

CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO AQUÍFERO CÁRSTICO EM COLOMBO (PR) E IMPACTOS AMBIENTAIS RESULTANTES DA SUA EXPLOTAÇÃO

Eduardo Chemas Hindi¹; Ernani Francisco da Rosa Filho¹; Leandson Roberto F. de Lucena²; André Virmond Lima Bittencourt¹; Luíz Eduardo Mantovani¹; Jorge Montaña Xavier³; Carlos Aurélio Nadal¹ & Donizetti Antônio Giusti¹

Resumo O sistema aquífero cárstico situado ao norte de Curitiba (PR), constitui um manancial de grande valor estratégico desse aquífero, tanto pela quantidade e qualidade das águas, quanto pela proximidade em relação aos centros consumidores. Esse reservatório subterrâneo, conhecido localmente como “Aquífero Karst”, é constituído pelas rochas metacarbonáticas da Formação Capiru, do Grupo Açungui. A exploração do sistema aquífero cárstico através de 11 poços situados nas bacias dos rios Fervida e Tumiri (zonas urbana e rural do município de Colombo-PR), produziram em alguns pontos, subsidências e colapsos de terreno que causaram graves avarias em várias de residências, depressões e rachaduras nas vias que cortam essa região e o secamento ou diminuição de vazão de fontes naturais e de rios, cujas águas são utilizadas para abastecimento doméstico, agricultura e criação de animais. Esses impactos negativos geraram forte pressão popular levando à interrupção do bombeamento dos poços em diversas ocasiões. O objetivo deste trabalho é apresentar as características hidrogeológicas do aquífero e os impactos sócio-ambientais ocorridos e indicar alternativas para a exploração sustentável do aquífero cárstico na região de Colombo.

Abstract Karstic springs are important sources of water for domestic and irrigation supplies in the rural and urban area of Colombo, Paraná State, Brazil. The karstic aquifer in this area consist in homogeneous dolomitic marble from Capiru Formation (Açungui Group), interbedded with phillites and cut by diabase dikes, forming a reticulate framework. The exploitation of groundwater through tubular wells drilled in the neighborhood of those springs for the water supplying of Colombo and part of the city of Curitiba, has caused social and environmental impacts such as, ground collapses and drying or decreasing of spring flows and damages to houses. The main goals of the current paper are to present the aquifer hydrogeological characteristics and the social and environmental

¹ Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da Universidade Federal do Paraná (hindi@geologia.ufpr.br)

Departamento de Geologia – Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico – Jardim das Américas – 81531-990 Curitiba - PR

² Doutorando em Geologia Ambiental. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná

³ Universidad de la Republica Oriental del Uruguay – Montevideo – Uruguay (montanox@movinet.com.uy)

impacts caused by the aquifer exploitation. The vulnerability and the sustainable way to use the water stored in the aquifer resources are also considered in this paper.

Palavras-chave: aquífero cárstico, impacto ambiental, fontes

INTRODUÇÃO

Desde os primeiros estudos para exploração dos recursos hídricos do sistema aquífero cárstico situado ao norte de Curitiba (PR), realizados na década de 70, ficou caracterizado o grande valor estratégico desse aquífero, tanto pela quantidade e qualidade das águas, quanto pela proximidade em relação aos centros consumidores. Esse reservatório subterrâneo, conhecido localmente como “Aquífero Karst”, é constituído pelas rochas metacarbonáticas da Formação Capiru, do Grupo Açungui. Apesar dos estudos realizados na região do carste no Estado do Paraná, por Souza et al., [1]; Bonacin [2]; SANEPAR [3]; Lisboa [4]; GEA [5]; SUDERHSA-SANEPAR-UFPR-JR [6]; HINDI [7], ainda pouco se sabe sobre as características hidrodinâmicas do sistema aquífero cárstico, de modo que sua exploração possa ser conduzida de forma sustentável e sem gerar efeitos indesejáveis.

Esse sistema aquífero vem sendo explotado, através de cerca 100 poços perfurados pela SANEPAR - Companhia de Saneamento do Estado do Paraná, servindo como fonte única ou complementar para o abastecimento público de cidades da Região Metropolitana de Curitiba (RMC), conforme mostra a tabela 1.

Tabela 1. Consumo de água superficial e subterrânea por alguns municípios da RMC.

Município	Total (m ³ /mês)	Água Superficial		Aquífero Carste	
		m ³ /mês	%	m ³ /mês	%
Almirante Tamandaré	513.862	0	0	513.862	100
Bocaiúva do Sul	84.023	0	0	84.023	100
Campo Magro	15.401	1.468	9,5	13.933	90,5
Colombo	1.188.691	322.704	27	865.987	73
Itaperuçu	64.674	24.878	38,5	39.796	61,5
Campo Largo	393.616	326.366	83	67.250	17

Fonte: SANEPAR [8]

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, pode causar 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. No Brasil, podem ser citados os acidentes ambientais em áreas de carste, os ocorridos nas cidades de Cajamar-SP [9]; Sete Lagoas-MG [10]; Almirante Tamandaré-PR [11]; [12] e Colombo-PR [7].

