês. Esse efeito de diluição deixa de ser tão evidente em outras fontes, embora as variações de descarga sejam influenciadas pela precipitação após um intervalo de tempo de 2 meses como pode ser observado nas FIGURAS 16(b) e 16(c). Uma possível explicação para isso seria o tamanho do compartimento drenado por tais fontes, que acumularia um volume de água suficiente para atenuar o impacto da diluição causada por uma nova recarga. O gráfico da FIGURA 17 relaciona o índice de saturação da calcita (ISc), com a pressão parcial de CO₂ (pCO₂). Podem ser separados nesse gráfico, cinco grupos de fontes caracterizados pela relação linear entre o ISc e a pCO₂, o que indica semelhança entre as áreas e processo de recarga dessas fontes. A fonte F-COFE-1 apresenta valores de pCO₂ inferiores aos das outras fontes, indicando recarga através de solos rasos e com pouca atividade microbiológica. Os solos de filito, que cobrem a área de captação dessa fonte, são geralmente de baixa fertilidade e com horizonte orgânico muito inferior aos desenvolvidos sobre rochas carbonáticas. Além disso, o tempo de percolação da água através do solo deve ser insuficiente para que ela consiga incorporar o CO₂ existente na atmosfera do solo. No outro extremo estão as fontes F-COFE-5, F-COTU-5 e F-COFE-8 que, embora insaturadas com relação à calcita, têm concentrações de CO₂ elevadas, cuja origem pode estar relacionada a infiltração lenta através de solos espessos ricos em matéria orgânica.

A relação rMg^{+2}/rCa^{+2} apresenta média de 1,13, valor característico de terrenos dolomíticos. No gráfico da FIGURA 18, pode-se observar que as fontes se agrupam, segundo a relação rMg^{+2}/rCa^{+2} , de forma semelhante à observada no gráfico ISc x pCO₂.

Os gráficos de $r\text{Na}^+/r\text{K}^+$ (FIGURA 19) e $r/\text{NO}_3^-/r\text{Cl}^-$ (FIGURA 20), mostram as fontes F-COTU-5 e 8 de forma isolada com relação às outras fontes. Esse padrão distinto pode ser indicativo de contaminação antrópica, principalmente, no que diz respeito à fonte F-COTU-5.

FIGURA 15 – VARIÇÃO TEMPORAL DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA NAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.

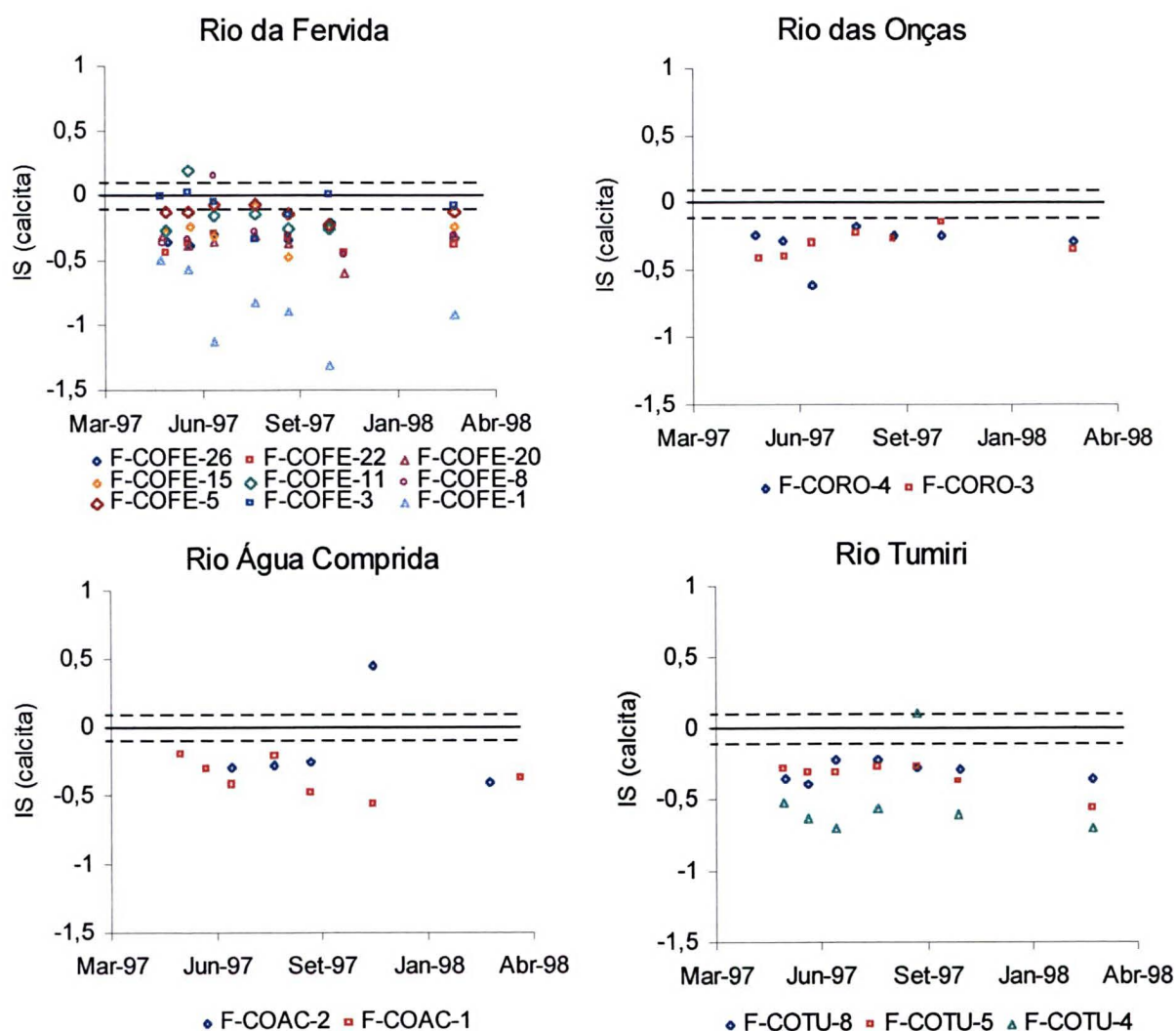


FIGURA - 16 RELAÇÃO ENTRE AS VARIAÇÕES TEMPORAIS DO ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA, PRECIPITAÇÃO E VAZÃO DE FONTES DA BACIA DO RIO FERVIDA.

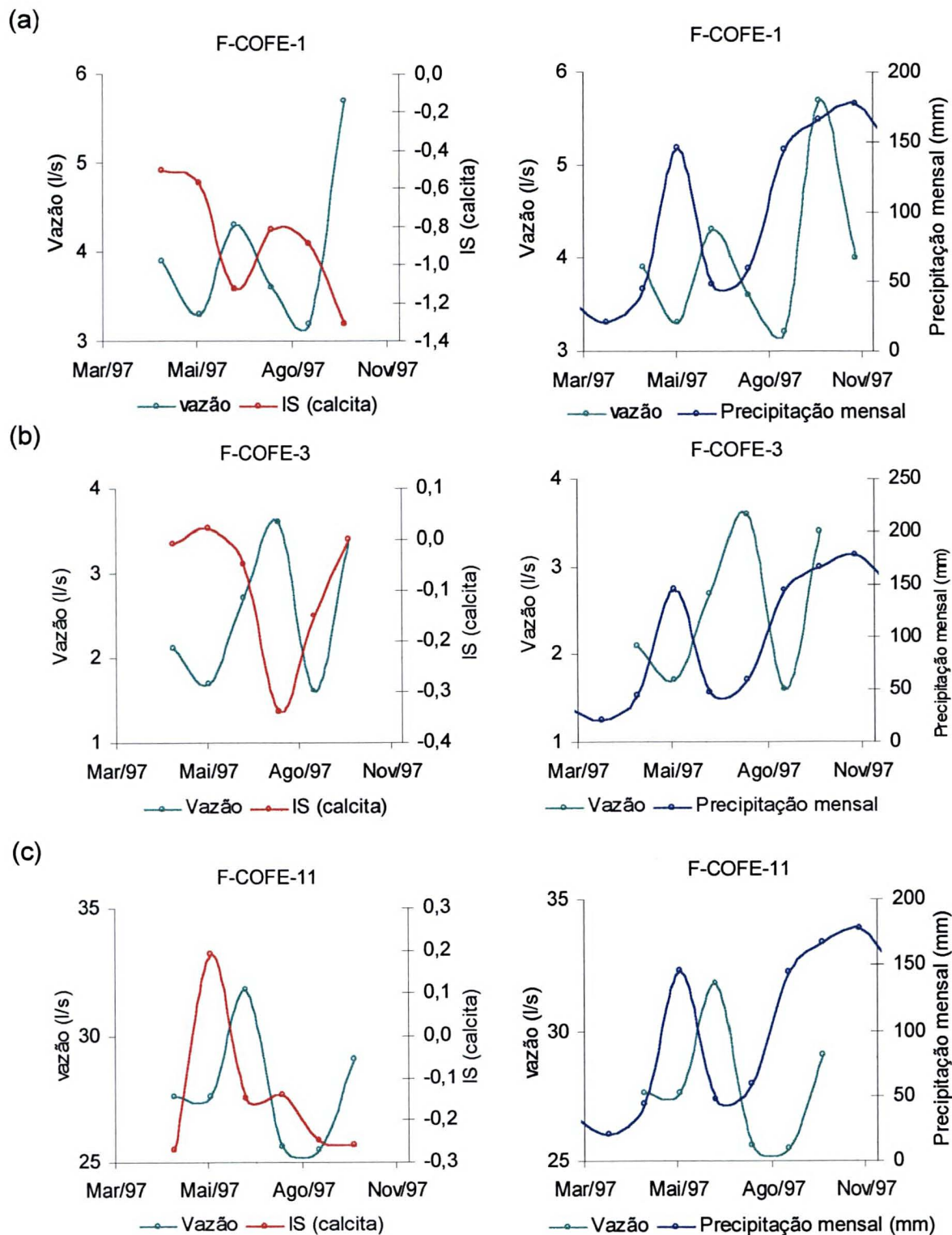


FIGURA - 17 RELAÇÃO ENTRE A PRESSÃO PARCIAL DE CO₂ E O ÍNDICE DE SATURAÇÃO DE CALCITA.

