

ASPECTOS DA QUALIDADE DE ÁGUAS DO AQUÍFERO CÁRSTICO EM ALMIRANTE TAMANDARÉ - PR

**André Virmond Lima Bittencourt¹; Eduardo Chemas Hindi¹; Luíz Eduardo Mantovani¹ &
Ernani Francisco da Rosa Filho¹;**

Resumo-Utilizando-se análises físico-químicas e bacteriológicas de amostras de água de 20 poços tubulares no município de Almirante Tamandaré, Região Metropolitana de Curitiba entre 1998 e 2002, foram procedidas algumas considerações preliminares sobre o quimismo do sistema hídrico local. A composição química das águas relacionadas do aquífero estudado reflete a compartimentação estrutural do aquífero. Observa-se um mínimo de três sistemas de circulação: Sede Municipal, Tranqueira e Botiatuva. Nesses sistemas, as águas tiveram ou tempos de residência diferentes no aquífero, ou diferentes taxas de mistura com águas recém infiltradas. Os teores em sílica dissolvida e cálcio são bons discriminadores. Diagramas de equilíbrio de minerais do tipo Si-Al-K e Si-Al-Na salientam que o tipo geoquímico de alteração dominante é a monossilitização e que os teores de potássio são controlados pelos filossilicatos do arcabouço litológico. O cálcio, antes de ser controlado por silicatos, é controlado pelo equilíbrio com a calcita, enquanto que o sódio está bem abaixo de níveis de saturação em relação aos minerais mais comuns. A vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação por agentes superficiais ficou bem caracterizada em determinados poços situados nas áreas urbanizadas. Ficou também evidente a necessidade de um monitoramento permanente de parâmetros químicos dos corpos de água locais, para dar suporte à exploração sustentada de água na região.

Abstract-Almirante Tamandaré have a karstic aquifer important for the Metropolitan Region of Curitiba water supply. This work aims to contribute to the hydrochemical behavior knowledge of the Almirante Tamandaré region water bodies. The study is based in chemical and bacteriological analyses performed in 20 tubular wells since 1998 until 2000. We observe at least three water circulation systems: municipal urban nucleus, Tranqueira Region and Botiatuva. In each system, the waters have different chemical composition patterns established by different residence time within the aquifer or by varied mixing rates with recently infiltrated water. The dissolved SiO₂ and calcium, are good discriminators. Equilibrium activity diagrams Si-Al-K and Si-Al-Na shows a monossilitic alteration behavior in the system and the potassium probably controlled by

¹ Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da Universidade Federal do Paraná (andre@ufpr.br)
Departamento de Geologia – Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico – Jardim das Américas – 81531-990 Curitiba - PR

phylossilicates of the rocks. The calcium, before a control by the silicates is much more controlled by the carbonates, mainly calcite. The sodium is below the saturation of all common minerals. About the vulnerability of the aquifers, related to surface agents, this aspect was characterized in some wells located within urbanized sites. Is also well evident the needing of a permanent water quality monitoring program in local water bodies to support his sustainable exploitation.

Palavras-chave: hidroquímica, aquífero cárstico, Região Metropolitana de Curitiba

INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Curitiba (RMC) tem a necessidade urgente de ampliar a disponibilização de mananciais de água para abastecimento público. Os aquíferos cársticos relacionados ao grupo Assungui são uma das opções disponíveis. Sua utilização já é feita, porém o potencial inexplorado é ainda muito grande. Um importantepositor de dificuldades para tal aproveitamento é a vulnerabilidade daquele tipo de aquífero à poluição. No caso específico de Almirante Tamandaré, problemas geotécnicos que ocorreram quando do início da exploração das águas cársticas pela SANEPAR, concessionária responsável pelo abastecimento público e coleta de esgotos, têm inibido um aproveitamento mais intensivo da água do carste paranaense.

O município de Almirante Tamandaré, (RMC), sedia importante volume de água armazenada em reservatórios cársticos. O aproveitamento sustentado daquela água carece de estudos básicos do sistema a ser explotado. Em face da fragilidade ambiental inerente a regiões com substrato carbonático sob processos de carstificação, vários trabalhos foram desenvolvidos na área alvo deste estudo. Dentre estes, se destacam Bonacin [1], Lisboa [2], Hindi e Rosa Filho [3] e Guimarães [4] que contribuíram para ao conhecimento da geologia e hidrogeologia local, assim como Raton et al. [5] e Nadal et al. [6] que abordaram sobretudo aspectos geotécnicos. A despeito de todas estas importantes contribuições, muito há que ser feito para se atingir um conhecimento adequado das interações químicas desenvolvidas no sistema hídrico, desde a infiltração até a captação em poços, fontes ou rios.

Dentre os aspectos importantes para o conhecimento necessário a uma otimização do aproveitamento da água está o quimismo dos mananciais disponíveis. Isto posto, tem este trabalho o fito de contribuir para o conhecimento da hidrogeoquímica dos sistemas hídricos de Almirante Tamandaré.

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS

A morfologia típica do Grupo Açungui, conforme Bigarella e Salamuni [7] reflete os fenômenos tectônicos ocorridos na área, com linhas de cristas de direção predominante NE-SW, formadas por faixas de filito e quartzito e, 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, geralmente formado por rochas carbonáticas, 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.

Os mármores dolomíticos da Formação Capiru (Grupo Açungui), constituem o arcabouço litológico do "Aquífero Karst". As observações pioneiras sobre os mármores do grupo Açungui foram realizados por Derby [8] e os primeiros estudos geológicos sistemáticos foram realizados por Oliveira [9] e Carvalho e Pinto [10]. Os estudos preliminares para a caracterização lito-estratigráfica do Grupo Açungui foram realizados por Maack [11] e sequenciados por Bigarella [12], [13], [14] e Bigarella e Salamuni [7],[15],[16],[17]. Merecem ser mencionados, também, os trabalhos realizados por Marini et al. [18], Marini [19], Fuck et al. [20], Fairchild [21], Fritzens Jr. et al. [22], Soares [23], Dias e Salazar Jr. [24] e Fassbinder [25], que modificaram a estratigrafia do Grupo Açungui, tendo como critérios, o grau de metamorfismo e a complexidade estrutural das litologias. Atualmente, aceita-se a seqüência estratigráfica proposta por Fiori [26] [27] [28], constituída pelas Formações Capiru, Votuverava e Antinha, que estão justapostas por contatos tectônicos, decorrentes de falhamentos associados ao Sistema de Cavalgamento Açungui. Com base nas características estruturais, sedimentares e tectônicas, essas formações foram subdivididas em seqüências litológicas, estando a Formação Capiru subdividida nas seqüências litológicas Juruqui, Rio Branco, Morro Grande e Bocaina.

Segundo Fiori [26] os tipos litológicos predominantes da Formação Capiru são metacalcários de composição dolomítica, sem estruturas sedimentares visíveis e de coloração variando de branca a cinza claro. Intercalados aos metadolomitos, ocorrem lentes descontínuas de quartzitos e de filitos com espessuras variáveis. Ocorrem com menor freqüência, lentes de filitos quartzosos e de quartzitos com matriz filitosa.

Os metadolomitos da Formação Capiru têm porosidade primária desprezível e apresentam um padrão de fraturamento com orientação principal N-W e secundária N-E [01], [03], [07] [04]. As linhas principais de fraturamento estão concentradas na direção N30-60W e estão, provavelmente, relacionadas aos processos tectônicos de reativação do Arco de Ponta Grossa, enquanto que as secundárias, com direção N50-70E estariam relacionados aos eventos causadores da falha

transcorrente da Lancinha. Em consequência da densidade de fraturas nas direções mencionadas e pela presença dos diques de diabásio, que condicionam o fluxo subterrâneo existem indícios de que os processos de carstificação foram mais efetivos nessas direções [01], [03].