A exploração do sistema aquífero cárstico através de 11 poços situados nas bacias dos rios Fervida e Tumiri (zonas urbana e rural do município de Colombo-PR), produziram em alguns pontos, subsidências e colapsos de terreno que causaram graves avarias em várias de residências, depressões e rachaduras nas vias que cortam essa região e o secamento ou diminuição de vazão de fontes naturais e de rios, cujas águas são utilizadas para abastecimento doméstico, agricultura e criação de animais [7]. Esses impactos negativos geraram forte pressão popular levando à interrupção do bombeamento dos poços em diversas ocasiões.

O objetivo deste trabalho é apresentar os impactos sócio-ambientais ocorridos e indicar alternativas para a exploração sustentável do aquífero cárstico na RMC.

SISTEMA AQUÍFERO CÁRSTICO

Características Gerais da Área de Estudo

A área de estudo situa-se no município de Colombo, Região Metropolitana de Curitiba - RMC (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.

A atividade econômica do município está fundamentada na agricultura, mineração e industrialização de calcário. A população de Colombo passou de 19.258 em 1970 para 183.329 (população urbana: 174.962; população rural: 8.367), em 2000 [13]. Levantamento realizado pela EMATER [14], nas microbacias dos rios Tumiri, Fervida e Onças, mostra que nessa região existem 123 propriedades rurais com área média de 5 ha, utilizando mão-de-obra familiar como força de produção. O padrão das moradias rurais, principalmente as da região da Fervida mostra que o nível econômico dos agricultores da região é muito superior ao de outras áreas agrícolas minifundiárias do Brasil.

Os solos têm textura argilosas e 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 mármore [15]; [14].

A cobertura vegetal primária foi quase que totalmente substituída por culturas comerciais de ciclo curto (horticultura) e bracingais. Ao longo dos rios ocorrem espécies folhosas decíduas e semi-decíduas formando a mata ciliar. As áreas de várzeas são, geralmente, cobertas por gramíneas e arbustos de pequeno porte, tendo sido, muitas delas, drenadas para a prática de horticultura. [14].

