

A APLICAÇÃO DO SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS NOS ESTUDOS DE PROTEÇÃO DE AQUÍFEROS E FONTES DE ÁGUA MINERAL

Sueli Yoshinaga Pereira¹ & Julio Cesar Portugal Valente²

Resumo - Este artigo visou apresentar estudos de proteção de aquíferos e de fontes de água mineral utilizando o Sistema de Informações Geográficas, no município de Magé, Rio de Janeiro. A área situa-se no contato entre a planície aluvionar do rio Piabetá, situada na cota altimétrica de 20 metros, e a Serra dos Órgãos, entre 320 e 350 metros. Apresenta alta taxa de precipitação anual (2569,7 mm) e nenhum déficit hídrico. O aquífero explorado é o fissural composto pelo Complexo Migmatítico. Estudos hidrológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, geológicos, geomorfológicos foram integrados, produzindo mapas de vulnerabilidade dos aquíferos e de zonas de contribuição, influência e trânsito de poços ali situados.

Palavras-chave - água mineral; proteção de fontes; Sistema de Informação Geográficas

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O presente trabalho visa apresentar uma aplicação do Sistema de Informações Geográficas em hidrogeologia, principalmente nos estudos de proteção de aquíferos e definição de áreas de proteção de poços e fontes de água subterrânea.

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) mostra-se uma ferramenta de importância pois pode-se construir e trabalhar conjuntamente o banco de dados, imagens de satélites e cartas georreferenciadas. Esse recurso é altamente viável para estudos regionais, como locais, principalmente onde há necessidade de promover e gerenciar

¹ Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas. Cidade Universitária Zeferino Vaz. CXP.: 6152, CEP – 13083-970. Campinas. São Paulo. Brasil. Telefone:+55 (021) 19 788 4698; Fax: +55 (021) 19 289 1562 E-mail: sueliyos@ige.unicamp.br

¹ Terra byte. Rua Cel. Tamarindo, 83, V. Yara. CEP 24466-520. São Gonçalo, Rio de Janeiro. Brasil. Telefone: +55 (021) 21 712 0818. E-mail: jcpv@qbl.com.br

recursos. Nesse caso o SIG foi aplicado nos estudos de proteção de aquíferos e, localmente, para os estudos de proteção das captações de água subterrânea.

A área de estudo localiza-se no município de Magé, Rio de Janeiro, nos terrenos da Empresa de Refrigerantes Pakera Ltda, dentro no megadomínio geomorfológico Serra dos Órgãos. Localmente, situa-se nos limites da extensa planície aluvial do rio Piabetá e dos terrenos escarpados da Serra dos Órgãos. Na parte leste da área situa-se a baixa ocupação urbana, desenvolvida nas planícies aluviais do rio Piabetá; à montante, apresenta mata nativa, onde a partir da cota de 100m é delimitada a APA de Petrópolis.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

a) **Caracterização Climática e Hidrológica** - A avaliação climática regional baseou-se no documento editado em 1978 pela Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ) intitulado “Indicadores Climáticos”. A nível local, buscaram-se informações da Estação Climática de Xerém, cuja série histórica de 30 anos (1931 a 1960) pôde fornecer parâmetros para o cálculo do balanço hídrico da área, como evapotranspiração potencial e real, deficiências hídricas e excedentes hídricos. O método do cálculo do Balanço Hídrico usado foi Thornthwaite & Mather (1955), por meio do software Balasc, do CEPAGRI – Instituto Agrônomo de Campinas e pela expressão clássica de balanço hídrico foi utilizada, onde se estimaram os percentuais de cada processo do ciclo hidrológico.

b) **Caracterização Hidrogeológica** – foi realizada com base nas informações dos relatórios dos poços da área de estudo, dos resultados do teste de aquífero realizado e dos condicionantes geológicos e climáticos. O Teste de Aquífero foi realizado nos dias 11 a 13 de novembro de 1999, com o bombeamento do poço 2 (Fonte Dois Irmãos) e monitoramento dos níveis de água dos poços 5 e Fonte Santana, situados a 26 e 53 metros, respectivamente. O método de interpretação do ensaio de bombeamento foi o Cooper-Jacob, utilizada com critérios, porém sem o uso da correção de rebaixamento de Dupuit-Jacob, para aquíferos livres em regime transitório, pois essa correção revelou-se desprezível. Nessa análise foram determinados os parâmetros hidrodinâmicos para cada direção (do poço 5 e em direção da fonte Santana).

c) **Caracterização Hidrogeoquímica e Qualidade das Águas** – foi executada por meio das análises dos exames físico-químicos e bacteriológicos das águas das Fontes Dois Irmãos e Santana. A amostragem das águas foi executada em 01/03/99 e a análise, a partir do dia 02/03/99. A análise hidrogeoquímica foi feita e as águas classificadas pelo Diagrama de Piper (diagrama triangular). A avaliação da potabilidade

das águas dos exames físico-químicos foi realizada em relação às leis vigentes (Portaria 36/90 e Resolução número 310 de 1999).