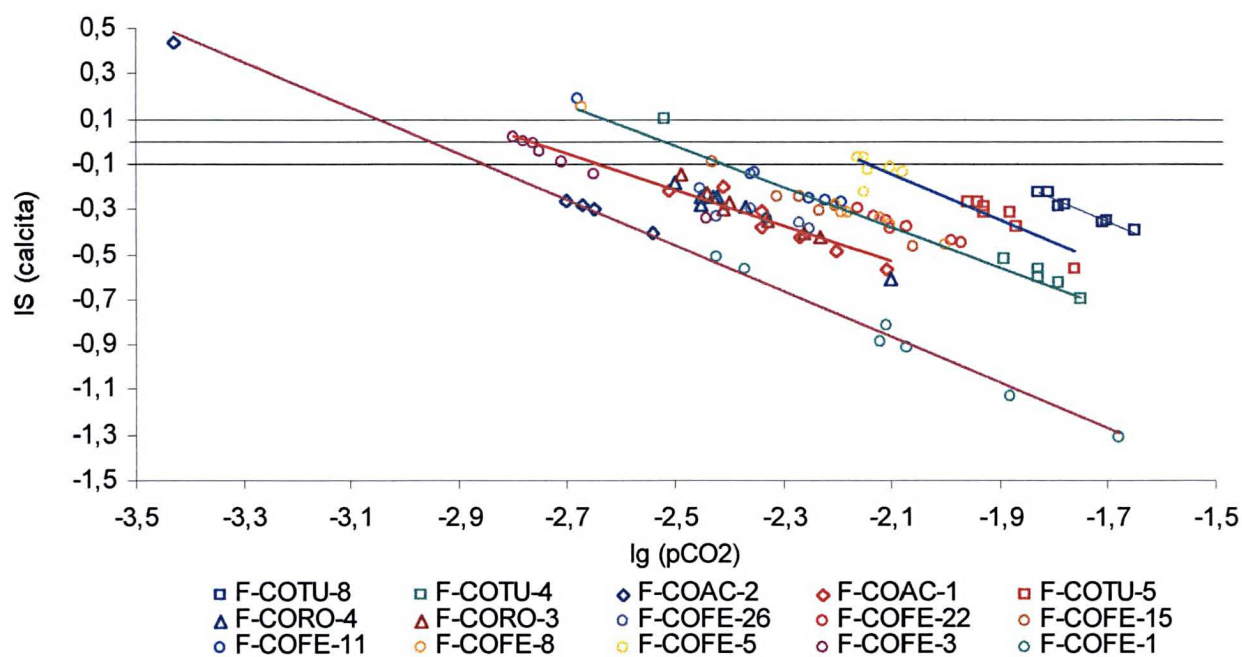


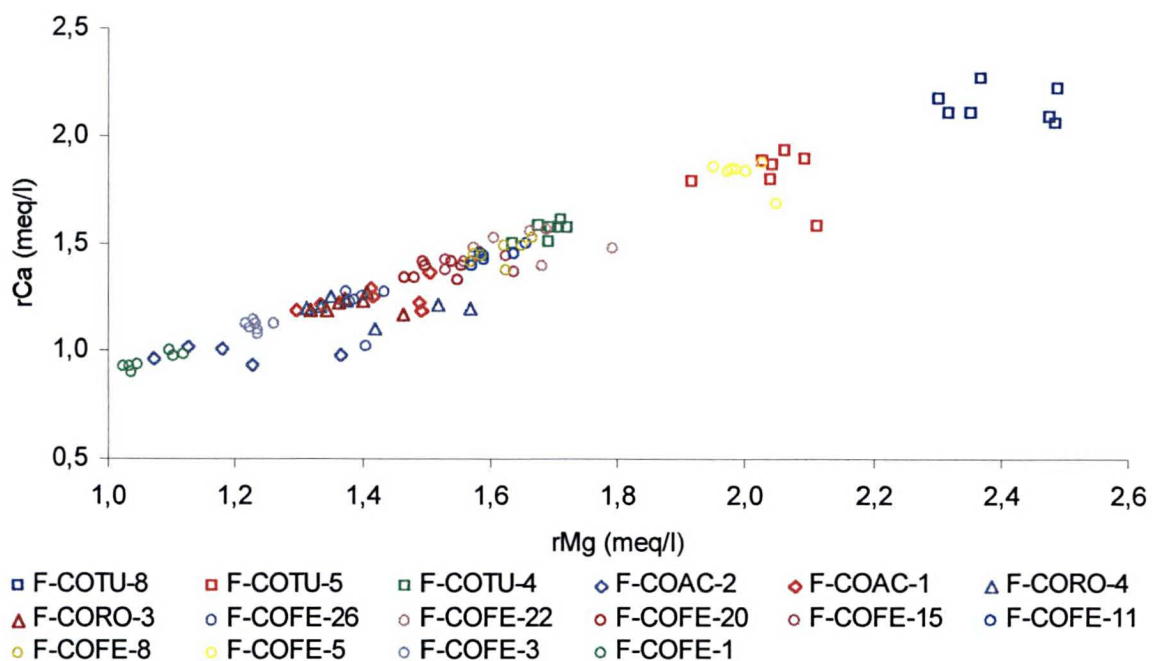
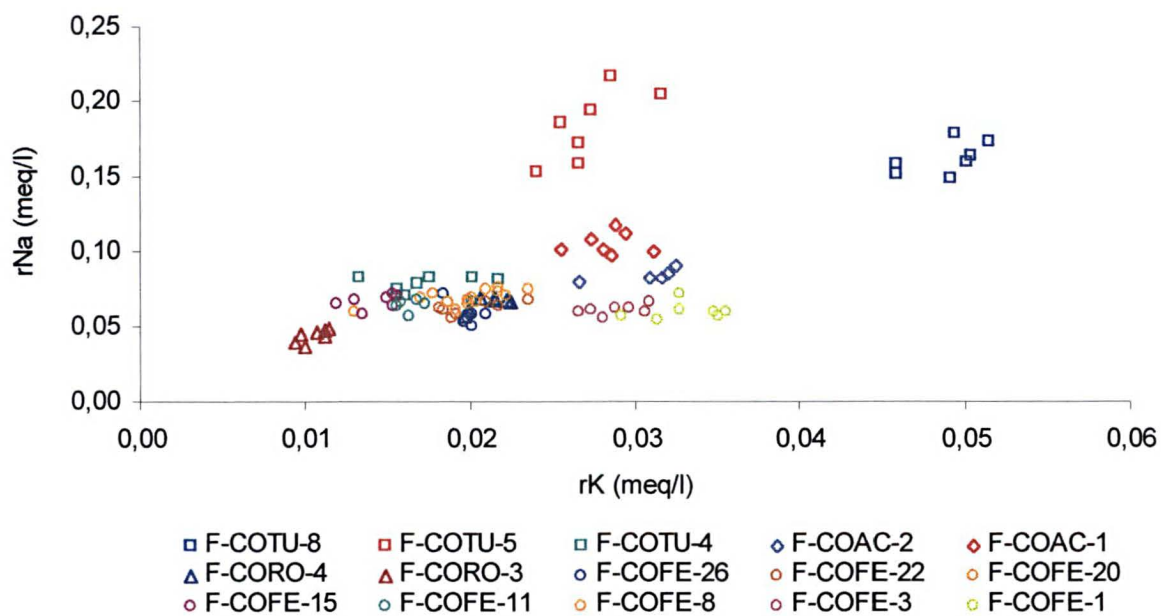
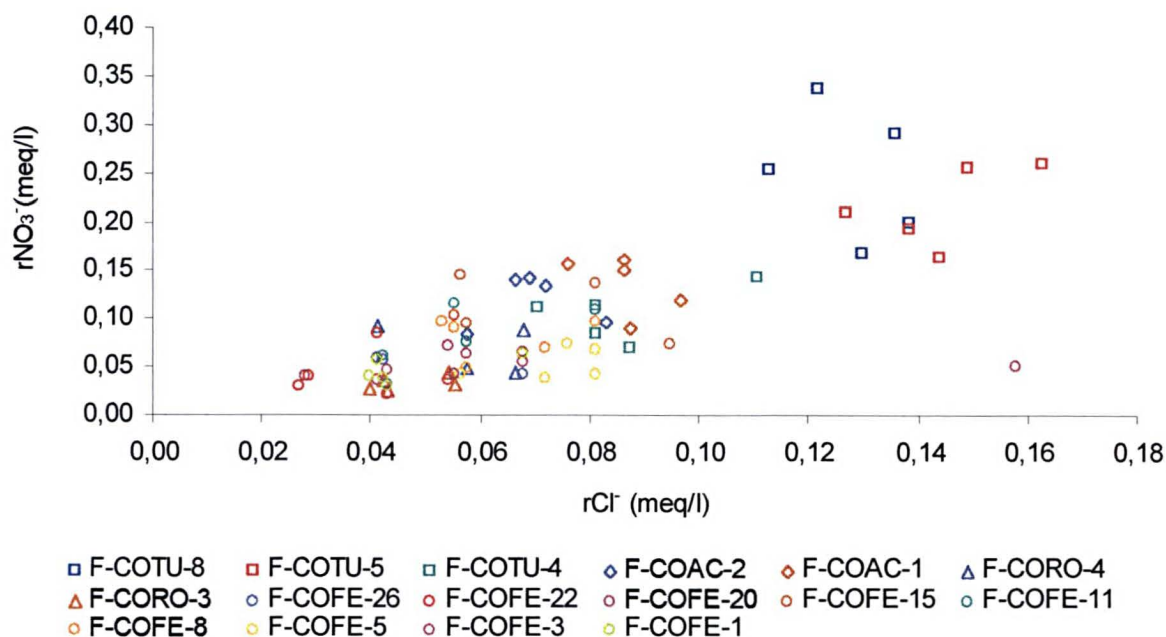
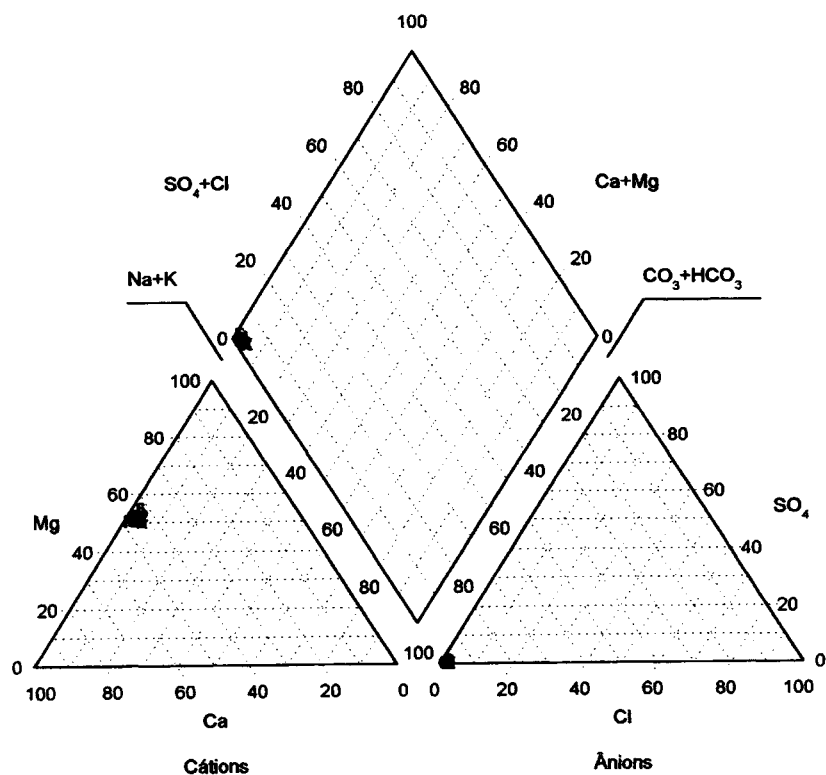
FIGURA - 18 RELAÇÃO rMg^{+2}/rCa^{+2} .FIGURA - 19 RELAÇÃO rNa^{+}/rK^{+} .

FIGURA - 20 RELAÇÃO $r\text{NO}_3^-/r\text{Cl}^-$.

4.1.6 Classificação geoquímica da água

A classificação geoquímica da água adotada neste trabalho foi a de íons dominantes, complementada pela medida da condutância específica, para avaliação do grau de mineralização das águas. Os valores utilizados para a classificação geoquímica correspondem às médias aritméticas das concentrações dos íons considerados. As fontes F-COFE-4, F-COFE-17 e F-COFE-25 foram amostradas uma única vez. As águas são todas do tipo bicarbonatadas magnesianas e pertencem aos grupos 5-d-C2, com exceção das fontes F-COFE-1, F-COFE-25 e F-COAC-1, que são do grupo 5-d-C1. Os dados utilizados e os resultados dessa classificação estão apresentados na TABELA 12 e o diagrama de Piper correspondente está apresentado na FIGURA 21.

FIGURA - 21 DIAGRAMA DE PIPER DE ÁGUA DAS FONTES DAS BACIAS DOS RIOS FERVIDA, DAS ONÇAS, ÁGUA COMPRIDA E TUMIRI.



1 F-COAC-1	6 F-COFE-17	B F-COFE-26	G F-COFE-4
2 F-COAC-2	7 F-COFE-19	C F-CORO-3	H F-COFE-5
3 F-COFE-1	8 F-COFE-20	D F-COFE-3	I F-COFE-8
4 F-COFE-11	9 F-COFE-22	E F-CORO-4	J F-COTU-4
5 F-COFE-15	A F-COFE-25	F F-CORO-7	K F-COTU-5
			L F-COTU-8

TABELA -12 CLASSIFICAÇÃO GEOQUÍMICA DAS ÁGUAS DAS FONTES

Fonte	rCa ⁺² (%)	rMg ⁺² (%)	rNa ⁺ (%)	rHCO ₃ ⁻ (%)	rCl ⁻ (%)	rSO ₄ ⁻² (%)	K (μS/cm)	Classificação Geoquímica	Grupo
BACIA DO RIO DA FERVIDA									
F-COFE-1	45,7	51,4	2,9	97,0	2,5	0,5	220	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C1
F-COFE-3	46,2	51,3	2,5	97,5	2,1	0,4	257	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-4	46,2	51,6	2,2	97,9	1,8	0,3	283	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-5	46,7	51,1	2,2	97,9	1,8	0,2	400	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-8	46,4	51,4	2,2	97,7	1,9	0,3	328	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-15	46,2	51,6	2,2	97,6	2,1	0,3	318	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-17	42,4	55,1	2,4	97,2	2,5	0,3	383	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-19	46,2	51,7	2,1	98,2	1,4	0,3	327	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-20	46,6	51,1	2,3	97,5	2,2	0,3	312	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-22	46,5	51,5	1,9	98,5	1,2	0,3	333	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COFE-25	45,0	52,1	2,9	97,2	2,3	0,4	225	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C1
F-COFE-26	45,4	52,4	2,2	98,0	1,7	0,4	286	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
BACIA DO RIO DAS ONÇAS									
F-CORO-3	46,1	52,3	1,7	98,0	1,6	0,4	280	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-CORO-4	44,9	52,7	2,4	97,9	1,7	0,4	281	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
BACIA DO RIO ÁGUA COMPRIDA									
F-COAC-1	45,0	51,2	3,8	96,5	3,1	0,4	288	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COAC-2	43,5	52,7	3,7	96,6	2,9	0,4	245	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C1
BACIA DO RIO TUMIRI									
F-COTU-4	46,8	50,8	2,4	97,3	2,4	0,3	339	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COTU-5	45,0	50,5	4,5	96,8	3,0	0,3	408	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2
F-COTU-8	45,7	50,9	3,4	97,0	2,7	0,2	487	Bicarbonatada - magnesiânica	5-d-C2

4.2 HIDROGEOLOGIA

4.2.1 O aquífero cárstico e a ocorrência de fontes

A área de estudo abrange parte do sistema aquífero cárstico paranaense, formado pelas rochas carbonáticas da Formação Capiru do Grupo Açungui. Essas rochas, segundo MARINI; BIGARELLA (1967), são metadolomitos de composição constante e homogênea, que se estendem por uma faixa estreita e abrangem os municípios de Colombo, Rio Branco do Sul e Itaperuçu entre outros.

Os afloramentos naturais de metadolomito são raros na área de estudo. Em observações feitas em cortes de pedreiras exploradas para fabricação de cal, essa rocha mostra coloração variando de branca a cinza, textura sacaróide, apresentando-se maciça em alguns locais e intensamente fraturada em outros (FIGURA 22). Pode-se ver também, zonas carstificadas bem desenvolvidas no meio da massa carbonática.

LISBOA (1997), com base na distribuição espacial dos tipos litológicos existentes na área do carste paranaense, apresenta um modelo conceitual do aquífero cárstico, onde este é composto por uma seqüência justaposta de células tridimensionais, com o pacote central constituído por rochas carbonáticas rebaixadas por processos erosivos diferenciais, limitadas na direção NW-SE pelos diques e na direção NE-SW, por faixas de filito e quartzito que se apresentam no terreno com feições morfológicas já citadas.

Os aquíferos cársticos resultam de processos complexos envolvendo fatores lito-estruturais, geomorfológicos, biológicos e climáticos, que causam mudanças nas características hidrogeológicas primárias da rocha, tais como porosidade,

condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento (LEGRAND; LEMOUREAX, 1975; FORD; WILLIAMS, 1991).

FIGURA 22- AFLORAMENTO DE DOLOMITO APRESENTANDO FATURAS E CANAIS DE DISSOLUÇÃO (COLOMBO, PR).



As rochas carbonáticas encontradas na área de estudo têm porosidade e permeabilidade primárias desprezíveis. O fluxo da água é feito através das fraturas, condutos e cavernas formadas pela circulação da água, enriquecida em dióxido de carbono, através das juntas e planos de acamamento da rocha. No afloramento da FIGURA 22 os planos de fratura predominantes têm as seguintes atitudes: N25-40W, 40-50NE e N30-40E, 70-80NW. Na FIGURA 22(b), pode-se ver, na parte superior da foto, água escorrendo no paredão, após percolar através das fraturas. Como a distribuição desses planos não é regular, o aquífero tem caráter

heterogêneo e anisotrópico, o que torna impreciso o resultado de técnicas convencionais de interpretação de ensaios de bombeamento, uma vez que as condições de contorno impostas para caracterizar o fluxo da água em direção ao poço não são mantidas. Além disso, os diques de diabásio e camadas mergulhantes de filitos formam barreiras hidrogeológicas que tornam o modelo hidráulico do sistema aquífero ainda mais complexo. Os parâmetros hidráulicos do aquífero, calculados a partir de ensaios de bombeamento, aplicando os métodos citados, servem apenas para dar a ordem de grandeza desses parâmetros nas proximidades do poço.

As rochas carbonáticas na área de estudo encontram-se cobertas por um manto de intemperismo de espessura variável. Na bacia do rio Tumiri a cobertura de inconsolidados (solo + rocha alterada), determinada a partir dos perfis litológicos de 15 poços tubulares, tem espessura média de 26 m, com máximo de 69 m e mínimo de 9 m. Na bacia do rio Fervida, as espessuras obtidas, usando dados de 19 perfis de poços, são: média, 17m; máxima, 40 m e mínima, 3 m.

Essa cobertura de material inconsolidado, com capacidade de infiltração moderada a boa, é um aquífero livre, com nível estático relativamente raso. Os níveis da água medidos em 7 poços-cacimba, situados na bacia do Tumiri, apresentaram variação de 1,6 m a 7,8 m. O nível médio foi 4,5 m. Deve-se observar que essas medidas foram realizadas em épocas diferentes, sem considerar a topografia do terreno e que o nível mais baixo foi registrado após um longo período de estiagem. Dois desses poços recebem água do aquífero cárstico, fato observado pelo valor da condutância específica dessas águas que foram de 265 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 295 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Um outro poço tem, aparentemente, águas mistas, com condutância

específica de $155 \mu\text{S}/\text{cm}$. A condutância específica média das águas dos demais poços foi $88 \mu\text{S}/\text{cm}$. O único poço-cacimba observado na bacia do Água Comprida apresentou nível estático de 1,25 m e condutância específica de $275 \mu\text{S}/\text{cm}$, indicando alimentação por águas do aquífero cárstico.