Na região de Almirante Tamandaré - Tranqueira, as rochas carbonáticas encontram-se cobertas por um manto de intemperismo com cerca de 20 m de espessura. Os solos têm textura argilosas, são bem desenvolvidos, com horizontes A e B profundos. Na base das encostas ocorrem solos do tipo cambissolos distróficos e nas superfícies aplainadas dos vales, cambissolo latossólico álico, cambissolos argilosos e cambissolos hidromórficos gleyzados, associados a filitos e mármorees [29], [30].

Vaine [31] no âmbito do "Projeto Karst", que abrange parte dos municípios de Colombo e Almirante Tamandaré, utilizou os registros feitos em sete postos pluviométricos durante o período de 1954 a 1997, para determinar os valores de precipitação anual média, mínima e máxima que são, respectivamente, 1400 mm, 860 mm e 1981 mm. O principal processo de recarga do aquífero é a infiltração difusa (autogênica e alogênica) da precipitação atmosférica através do manto de intemperismo. O intervalo de tempo entre a queda da chuva e a variação do nível da água no aquífero, medido em poços perfurados na região de Colombo (PR), foram estimados por Hindi [32] entre 60 a 75 dias. Esse dado é importante por mostrar a vulnerabilidade do aquífero a substâncias contaminantes persistentes e, principalmente, pelo desenvolvimento de atividades agrícolas com aplicação intensa de defensivos e fertilizantes, nas áreas de ocorrência do aquífero.

O potencial hídrico do aquífero cárstico nessa região é evidenciado pelo volume de água captado para abastecer a sede municipal de Almirante Tamandaré e pela descarga natural de fontes cársticas. Desde 1992, o abastecimento de água Almirante Tamandaré vem sendo complementado pela exploração de cinco poços perfurados na sede do município, que produzem juntos, 430 m³/h. A vazão média das três maiores fontes da região de Almirante Tamandaré - Tranqueira (Seminário: 52 L/s; Dona Santinha: 38 L/s e, Timbu: 139 L/s), quando somadas ultrapassam 850 m³/h. Parte desse volume, que na maioria das vezes serve apenas para diluir a poluição do rio Barigüí, poderia ser captado e lançado na rede de abastecimento, desde que fossem realizadas obras de proteção e regularização de descarga dessas fontes.

MATERIAIS E MÉTODOS

As coletas das amostras de água foram feitas em poços perfurados em Almirante Tamandaré, por hidrogeólogos da SANEPAR - Companhia de Saneamento do Estado do Paraná e as análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas – LPH, da Universidade Federal do Paraná em Curitiba. Os procedimentos utilizados tiveram por os procedimentos estabelecidos no “Standard Methods”[33]. As amostras após serem coletadas, foram enviadas ao laboratório em um período inferior a 24 horas, para determinação dos parâmetros físico-químicos. Os dados bacteriológicos foram obtidos nos laboratórios da SANEPAR.

A bacia do rio Barigui, que nasce na região e é um dos formadores do rio Iguaçu, é a principal feição hidrográfica de Almirante Tamandaré. Entre outubro de 1994 e julho de 1995, foram operadas 3 estações de medição de vazão no rio Barigüí, localizadas em Areias, Tranqueira e nas proximidades da Escola Rural [34]. A estação da Escola Rural, corresponde ao exutório da bacia. Nessa estação foram feitas, no período mencionado, 26 medições de vazão que variaram de 0,234 m³/s a 2,37 m³/s. Atualmente as estações fluviométricas estão desativadas.

No que diz respeito à água subterrânea, neste trabalho são consideradas 38 análises físico-químicas (Tabela 1) e bacteriológicas, realizadas em 20 poços tubulares. As análises foram realizadas nos laboratórios da ARH/SUREHMA/IAP, da SANEPAR e no LPH, segundo técnicas que nem sempre foram as mesmas, o que dificulta a interpretação dos resultados. As análises envolveram 47 parâmetros, vários destes analisados apenas em um ou outro poço. Em alguns dos poços foram realizadas mais de uma amostragem e análise, o que é positivo para minimizar fatores aleatórios influentes na qualidade da água.

ÁGUAS SUPERFICIAIS

Para uma correta caracterização da qualidade da água de uma determinada região, se faz mister o monitoramento desta qualidade, o que via de regra se faz por meio de pontos de monitoramento sistemático. Esta sistematicidade é importante na medida em que existem diversos fatores influentes nas características das águas que variam no tempo. Uma água que apresenta uma boa qualidade em um momento, segundo parâmetros estabelecidos, em outra ocasião pode não atender a padrões mínimos de qualidade. No caso do município de Almirante Tamandaré, na Estação Escola Rural o ponto de monitoramento de águas superficiais, operado pelo IAP no rio Barigui, é a estação AI 57 – Boichininga. Instalada em 1993, até maio de 1998 foi alvo de apenas 10 análises, restritas aos parâmetros empregados para avaliação do Índice de Qualidade de Água (IQA). De julho de 2000 a abril de 2002, foi levantado um rol mais completo, de 21 parâmetros, disponibilizados pelo IAP/SUDERHSA.

O rio que está classificado na Classe 2 [35], não apresenta uma qualidade adequada, excedendo os limites legais em termos de coliformes fecais, coliformes totais, e fosfatos. Esta constatação é comum em rios que drenam áreas antropizadas, o que é o caso. Apesar do comprometimento da qualidade das águas pelos coliformes e fosfato, as espécies químicas nitrogenadas não excedem aos limites legais naquele ponto do rio.

Em pontos do rio Barigui a montante da área urbana de Tranqueira, por observação visual, suspeita-se que a qualidade da água seja sensivelmente melhor. O que, naturalmente, deverá ser efetivamente comprovado através de análises físico-químicas, químicas e bacteriológicas.

Tabela.1. Análises, pelo LPH/UFPR, dos principais parâmetros químicos e pH, correspondentes aos poços perfurados para a SANEPAR em Almirante Tamandaré. Os parâmetros químicos estão expressos em mg/L.

Análise	Poço	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	pH
01	sp01	1,77	3,62	206,18	14,9	36,53	16,53	3,1	2,1	7,6
02	sp01	3,45	1,68	216,79	7,3	33,31	15	2	2,2	7,33
08	sp07	4,42	3,15	198,09	15,1	34,15	16,16	2,5	1,5	7,65
09	sp07	3,18	1,77	197,52	15,3	17,79	32,52	2,1	1,2	7,33
10	sp09	5,00	3,57	190,30	17,3	36,3	14,59	2,8	1,7	7,66
11	sp09	3,36	1,82	183,00	16,4	17,8	26,95	2,4	1,4	7,49
12	sp17	2,34	3,09	197,48	14	37,06	14,9	2,7	1,7	7,77
13	sp17	1,77	1,68	187,76	13,5	27,21	27,97	2,2	1,3	7,59
14	sp20	4,42	3,03	194,89	14,6	34,64	15,97	2,4	1,5	7,74
15	sp20	2,74	1,59	187,88	14	31,74	24,27	1,9	1,1	7,56
16	tp01	1,33	2,23	197,27	14	30,46	22,42	2,4	1,5	7,51
18	tp01	4,59	4,05	221,39	8	29,33	27,61	2,5	0,7	7,49
19	tp04	1,64	2,94	174,72	9,48	30,06	16,53	2,17	0,3	7,65
20	tp05	3,18	1,41	205,08	9,7	33,63	21,94	1,6	0,7	7,56
21	tp05	4,24	3,57	207,60	8,1	38,08	18,52	1,7	0,6	7,95
22	tp12	1,33	0,55	153,35	9,8	27,05	15,29	1,2	0,8	7,61
23	tp12	1,46	1,94	149,24	10,3	28,76	14,12	1,3	0,8	8,06
25	tp17	1,41	0,77	156,04	8,9	27,33	14,49	1,1	0,7	7,61
26	tp17	1,45	1,69	150,26	9,6	26,7	17,65	1,1	0,7	8,02
28	tp20	2,74	1,05	208,74	5,6	26,17	27,34	1,3	0,4	7,51
29	tp20	3,54	3,15	205,43	6,3	35,06	17,11	1,3	0,5	7,97
31	bp04	0,37	0,98	68,44	6,45	12,42	6,56	0,65	0,24	6,95
32	bp05	3,81	0,98	182,24	4,72	28,41	15,76	0,7	0,2	7,89