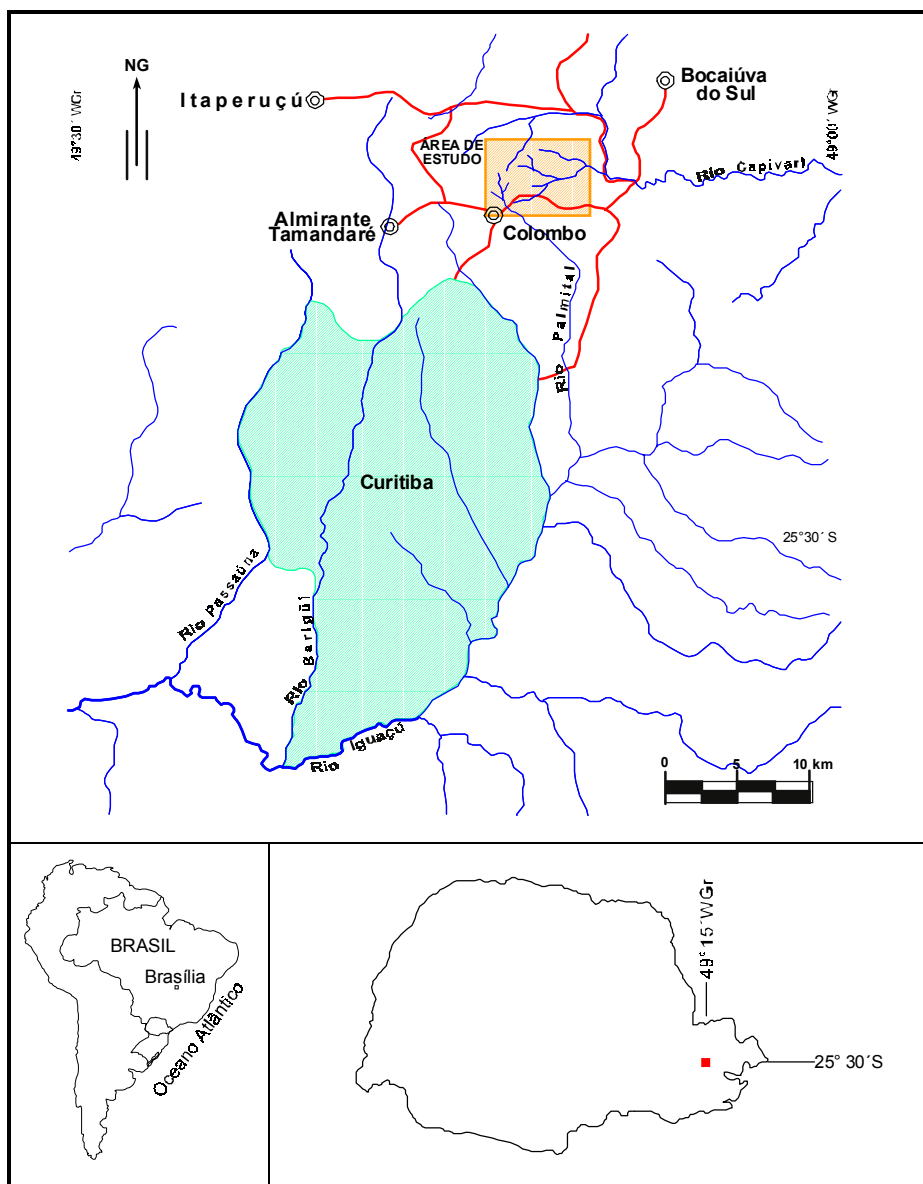


Figura 1. Localização da área de estudo.

Clima e Geomorfologia

O clima da região é classificado, segundo sistema de Koeppen, como 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) [16]. A temperatura média anual é 16,9 °C, com média máxima de 28,9°C e média mínima é 10,8 °C. A precipitação média anual na região estudada é de 1400 mm, com chuvas concentradas nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e os meses mais secos são junho, julho e agosto.

Bigarella e Salamuni [17] descreveram a morfologia típica do Grupo Açungui onde a paisagem reflete os fenômenos tectônicos regionais, com linhas de cristas dispostas predominantemente nas direções NE-SW, formadas por faixas de filito e quartzito e NW-SE, formadas por diques de diabásio. A ação erosiva em rochas de diferentes resistências, deu ao terreno uma feição reticular, com núcleo rebaixado, geralmente formado por rochas carbonáticas,

limitado pelas linhas de crista citadas. 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.

Características Geológicas

Os mármores dolomíticos da Formação Capiru (Grupo Açungui), constituem o arcabouço litológico do "Aqüífero Karst". As observações pioneiras sobre os mármores do grupo Açungui foram realizadas por Derby [18] e os primeiros estudos geológicos sistemáticos foram realizados por Oliveira [19] e Carvalho e Pinto [20]. A caracterização lito-estratigráfica preliminar do Grupo Açungui foi feita por Maack [21] e sequenciada por Bigarella [22], [23], [24] e Bigarella e Salamuni [17], [25], [26], [27]. A divisão do Grupo Açungui nas formações Setuva, Capiru e Votuverava foi proposta por Bigarella e Salamuni [17]. Estudos posteriores realizados por Marini et al., [28]; Marini [29]; Fuck et al. [30]; Batolla Jr et al., [31]; Fairchild [32]; Fritzens Jr. et al., [33]; Soares [34]; Dias e Salazar Jr [35]; Fiori [36], [37], [38] e Fassbinder [39], 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 [36], [37], [38], 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 [36], 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 afloramentos naturais de metadolomito são raros na área estudada. As frentes de lavra de mineração do metadolomito, situadas ao norte da área de estudo, constituem os melhores locais para estudos lito-estruturais. Nesses locais, a rocha apresenta coloração variando de branca a cinza claro, textura sacaróide, mostrando-se maciça em alguns locais e intensamente fraturada em outros. Em alguns desses cortes, pode-se observar o desenvolvimento de zonas carstificadas. O pacote de rochas metasedimentares encontra-se intrudido por inúmeros diques de diabásio, sub-paralelos, dispostos na direção NW-SE. Tais intrusões estão relacionadas ao reativamento da plataforma brasileira durante o Mesozóico e raramente ultrapassam 50 m de espessura no local.

Características Hidrogeológicas

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 e condutividade hidráulica. Nesse tipo de aquífero, o armazenamento e fluxo da água ocorre nos condutos formados pela circulação da água enriquecida em dióxido de carbono que dissolve a rocha carbonática ao longo das superfícies de fraturas e de acamamento. Como a distribuição das superfícies de fraturas e de acamamento é, em geral, aleatória, os aquíferos cársticos têm caráter heterogêneo e anisotrópico [40]; [41].

Os metadolomitos da Formação Capiru apresentam padrão de fraturamento com orientação principal N-W e secundária N-E [2]; [42]; [7]; [43]. 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 segundo Bonacin [2] e Hindi e Rosa Filho [42], indícios de que os processos de carstificação foram mais efetivos nessas direções.