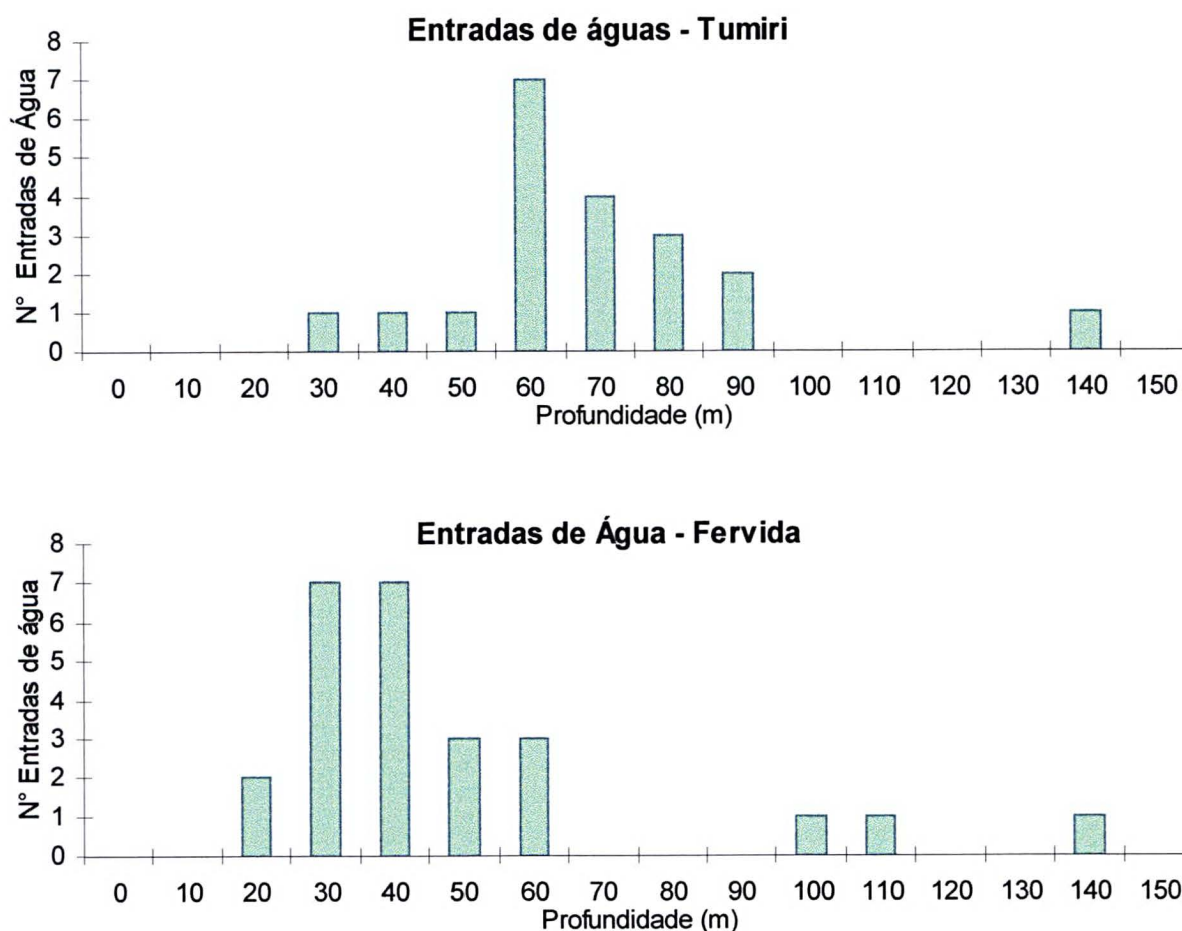
O aquífero cárstico apresenta na área de estudo, características de aquífero semi-confinado ou confinado, com poços surgentes na bacia do Tumiri, como o poço P-08, cujo nível estático atingiu 1,5 m acima da superfície do terreno e o poço P-14 (FIGURA 23), considerado improdutivo pela baixa vazão. Essa característica é confirmada pela presença de água do carste em poços cacimba, indicando que em certos locais, a pressão hidráulica é dirigida de baixo para cima, de modo que o aquífero cárstico (semi-confinado/confinado), alimenta o aquífero freático.

FIGURA 23 - POÇO SURGENTE (P-14), NA BACIA DO RIO TUMIRI, PRÓXIMO À ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA – SANEPAR



Foram perfurados 34 poços na área de estudo, sendo 15 na bacia do rio Tumiri e 19 na do rio Fervida. As entradas de água são constituídas por zonas fraturadas ou cavidades de dissolução com até 1,5 m de vão livre. Os histogramas de profundidade de entradas de água de ambas as bacias estão apresentados na FIGURA 24. Na bacia da Fervida, 56% das entradas de água ocorrem no intervalo de 20 m a 40 m de profundidade e cerca de 90% estão situadas em profundidades de até 60 m. Na bacia do Tumiri, as entradas de água se situam em um nível mais profundo, com intervalo de maior concentração (55%), situado no intervalo de 50 m a 70 m. 95% das entradas ocorrem até 90 m de profundidade.

FIGURA 24 - HISTOGRAMAS DE PROFUNDIDADES DE ENTRADAS DE ÁGUA NOS POÇOS PERFURADOS NAS BACIAS DOS RIOS TUMIRI E FERVIDA.



As maiores profundidades atingidas pelos poços foram 156 m e 135 m nas bacias do Tumiri e da Fervida respectivamente. No entanto, nenhum dos poços perfurados atingiu a base do aquífero.

A altitude média dos poços perfurados nas bacias do Tumiri e Fervida são respectivamente, 990 m e 941 m. Essa diferença de altitude justifica o fato das entradas de água nos poços da Fervida serem mais rasas que as dos poços do Tumiri, levando a crer que os níveis de carstificação estejam situados em profundidades semelhantes nas duas bacias.

THRAILKILL (1968), partindo das seguintes hipóteses: precipitação anual de 1000 mm; infiltração de 50% do volume precipitado; área de infiltração de 1 km²; e que ao chegar no aquífero a água ainda está insaturada com relação a calcita (concentração de 0,0108 mg/l de Ca⁺²), estimou em 100.000 anos, o tempo necessário para escavar uma caverna com 500 m de extensão e seção média de 1 m² em rocha constituída por calcita pura. KARMANN (1994), estudando o sistema de cavernas no vale do rio Ribeira de Iguape (SP), formadas em rochas carbonáticas do Grupo Açungui, determinou as idades mínimas para o entalhamento dessas cavernas, através de datação pelo método ²³⁰Th/²³⁴U de depósitos secundários de calcita (escorrimentos calcíticos e bases de estalagmites). As idades obtidas estão compreendidas entre os valores extremos de 20.000 a 350.000 anos.

Embora seja de caráter especulativo, pode-se considerar, pelas dimensões dos condutos de dissolução atravessados pelos poços perfurados, que as carstificações existentes na área de estudo são geologicamente recentes, com idades situadas entre aquelas determinadas por KARMANN (1994).

Os gráficos das FIGURAS 25, 26 e 27 mostram a variação do nível médio mensal da água em poços tubulares, em comparação com a precipitação média mensal. As medidas dos níveis da água nos poços foram obtidos na SUDERHSA - Superintendência de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná, e referem-se a poços perfurados em compartimentos onde não há poços em exploração. Acredita-se, assim, que as flutuações de nível sejam consequência unicamente da precipitação.

A resposta do aquífero às precipitações é bastante semelhante nos poços da Fervida com uma defasagem de 30 a 60 dias entre os pontos extremos das curvas de precipitação e nível da água. Na bacia do Tumiri, esse tempo é, em geral, mais longo, variando de 90 a 120 dias. A razão para essa diferença parece ser a maior espessura média de material inconsolidado que cobre as rochas carbonáticas na bacia do Tumiri. A defasagem entre os extremos de rebaixamento e de precipitação nos poços P-04 e P-15 é mais curta do que nos demais poços. Essa defasagem pode estar relacionada não só à espessura de inconsolidados mas também ao tamanho do compartimento. O P-15 está localizado a cerca de 30 m do P-14 (surgente), em um compartimento com cerca de 0,01 km². O nível da água é raso (< 0,8 m), e varia de acordo com a precipitação até que, aparentemente, todos os vazios desse compartimento se saturem. A partir daí, as variações de precipitação têm pouca influência nas flutuações do nível da água no poço, que se mantém estável e próximo da superfície.

Esses fatos permitem inferir que, na área de estudo, a recarga do aquífero é do tipo autogênica, por infiltração e percolação difusa da água das chuvas, em função da boa capacidade de infiltração do solo e abrange toda a área sobrejacente

aos carbonatos. Pode ocorrer, também, recarga através de dolinas, como observado nas proximidades do poço P-15 (FERVIDA), onde águas de chuva acumuladas em depressões do terreno, desapareciam poucos dias após a chuva. A recarga allogênica, decorrente da infiltração em áreas de captação constituídas por filitos não deve ser significativa, pelas características de permeabilidade dessa rocha.

VAINE (1998) quantificou o excedente hídrico na área de aproveitamento do aquífero cárstico, que compreende as localidades de Tranqueira, Cabeceira do Atuba, Colombo, Várzea do Capivari e Almirante Tamandaré. Foram utilizados nesse cálculo valores de precipitação anual ($P = 1404$ mm/ano) e evapotranspiração real pelo método de Morton ($ETR = 1041$ mm/ano), resultando no excedente hídrico anual de 364 mm, que corresponde ao deflúvio médio anual.

No entanto, o resultado obtido por VAINE (1998), tem validade restrita para a avaliação das reservas hídricas subterrâneas uma vez que os cálculos realizados não levam em conta variáveis importantes, tais como: os volumes explorados através dos poços ou escoados pelas fontes, capacidade de campo e o volume de água de irrigação.

A região de Colombo é notável pela alta produção de hortaliças, com aplicação intensa de irrigação e pulverização das culturas. A técnica de irrigação usada pelos agricultores nas bacias estudadas é a de irrigação por aspersão que, segundo EMATER (1997), é na maioria das vezes mal dimensionada e com grande desperdício de água. Foi observado, em períodos secos, que o trecho do rio Tumiri compreendido entre os poços P-04 e P-08, era desviado e usado para irrigação, cessando de fluir. Na região da Fervida, a captação de água de rios para irrigação chega a causar conflitos entre os agricultores, quando o volume captado diminui a

descarga a ponto de prejudicar agricultores situados a jusante e também dependentes do mesmo rio para irrigar suas plantações. O processo de irrigação representa uma chuva artificial em toda a área cultivada (cerca de 300 ha), ao longo do ano e mais intensamente, no período de novembro a abril, que causa uma diminuição da descarga dos rios e um aumento na evapotranspiração, evaporação direta durante a aspersão e infiltração. Nessas circunstâncias, o balanço hídrico da área estudo deveria verificar como e com que intensidade, a irrigação influencia o resultado obtido.

FIGURA 25 - GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P - 02 (FERVIDA) E P - 07 (FERVIDA).

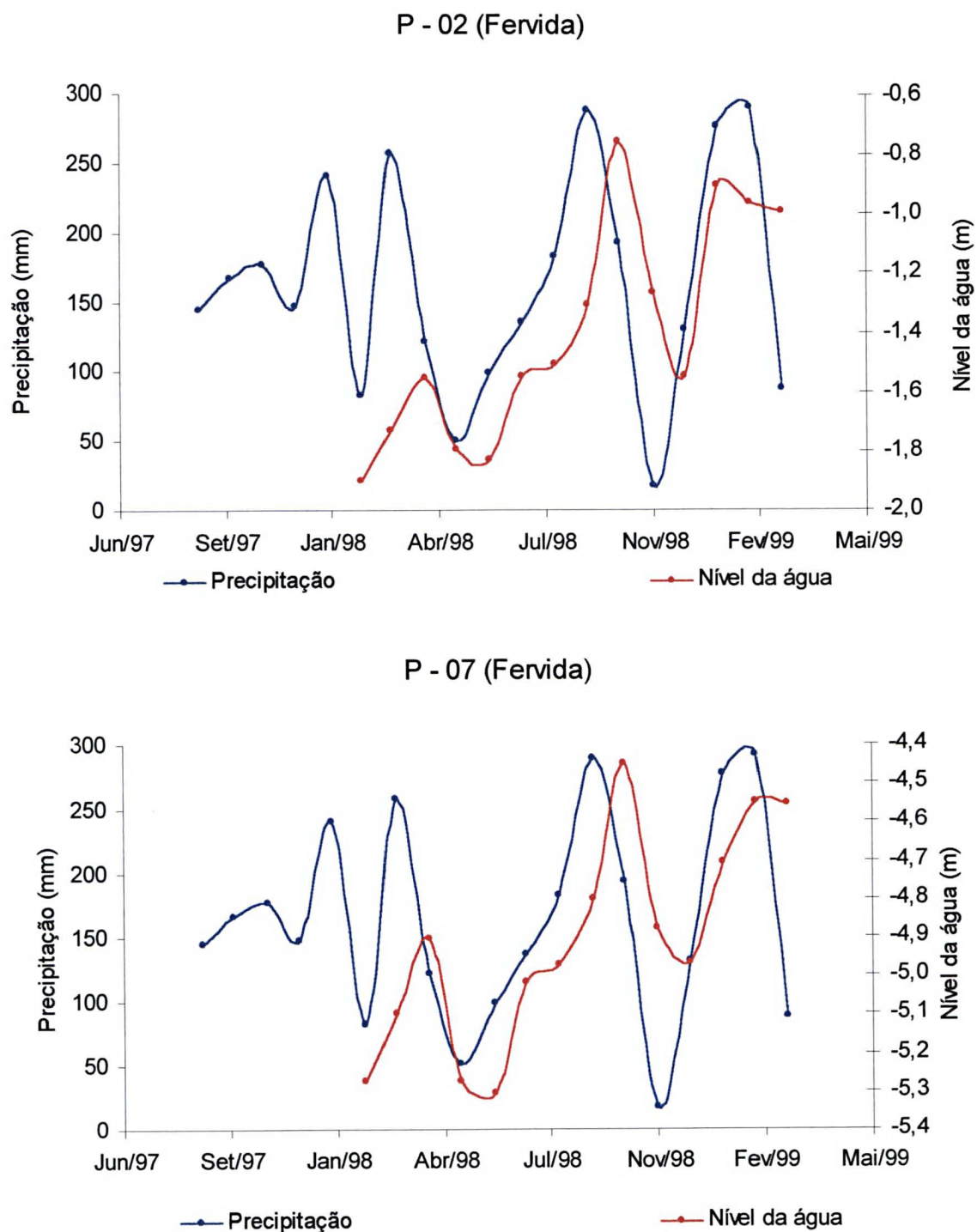


FIGURA 26 - GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P-13 (FERVIDA) E P-15 (TUMIRI)