ÁGUA SUBTERRÂNEA

De um modo geral, as águas subterrâneas não apresentaram parâmetros excedentes àqueles requeridos às águas potáveis. Este aspecto seria de se esperar em se tratando de águas que sofreram processo natural de depuração durante sua infiltração pelo solo, todavia em um sistema cárstico a contaminação poderia ser facilitada.

Uma avaliação da qualidade das águas subterrâneas do município de Almirante Tamandaré é minimamente possível através de uma apreciação dos resultados de análises de material coletado em poços tubulares perfurados por iniciativa da SANEPAR.

Em águas subterrâneas não cabe falar em termos de Índice de Qualidade de Água - IQA, ao menos no que diz respeito aos parâmetros empregados pelos órgãos estatais paranaenses. Neste contexto serão tecidas algumas considerações sobre os parâmetros químicos e físico-químicos minimamente necessários para avaliar o quimismo de uma água. As análises disponíveis foram realizadas em 3 laboratórios diferentes, e a maior parte o foi no LPH/UFPR, de modo que se procurou evitar interferências oriundas de metodologias diferentes considerando apenas os dados daquele laboratório, constantes da tabela 1. Nesta última tabela referida, não constam os valores do íon sulfato e do íon fluoreto. O sulfato foi anotado apenas em duas amostras com teores superiores a 1,0 mg/L, ou seja, uma no poço sp07 e outra no poço sp20. O íon fluoreto, na maioria das amostras apresentou-se inferior a 0,01 mg/L, em uma amostra, tp04 foi de 0,43 mg/L e em todas as outras sempre esteve inferior a 0,2 mg/L.

Os parâmetros anotados não apresentam valores anômalos em relação aos obtidos em outras análises referidas na literatura sobre a região cárstica paranaense [1], [2], [36]. As cifras estão dentro dos padrões de potabilidade preconizados pela legislação brasileira [37].

Dos parâmetros em questão, o nitrato é especialmente importante por poder refletir contaminações orgânicas. É sob esta forma extremamente solúvel, que a matéria orgânica nitrogenada normalmente se estabiliza, todavia nem sempre a matéria orgânica é originária de processos poluentes. Materiais turfosos, quando presentes podem contribuir com nitrato.

Como o relevo cárstico possibilita muitas situações que favorecem o desenvolvimento de solos hidromórficos, não podem ser considerados preocupantes teores de até 5 mg/L em nitrato. Em estudo realizado no mesmo contexto cárstico do município de Colombo, vizinho de Almirante Tamandaré, ficou constatada a importância do sistema de adubação de cultivos olerícolas por material orgânico originado de granjas de aves nos teores de nitrato das águas subterrâneas [38].

É importante se observar, que foi anotada a presença de coliformes totais e fécais em várias amostras. Curiosamente, na amostragem realizada em 14/02/2002, o índice de coliformes ou foi muito baixo, ou nulo. Nota-se algumas outras características comuns dentro dos dados levantados em outras campanhas. Este aspecto pode estar relacionado a diferenças sutis entre os

procedimentos laboratoriais usados em cada caso, o que dificulta uma comparação mais elaborada entre os dados como um todo.

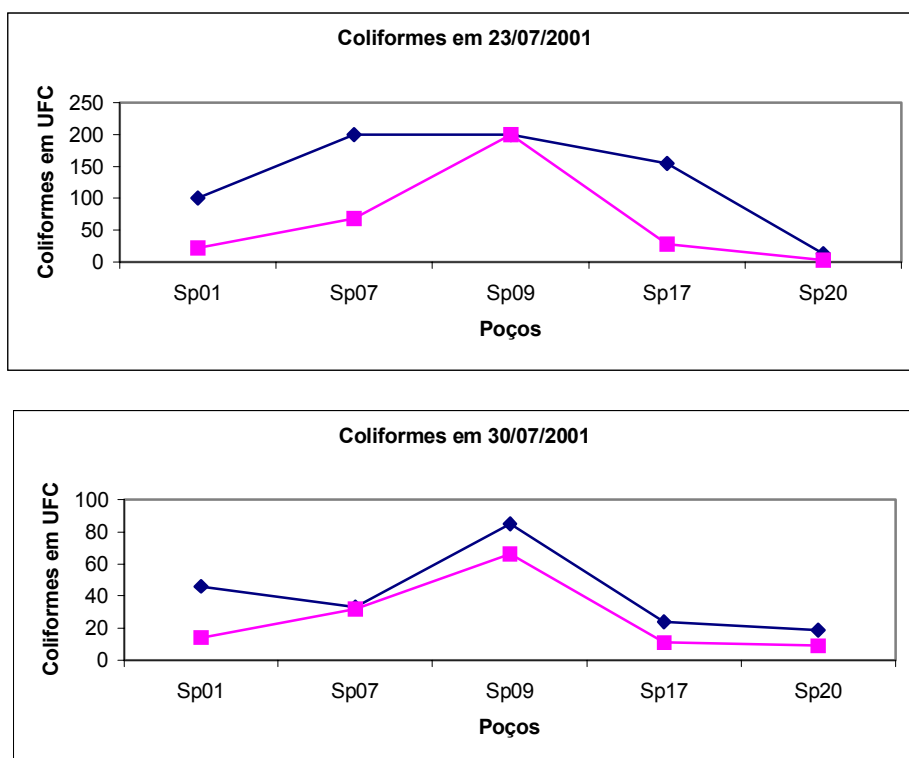
Serão aqui consideradas para uma interpretação comparativa entre os poços, as campanhas realizadas no ano de 2001, que apresentam maior coerência nos resultados analíticos obtidos.

Observando-se a figura 1, nota-se um padrão que reflete diferenças sistemáticas nos teores de coliformes das águas dos poços da sede municipal de Almirante Tamandaré. O poço 09 apresenta os valores mais altos enquanto os poços 01 e 20 os mais baixos. Efetivamente, ocorrem problemas de contaminação localizada, que demandam de um estudo mais aprofundado para terem sua origem perfeitamente conhecida. Pela regularidade observada, pode-se descartar problemas mais sérios de contaminação devida à amostragem, o que remete, efetivamente a fontes poluidoras diretamente nas cercanias dos poços.

No caso de Tranqueira, a presença de habitações a poucos metros de poços em operação testemunha uma situação a ser evitada.

Sobre a qualidade físico-química de águas do atual município de Almirante Tamandaré, o primeiro registro anotado de uma análise laboratorial detalhada, correspondente a uma fonte na localidade de Tranqueira, cerca de 500 metros da Estação Ferroviária, quando foi constatado tratar-se de água mineral alcalino-terrosa [39].

Com base nas análises recentes, são possíveis algumas observações preliminares, porém importantes e que podem levar a constatações de ordem prática, relacionadas à aquisição dos parâmetros levantados.