Na área das bacias, as rochas carbonáticas 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, 17 m; máxima, 40 m e mínima, 3 m. A cobertura de material inconsolidado tem capacidade de infiltração variando de moderada a boa e constitui um aquífero livre com nível de água variando de dois a três metros de profundidade. Alguns poços cacimba têm águas com características físico-químicas semelhantes às das águas de fontes originárias do aquífero cárstico, indicando que em certos locais, o fluxo da água no aquífero cárstico é ascendente, alimentando o aquífero freático [7].

O principal processo de recarga do aquífero cárstico é por infiltração difusa (autogênica e alogênica) da precipitação atmosférica através do manto de intemperismo. O intervalo de tempo decorrido entre a precipitação e a variação do nível da água no aquífero é relativamente curto sendo, em média, de 45 dias na bacia do Fervida e de 75 dias na bacia do Tumiri [7].

O aquífero cárstico tem características de aquífero semi-confinado ou confinado. Em alguns locais apresenta propriedades artesianas com poços surgentes (poço P-08, na bacia do rio Tumiri). O fluxo subterrâneo é controlado por fatores climáticos e lito-estruturais, ressaltando-se as zonas carstificadas onde os canais de dissolução e cavidades formam os dutos para a passagem e armazenamento da água; e pelos diques de diabásio e camadas de filito, que agem como barreiras

subterrâneas interrompendo o fluxo subterrâneo. Se, nessas barreiras, a pressão hidráulica exercida pela água acumulada no aquífero, for suficiente para fazer a água ascender até a superfície, surgem as fontes naturais do aquífero cárstico. A relação entre as fontes e os diques é evidenciada pela presença de cristais de magnetita (produto do intemperismo das intrusivas básicas), nos fundos de lagos e córregos formados pelas fontes. As surgências naturais das bacias estudadas se assemelham ao tipo denominado "fonte de barragem", mostrado em Bryan [44], Tolman [45] e Ford e Williams [41], onde as águas subterrâneas represadas no contato do aquífero com rochas impermeáveis, ascendem até a superfície do terreno.

O potencial hídrico do aquífero cárstico nessa região é evidenciado pelo volume de água captado através dos poços ($Q \approx 650 \text{ m}^3/\text{h}$) e pela descarga das surgências naturais ($Q > 300 \text{ m}^3/\text{h}$). Parte do volume escoado pelas fontes poderia ser captado e aproveitado para abastecimento público, desde que fossem realizadas obras de proteção e regularização de descarga dessas fontes conforme mostrado em Sanz [46] e Mijatovic [47]. Esse tipo de aproveitamento das nascentes abre uma nova via para a solução de problemas de provisão de água nas regiões onde as condições geotécnicas são desfavoráveis.

Apesar do conhecimento do potencial hídrico armazenado, a incerteza, em relação ao volume de água que pode ser extraído sem que ocorram impactos ambientais e sociais é ainda um dos obstáculos à exploração do aquífero. Lisboa [4], adaptou o modelo morfológico de Bigarella e Salamuni [17], para propor o modelo conceitual do sistema aquífero cárstico no Estado do Paraná, como sendo uma seqüência justaposta de células tridimensionais, onde o reservatório subterrâneo é constituído por rochas carbonáticas carstificadas, limitadas por barreiras "impermeáveis" formadas pelos diques de diabásio na direção NW-SE e por camadas de filito e quartzito na direção NE-SW. Esse modelo compartimentado vem direcionando a política de gerenciamento de recursos hídricos, bem como, a estratégia de locação de poços tubulares profundos em toda área do carste paranaense. No entanto, a variação no tamanho dos compartimentos, a heterogeneidade e anisotropia do aquífero são fatores que aumentam a complexidade do aquífero, dificultando o cálculo da reserva explotável, dentro de parâmetros seguros e sustentáveis.

O procedimento básico para a seleção dos locais para perfuração de poços no carste paranaense tem sido a identificação de zonas carstificadas e, principalmente, a proximidade com surgências naturais do aquífero. A relação causal entre fontes e diques induziu a locação de poços nas proximidades de barreiras hidrogeológicas (diques) e, em certos casos, de barreiras múltiplas (interseções de diques com camadas mergulhantes de filito). De acordo com a teoria das imagens [48]; [49], esse procedimento ocasiona um sobreebaixamento do cone de depressão entre o poço e tais barreiras. Como nas áreas de ocorrência de fontes o fluxo da água é ascendente, supõe-se que a água contida no carste exerça uma força dirigida de baixo para cima, auxiliando no equilíbrio da

camada de solo sobrejacente. O sobrerbaixamento do nível da água no aquífero, seja por bombeamento excessivo ou pela proximidade de barreiras negativas, modifica o equilíbrio potenciométrico do aquífero, causando subsidência do terreno devido a diminuição da pressão neutra no solo ou, caso ocorra o carreamento de material de preenchimento das cavidades subterrâneas, colapsos de terreno. Além dos problemas geotécnicos causados pelo bombeamento dos poços, as interferências negativas na descarga das fontes afetam os agricultores que necessitam da água para irrigação, criação de animais e abastecimento doméstico. A longo prazo, tais interferências poderão causar danos irreparáveis ao ecossistema associado à rede de drenagem alimentada por uma determinada fonte. Um efeito ainda mais perigoso do bombeamento de poços, é a inversão de fluxo na fonte, que passa a ser uma canal de infiltração direta de água superficial para o aquífero sem que ocorra qualquer processo depurador [7]; [42].