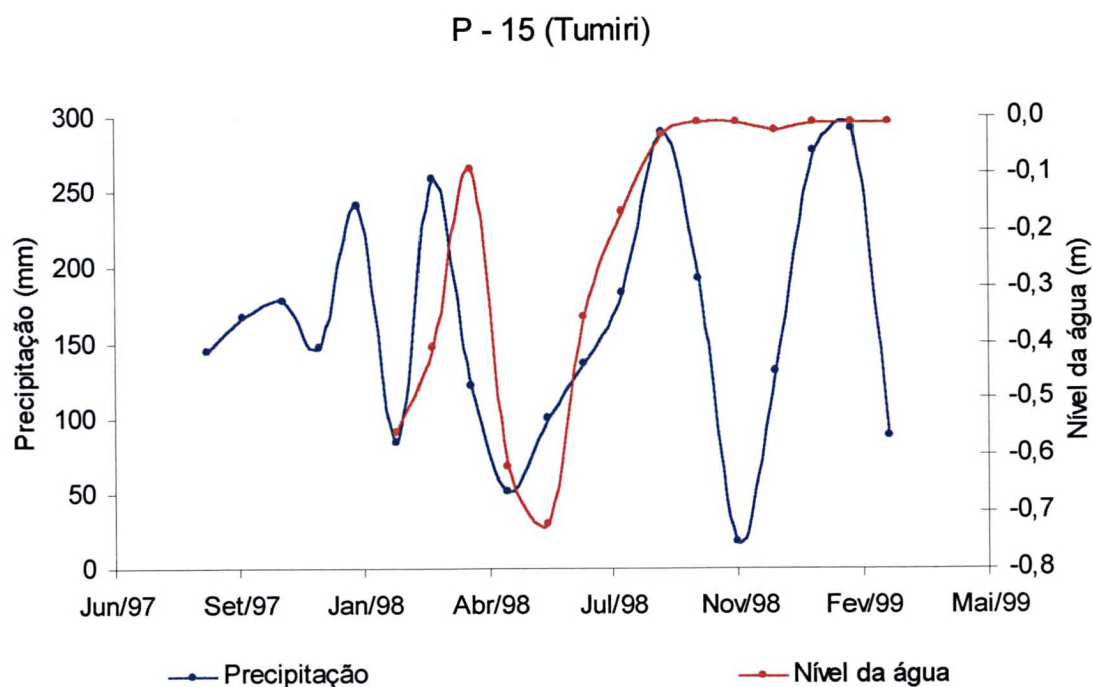
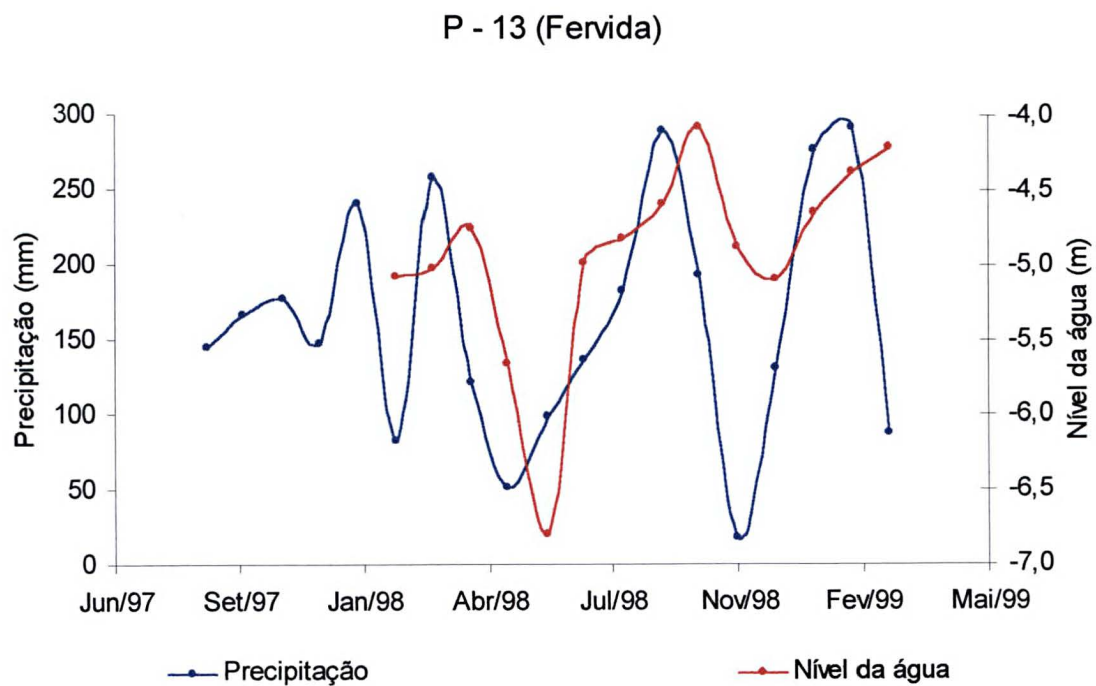
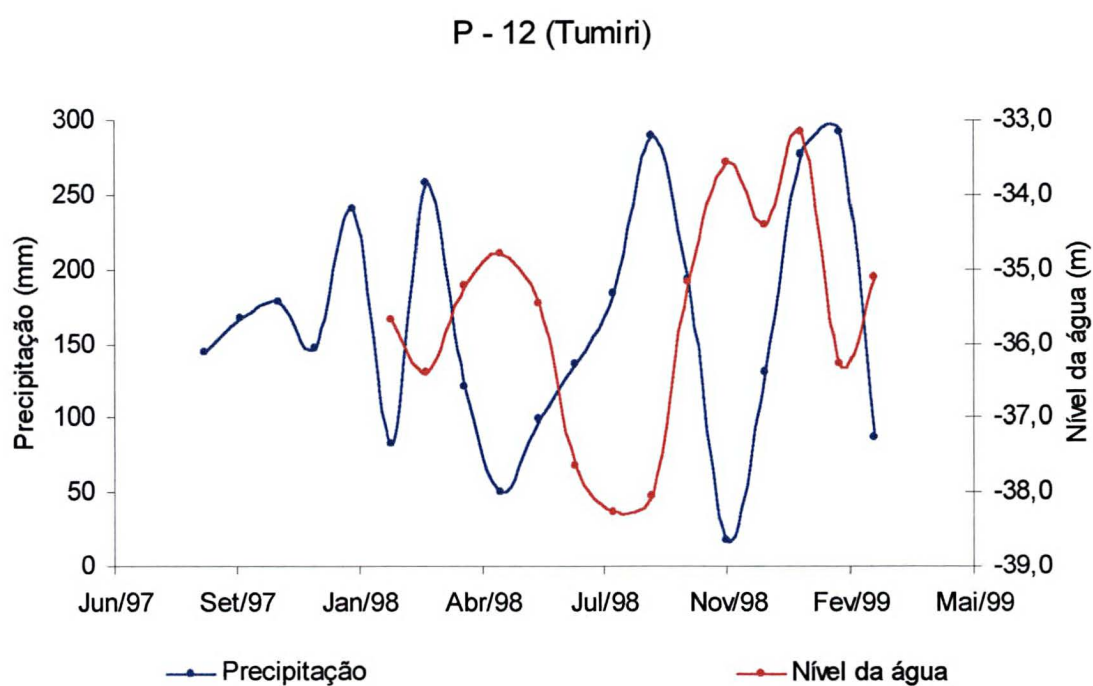
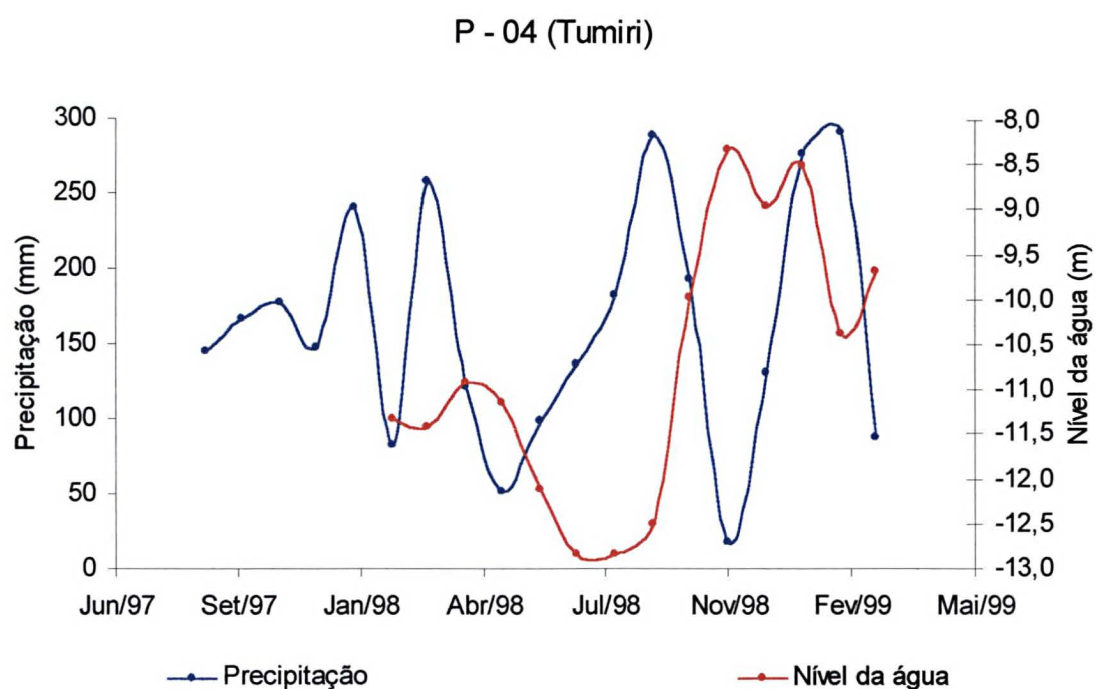


FIGURA 27 - GRÁFICOS DE PRECIPITAÇÃO E VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA NOS POÇOS P-04 E P-12 (TUMIRI).



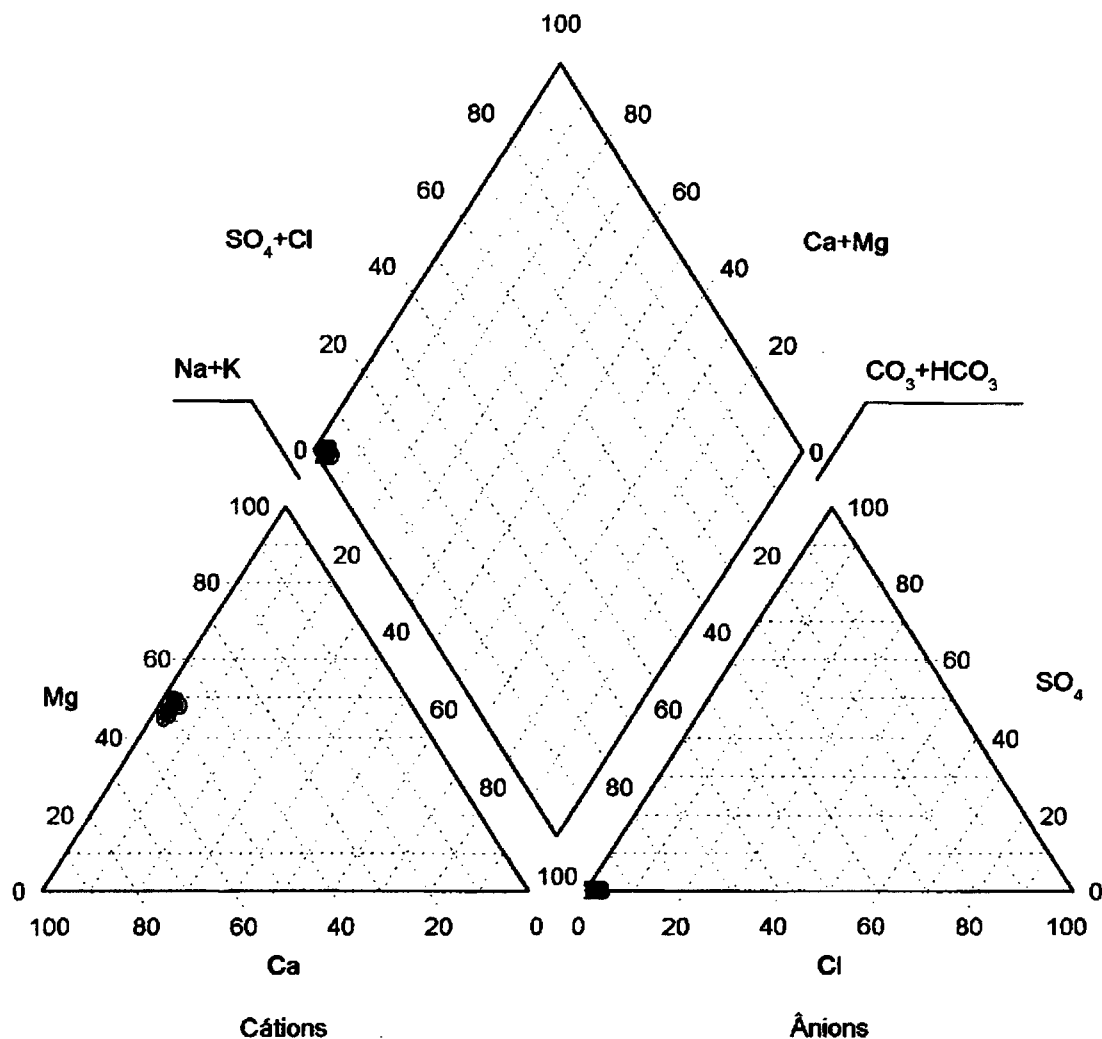
As características hidroquímicas das amostras de água coletadas nos poços P-01, P-03, P-04, P-08 e P-13 da bacia do Tumiri e nos poços P-01, P-10, P-12 e P-14 na Fervida, são semelhantes às das fontes tendo como íons predominantes o Ca^{+2} , Mg^{+2} e HCO_3^- . Quanto ao grau de dureza, variam de duras a muito duras. Os demais íons analisados estão dentro das faixas de variação das águas das fontes.

Todas as amostras analisadas apresentaram coliformes fecais abaixo de 1,1 NMP (Número Mais Provável. Equivale ao número de coliformes por 100 ml de amostra). Apenas duas amostras apresentaram concentrações de coliformes totais acima de 2,2 NMP: o poço P-04 da bacia do Tumiri, com 7,4 NMP e o poço P-12 da Fervida, com 121,1 NMP. Este último apresentou teores de NO_3^- de 8,3 mg/l e 10,1 mg/l. Esses valores indicam que pode estar ocorrendo contaminação por efluentes domésticos.

As águas captadas nesses poços são insaturadas com relação à calcita e dolomita ($-0,56 < \text{ISc} < -0,2$; $-1,14 < \text{ISd} < -0,35$), indicando um tempo de trânsito insuficiente para se atingir o equilíbrio químico entre a água e tais minerais. Essas águas tenderão a manifestar mais prontamente, a qualquer contaminação antrópica nas áreas de recarga.

A classificação geoquímica dessas águas, segundo o diagrama de Piper, apresentado na FIGURA 28, indicam águas do tipo bicarbonatadas cálcico-magnesianas.

FIGURA 28 - DIAGRAMA DE PIPER DAS AMOSTRAS DE ÁGUA COLETADAS NOS POÇOS TUBULARES P-01, P-12, P-14 (FERVIDA) E P-01, P-03, P-04, P-08 E P-13 (TUMIRI).



As fontes são extravasamentos naturais da água subterrânea na superfície do terreno. LLADÓ (1968), divide as fontes cársticas em: ressurgências, aquelas alimentadas por recarga alogênica em grande volume, proveniente de águas introduzidas no aquífero através de sumidouros; e exurgências, aquelas alimentadas por recarga autogênica ou alogênica difusa.

A FIGURA 29 mostra um modelo esquemático do fluxo da água através do aquífero, desde a zona de recarga até a de descarga através de fontes ou por recarga do aquífero freático, onde existirem condutos ou fraturas ligando os dois aquíferos. Essa recarga explicaria o fato de alguns poços-cacimba captarem águas com características de água do carste, como exposto anteriormente.

O fluxo da água através do aquífero é controlado pelos fatores climáticos, hidrogeológicos e, principalmente, pelos diques de diabásio que são barragens subterrâneas que represam a água armazenada no aquífero. Quando o fluxo subterrâneo é interrompido pelo dique, a pressão hidráulica exercida pela água acumulada no aquífero, força a subida da água até a superfície, dando origem às fontes. A relação entre as fontes e os diques é evidenciada pela presença de areia escura, nos fundos de lagos e córregos formados pelas fontes, constituída por cristais de magnetita provenientes da decomposição dos diques (FIGURA 30).