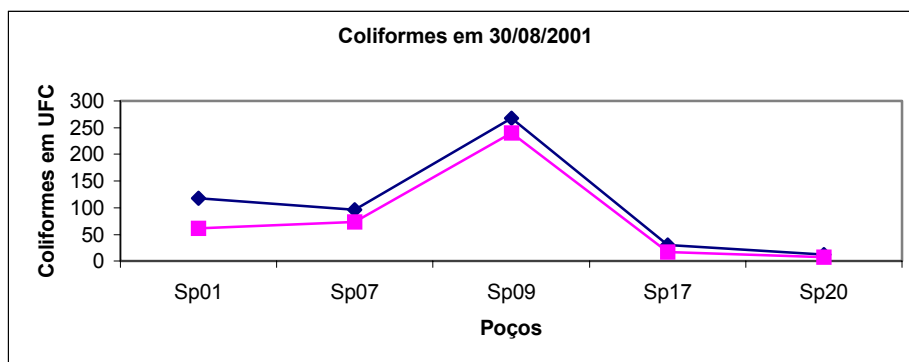


Figura 1. Variação no nível de Coliformes Fecais e Totais nas águas de poços tubulares na Sede do Município de Almirante Tamandaré nas campanhas realizadas em 23/07/2001, 30/07/2001 e 30/08/2001, por equipe da SANEPAR.

A figura.2 apresenta um diagrama de Durov modificado, em que estão representadas as águas dos poços tubulares constantes da tabela 3. Como os valores de sulfato foram inexpressivos, optou-se por incluir o nitrato como um dos vértices do triângulo dos cátions. As águas se situam, como seria de se esperar, em um campo onde se fazem presentes soluções naturais equilibradas com rochas dolomíticas [40].

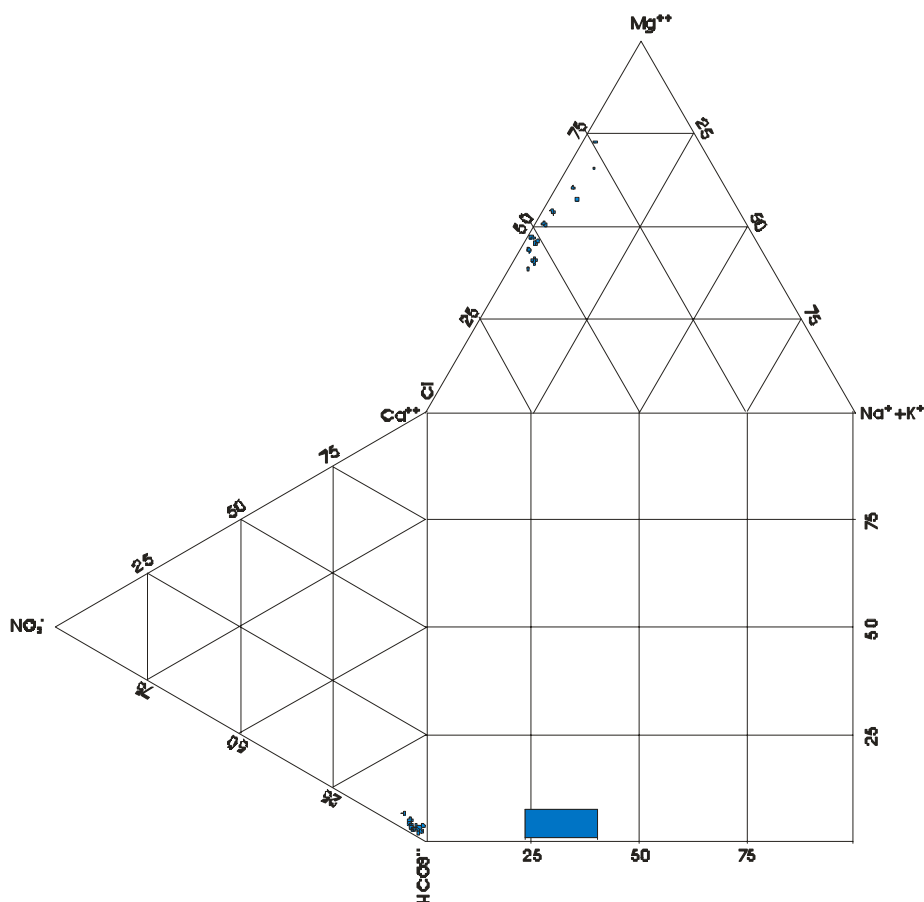


Figura 2 . Diagrama de DUROV modificado, apresentando as águas dos poços de Almirante Tamandaré. O retângulo azul corresponde ao campo ocupado pela família toda de águas coletadas nos poços tubulares de Almirante Tamandaré. Neste tipo de diagrama os parâmetros químicos constantes da tabela 1, são convertidos em porcentagem de meq/L.

Todas as amostras apresentam dentre os ânions o bicarbonato predominando com mais de 90%, conseqüentemente há uma grande concentração junto ao vértice correspondente àquele ânion. Para os cátions, o Sódio e Potássio contribuem juntos sempre com menos de 6%. A dispersão maior de pontos no diagrama fica por conta do cálcio e do magnésio. Os dados de qualidade de água refletem nitidamente dois grupamentos representados um pelos poços de Almirante Tamandaré Sede e outro pelos poços de Tranqueira. Botiatuba é um caso independente. Os teores em K^+ , Na^+ e em SiO_2 ressaltam esta diferença (figura.3, figura 4 e figura 5). Esta compartimentação não é nítida quanto aos valores anotados para o NO_3^- e Cl^- (figura 6).

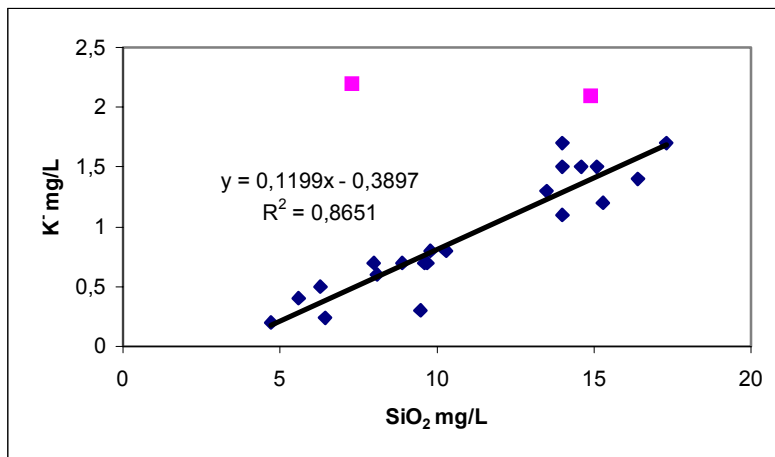


Figura 3. Correlação entre o K^+ e SiO_2 de águas coletadas em poços tubulares do Município de Almirante Tamandaré. São salientados dois valores atípicos não considerados na correlação.

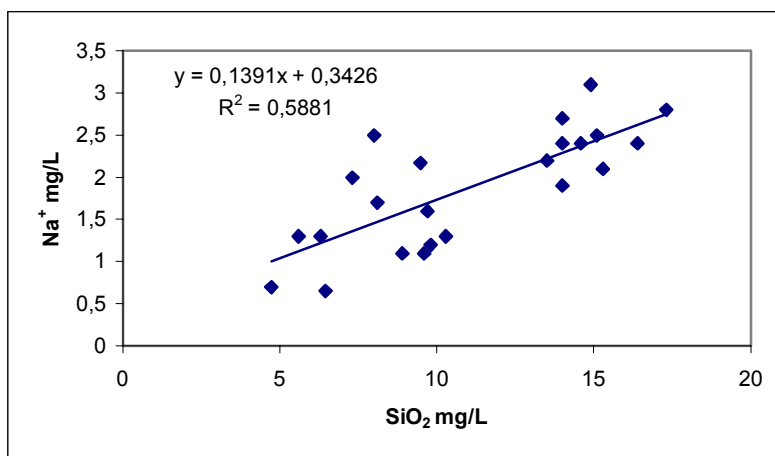


Figura 4. Correlação entre o Na^+ e SiO_2 de águas coletadas em poços tubulares do Município de Almirante Tamandaré, com base em análises realizadas pelo LPH entre 1998 e 2001.