Características Hidroquímicas

Os íons predominantes nas águas do aquífero cárstico nas bacias estudadas são Ca^{+2} , Mg^{+2} e HCO_3^{-2} , indicando águas do tipo bicarbonatadas-cálcio-magnesianas (figura 2). Quanto ao grau de dureza, variam de duras a muito duras. São águas insaturadas com relação à calcita ($-0,56 < \text{ISc} < -0,2$), podendo-se inferir daí que o tempo de trânsito da água através do aquífero foi insuficiente para se atingir o equilíbrio químico entre a água e tail mineral, levando a crer que essas águas tenderão a manifestar mais prontamente, a qualquer contaminação antrópica nas áreas de recarga.

Com relação a contaminantes antropogênicos, os poço P-04 da bacia do Tumiri e P-12 da Fervida, apresentaram teores de bactérias coliformes totais de 7,4 NMP e 121,1 NMP, respectivamente. Todas as amostras analisadas apresentaram coliformes fecais abaixo de 1,1 NMP. O poço P-12 (Fervida) apresentou teor de NO_3^- de 8,3 mg/l e 10,1 mg/l.

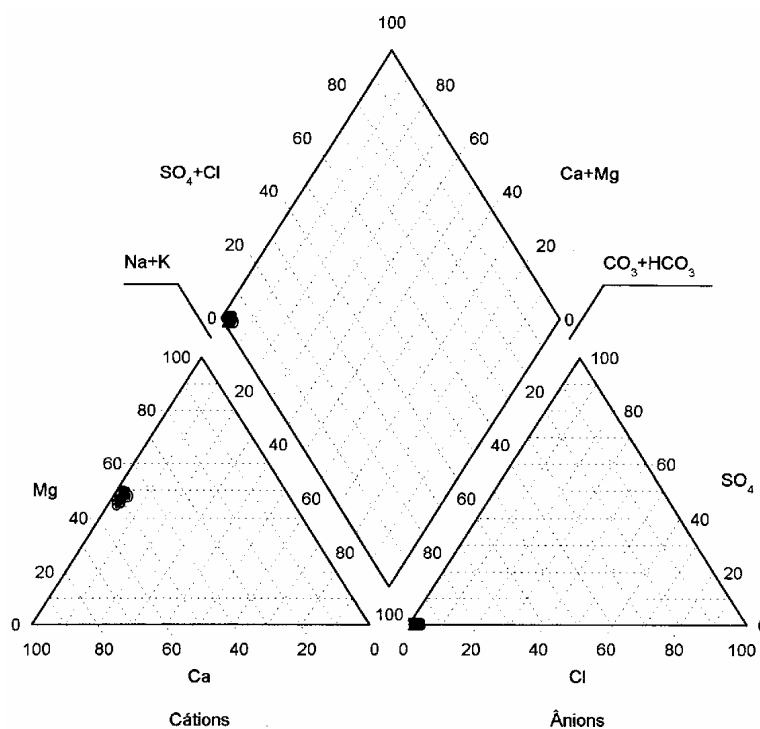


Figura 2. Diagrama de Piper de amostras de água do aquífero cárstico (Colombo-PR)

IMPACTOS AMBIENTAIS

A exploração do aquífero cárstico na região de Colombo-PR foi levada a efeito sem considerar as possibilidades de ocorrência de acidentes geotécnicos ou ambientais, apesar dos precedentes ocorridos em Almirante Tamandaré-PR, cidade vizinha situada a cerca de 12 km de Colombo.

Entre os anos de 1995 e 1998, foram registrados, Nas bacias dos rios Tumiri e Fervida, vários casos de subsidência e colapsos de terreno que causaram avarias em aproximadamente 20 residências e depressões e rachaduras nas estradas que atravessam a região. No entanto, o secamento de fontes e das drenagens alimentadas por elas configura o impacto de maior expressão, não só pelas consequências ambientais como também, econômicas, já que essas águas são utilizadas para irrigação e, em menor escala, para piscicultura.

As fontes cárticas dessas bacias são perenes e têm descarga pouco variável ao longo do tempo. A soma das vazões médias de 11 fontes monitoradas (34% das fontes cadastradas nas duas bacias), é de pouco mais de 290 m³/h. A bacia da Fervida é a que apresenta o maior número de fontes, estando aí a maior das fontes monitoradas com vazão média superior a 100 m³/h.