As fontes cársticas aqui mapeadas são exurgências com fluxo da água ocorrendo através de fraturas ou condutos de dissolução e têm características artesianas, isto é, o ponto de emergência está abaixo da superfície potenciométrica virtual. Na maioria dos casos, a surgência da água se dá ao nível da drenagem superficial, onde os condutos cársticos estão próximos à superfície e a pressão da água foi suficientemente forte para abrir caminho através da cobertura de inconsolidados. Nesses casos, ao surgir, a água agita constantemente o fundo arenoso dando a impressão de estar fervendo (FIGURA 30). BRYAN (1919) denomina essas fontes de ferventes. A microbacia da Fervida recebe esse nome pela quantidade de fontes desse tipo. As mais interessantes são aquelas que formam um pequeno lago no local de surgência. Outro tipo de surgência ocorre nos

locais onde os canais de dissolução são interceptados pela encosta de um vale. Esse tipo é mais raro tendo como exemplo característico a fonte F-COFE-19 (FIGURA 31).

BRYAN (1919), TOLMAN (1937) e FORD; WILLIAMS (1991) apresentam um modelo de fonte denominado fonte de barragem no qual as águas subterrâneas são represadas no contato entre o aquífero e rochas impermeáveis. A diferença entre tal modelo e o das fontes que ocorrem na área de estudo está na direção descendente do fluxo da água, onde a água se move livremente por ação gravitacional. Entre os modelos citados por esses autores, o que mais se assemelha ao tipo de fonte encontrado na área de estudo é aquele em que o aquífero tem natureza artesianiana e a migração da água é interrompida por falhamentos que servem de barreiras e de condutos para a ascensão da água.

FIGURA 29 - MODELO ESQUEMÁTICO DO FLUXO DA ÁGUA ATRAVÉS DO AQUIFERO E DA FORMA DE OCORRÊNCIA DE FONTES

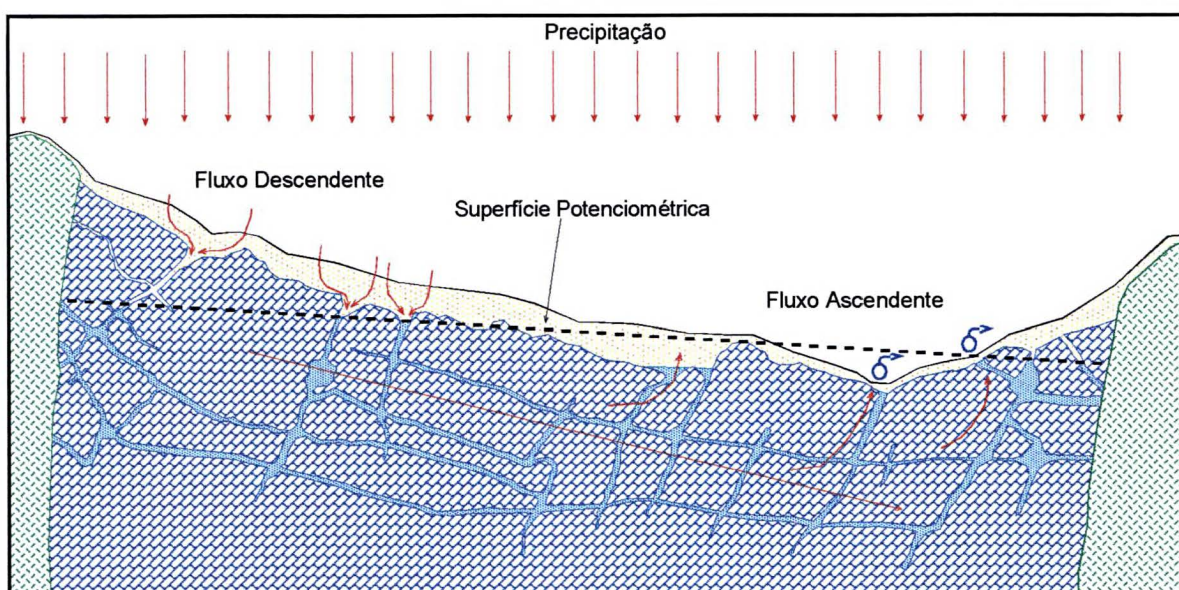


FIGURA 30 - FONTE DO TIPO FERVENTE (F-COFE-11), COM BLOCO DE DIABÁSIO E AREIA ESCURA (MAGNETITA) NO FUNDO. PODE-SE VER MARCAS CIRCULARES FORMADAS PELA ASCENSÃO DA ÁGUA (COLOMBO, PR).



FIGURA 31- FONTE FORMADA PELA INTERCEPTAÇÃO DE CANAL DE DISSOLUÇÃO PELA ENCOSTA DO VALE (F-COFE-19). O SECAMENTO DESSA FONTE FOI CAUSADO PELA EXPLOTAÇÃO DO POÇO P-01 (TUMIRI) , COLOMBO, PR.



Desde que não haja interferência pela exploração de poços nas proximidades das fontes, como no caso da F-COFE-11 e da F-COFE-19, que tiveram suas vazões reduzidas a zero pelo bombeamento dos poços P-01 (Fervida) e P-01 (Tumiri), respectivamente, as fontes cársticas cadastradas são perenes. Isso indica que a distribuição e volume das precipitações são suficientes para sustentar a vazão dessas fontes ao longo do ano e que o volume de água armazenado no aquífero é muito grande comparado com o volume drenado pelas fontes.

A soma das vazões médias de onze fontes monitoradas é 81 l/s. A bacia da Fervida é a que apresenta o maior número de fontes, estando aí a maior das fontes monitoradas, a F-COFE-11, com vazões medidas variando de 25,5 l/s a 31,8 l/s.

A fonte F-COTU-2, é utilizada para complementar o abastecimento de água da sede do município de Colombo.

O potencial hídrico das fontes naturais deve ser bem maior do que a descarga média total de 81 l/s, já que as fontes monitoradas representam apenas 34% das fontes cársticas cadastradas nas bacias estudadas, e foram selecionadas por estarem em compartimentos distintos e, principalmente, pela facilidade de acesso e permissão do proprietário para que se realizassem as medições.

Embora as fontes sejam uma possibilidade para suprir ou complementar as necessidades de água de uma população, fatores como, qualidade da água, inacessibilidade, distância até o centro consumidor e a variabilidade de descarga, podem impedir a utilização plena desses recursos. As bacias estudadas estão todas localizadas nas proximidades da sede de Colombo e têm sido alvo de programas de perfurações de poços tubulares para abastecimento das cidades de Colombo e Curitiba. A maior restrição ao aproveitamento dessas fontes para fins de

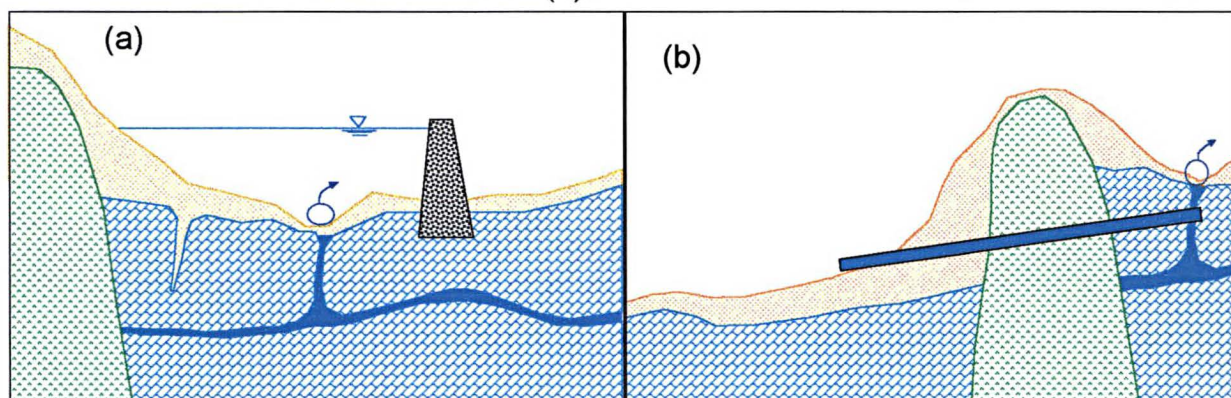
abastecimento público seria a variabilidade de descarga, já que, das fontes monitoradas, apenas uma apresenta coeficiente de variabilidade constante, nove são sub-variáveis e uma é variável. Deve-se salientar que a determinação do coeficiente de variabilidade deve corresponder a um período longo de observação, o que não foi possível dentro do prazo para a realização deste estudo. No entanto, a variabilidade de descarga das fontes pode ser corrigida através de obras de regularização de fluxo.

Segundo SANZ (1987), os aquíferos cársticos são os que oferecem melhores possibilidades de regularização por apresentarem, geralmente, vazões elevadas e, portanto, maior interesse econômico. A harmonização entre a variação de descargas e a demanda em períodos de estiagem, pode ser conseguida com a construção de barragens ou aproveitamento de barragens naturais junto à fonte, com base no conhecimento das características geológicas e hidrodinâmicas do aquífero, bem como no estudo de viabilidade da captação para atender à demanda solicitada. A FIGURA 32 ilustra dois modelos de regularização da descarga de fontes, um representado pela construção de galerias ou poços horizontais através de barragens naturais e outro pela construção de barragens convencionais na desembocadura da fonte.

A construção de barragens à jusante das fontes contribui para a elevação do nível potenciométrico, permitindo o acúmulo da água de períodos úmidos nos condutos hidráulicos, transformando o aquífero em um reservatório subterrâneo. Esse tipo de armazenamento de água abre uma nova via para a solução de problemas de provisionamento de água nas regiões onde as condições topográficas, hidrogeológicas e geotécnicas são desfavoráveis à construção de

barragens superficiais. Estes mananciais tem as vantagens de não sofrer perdas por evaporação, não estarem sujeitas a assoreamento e apresentarem exigências geotécnicas e riscos de catástrofes mínimos (MIJATOVIC, 1975).

FIGURA 32 REGULARIZAÇÃO DE FONTES POR MEIO DE BARRAGENS (a) OU DE GALERIAS (b).



Adaptado de MIJATOVIC (1975) e de SANZ (1987).

Considerando as características hidráulicas (vazão e regularidade) das fontes da área de estudo, esse tipo de obra de regularização seria inviável em termos econômicos, produtivos e logísticos, comparando com a construção de poços tubulares. A aplicação de tal técnica pode ser factível em outras áreas do carste paranaense, onde foram cadastradas fontes com vazões da ordem de 50 l/s e de até 140 l/s (GEA, 1998).

4.2.2 Cadastramento e Classificação das Fontes

Foram cadastradas 52 fontes, sendo 35 provenientes do aquífero cárstico e as 17 restantes relacionadas a litologias como filito ou quartzito. A localização dessas fontes está assinalada no Mapa Geológico-Estrutural (ANEXO I). As fontes cársticas estão distribuídas da seguinte maneira: Fervida, 20; Onças, 6; Tumiri, 5; e Água Comprida, 4. As características e classificação dessas fontes estão apresentadas sucintamente na TABELA 13.

As fontes foram classificadas com base nos valores médios dos resultados das análises físico-químicas e de campo. Deve ser feita a ressalva de que o programa de amostragem teve curta duração, não cobrindo um ano hidrológico, o número de amostras é pequeno, tendo sido coletadas em intervalos irregulares de 25 a 54 dias.

Para as fontes não incluídas no programa de monitoramento contínuo foram utilizados dados (temperatura e condutância específica da água), obtidos no momento do cadastramento. Para a classificação quanto ao grau de dureza, mineralização e sólidos totais dissolvidos, foram aplicadas as relações definidas na FIGURA 5. Alguns campos da TABELA 13 encontram-se incompletos, já que a caracterização e classificação dessas fontes foram feitas com base em uma única amostragem.

TABELA 13 - CLASSIFICAÇÃO DAS FONTES CÁRSTICAS CADASTRADAS NAS BACIAS DOS RIOS TUMIRI, FERVIDA, ONÇAS E ÁGUA COMPRIDA

RIO FERVIDA					
	F-COFE-1	F-COFE-3	F-COFE-4	F-COFE-5	F-COFE-8
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 16' 15,3" S 49° 10' 41,1" W Gr	25° 16' 23,6" S 49° 10' 51,0" W Gr	25° 16' 43,4" S 49° 10' 53,6" W Gr	25° 16' 43,4" S 49° 10' 53,6" W Gr	25° 16' 09,4" S 49° 10' 34,1" W Gr
Descrição	Fonte fervente situada junto à base da encosta de vale aberto, de fundo plano, próximo ao contato com dique de diabásio.	Fonte fervente situada em vale aberto e fundo plano. Forma um pequeno lago	Fonte fervente situada em vale aberto e fundo plano. Forma um pequeno lago	Conjunto de fontes ferventes, situadas em vale encaixado, junto a dique de diabásio.	Fonte de fratura situada em encosta de vale, cerca de 8 m acima do fundo do vale. Com proteção de alvenaria
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Sem uso	Irrigação	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento	Abastecimento
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média	Média Baixa
Grau de Dureza	Moderadamente Dura	Moderadamente Dura	Dura	Dura	Dura
Classificação Mineral	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana		Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Tubular	Tubular	Tubular	Tubular	Fratura
Natureza do Fluxo	Difuso	Difuso		Difuso	Difuso
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude	5ª	5ª		6ª	5ª
Variabilidade	Sub-variável	Sub-variável		Variável	Sub-variável

Continua

RIO FERVIDA

	F-COFE-9	F-COFE-10	F-COFE-11	F-COFE-12	F-COFE-15
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 16' 12,8" S 49° 11' 15,1" W Gr	25° 16' 29,7" S 49° 11' 17,0" W Gr	25° 16' 47,5" S 49° 11' 32,1" W Gr	25° 16' 49,7" S 49° 11' 32,1" W Gr	25° 16' 58,4" S 49° 11' 49,1" W Gr
Descrição	Conjunto de fontes ferventes situadas em vale aberto e fundo plano. Formam um pequeno lago	Fonte fervente situada em vale aberto e de fundo plano. Forma um pequeno lago. Seca com o bombeamento do poço P-15.	Fonte fervente situada em vale aberto e de fundo plano, próximo ao contato com dique de diabásio. Forma um pequeno lago. Seca com o bombeamento do poço P-01.	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Forma um pequeno lago.	Fonte de fratura. Surge na base da encosta de vale aberto, assimétrico e de fundo plano. Forma um pequeno lago.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Irrigação	Irrigação	Abastecimento	Abastecimento	Sem uso
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média	Média Baixa
Grau de Dureza	Dura	Dura	Dura	Moderadamente Dura	Dura
Classificação Mineral			Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana		Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Tubular	Tubular	Tubular	Tubular	Fratura
Natureza do Fluxo			Difuso		Difuso
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude			4ª		5ª
Variabilidade			Constante		Sub-variável