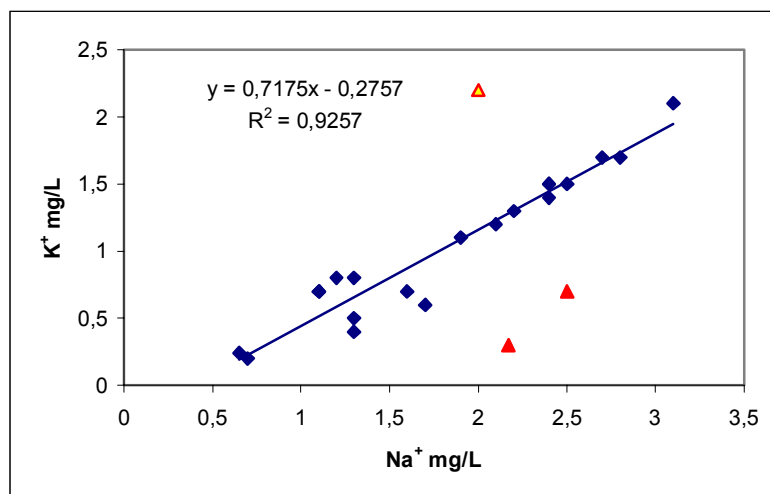


Figura 5. Correlação entre o K⁺ e Na⁺ de águas coletadas em poços tubulares do Município de Almirante Tamandaré, com base em análises realizadas pelo LPH entre 1998 e 2001. São salientados três valores atípicos não considerados na correlação.

Um dos fatores que podem exercer papel significativo neste comportamento é relativo à origem dos parâmetros. O NO₃⁻ e o Cl⁻ não são originários do arcabouço litológico e sim de fonte superficiais que envolvem desde a origem marinha por aerossóis, no caso do Cl⁻ até poluição no caso dos dois íons. Íons como o K⁺ e SiO₂, são de origem principalmente litológica, vindo em sua maior parte dos filossilicatos. O Na⁺, também presente em certos minerais silicatados também pode ter seu aporte relacionado a poluição por NaCl, principalmente, sendo este presente em grande quantidade em efluentes urbanos e de atividades pecuárias. Também o K⁺ pode provir, em situações específicas, de poluição por adubos do tipo NPK.

O Ca²⁺ e o Mg²⁺ não são bons discriminadores de diferentes compartimentos cársticos (figura 7), apresentando sutil correlação inversa, onde os teores em Mg²⁺ diminuem com o aumento do Ca²⁺ em solução. Esta correlação inversa é mais notável nos poços da sede de Almirante Tamandaré.

O compartimento aquífero Tranqueira, comporta águas características mais variáveis, o que ressalta uma heterogeneidade maior entre os poços. Isto seria de se esperar, uma vez que os poços da sede municipal encontram-se espacialmente mais agrupados.

A correlação HCO₃⁻ com a sílica também salienta a existência de sistemas aquíferos bem diferentes na sede e em Tranqueira (figura 8).

A qualidade das águas também salienta a existência de controles diferentes sobre os mecanismos reguladores do quimismo de diferentes poços, o que requer um acompanhamento sistemático deste fator. Este monitoramento é imprescindível em sítios muito ocupados por atividades antrópicas, como é o caso, tanto de Almirante Tamandaré sede como, ainda em menor escala, Tranqueira.

Amostras isoladas de qualidade de água, são muito frágeis como base para interpretações de impactos ambientais por elas sofridos. É fundamental amostras sistemáticas o suficiente para que sejam notáveis as anomalias que podem advir de contaminações das mais diversas origens. As figuras.2 e 5 denotam bem este aspecto.

A par das observações sobre a qualidade das águas com base em determinações analíticas, observações de campo levam a que se conclua sobre a fragilidade da qualidade da água captada em poços localizados em zonas urbanizadas. Este é o caso, tanto do sítio Almirante Tamandaré sede, como Tranqueira. Neste último caso, a poucos metros da captação principal, estão localizadas residências que vertem esgoto diretamente em valetas a céu aberto. Certamente esta é uma fonte poluidora que pode contribuir seriamente para a degradação da qualidade da água dos poços vizinhos.

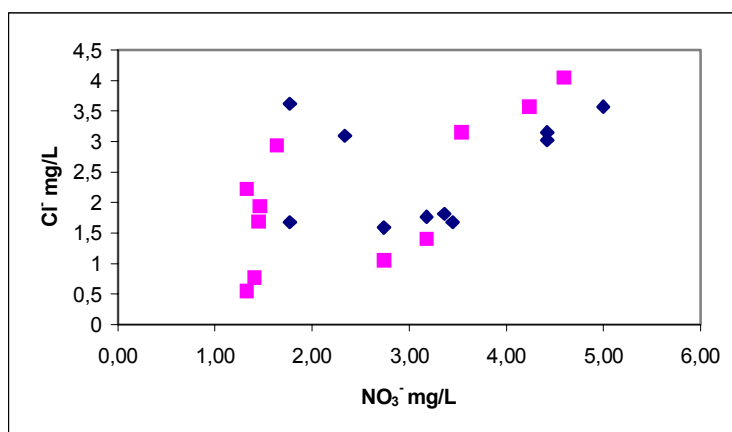


Figura 6. Correlação entre o Cl⁻ e NO₃⁻ de águas coletadas em poços tubulares do Município de Almirante Tamandaré, com base em análises realizadas pelo LPH entre 1998 e 2001.

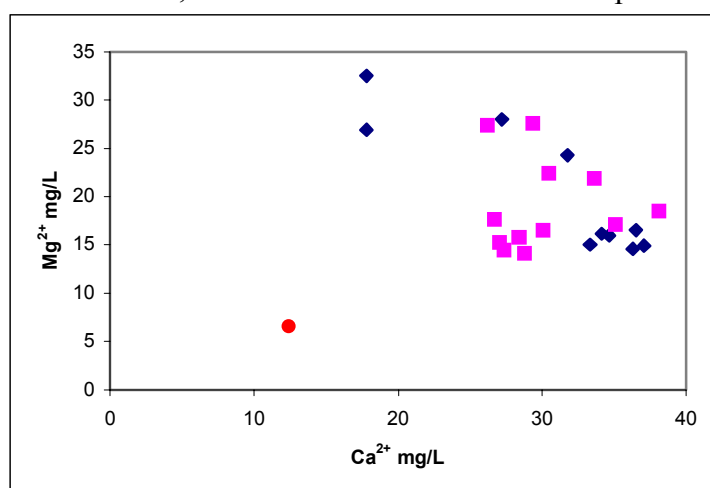


Figura 7. Correlação entre os teores em Mg²⁺ e Ca²⁺ de águas coletadas em poços tubulares do Município de Almirante Tamandaré, com base em análises realizadas pelo LPH entre 1998 e 2001. Os losangos correspondem a Sede municipal, os quadrados a Tranqueira, o círculo a Botiatuba p04