O bombeamento de poços interfere, em certos casos, na descarga natural das fontes situadas nas suas proximidades podendo, também, acelerar o rebaixamento do nível de água do aquífero freático sotoposto às rochas carbonáticas. As figuras 3A e 3B mostram, respectivamente, tais efeitos

em uma fonte freática e em um poço cacimba, situados nas proximidades dos poços P-8 e P-13 da bacia do Tumiri. Outras ocorrências semelhantes foram registradas, na mesma bacia, nas imediações do poço P-04. Embora exista uma relação entre esses fatos e o bombeamento dos poços, não se pode descartar os efeitos climáticos. No entanto, não existem dados sistemáticos que permitam correlacionar o nível de água no aquífero freático com a precipitação atmosférica nessas bacias.

O bombeamento do poço P-01 (Tumiri), provocou o secamento da fonte conhecida como “fonte do desembargador” e de uma outra situada na divisa da propriedade do Sr. Darci Poli (figuras 3C e 3D respectivamente). Essas nascentes davam origem ao rio Papanduvras que, em consequência disso, parou de escoar (figura 3E) afetando o abastecimento doméstico e a alimentação de um açude usado para piscicultura e irrigação (figura 3F). O rio Papanduvras secou até a confluência com o rio São João passando a escoar normalmente a partir desse ponto.

Durante o teste de bombeamento do poço P-17 (Fervida), verificou-se o carreamento de material de preenchimento de cavidades subterrâneas (figura 3G) e, posteriormente, o colapso das margens de um pequeno açude (figura 3f) situado a menos de 50 m do poço e o desvio do curso da drenagem que saía do lago.

O bombeamento do poço P-15 (Fervida), causou o secamento de uma fonte situada a cerca de 50 m do poço e inúmeros solapamentos de terreno estando um deles situado no leito do rio que passa pela propriedade do Sr. Luís Cavalli (figuras 3I, 3J, 3L e 3M).

O poço P-14 (Fervida) causou rachaduras e depressões na rua, além do secamento de uma fonte e o solapamento de terrenos e de pequenos lagos de piscicultura da propriedade dos Sr. Marco Correia, todos situados num raio inferior a 100 m. O colapso desses lagos deu origem a sumidouros por onde penetravam águas superficiais, comprometendo a qualidade da água subterrânea (figura 3N e 3O). Além dessas, poderiam ser citados ainda, o secamento da fonte situada na propriedade do Sr. Plínio Schmidt (Figura 3P) devido ao teste de bombeamento do poço P-06 e da nascente situada na drenagem que passa cerca de 100 m ao norte do poço P-10 (Fervida) que, em consequência disso teve o fluxo invertido passando a alimentar o aquífero.

A Figura 3Q mostra o aspecto normal de uma fonte “fervente” no município de Colombo. A região da Fervida é assim denominada pelo grande número de ocorrências de fontes desse tipo.



Figura 3A. Secamento de fontes do aquífero freático atribuído ao bombeamento do poço P-08 (Tumiri)



Figura 3B. Secamento de poço cacimba com 8 m de profundidade, atribuído ao bombeamento dos poços P-08 e P-08 (Tumiri)



Figura 3C. Secamento da fonte do "desembargador", atribuído ao bombeamento do poço P-01 (Tumiri)



Figura 3D. Secamento de fonte na propriedade do Sr. Darci Poli, atribuído ao bombeamento do poço P-01 (Tumiri)



Figura 3E. Secamento do rio Papanduvas na propriedade do Sr. Darci Poli, atribuído ao bombeamento do poço P-01 (Tumiri)



Figura 3D. Secamento de açude na propriedade do Sr. Darci Poli, atribuído ao bombeamento do poço P-01 (Tumiri)



Figura 3F. Carreamento de material de preenchimento de cavidades subterrâneas durante o teste do poço P-17 (Fervida)



Figura 3G. Colapso de açude (dolina), em conseqüência do bombeamento do P-17 (Fervida) visto no canto superior direito da foto.



Figura 3I. Secamento de fonte na propriedade do Sr. Luís Cavalli, atribuído ao bombeamento do poço P-15 (Fervida)



Figura 3J. Colapso de terreno com mais de 2 m de diâmetro na propriedade do Sr. Luís Cavalli, atribuído ao bombeamento do poço P-15 (Fervida)



Figura 3L. Processo inicial de colapso de terreno na propriedade do Sr. Luís Cavalli, atribuído ao bombeamento do poço P-15 (Fervida)



Figura 3M. Colapsos de terreno em leito de rio na propriedade do Sr. Luís Cavalli, atribuído ao bombeamento do poço P-15 (Fervida).