Continua

RIO FERVIDA

	F-COFE-17	F-COFE-19	F-COFE-20	F-COFE-21	F-COFE-22
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 16' 55,6" S 49° 12' 02,4" W Gr	25° 16' 31,6" S 49° 12' 01,3" W Gr	25° 16' 11,6" S 49° 11' 48,0" W Gr	25° 16' 22,4" S 49° 11' 58,5" W Gr	25° 16' 11,3" S 49° 12' 18,8" W Gr
Descrição	Fonte de fratura situada na base da encosta de vale largo e assimétrico. Existe um depósito de esterco de galinha ao lado da fonte.	Conjunto de fontes de fratura, situadas no talvegue de vale encaixado. Secam com o bombeamento do poço P-01 (Tumiri).	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano, na base da encosta, próximo ao contato com camada de filito e dique de diabásio. Seca com o bombeamento do poço P-14. Com proteção de alvenaria.	Fonte fervente situada na cabeceira de vale encaixado. Forma um pequeno lago.	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique (?)	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Sem uso	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal	Ortotermal
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média	Média Baixa	Média Baixa	Média	Média Baixa
Grau de Dureza	Moderadamente Dura	Moderadamente Dura	Dura	Dura	Dura
Classificação Mineral		Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana		Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Fratura	Fratura	Tubular	Tubular	Tubular
Natureza do Fluxo			Difuso		Difuso
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude			5ª		5ª
Variabilidade			Sub-variável		Sub-variável

Continua

RIO FERVIDA

	F-COFE-23	F-COFE-24	F-COFE-25	F-COFE-26	F-COFE-27
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 16' 00,0" S 49° 12' 24,7" W Gr	25° 15' 42,4" S 49° 12' 19,9" W Gr	25° 15' 40,4" S 49° 12' 27,1" W Gr	25° 15' 39,8" S 49° 11' 28,9" W Gr	25° 16' 00,3" S 49° 10' 59,6" W Gr
Descrição	Fonte de fratura situada em encosta de vale encaixado.	Fonte de fratura situada em cabeceira de vale encaixado.	Fonte de fratura em encosta de vale. Ocorre na transição (?) de filito para dolomito. Tem água com característica de mistura.	Fonte de fratura em encosta de vale. Ocorre cerca de 50 m a montante da F-COFE-25. Com proteção de alvenaria.	Fonte fervente situada no leito do rio. Seca com o bombeamento dos poços P-5, 10 ou 11. Nessas circunstâncias, a água do rio infiltra diretamente através do orifício da fonte.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico / Filito	Mármore dolomítico / Filito	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique (?)	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Irrigação	Irrigação	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento / Irrigação	Irrigação
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média	Média Baixa
Grau de Dureza	Moderadamente Dura	Moderadamente Dura	Dura	Dura	Dura
Classificação Mineral				Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Fratura	Fratura	Fratura	Fratura	Tubular
Natureza do Fluxo			Difuso	Difuso	
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude					
Variabilidade					

Continua

RIO DAS ONÇAS

	F-CORO-1	F-CORO-2	F-CORO-3	F-CORO-4	F-CORO-6
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 16' 02,6" S 49° 10' 08,8" W Gr	25° 15' 29,7" S 49° 11' 02,2" W Gr	25° 15' 27,4" S 49° 10' 57,9" W Gr	25° 15' 58,6" S 49° 10' 06,4" W Gr	25° 15' 43,6" S 49° 10' 26,6" W Gr
Descrição	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Forma um pequeno lago.	Conjunto de fontes ferventes em vale assimétrico. Forma um pequeno lago.	Conjunto de fontes de fratura situada em cabeceira de vale encaixado.	Conjunto de fontes ferventes em vale aberto de fundo plano	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Forma um pequeno lago.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Abastecimento	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento	Abastecimento / Irrigação
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa
Grau de Dureza	Dura	Dura	Dura	Dura	Dura
Classificação Mineral			Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Tubular	Tubular	Fratura	Tubular	Tubular
Natureza do Fluxo			Difuso	Difuso	
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude					
Variabilidade					

Continua

RIO DAS ONÇAS E RIO ÁGUA COMPRIDA

	F-CORO-7	F-COAC-1	F-COAC-2	F-COAC-3	F-COAC-4
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 15' 14,9" S 49° 10' 47,1" W Gr	25° 15' 56,4" S 49° 12' 49,0" W Gr	25° 15' 32,8" S 49° 12' 32,6" W Gr	25° 16' 17,3" S 49° 12' 51,2" W Gr	25° 16' 24,1" S 49° 12' 58,6" W Gr
Descrição	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Forma um pequeno lago	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano.	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Com proteção de aivenaria.	Fonte fervente situada em vale aberto de fundo plano. Com proteção de aivenaria.	Fonte fervente situada em fundo de vale. Forma um pequeno lago e dá origem ao Água Comprida.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique	Dique	Dique	Dique (?)	Dique
Uso	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento / Irrigação	Abastecimento	Abastecimento	Sem uso
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma	Ortoterma
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa
Grau de Dureza	Dura	Dura	Moderadamente Dura	Dura	Dura
Classificação Mineral		Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana		
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Tubular	Tubular	Tubular	Tubular	Tubular
Natureza do Fluxo		Difuso	Difuso		
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude		5ª			
Variabilidade		Sub-variável			

Continua

RIO TUMIRI

	F-COTU-2	F-COTU-3	F-COTU-4	F-COTU-5	F-COTU-8
CARACTERÍSTICAS GERAIS					
Coordenadas	25° 17' 18,4" S 49° 12' 57,8" W Gr	25° 17' 08,8" S 49° 13' 10,3" W Gr	25° 17' 09,9" S 49° 13' 20,8" W Gr	25° 17' 09,7" S 49° 13' 29,8" W Gr	25° 16' 54,3" S 49° 13' 48,9" W Gr
Descrição	Fonte fervente situada em fundo de vale aberto. Com proteção e usada para complementar o abastecimento de água de Colombo.	Fonte fervente em fundo de vale aberto e aplainado.	Fonte fervente em fundo de vale aberto e aplainado. Com proteção de alvenaria.	Fonte de fratura na base de encosta. Forma um lago devido barragem a jusante. É provável que existam fontes ferventes no fundo do lago.	Fonte fervente situada em cabeceira de vale. Com proteção de alvenaria, utilizada por indústria de cal.
Litologia	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico	Mármore dolomítico
Controle Estrutural	Dique	Dique	Dique	Dique	Dique
Uso	Abastecimento	Sem uso	Sem uso	Sem uso	Abastecimento
CLASSIFICAÇÃO					
Propriedades Físico-Químicas					
Temperatura	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais	Ortotermais
Sólidos Totais Dissolvidos	Doce	Doce	Doce	Doce	Doce
Grau de Mineralização	Média Baixa	Média Baixa	Média Baixa	Média	Média
Grau de Dureza	Dura	Dura	Dura	Muito Dura	Muito Dura
Classificação Mineral				Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana	Alcalino-terrosa cálcica-magnésiana
Propriedades Hidráulicas					
Causa da emergência	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana	Gravitacional Artesiana
Caráter das aberturas	Tubular	Tubular	Tubular	Fratura (Tubular)	Tubular
Natureza do Fluxo				Difuso	Difuso
Sazonalidade	Perene	Perene	Perene	Perene	Perene
Magnitude				4ª	5ª (?)
Variabilidade				Sub-variável	Variável (?)

5 CONCLUSÕES

A exploração do aquífero cárstico por poços tubulares, na região de Colombo (PR), para atender a demanda de água da Região Metropolitana de Curitiba, tem causado impactos ambientais como colapsos de terreno, subsidências e interferências no escoamento de fontes. A importância dessas fontes para o desenvolvimento sócio-econômico da área de estudo e para o ecossistema relacionado à rede de drenagem que delas originam, além da falta de dados básicos sobre a descarga e qualidade das águas dessas fontes, foram fatores que motivaram esta dissertação, cujas conclusões mais importantes são resumidas a seguir.

a) As águas das fontes são pouco mineralizadas, com grau de dureza variando de moderadamente dura a dura e são do tipo bicarbonatada-magnésiana, segundo a classificação geoquímica por íons dominantes. Os parâmetros analisados atendem aos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria N° 36/1990 (BRASIL. Ministério da Saúde, 1990). Deve-se ressaltar que não foram feitas análises bacteriológicas nem detecção de compostos orgânicos, o que seria de fundamental importância, em função da atividade agrícola desenvolvida nessa região, com aplicação intensa de fertilizantes e defensivos agrícolas.

b) Estão incluídas na classe alcalino-terrosa cálcica-magnésiana, segundo a classificação mineral conforme estabelece a Resolução N° 25/1976, da Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos do Ministério da Saúde (BRASIL. Ministério da Saúde, 1976).

c) Os íons predominantes são HCO_3^- , Mg^{+2} e Ca^{+2} , mostrando que o quimismo das águas é fortemente controlado pela mineralogia do aquífero. O íon nitrato está presente em todas as análises, em consequência da extensa área agrícola sobrejacente ao aquífero. As fontes das bacias do rio Tumiri e Água Comprida apresentam teores de nitrato, cloreto e sódio mais elevados em relação às

outras duas bacias estudadas. Isso é indicativo de contaminação por efluentes domésticos, devido ao tipo de ocupação predominante dessas bacias.

d) A condutância específica da água é um parâmetro útil para o mapeamento de fontes por permitir a associação entre os valores de condutância e os tipos litológicos da área de estudo. Além disso, uma vez caracterizada a relação entre tal parâmetro e outras propriedades da água, tais como, STD, HCO_3^- , Ca^{+2} , Mg^{+2} e Dureza Total, estas podem ser avaliadas, indiretamente, pela medida de condutância da água.

e) Os parâmetros físico-químicos das fontes apresentam variações sazonais, em função da velocidade de recarga e tamanho do compartimento drenado pelas fontes, estando relacionados com as características edáficas e litológicas da área de recarga e com o tempo de trânsito da água entre a infiltração e descarga.

f) O tempo de resposta da descarga das fontes em relação às precipitações é proporcional ao tamanho do compartimento hidrogeológico e a extensão da área de recarga.

g) As variações sazonais dos parâmetros hidroquímicos são mais atenuadas nos compartimentos maiores.

h) Os diques constituem o principal controle estrutural para o surgimento das fontes.

i) Embora sejam perenes, as fontes cársticas da área de estudo, têm potencial limitado para abastecimento público, devido à magnitude e variabilidade de descarga e, também, por questões logísticas.

j) A presença de nitrato e de coliformes, nas águas subterrâneas evidenciam a vulnerabilidade e uma incipiente contaminação do aquífero.

l) A recarga do aquífero é, principalmente, autogênica, ocorrendo pela percolação de águas de chuvas através do solo sobrejacente às rochas carbonáticas, com tempo de resposta estimado variando de 60 a 120 dias.

ANEXO I

25°14'33"
49°14'34"

7207000
7206000
7205000
7204000
7203000
7202000
7201000
7200000

CONVENÇÕES

ESTRATIGRÁFICAS

- JURÁSSICO-CRETÁCEO
- DIQUE DE DIABÁSIO
- DIQUE DE DIABÁSIO INFERIDO
- PRÉ-CAMBRIANO
- Grupo Açungui
- MÁRMORES DOLOMÍTICOS
- FILTOS E QUARTZITOS

GEOLÓGICAS

- FALHÁS
- EIXOS DE DOBRAS
- ATTITUDES DE CAMADAS

HIDROGEOLÓGICAS

- POÇO TUBULAR PROFUNDO
- FONTE (AQUÍFERO CÁRSTICO)
- FONTE (FILTOFREÁTICO)

TOPOGRÁFICAS

- ESTRADAS
- DRENAGEM
- CURVAS DE NÍVEL
- FORMAS CÁRSTICAS (DOLINAS)
- LIMITE DE BACIA HIDROGRÁFICA
- POSTO FLUVIOGRÁFICO
- POSTO PLUVIOGRÁFICO

ARTICULAÇÃO

D-1-SE-F 360	D-2-SO-E 371	D-2-SO-F 372
D-3-NE-B 388	D-4-NO-A 409	D-14-NO-B 410
D-1-3-NE-D 400	D-14-NO-C 411	D-14-NO-D 412

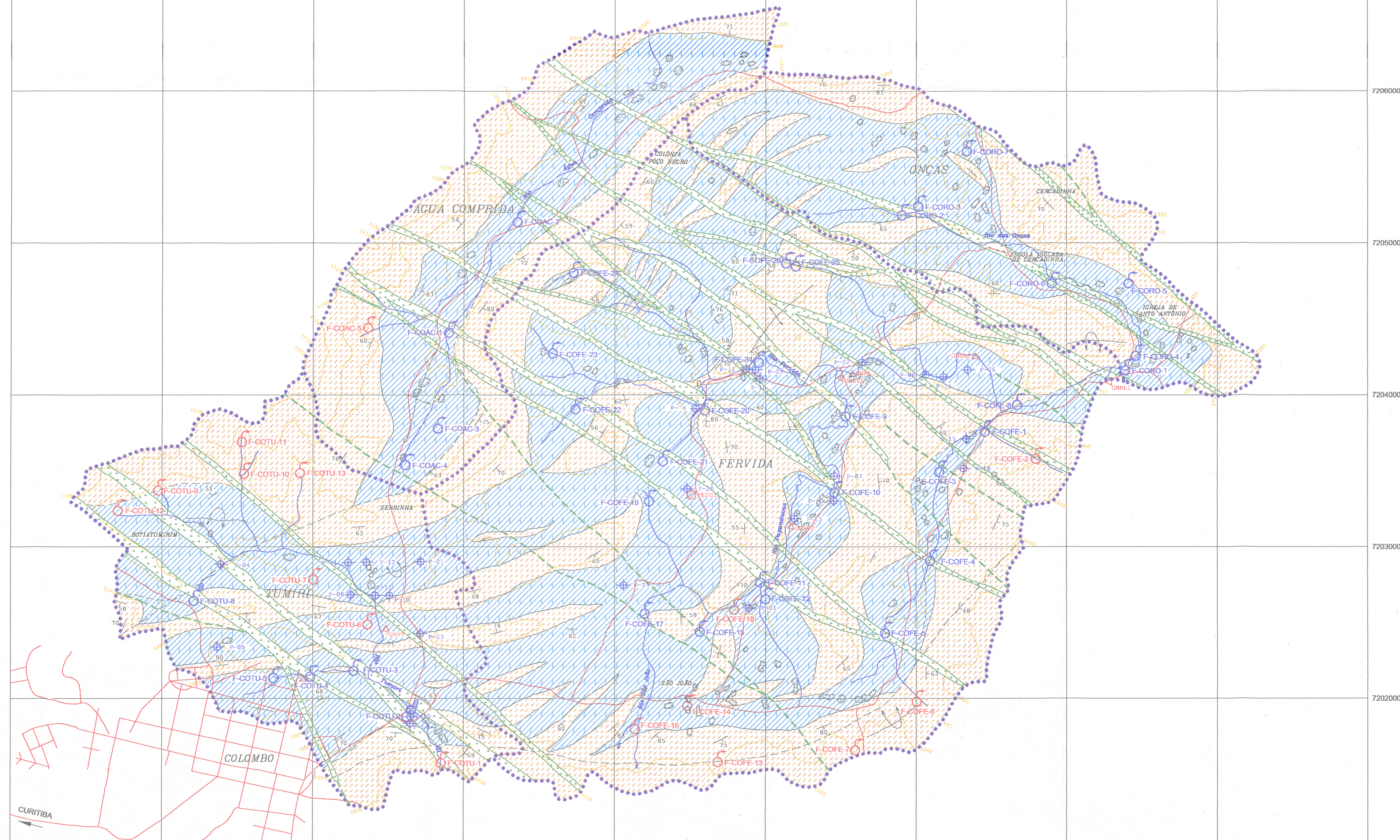


**MAPA GEOLÓGICO-ESTRUTURAL
DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS
TUMIRI, ÁGUA COMPRIDA, FERVIDA E DAS ONÇAS**