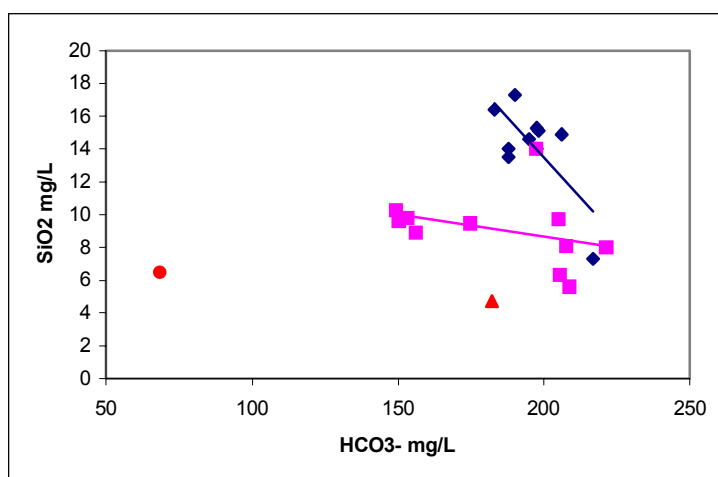


Figura 8. Gráfico representando a correlação entre SiO_2 e HCO_3^- para os poços tubulares de Almirante Tamandaré. Os losangos correspondem a Sede municipal, os quadrados a Tranqueira, o círculo a Botiatuba p04 e o triângulo a Botiatuba p05.

INTERAÇÕES ENTRE A ÁGUA E MINERAIS

Uma primeira análise dos equilíbrios entre as águas dos compartimentos explorados e minerais do arcabouço litológico, foi procedida com dados hidroquímicos tratados pelo programa PHREEQE C1 [41]. Os índices de saturação foram determinados considerando-se as equações abaixo, onde os valores correspondentes aos íons são empregados em termos de atividade iônica. Os valores dos logaritmos dos produtos de solubilidade (Q) obtidos do tratamento dos dados analíticos são diminuídos dos valores correspondentes às condições de equilíbrio do mineral (K). A índices de saturação negativos correspondem soluções insaturadas, enquanto valores positivos correspondem a supersaturação.

Índice de Saturação	= $\log Q - \log K$
Produto de solubilidade da Calcita	= $[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$
Produto de solubilidade da Aragonita	= $[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}]$
Produto de solubilidade da Dolomita	= $[\text{Ca}^{2+}] \times [\text{Mg}^{2+}] \times [\text{CO}_3^{2-}] \times 2$
Produto de solubilidade do Quartzo	= $[\text{SiO}_2]$

Foram avaliadas as 12 amostras dos poços estudados e constantes da tabela 2. Os testes de saturação indicaram em 9 casos, águas um pouco insaturadas em relação à calcita e dolomita, no entanto muito próximas ao equilíbrio com estes minerais. Apenas amostra do poço bp05, Botiatuba, apresentou saturação com respeito aos dois minerais referidos. Esta mesma amostra bp05 apresentou leve insaturação em relação ao quartzo, aspecto a ser investigado, a despeito de sua pouca relevância. A aragonita, nas condições consideradas é sempre um pouco mais solúvel do que a calcita. Este mineral em determinadas condições pode se formar em soluções supersaturadas em relação à calcita, porém com o passar do tempo o equilíbrio promove sua transformação em calcita.

A locação dos índices de saturação em gráficos (Figuras 9 e 10), evidencia diferenças de caráter químico das águas, promovidas provavelmente por tempos de residência diferentes no seio do aquífero. Águas subterrâneas mais saturadas normalmente indicam um maior tempo de contacto com o arcabouço mineral das rochas. Este aspecto também pode ser fortemente influenciado por diluição de águas mais concentradas com águas oriundas de precipitações pluviométricas mais recentes.

Tabela.2. Índices de saturação de Calcita, Aragonita, Dolomita e Quartzo (a 20°C.) de águas de poços perfurados em Almirante Tamandaré, obtidos através do programa PHPREEQE C1.

Data	Poço	Calcita	Aragonita	Dolomita	Quartzo
14/03/1998	bp04	-1,54	-1,69	-3,07	0,09
23/07/2001	sp09	-0,62	-0,77	-0,69	0,46
23/07/2001	tp20	-0,25	-0,40	-0,20	0,02
23/07/2002	tp12	-0,24	-0,39	-0,45	0,27
23/07/2001	tp17	-0,23	-0,38	-0,46	0,22
23/07/2001	sp17	-0,20	-0,35	-0,10	0,41
23/07/2001	tp01	-0,20	-0,35	-0,26	0,42
23/07/2001	sp20	-0,16	-0,31	-0,15	0,42
18/03/1998	tp04	-0,12	-0,27	-0,21	0,25
23/07/2001	tp05	-0,10	-0,25	-0,10	0,26
08/08/1998	bp05	0,11	-0,03	0,26	-0,05

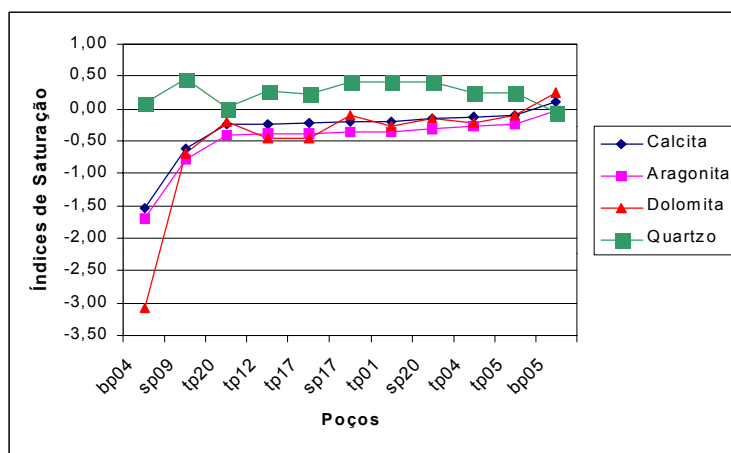


Figura 9. Índices de saturação das águas de 12 poços tubulares em Almirante Tamandaré em relação à Calcita, Aragonita, Dolomita e Quartzo (Tabela 5).

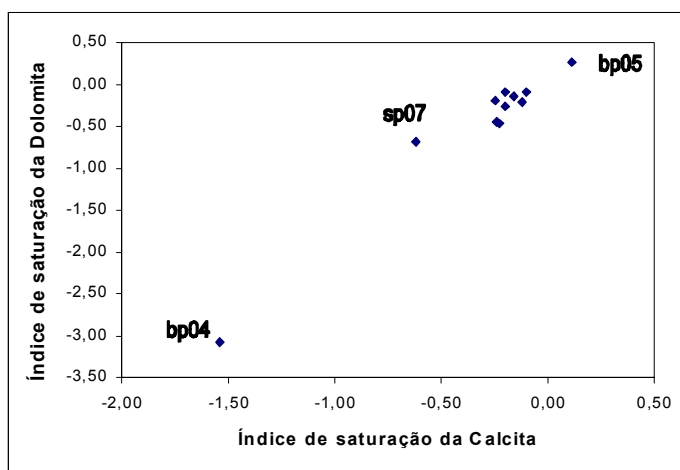


Figura 10. Índices de saturação das águas de 12 poços tubulares em Almirante Tamandaré em relação à Calcita e Dolomita. Os poços bp04, bp05 e sp07 estão em destaque (Tabela 5).

Pode-se dizer que águas mais insaturadas tendem a ser mais vulneráveis a contaminações, não por sua relação com a mineralogia e sim pelas evidências de veiculação de água infiltrada há menos tempo. É o caso do poço bp05. Este aspecto, todavia, não pode ser generalizado, pois uma pequena quantidade de água superficial contaminada pode comprometer um grande volume de água em boas condições.