Figura 3N. Sumidouro causado pelo bombeamento do poço P-14 (Fervida)



Figura 3O. O mesmo sumidouro da Fig. 3N. Pode-se ver a drenagem superficial penetrando no aquífero.

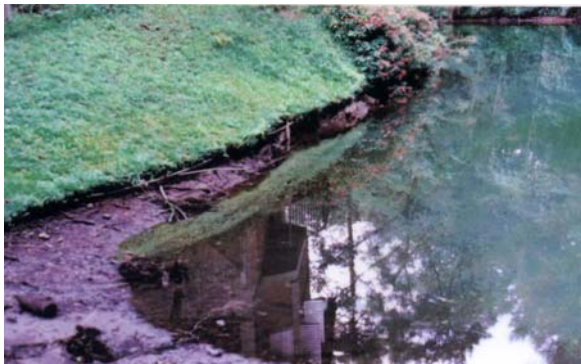


Figura 3P. Secamento de açude na propriedade do Sr. Plínio Schmidt atribuído ao bombeamento do poço P-06 (Fervida)



Figura 3Q. Aspecto normal de uma fonte "fervente", da região de Colombo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando a configuração reticular do aquífero cárstico, os maiores compartimentos e/ou aqueles onde as atividades antrópicas ainda estejam em estágio incipiente, deverão ser os alvos preferenciais para exploração do aquífero. Nesses compartimentos deverão ser desenvolvidos estudos hidrogeológicos detalhados com vistas à definição do volume explotável e do processo de recarga do aquífero.

A avaliação da reserva explotável deverá ser feita, para cada compartimento selecionado, pelo método do balanço hídrico, considerando todas as parcelas de entrada e saída do sistema e separando as componentes relativas aos aquíferos freático (manto de alteração) e cárstico.

A implantação de uma rede de monitoramento contínuo do nível de água no aquífero e da vazão das fontes e poços tubulares produzirá dados necessários para a estimativa das reservas reguladoras do aquífero cárstico, bem como, para avaliar a variações sazonais na descarga das fontes e a evolução de possíveis alterações nas condições naturais de fluxo dentro do aquífero, causadas pelo bombeamento do poço.

As medidas de velocidade de infiltração básica pelo método de "infiltrômetro de anel" para vários tipos de solo na região de Colombo-PR feitas por Santos e Bertol [50], apresentam valores entre 50 mm/h a 186 mm/h, onde os valores mais elevados correspondem aos solos sobrejacentes às rochas metacarbonáticas. Apesar do espesso manto de intemperismo que cobre o aquífero, essa elevada taxa de infiltração mostra que o aquífero é muito vulnerável. A elaboração de um mapa de vulnerabilidade por métodos adequados à escala e tipo de uso e ocupação de cada compartimento ajudará a minimizar os riscos de contaminação da água subterrânea e indicará as zonas onde se deverá manter um rigoroso controle sobre as atividades ali desenvolvidas.

O intervalo de tempo entre as precipitações pluviométricas e a variação do nível da água no aquífero é da ordem de 60 dias. Esse dado mostra 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.

Os métodos de locação de poços precisam ser revistos, para se evitar a construção de poços em locais que possam aumentar o risco de acidentes geotécnicos ou de impactos ambientais. Os trabalhos de locação poderiam ser apoiados por levantamentos geofísicos para a detecção de cavidades saturadas. Uma vez construído o poço, deverão ser estabelecidos os perímetros de proteção da captação nos moldes da Portaria n.º 231/98-DNPM [51].

As fontes naturais deverão ser objeto de estudo para avaliar a exequibilidade de obras de regularização e proteção, com vistas à captação desses mananciais para abastecimento público.