Adaptado de: PROJETO KARST-Mapa Geológico-Estrutural (1998)

Data: ABR/99 Escala: 1:20.000 Digitalizado por:

677000 678000 679000 680000 681000 682000 683000 684000 685000 25°17'44"
49°09'09"



ANEXO II

Fonte	Data	pH	T	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	F ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Dureza	Alcalinidade	Acidez	CO ₂	N	N	N	SiO ₂	TDS	pCO ₂	IS	IS	Q	DBI	Total	
																															livre	(Kjeldahl)
		(°C)	(µS/cm)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(°)	(°)	(°)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(l/s)	(%)			
F-COFE-20	09/05/97	7.47	17.6	313	28.1	18.9	1.4	0.8		194.0	2.0					0.5	148.0	159.0	12.0	10.7					245.7	-2.23	-0.31	-0.55	9.8	3.3		
F-COFE-20	05/08/97	7.39	17.8	312	28.0	18.2	1.4	0.5		195.2	2.0					0.5	145.0	160.0	12.0	10.7					245.8	-2.15	-0.39	-0.71	11.0	4.8		
F-COFE-20	02/07/97	7.45	17.7	310	28.9	17.9	1.5	0.7	0.01	188.8	5.8	0.01	0.06	3.2	0.0	0.5	140.7	155.0	12.0	10.7				14.9	259.9	-2.22	-0.36	-0.65	9.7	6.7		
F-COFE-20	12/08/97	7.45	17.7	314	28.9	18.0	1.7	0.9	0.06	194.4	1.9	0.01	0.01	4.4	0.0	0.5	141.3	159.0	15.0	13.2	0.2		0.2	16.1	264.9	-2.20	-0.31	-0.57	8.5	6.4		
F-COFE-20	16/08/97	7.41	17.8	312	28.4	18.2	1.6	0.8	0.01	191.6	1.5	0.01	0.03	2.2	0.0	0.5	145.7	157.0	12.0	10.8	0.4		0.4	13.5	258.2	-2.17	-0.37	-0.68	7.5	3.7		
F-COFE-20	11/11/97	7.18	18.5	307	28.3	18.7	1.7	0.8	0.08	186.1	2.0	0.01	0.02	3.9	0.0	0.5	147.8	153.0	9.0	4.5	0.3		0.3	14.7	256.9	-1.95	-0.60	-1.12	6.7	2.1		
F-COFE-20	05/03/98	7.48	17.8	313	26.7	18.8	1.6	0.7		192.0	2.4	0.01	0.15	3.3	0.0	0.5	144.3	157.0	2.0	1.8	0.1		0.1		248.2	-2.24	-0.32	-0.55		5.0		
F-COFE-22	13/05/97	7.27	17.3	334	31.2	20.2	1.3	0.7		212.3	2.0					0.5	161.0	174.0	11.0	10.0					268.2	-1.99	-0.44	-0.82	1.1	3.7		
F-COFE-22	05/08/97	7.34	17.1	333	30.7	19.5	1.4	0.8		212.3	1.5					0.5	157.0	174.0	11.0	10.0					266.6	-2.07	-0.38	-0.71	1.2	4.7		
F-COFE-22	02/07/97	7.43	17.2	330	29.7	18.2	1.4	0.7	0.01	210.5	1.5	0.13	0.06	1.2	0.0	0.5	152.8	173.0	12.0	10.7	0.2		0.2	16.2	261.0	-2.16	-0.30	-0.55	1.5	6.0		
F-COFE-22	12/08/97	7.39	17.0	336	29.2	19.3	1.5	0.9	0.01	213.7	1.9	0.01	0.15	2.2	0.0	0.5	152.3	175.0	13.0	11.4	0.2		0.2	17.0	266.4	-2.11	-0.35	-0.63	0.8	7.0		
F-COFE-22	16/08/97	7.40	17.8	334	29.7	21.8	1.5	0.9		210.3	1.5	0.01	0.06	5.2	0.0	0.5	154.1	172.0	15.0	13.2	0.3		0.3	14.7	266.1	-2.13	-0.33	-0.54	0.8	3.2		
F-COFE-22	12/11/97	7.25	17.5	333	31.3	20.5	1.5	0.8		214.3	1.0	0.01	0.02	2.4	0.0	0.5	162.7	178.0	5.1	4.5	0.2		0.2	16.1	268.6	-1.97	-0.45	-0.84	1.1	3.7		
F-COFE-22	05/03/98	7.37	17.5	333	28.1	20.5	1.4	0.7		207.8	1.0	0.01	0.20	1.8	0.0	0.5	154.2	170.0	4.5	4.0	0.2		0.2		261.9	-2.10	-0.39	-0.67	2.0	4.8		
F-COFE-25	12/08/97	7.33	17.9	225	18.2	12.8	1.3	1.1	0.01	139.2	1.9	0.01	0.04	3.2	0.0	0.5	98.2	114.0	12.0	10.8	0.1		0.1	12.7	191.0	-2.23	-0.75	-1.40	0.5	7.9		
F-COFE-26	14/05/97	7.48	17.8	287	25.6	17.5	1.2	0.8		181.8	1.5					0.5	136.0	149.0	9.0	10.0					228.8	-2.27	-0.36	-0.64	0.5	4.3		
F-COFE-26	06/08/97	7.48	17.9	288	25.6	16.8	1.2	0.8		178.1	2.0					0.5	133.0	146.0	12.0	10.7					225.0	-2.25	-0.39	-0.71	0.5	4.6		
F-COFE-26	01/07/97	7.56	17.8	288	24.8	16.9	1.3	0.8	0.01	178.1	1.5	0.01	0.46	1.9	0.0	0.5	131.6	146.0	11.0	10.0	0.2		0.2	11.6	238.0	-2.36	-0.30	-0.52	0.5	5.5		
F-COFE-26	16/08/97	7.53	17.8	288	24.6	16.8	1.4	0.8	0.09	175.5	1.5	0.01	0.03	3.7	0.0	0.5	130.6	144.0	9.0	7.9	0.1		0.1	11.0	235.8	-2.33	-0.34	-0.58	0.5	5.2		
F-COFE-26	30/10/97	7.65	17.9	284	25.1	17.0	1.4	0.8		176.7	1.5	0.01	0.02	3.6	0.0	0.5	132.6	145.0	10.0	8.8	0.1		0.1	11.3	237.8	-2.45	-0.21	-0.34	0.4	4.8		
F-COFE-26	05/03/98	7.62	17.9	282	20.5	17.1	1.7	0.7	0.06	175.5	2.4	0.15	0.28	2.5	0.0	0.5	121.5	144.0	3.0	2.6	0.1		0.1		221.4	-2.42	-0.33	-0.48		8.8		
F-CORO-3	13/05/97	7.44	17.7	279	24.8	17.1	0.9	0.4		181.8	1.5					0.5	132.0	149.0	9.0	8.0					228.9	-2.23	-0.42	-0.74	4.9	6.0		
F-CORO-3	05/08/97	7.48	17.6	277	24.6	16.8	0.9	0.4		176.9	2.0					0.5	145.0	160.0	9.0	8.0					221.9	-2.28	-0.41	-0.74	4.2	5.8		
F-CORO-3	02/07/97	7.60	17.3	277	23.8	16.1	1.0	0.4	0.01	173.2	1.5	0.11	0.03	1.5	0.0	0.5	125.5	142.0	10.0	9.0	0.3		0.3	7.8	225.9	-2.41	-0.30	-0.52	2.7	6.8		
F-CORO-3	12/08/97	7.65	17.7	281	23.8	16.4	1.1	0.4	0.13	179.2	1.9	0.01	0.04	2.7	0.0	0.5	126.6	147.0	14.0	12.3	0.2		0.2	8.7	234.9	-2.44	-0.23	-0.37	2.0	8.0		
F-CORO-3	16/08/97	7.60	17.9	281	25.1	16.7	1.1	0.5	0.01	174.2	2.0	0.01	0.03	1.9	0.0	0.5	131.2	143.0	9.0	7.9	0.2		0.2	7.3	229.2	-2.40	-0.27	-0.46	4.8			
F-CORO-3	30/10/97	7.70	17.7	281	25.6	17.1	1.1	0.4	0.03	180.4	1.5	0.01	0.05	2.2	0.0	0.5	134.2	145.0	8.0	7.0	0.1		0.1	7.3	236.2	-2.49	-0.15	-0.22		5.3		
F-CORO-3	05/03/98	7.54	17.7	290	23.5	17.8	1.0	0.4	0.05	179.2	1.4	0.19	0.18	1.7	0.1	0.5	132.0	147.0	4.0	3.5	0.2		0.2		228.1	-2.33	-0.35	-0.56		5.9		
F-CORO-4	09/05/97	7.62	18.5	281	24.8	16.8	1.3	0.8		174.5	2.0					0.5	131.0	143.0	10.0	9.0					220.7	-2.42	-0.24	-0.39	8.0	4.2		
F-CORO-4	04/08/97	7.57	18.2	281	25.1	16.4	1.4	0.8		175.2	2.0					0.5	130.0	144.0	11.0	9.8					221.5	-2.37	-0.29	-0.50		4.5		
F-CORO-4	02/07/97	7.28	18.1	290	24.3	16.3	1.5	0.9	0.01	188.1	2.0	0.01	0.08	3.1	0.0	0.5	127.4	138.0	10.0	9.0	0.2		0.1	12.2	228.9	-2.10	-0.61	-1.14		4.4		
F-CORO-4	12/08/97	7.70	18.4	283	23.9	16.0	1.8	0.8	0.01	173.7	2.4	0.01	0.10	5.4	0.0	0.5	125.5	142.0	13.0	11.4	0.1		0.1	13.7	236.1	-2.50	-0.18	-0.28		7.4		
F-CORO-4	16/08/97	7.64	18.6	282	24.1	19.1	1.8	0.8	0.01	173.0	1.5	0.01	0.02	5.8	0.0	0.5	126.6	142.0	8.0	7.0	0.2		0.2	11.7	238.0	-2.45	-0.24	-0.32		2.1		
F-CORO-4	30/10/97	7.63	18.5	278	24.3	18.5	1.6	0.9		175.5		0.01	0.06	4.8	0.0	0.5	136.6	144.0	9.0	7.9	0.2		0.2	12.2	238.3	-2.43	-0.24	-0.34		2.5		
F-CORO-4	05/03/98	7.64	18.4	280	22.1	17.3	1.6	0.8	0.13	169.2	2.4	0.24	0.15	2.7	0.0	0.5	126.3	139.0	6.0	5.3	0.2		0.2		217.1	-2.45	-0.28	-0.42		5.3		
F-COAC-1	16/05/97	7.62	17.9	305	27.4	18.3	2.5	1.1		180.6	3.6					0.5	144.0	148.0	10.0	9.0					233.9	-2.41	-0.20	-0.32	2.9	1.0		
F-COAC-1	09/08/97	7.54	17.7	303	25.9	17.2	2.7	1.1		175.7	3.8					0.5	144.0	144.0	10.0	9.0					228.7	-2.34	-0.31	-0.55	3.0	2.3		
F-COAC-1	03/07/97	7.45	19.9	290	24.5	16.3	2.3	1.0	0.05	184.2	3.1	0.14	0.13	5.5	0.0	0.5	127.9	135.0	10.0	9.0	0.1		0.1	16.7	234.4	-2.27	-0.42	-0.74	0.3	3.6		
F-COAC-1	13/08/97	7.69	17.2	296	23.9	15.8	2.6	1.2	0.10	171.0	3.1	0.01	0.14	9.3	0.0	0.5	124.6	140.0	15.0	13.2	0.3		0.3	17.6	245.1	-2.51	-0.22	-0.37	0.5	7.3		
F-COAC-1	17/09/97	7.39	17.8	297	24.6	18.1	2.3	1.1	0.05	174.2	2.7	0.01	0.06	9.8	0.0	0.5	131.1	143.0	10.0	8.8	0.3		0.3	14.9	248.3	-2.20	-0.49	-0.66	1.0	4.3		
F-COAC-1	14/11/97	7.30	18.1	290	25.1	17.2	2.3	1.2	0.06	170.7	3.1	0.01	0.02	10.1	0.0	0.5	133.6	140.0	11.0	9.7	0.2		0.2	16.1	246.4	-2.11	-0.57	-1.05	1.0	4.3		
F-COAC-1	03/04/98	7.52	18.5	300	23.8	18.2	2.2	1.1	0.23	167.8	3.4	0.11	0.02	7.4	0.0	0.5	134.2	138.0	3.0	2.6	0.1		0.1		224.8	-2.34	-0.38	-0.61	1.5	2.9		
F-COAC-2	03/07/97	7.75	17.8	247	20.4	13.7	1.8	1.0	0.01	138.6	2.0	0.31	0.06	5.2	0.0	0.5	107.2	114.0	10.0	9.0												