Com base em equações de equilíbrio entre minerais [42] elaboradas a partir de dados termodinâmicos de dissolução de minerais apresentados por Gac [43] e Fritz [44] foram construídos diagramas de atividade ou de Khorzinskii. Estes diagramas (Figuras.11 e 12), salientam o equilíbrio das águas do aquífero com espécies silicatadas, aluminosas e aluminossilicatadas presentes nas rochas. Fica evidenciado que o tipo geoquímico de alteração dominante no sistema de circulação de água, desde a recarga até a captação, é a monossilitização. Isto é demonstrado pela situação dos pontos representando as águas no campo da caulinita. Na figura 11, a proximidade dos pontos com os campos do microclínio e muscovita, reflete influência de minerais potássicos presentes na fração silicosa dos metacarbonatos e nos filitos. Na figura representando espécies minerais sódicas (figura 12), fica caracterizado que estas espécies minerais não têm papel relevante no controle deste elemento nas águas. Ambos os diagramas também mostram a insaturação em relação ao quartzo para uma amostra (bp05) e duas amostras (bp04 e tp20) praticamente nas condições de equilíbrio com aquele mineral. Há que ser considerado que, nestes tipos de diagramas, em especial quando se trata de minerais muitas vezes não perfeitamente cristalizados, a transição entre um mineral e outro é uma banda levemente difusa, ao invés de uma linha perfeitamente estabelecida.

Diagrama equivalente aos anteriores, porém referenciado a espécies cálcicas, não é apresentado pelo fato do controle dos teores daquele metal alcalino terroso nas águas, ser exercido antes pelos carbonatos do que pelos silicatos.

As observações sobre o quimismo das águas de Almirante Tamandaré, feitas neste documento, são bastante preliminares e envolvem poucos cálculos de equilíbrios entre minerais e rochas, que permitirão, inclusive tecer considerações sobre tempos de residência das águas nos aquíferos. Este tipo de tratamento deverá ser procedido na seqüência dos trabalhos. Uma deficiência nos dados disponíveis é a ausência de temperaturas das amostras determinadas quando da coleta. Este fato impede estudos mais detalhados de equilíbrios entre rocha e água.

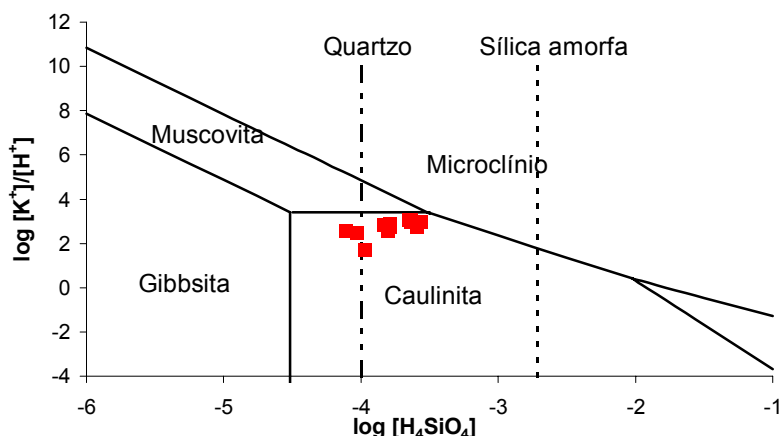


Figura 11 - Diagrama de Kozinskii onde estão representadas das águas de 12 poços tubulares em Almirante Tamandaré, com relação ao sistema Si – Al – K . Os dados, referidos à temperatura de 25°C correspondem aos poços constantes da tabela 5.

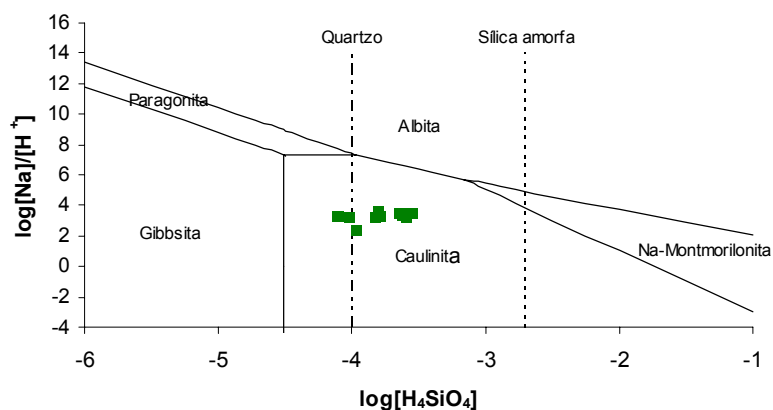


Figura 12 - Diagrama de Kozinskii onde estão representadas das águas de 12 poços tubulares em Almirante Tamandaré, com relação ao sistema Si – Al – Na. Os dados, referidos à temperatura de 25°C correspondem aos poços constantes da tabela 5.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- Os dados existentes sobre a qualidade das águas superficiais são bastante precários, por estarem sendo obtidos apenas em uma única estação (AI 57) e também incompletos em termos de parâmetros e distribuição no tempo.
- O quimismo das águas comprova que os sistemas hidrogeológicos de Almirante Tamandaré, Sede e Tranqueira são muito diferentes.
- Principalmente no caso dos poços de Tranqueira, ocorrem situações que evidenciam diferenças nos padrões de circulação de água em muitos dos poços. Este aspecto ressalta a importância de monitoramento individual dos poços
- A contaminação de vários poços por coliformes atesta a fragilidade dos sistemas de captação e/ou do aquífero. Existem indícios de contaminação em águas subterrâneas “in naturas” coletadas tanto em Almirante Tamandaré Sede como em Tranqueira.
- Recomenda-se a execução anual de um mínimo de duas campanhas regulares de medições “in situ” de parâmetros físico-químicos abrangendo todos os poços produtivos da região, além de coleta de amostras para análise laboratorial. Cada campanha deverá ser completada sob as mesmas condições de tempo, preferencialmente em um único dia. Deste modo variações devidas a fatores temporais serão minimizadas e comparações entre os pontos de coleta de uma campanha serão otimizadas.
- As análises deverão ser, preferencialmente, realizadas em um mesmo laboratório. Se isto não for possível, um programa constantemente aferido de homogeneidade de procedimentos entre os laboratórios envolvidos deverá ser mantido.
- Recomenda-se que as análises semestrais abranjam além dos parâmetros bacteriológicos, a análise de todos os íons importantes, da sílica e dos metais pesados.
- Os metais pesados deverão ser determinados com precisão de frações de micrograma /L.
- As análises “in situ”, deverão contemplar minimamente os seguintes parâmetros: Temperatura da água e Temperatura ambiente; pH; Oxigênio Dissolvido; condutividade. Se for viável nas condições específicas, a alcalinidade também deveria ser medida no campo.
- Como na sede de Almirante Tamandaré a ocupação antrópica está consolidada, mesmo com o funcionamento de um sistema de coleta de esgotos, o aquífero cárstico ficará química e bacteriológicamente cada vez mais fragilizado. Este aspecto induz a que se busque outras captações em compartimentos menos ocupados e onde for possível um rígido controle da ocupação.
- Em sítios urbanos menos consolidados, como é o caso de Tranqueira, deverá haver uma urgente implantação de rede de coleta de esgotos sanitários e um plano para diminuir ou,