A prática atual para a determinação de parâmetros hidráulicos e da vazão de exploração de poços tem sido a realização e interpretação de ensaios de bombeamento pelos métodos convencionais (Theis, Cooper-Jacob, etc). No entanto, as condições naturais não seguem as condições de contorno impostas por esses métodos, para resolver a equação de fluxo da água em direção ao poço, o que torna o resultado impreciso e limitado às proximidades do ponto onde foi realizado, impossibilitando a extrapolação dos parâmetros hidráulicos determinados para outras áreas do aquífero, ainda que dentro do mesmo compartimento. A reserva explotável poderá ser determinada pelo balanço hídrico de cada compartimento hidrogeológico, considerando todas as parcelas de entrada e saída do sistema, separando as componentes relativas aos aquíferos freático (manto de alteração) e cárstico. Com o cálculo do volume que poderá ser extraído de cada compartimento, define-se a locação e o número de poços necessários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] SOUZA, E. L. C.; LISBOA, A. A. ; FONTANA M. A. **Relatório do projeto karst após execução da TP 001/92-DT.** Gerência de Hidrogeologia - Relatório Interno. Curitiba: SANEPAR, 1992.
- [02] 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.
- [03] SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. **Projeto "Caracterização hidrogeológica do aquífero Karst na região norte de Curitiba".** Curitiba: GEA, 1996.
- [04] 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.
- [05] GEA – Geologia Ambiental Ltda. **Projeto PROSAM/PEB-07 - Relatório Final.** Curitiba: 1998. (Companhia de Saneamento do Paraná. Projeto Concluído. Áreas: Fervida e Botiatuva).
- [06] SUDERHSA-SANEPAR-UFPR-JR. **Projeto Karst - Progress Report I e II.** Curitiba: Suderhsa/Sanepar/Comec/IJR/UFPR, 1998.
- [07] 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.
- [08] SANEPAR – Companhia Paranaense de Saneamento. Relatório de Produção (Relatório Interno). Curitiba: 2002.
- [09] NAKAZAWA, V. A., PRANDINI, F. L.; ÁVILA, I. G.; PONÇANO, W. L.; BRAGA, A. C. O.; BOTTURA, J. A.; SANTORO, E. Cajamar - carst e urbanização: investigação e monitoramento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5. 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1990. v.2 p.443-459.
- [10] SILVA, A. B. Abatimento de solo na cidade de Sete Lagoas, Minas Gerais. **Revista de Aguas Subterrâneas**, São Paulo, n.12, p.57-66, 1988.

- [11] 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.
- [12] 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.
- [14] EMATER - Empresa Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural. **Estudo do quadro Natural do “Karst”**. Curitiba, 1997.
- [15] 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.
- [16] MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. 2., Rio de Janeiro : José Olímpio, 1981.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] OLIVEIRA, E. P. **Mapa Geológico do Estado do Paraná (1:1.000.000)**. Rio de Janeiro: Serviço Geológico e Mineralógico, 1925
- [20] CARVALHO, P. F.; PINTO, E. A. Reconhecimento geológico na série Assunguy. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico**. Rio de Janeiro, n. 71, 1937
- [21] 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.
- [22] BIGARELLA, J. J. Estudos preliminares na Série Açungui II – Rochas calcáreas. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**. Curitiba, v. III, p. 201-354, 1948.
- [23] 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.
- [24] 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.

- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] BIGARELLA, J. J.; SALAMUNI, R. **Planta geológica provisória de partes dos municípios de Rio Branco do Sul, Bocaíuva do Sul, Almirante Tamandaré e Colombo**. Curitiba: UFPR/Instituto de Geologia, 1959.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] BATOLLA Jr., F.; CARVALHO, M.A S.; COLANERI, S.; AGUIAR NETO, A. Geologia. In. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Projeto Leste do Paraná. Folha Curitiba-SG-22-X-D-1. **Relatório Final-Geologia-Anexos I e II**. São Paulo. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1977, p.53-164.
- [32] 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
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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
- [37] 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

- [38] FIORI, A. P. Evolução geológica da bacia do Açungui. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba, n. 42, p. 7-27, 1994.
- [39] 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
- [40] LEGRAND, H. E.; LAMOREAUX, P. E. Hydrogeology and hydrology of karst. In: BURGER A.; DUBERTRET, L. **Hydrogeology of karstic terrains**, (Ed.), Paris:IAH, 1975.
- [41] FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hidrology**. London: Chapman-Hall, 1991.
- [42] 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 n° 13. Santa Fe: Instituto Superior de Correlación Geológica – CONICET, 1999, p.473-479.
- [43] GUIMARÃES, S. B. **Os metadolomitos da região de Morro Azul - PR: características geológicas do minério explotado**. Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória) - Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. (2001)
- [44] BRYAN, K. Classification of springs. **Journal of Geology**. Chicago, v.27, p.522-561, 1919.
- [45] TOLMAN, C. F. **Ground Water**. New York: McGrawHill, 1937.
- [46] 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.
- [47] MIJATOVIC, B. F., Exploitation rationnelle des eaux karstiques. In: BURGER, A.; DUBERTRET, L. (Ed.), **Hydrogeology of Karstic Terrains**.. Paris : IAH, 1975.
- [48] WALTON, W. **Groundwater resource evaluation**. New York: Mcgraw-Hill, 1970.
- [49] CUSTÓDIO, E.; GALOFRÉ, A. Hidráulica de captaciones de agua subterránea. In: CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterránea**. Barcelona: Omega, 1983.
- [50] SANTOS L. M. F.; BERTOL, O. J. **Estudo da infiltrabilidade e da disponibilidade de água dos principais solos do Karst - Paraná**. inédito (sem data)
- [51] BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral-DNPM. Portaria N° 231 de 31 de julho de 1998. Estabelece as ações e procedimentos necessários à definição de áreas de proteção das fontes, balneários e estâncias de de águas minerais e de mesa em todo território nacional. **Diário Oficial da União**, 07/ago/1998, n. 150, Seção 1, p. 103.