Fonte	Data	pH	T	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	F ⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Dureza	Alcalinidade	Acidez	CO ₂	N	N	N	SiO ₂	TDS	pCO ₂	IS	IS	Q	DBI					
																	Total																		
																	livre	(Kjeldahl)	(amon.)	(organ.)	Calculado			(calcita) (dolomita)											
																	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(*)	(*)	(*)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)	(l/s)	(%)
F-COTU-4	14/05/97	7.17	18.3	345	31.5	20.9	1.6	0.6		212.3	3.1					0.5	165.0	174.0	17.0	15.0					270.5	-1.89	-0.52	-0.06	0.2	2.8					
F-COTU-4	09/08/97	7.07	18.0	345	31.7	20.4	1.7	0.6		214.4	3.1					0.5	163.0	176.0	18.0	16.0					272.3	-1.79	-0.63	-1.18	0.2	3.8					
F-COTU-4	03/07/97	7.02	18.4	343	30.1	19.9	1.9	0.5	0.04	207.4	3.1	0.01	0.08	4.3	0.0	0.5	157.0	170.0	17.0	15.0	0.2		0.2	11.8	279.7	-1.75	-0.70	-1.31	0.3	4.9					
F-COTU-4	11/08/97	7.11	18.4	361	32.3	20.8	1.9	0.7	0.04	209.5	2.9	0.01	0.04	5.1	0.0	0.5	166.2	172.0	11.4	15.9	0.1	0.02	0.1	11.4	285.2	-1.83	-0.57	-1.08		2.7					
F-COTU-4	18/09/97	7.80	18.2	352	31.5	20.8	1.9	0.8		214.0	2.9	0.01	0.02	7.0	0.0	0.5	164.2	175.0	15.0	13.2	0.3	0.01	0.3	10.8	290.2	-2.52	0.10	0.20	0.2	4.6					
F-COTU-4	27/10/97	7.10	18.7	322	31.5	20.6	1.9	0.9		206.6	2.5	0.01	0.02	6.9	0.0	0.5	163.6	136.0	13.0	11.4	0.3		0.3	10.7	282.1	-1.83	-0.60	-1.11		3.0					
F-COTU-4	04/03/98	7.02	18.4	333	30.2	20.6	1.8	0.7	0.01	204.7	3.9	0.01	0.16	8.8	0.0	0.5	160.1	168.0	3.5	3.1	0.2		0.2		271.3	-1.75	-0.70	-1.31		4.7					
F-COTU-5	14/05/97	7.27	18.4	417	36.0	25.5	3.9	1.0		247.7	2.6					0.5	200.0	203.0	20.0	18.0					319.2	-1.93	-0.29	-0.49	11.0	0.6					
F-COTU-5	08/08/97	7.23	18.5	424	37.8	24.7	4.4	1.1		250.1	2.6					0.5	198.0	206.0	17.0	15.0					321.1	-1.88	-0.32	-0.57	13.0	0.6					
F-COTU-5	03/07/97	7.27	18.3	408	35.9	23.3	4.3	1.0	0.01	244.0	5.1	0.03	0.04	10.2	0.0	0.5	185.6	200.0	17.0	15.0	0.2		0.2	9.3	333.6	-1.93	-0.32	-0.58	14.6	4.9					
F-COTU-5	11/08/97	7.28	18.5	408	38.7	25.1	4.7	1.2	0.42	246.8	5.3	0.22	0.08	15.9	0.0	0.5	199.8	202.0	17.0	15.0	0.3	0.02	0.2	11.3	350.2	-1.94	-0.27	-0.47	19.1	2.8					
F-COTU-5	18/09/97	7.31	18.4	425	36.1	24.8	5.0	1.1	0.05	248.9	5.8	0.01	0.02	16.1	0.0	0.5	192.1	204.0	11.0	9.7	0.2	0.02	0.2	9.2	347.5	-1.96	-0.27	-0.44	9.8	4.9					
F-COTU-5	27/10/97	7.20	18.4	394	37.5	24.8	3.6	1.0	0.02	240.2	4.5	0.01	0.02	13.0	0.0	0.5	193.7	197.0	9.0	7.9	0.3		0.3	8.7	334.0	-1.87	-0.38	-0.67	16.0	2.2					
F-COTU-5	04/03/98	7.08	18.4	403	31.7	25.7	3.5	0.9	0.01	235.2	4.9	0.01	0.02	11.9	0.0	0.5	185.0	168.0	6.0	5.3	0.2		0.2		314.5	-1.76	-0.57	-0.98	16.0	4.0					
F-COTU-8	15/05/97	7.10	17.8	485	44.6	30.3	3.4	1.9		286.6	5.1					0.5	236.0	235.0	33.0	29.0					372.4	-1.70	-0.35	-0.61	1.6	0.6					
F-COTU-8	06/08/97	7.06	17.8	486	42.3	28.6	3.8	2.0		288.8	5.1					0.5	223.0	237.0	31.0	27.5					371.0	-1.65	-0.40	-0.73	1.5	2.2					
F-COTU-8	03/07/97	7.23	17.8	483	43.8	28.0	3.6	1.8	0.01	283.7	4.6	0.05	0.02	10.4	0.0	0.5	224.5	233.0	31.0	27.5	0.2		0.2	14.0	390.4	-1.83	-0.23	-0.40	1.6	2.8					
F-COTU-8	11/08/97	7.21	17.7	493	45.5	28.8	4.0	2.0	0.05	288.1	4.8	0.01	0.06	18.0	0.0	0.5	232.0	236.0	27.0	23.8	0.1	0.01	0.1	13.9	405.8	-1.81	-0.23	-0.41	1.2	3.0					
F-COTU-8	18/09/97	7.18	18.8	490	42.4	28.2	4.1	1.9		280.0	4.3	0.01	0.02	21.0	0.0	0.5	221.2	230.0	18.0	15.8	0.3		0.3	12.9	395.3	-1.78	-0.28	-0.48	0.8	4.1					
F-COTU-8	28/10/97	7.19	17.8	470	41.5	30.2	3.7	2.0		286.2	4.0	0.01	0.02	15.7	0.0	0.5	227.9	235.0	10.0	8.8	0.2		0.2	13.4	397.1	-1.79	-0.29	-0.46	1.7	3.1					
F-COTU-8	04/03/98	7.11	18.0	491	41.9	30.1	3.5	1.8	0.01	286.0	4.9	0.01	0.02	12.4	0.0	0.5	228.4	234.0	4.0	3.5	0.2		0.2		381.1	-1.71	-0.36	-0.61	1.9	2.8					

(*) mg/l de CaCO₃

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ALFARO, C.; WALLACE, M. Origin and classification of springs and historical review with current applications. **Environmental Geology**. Berlin, n.24, p.112-124, 1994.
- 2 ANDRÉ, H. Méthode chimique de dilution: procédé par intégration. **La Houille Blanche**. Grènohle, N° spécial – B, p. 833-843 ,1960.
- 3 ANDRÉ, H.; RICHER, C.; DOUILLET, G. Les jaugeages par la méthode de dilution en 1970. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN HYDROMETRY, (Koblenz : 1970). **Proceedings...** Koblenz : Unesco/WMO/IAHS, v.1, p. 239-250, 1970.
- 4 ANGINO, E.E. Geochemistry and water quality. In: THORNTON, I. (Ed). **Applied environmental geochemistry**. London : Academic Press, 1983.
- 5 APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of waste waters**, 19. New York : APHA, 1995.
- 6 BARNES, H.H.; KILPATRICK, F.A. Techniques for measurement of discharge by dye dilution. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN HYDROMETRY, (Koblenz : 1970). **Proceedings...** Koblenz : Unesco/WMO/IAHS, v.1., p.251-259, 1970.
- 7 BIGARELLA, J.J. ; SALAMUNI, R. Estudos preliminares na Série Açungui VIII – a Formação Votuverava. **Boletim do Instituto de História Natural**, Curitiba, Geologia –2, p.1-6, 6/6/1958.
- 8 BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 20 de 18 de junho de 1986. Estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas no Território Nacional. In: FARIAS, L.G.; LIMA, M.C. **Coletânea de legislação ambiental federal e estadual**. Curitiba : SEDU/CEDMA, p. 321-327, 1990.
- 9 BRASIL. Ministério da Saúde. Resolução N° 25 de 13 de agosto de 1976. Estabelece padrões de identidade e qualidade de águas minerais e água natural de fonte. In: **Compêndio de legislação de alimentos**. São Paulo : Associação Brasileira de Indústrias de Alimentação, p. 7.14 - 7.17, 1992.
- 10 BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria N° 36 de 19 de janeiro de 1990. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial da União**, 23/jan/1990, Seção 1, p. 1651-1654.

- 11 BRYAN, K. Classification of springs. **Journal of Geology**. Chicago, v.27, p.522-561, 1919.
- 12 CASTANY, G. **Prospección y explotación de las águas subterráneas**. Barcelona : Omega, 1975.
- 13 CHAPMAN, D.; KIMSTACH, V. The selection of water quality variables. In: **Water Quality Assessments – a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring**. CHAPMAN, D. (Ed.) New York: Chapman & Hall, 1996.
- 14 COLOMBO. Prefeitura Municipal. **Município de Colombo** : relatório de atuação do governo municipal - gestão 93/96. Colombo, 1997.
- 15 CUSTÓDIO, E. Principios básicos de química y radioquímica de las águas subterráneas. In: CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterránea**. Barcelona : Omega, 1983a.
- 16 _____ . Evolución geoquímica de las águas en los acuíferos. In: CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterránea**. Barcelona : Omega, 1983b.
- 17 DALARMI, O., Utilização futura dos recursos hídricos da Região Metropolitana de Curitiba. **Sanare**, v.4, Curitiba, n.4, p.31-43, Abr/Jun, 1995.
- 18 DAVIS; S.N.; DEWIEST, R.J.M. **Hydrogeology**. New York : Wiley, 1966.
- 19 DAY, T.J. On the precision of salt dilution gauging. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.31, p. 293-306, 1976.
- 20 DEMAYO, A.; STEEL, A. Data handling and presentation. In: **Water quality assessments – a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring**. CHAPMAN, D. (Ed.) New York: Chapman & Hall, 1996.
- 21 DIAS, M.V.F.; SALAZAR Jr, O., Geologia da Seqüência Antinha – Grupo Açungui, PR. In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3. Curitiba, 1987. **Atas....** Curitiba : SBG, v.1, p.263-279.
- 22 DNAEE, **Curso de técnicas hidrometeorológicas: Fluviometria**, [S.l.] : MME-DNAEE, 1987.
- 23 DODERO, M. Modalités pour le titrage des solutions employées dans la méthode chimique pour la mesure des débits. **La Houille Blanche**. Grè noble, Décembre, 1953, p.883-888.

- 24 DRAKE, J.J. The effectes of geomorphology and seasonality on the chemistry of carbonate groundwater. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.61, p.223-236, 1983.
- 25 DRAKE, J.J.; WIGLEY, T.M.L. The effect of climate on the chemistry of carbonate ground water. **Water Resources Research**. Washington (DC), v.11, n.6, p.958-962, 1975.
- 26 DREVER, J.I. **The geochemistry of natural waters**. 2., Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988.
- 27 DUMAS, H. La méthode chimique pour la mesure du débit des cours d'eau. **La Houille Blanche**. Grènohle, Octobre-Novembre, 1952, p. 690-701.
- 28 EMATER - Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Estudo do quadro Natural do "Karst"**. Curitiba, 1997.
- 29 ESTRADA, P. **Manual de control analítico de la potabilidad de las aguas de consumo humano**. Madrid : Diáz de Santos, 1986.
- 30 FETTER, C.W. **Applied hydrogeology**. Upper Saddle River : Prentice-Hall, 1994.
- 31 FIORI, A.P. Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui – PR. Boletim do Instituto de Geociências. Série Científica, São Paulo, v. 23, p. 55-74, 1992.
- 32 FIORI, A.P. Evolução geológica da bacia do Açungui. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, n. 42, p. 7-27, 1994.
- 33 FISHER, H.B.; LIST, E.J.; KOH, R.C.Y.; et al., **Mixing in inland and coastal waters**. San Diego : Academic Press, 1994.
- 34 FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. **Karst geomorphology and hidrology**. London : Chapman-Hall, 1991.
- 35 FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. **Groundwater**. Englewood : Prentice-Hall, 1979.
- 36 FRITZONS Jr, O.; PERKARZ, G.F.; FALCADE, D. Geologia e potencial econômico do Grupo Setuva (PR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., Salvador, 1982. **Anais...** Salvador : SBG, v.1, p. 987-1001.
- 37 GARRELS, R.M.; CHRIST, C.L. **Solutions, minerals and equilibria**. New York : Harper & Row, 1965.

- 38 GEA - Geologia Ambiental Ltda. **Projeto PROSAM/PEB-07 - Relatório Final.** Curitiba : 1998. (Companhia de Saneamento do Paraná. Projeto Concluído. Áreas: Fervida e Botiatuva).
- 39 GONSALVES, A.D. **Águas minerais do Brasil – primeira contribuição para o conhecimento das fontes e estabelecimento da estatística da produção.** Rio de Janeiro : Ministério da Agricultura-Diretoria de Estatística da Produção, 1936.
- 40 HEM, J.D. Calculation and use of ion activity. **Geological Survey Water-Supply Paper**, Washington (DC), n.1535-C, p.1-17, 1961.
- 41 HEM, J.D. Study and interpretation of the characteristics of natural waters. 2., **Geological Survey Water-Supply Paper**, Washington (DC), n.1473, p.1-334, 1970.
- 42 HSU, K.J. Solubility of dolomite and composition of Florida ground waters. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.1, p.288-310, 1963.
- 43 IBGE - Instituto Brasileiro de geografia e Estatística. **Sistema de recuperação automática.** <http://www.sidra.ibge.gov.br>, 1997.
- 44 JACOBSON, R.L.; LANGMUIR, D. The chemical history of some spring waters in carbonate rocks. **Ground Water**. v.8, n.3, p.5-9, 1970.
- 45 KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do Alto Vale do rio Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo.** São Paulo, 1994. Tese (Doutorado). Instituto de Geociências – USP.
- 46 KRAUSKOPF, K.B., **Introdução à geoquímica.** São Paulo : Edusp-Polígono, 1972.
- 47 LEGRAND, H.E.; LAMOREAUX, P.E. Hydrogeology and hydrology of karst. In: BURGER A.; DUBERTRET, L. **Hydrogeology of karstic terrains**, (Ed.), Paris : IAH, 1975.
- 48 LISBOA, A.A. **Proposta de metodologia para avaliação hidrogeológica do aquífero cárstico, Compartimento São Miguel.** Curitiba, 1997. Dissertação (Mestrado), Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- 49 LLADÓ, N.L., **Fundamentos de hidrogeologia carstica – introducción a la geoespeleología.** Madrid : Blume, 1968.
- 50 LLOYD; J.W.; HEATHCOTE, J.A. **Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater.** Oxford : Clarendon Press, 1985.

- 52 MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 2., Rio de Janeiro : José Olimpio, 1981.
- 53 MARINI, O.J.; BIGARELLA, J.J. Rochas calcárias do Grupo Açungui. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, n. 23-25, p. 105-150, 1967.
- 54 MARINI, O.J.; TREIN, E.; FUCK, R.A. O Grupo Açungui no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, n. 23-25, p. 43-103, 1967.
- 55 MASCHIO, D.J., Colombo rumo ao ano 2000 no desenvolvimento rural. **Folha de Colombo**, 15/março/1997.
- 56 MEINZER, O.E. Ground water – occurrence, origin and discharge of ground water. In: MEINZER, O. E (Ed.). **Hydrogeology**, New York : Dover, 1942.
- 57 MEINZER, O.E. Outline of ground-water hydrology. **Geological Survey Water-Supply Paper**, Washington (DC), n.494, p.1-71, 1923.
- 58 MIJATOVIC, B.F., Exploitation rationnelle des eaux karstiques. In: BURGER, A.; DUBERTRET, L. (Ed.), **Hydrogeology of Karstic Terrains**.. Paris : IAH, 1975.
- 59 OTTON, E.G.; HILLEARY, J.T. Mariland springs - their physical, thermal, and chemical characteristics. **Report of investigations – Maryland Geological Survey**, n. 42, 1985.
- 60 PARKHURST, D.L. **User's guide to PHREEQC** : A computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculation. Lakewood : USGS, 1995.
- 62 PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Transactions of the American Geophysical Union - 1944**. Washington (DC), Part VI, p.914-928, May/1945.
- 61 ROSENAU, J.C.; FAUKNER, G.L.; HENDRY, C.W.; HULL, R.W. Springs of Florida. **Geological Bulletin - Florida Geological Survey**, n.31 (revised), 1978.
- 63 SANZ PEREZ, E. La regulación de los manantiales y su incidencia em España. **Boletín Geológico y Minero**. Madri, v. 98-6, p.105-132, 1987.
- 64 SCHOELLER, H. **Les eaux souterraines**. Paris : Masson, 1962.
- 65 SHUSTER, E.T.; WHITE, W.B. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonates aquifers. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.14, p.93-128, 1971.

- 66 SHUSTER, E.T.; WHITE, W.B. Source areas and climatic effects in carbonate groundwaters determined by saturation indices and carbon dioxide pressures. **Water Resources Research**. Washington (DC), v.8, n.4, p.1067-1073, 1972.
- 67 THRAILKILL, J. Chemical and hydrologic factors in limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**. Boulder, v.79, p.19-46, Jan./1968.
- 68 TODD, D.K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: Edgar Blücher, 1959.
- 69 TOLMAN, C.F. **Ground Water**. New York: McGrawHill, 1937.
- 70 TRAINER, F.W.; HEATH, R.C. Bicarbonate content of groundwater in carbonate rock in Eastern North America. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v.31, p.37-55, 1976.
- 71 VAINE, J.L., Caracterização hidrológica da área do Projeto Karst. In: **Projeto Karst-Progress Report**. Curitiba : Suderhsa/Sanepar/Comec/IJR/UFPR, 1998.
- 72 WILD, A. **Soils and the environment - an introduction**. New York : Cambridge Press, 1995.