se possível eliminar por desapropriação ou mesmo acordos com proprietários, a ocupação urbana nas vizinhanças das captações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] BONACIN, E. A. **Dinâmica do sistema hidrogeológico cárstico na área de Tranqueira – Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba, 1996, 162 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) - Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- [02] LISBOA, A. A. **Proposta de metodologia para avaliação hidrogeológica do aquífero cárstico, Compartimento São Miguel**. Curitiba, 1997. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- [03] HINDI, E. C.; ROSA FILHO, E. F. Interferência en el caudal de fuentes por explotación de acuífero cárstico. In: TINEO, A. **Hidrologia subterránea**. Série Correlación Geológica nº 13. Santa Fe: Instituto Superior de Correlación Geológica – CONICET, 1999, p.473-479.
- [04] GUIMARÃES, S. B. **Os metadolomitos da região de Morro Azul - PR: características geológicas do minério explorado**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória) - Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. (2001)
- [05] RATTON, E.; NADAL, C. A.; GIUSTI, D. A.; ROSA FILHO, E. F.; BITTENCOURT, A. V. L.; JULIANO, K. A. Um caso de subsidência do terreno devido à exploração de aquífero cárstico na Região Metropolitana de Curitiba. In: SEMINÁRIO LUSO-BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL , 1995, **Anais...** Lisboa, 1995. v.1.p. 15-25.
- [06] NADAL, C. A.; RATTON, E.; ROSA FILHO, E. F.; GIUSTI, D. A.; BITTENCOURT, A. V. L.; JULIANO, K. A. Monitoramento de subsidências do terreno, devido à exploração de aquífero cárstico. In: Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 9. **Anais...** Curitiba: ABAS, 1995, p.83-90.
- [07] BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Contribuição à geologia da região sul da série Açungui (Estado do Paraná). **Boletim Paulista de Geografia**. São paulo, n. 29. p. 3-19, 1958b.
- [08] DERBY, O. A. A geologia da região diamantífera da Província do Paraná. **Archivos do Museu Nacional**. Rio de Janeiro, v. 3, p. 89-98, 1878.
- [09] OLIVEIRA, E. P. **Mapa Geológico do Estado do Paraná (1:1.000.000)**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico e Mineralógico, 1925

- [10] CARVALHO, P. F.; PINTO, E. A. Reconhecimento geológico na série Assunguy. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico**. Rio de Janeiro, n. 71, 1937
- [11] MAACK, R. Breves notícias sobre a geologia dos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Curitiba, v. II, p. 63-154, 1947.
- [12] BIGARELLA, J. J. Estudos preliminares na Série Açungui II – Rochas calcáreas. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Curitiba, v. III, p. 201-354, 1948.
- [13] BIGARELLA, J. J. Estudos preliminares na Série Açungui III – Rochas calcáreas da faixa central e sua classificação. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Curitiba, v. VIII, p. 473-502, 1953.
- [14] BIGARELLA, J. J. Contribuição ao estudo dos calcáreos no Estado do Paraná. **Boletim do Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas**. Curitiba, n. 37, p. 1-79, 1956.
- [15] BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Estudos preliminares na Série Açungui VII – Estruturas singenéticas nos dolomitos da formação Capiru (PR). **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Curitiba, v. XI, p. 197-205, 1956.
- [16] BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. Estudos preliminares na Série Açungui VIII – A Formação Votuverava. **Boletim do Instituto de História Natural**, Curitiba, v.2, p.1-6, 1958a.
- [17] BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. **Planta geológica provisória de partes dos municípios de Rio Branco do Sul, Bocaiúva do Sul, Almirante Tamandaré e Colombo**. Curitiba: UFPR/Instituto de Geologia, 1959.
- [18] 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.
- [19] MARINI, O.J. **Geologia da Folha de Rio Branco do Sul – PR**. Rio Claro, 1970, 190 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Universidade Estadual de São Paulo.
- [20] FUCK, R.A. MARINI, O.J; TREIN, E; MURATORI, A. – 1971 – Geologia do leste paranaense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBG, 1971, p. 122-130.
- [21] FAIRCHILD, T. R. Conophyton of other columnar stromatolites from the upper precambrian Açungui group near Itapeva, SP, Brazil. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA 1, 1977, São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBG, 1977, p. 179-198
- [22] FRITZONS Jr, O.; PERKARZ, G. F.; FALCADE, D. Geologia e potencial econômico do Grupo Setuva (PR). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1982, Salvador. **Anais...** Salvador: SBG, 1982, v.1, p. 987-1001.

- [23] SOARES, P.C. Seqüências tectono-sedimentares e tectônica deformadora no centro-oeste do Escudo Paranaense In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, 1987, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG, 1987, v.2, p.743-771.
- [24] DIAS, M. V. F.; SALAZAR Jr, O., Geologia da Seqüência Antinha – Grupo Açungui, PR. In: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, 1987, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG, 1987, v.1, p.263-279.
- [25] FASSBINDER, E. **A unidade Água Clara no contexto do Grupo Açungui: um modelo transpressivo de colisão oblíqua no neoproterozóico paranaense**. São Paulo, 1996, 207 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
- [26] FIORI, A.P. **Tectônica e estratigrafia do Grupo Açungui a norte de Curitiba**. São Paulo, 1990, 261 f. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo
- [27] 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
- [28] FIORI, A. P. Evolução geológica da bacia do Açungui. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, n. 42, p. 7-27, 1994.
- [29] EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná**. Curitiba: EMBRAPA-SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984.
- [30] EMATER - Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Estudo do quadro Natural do “Karst”**. Curitiba, 1997.
- [31] VAINE, J. L., Caracterização hidrológica da área do Projeto Karst. In: **Projeto Karst-Progress Report**. Curitiba : Suderhsa/Sanepar/Comec/IJR/UFPR, 1998.
- [32] HINDI, E. C. **Caracterização Hidroquímica e Hidrogeológica das fontes cársticas das bacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças – Colombo, PR**. Curitiba, 1999, 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Departamento de Geologia, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- [33] APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of waste waters**, 19. New York : APHA, 1995.
- [35] BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986. s.e. Diário Oficial da União da República Federativa do Brasil, Brasília, 1986.

- [36] GEA – Geologia Ambiental Ltda. **Projeto PROSAM/PEB-07 - Relatório Final**. Curitiba: 1998. (Companhia de Saneamento do Paraná. Projeto Concluído. Áreas: Fervida e Botiatuva).
- [37] BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 1469 de 29 de dezembro de 2000. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial da União**, 02/jan/2001, Seção 1, p. 19-23.
- [38] FRITZSONS, E.; RIZZI, N. E.; BITTENCOURT, A. V. L.; MANTOVANI, L. E. Uso da terra e contaminação por nitrogênio numa bacia hidrográfica cárstica. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba: UFPR, n.48, p.27-33, 2000
- [40] LLOYD, J.W.; HEATHCOTE, J. A. Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An Introduction. Clarendon Press – Oxford, 1985.
- [39]. MAACK, R. E SPITZNER, R. Estudo contributivo ao conhecimento de algumas águas minerais do Estado do Paraná. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Vol.1 Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas – Secretaria de Agricultura, Indústria e Comércio – Curitiba, 1946.
- [41] PARKHURST, D. e APPELO, C. A. J. **A Computer program for speciation batch-reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations**. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 99-4259. Denver Colorado, 1999.
- [42] BITTENCOURT, A.V. L. Sobre o controle do quimismo de águas termais da Bacia do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba: UFPR n.44, p.117-129, 1996.
- [43] GAC, J.Y. **Géochimie du bassin du lac Tchad. Bilan de l'altération, de érosion et de la sédimentation**. Thèse Sci. Strasbourg, 194 p. 1979.
- [44] FRITZ, B. Étude thermodynamique et modélisation des réactions hydrothermales et diagénétiques. Mém. 65 **Sciences Géologiques**. CNRS. Inst. de Géologie Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, França. 206 p., 1981