d) **Geoprocessamento das informações** Os dados pertinentes à análise foram convertidos em mapas no formato vetorial e posteriormente convertidos para o formato *raster* com tamanho de pixel de 2m (ou seja, cada porção do terreno é individualizada por células quadradas com 2 metros de aresta), a exceção do modelo digital de terreno que foi gerado com tamanho de pixel de 20 metros. Foram os seguintes os dados básicos convertidos em mapas:

Drenagem – Obtida da digitalização de mapa de drenagem da Folha Petrópolis - SF-23-Z-B-IV-2 / 1979, na escala 1: 50.000. o RMS (Erro Médio Quadrático) obtido no georreferenciamento foi de 2 metros e o produto final alcançou 3 metros de RMS.

Mapa Geológico – Obtido pelo mesmo processo, registrou os mesmos valores de RMS. Como fonte, foi utilizado o Mapa Geológico da Folha Petrópolis na escala de 1:50.000 de autoria do DRM 1979.

Modelo Digital de Terreno – Gerado a partir da Carta Topográfica na escala 1: 10.000 elaborado para o Programa de Despoluição da Baía de Guanabara. As curvas de nível foram transformadas em formato digital raster através de *scanner* de rolo e vetorizadas em programa de vetorização semi-automática no software Micro-Station. O arquivo de curvas de nível obtido (formato dgn) foi convertido para formato ASC-III estruturado em Coordenada E, N e altimetria no sistema de projeção UTM – Zona 23. Este arquivo de pontos foi interpolado pelo método de Krigagem ordinária no programa Surfer 6.0 e exportado para o programa ARC/View 3.0.

Mapa de Lineamentos – O mapa de lineamentos foi obtido no programa ARC/View através de vetorização manual em imagem de satélite Landsat TM5 nas bandas 3, 4 e 5 com realce através da Primeira Principal Componente – PC1.

e) **Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos** – o método de vulnerabilidade aplicado foi baseado na metodologia GOD, proposto por Foster & Hirata (1988) e adaptado para o uso em Sistema de Informações Geográficas, onde as áreas de maior potencial de vulnerabilidade são apresentadas por método de integração e fusão de dados.

f) **Áreas de Proteção de Fontes** – a definição das áreas de proteção de fontes envolveram a aplicação de alguns métodos sendo delimitadas seguindo a Portaria DNPM no. 231. As metodologias aplicadas que viabilizaram as delimitações dessas zonas foram:

o mapa de vulnerabilidade de aquíferos, o uso de mapeamento de fluxo de água subterrânea conjugado com a equação de fluxo uniforme em superfícies potenciométricas inclinadas e o método do Raio Fixo Calculado. Os estudos hidrogeológicos, a análise das condições de ocorrências das águas subterrâneas em dois aquíferos distintos e as condições fisiográficas da área subsidiaram os estudos para a definição dessas zonas.

3. RESULTADOS

a) **Caracterização Climática e Hidrológica.** De acordo com o FIDRJ (1978), o estado do Rio de Janeiro e conseqüentemente a região da folha Petrópolis, enquadra-se no Domínio Tropical, apresentando, em geral, pequena variabilidade das temperaturas médias anuais. A região do trabalho, baseando-se na distribuição espacial dos tipos climáticos (segundo Thornthwaite, 1955), situa-se no **Tipo Climático Superúmido-Úmido**, com pouco ou nenhum déficit de água, megatérmico de temperaturas elevadas, com calor bem distribuído o ano todo. Na classificação de **Koppen**, o clima da região se assemelha ao designado de **AW**, característico de **clima quente-úmido de estação chuvosa no verão**.

A área de estudo apresenta uma precipitação anual elevada, com total de 2569,7 mm e temperatura média anual de 21,2 °C. Os meses de maior ocorrência pluviométrica situam-se entre dezembro e março, com valores acima de 300 mm, culminando em dezembro, e os meses menos chuvosos abrangem os períodos de junho a agosto, com valores menores que 100 mm.

A temperatura média mensal varia durante o ano de 17,9 °C a 24,5 °C, onde o período mais quente são os meses de dezembro a março, e os mais frios, de junho a agosto.

Essas variações de temperatura e chuvas indicam uma sazonalidade marcada por dois períodos: chuvoso e menos chuvoso, e uma baixa variação de temperaturas no decorrer do ano.

Balanço Hídrico. O cálculo do Balanço Hídrico apresentou estimativas de Evapotranspiração Potencial Anual de 1020 mm e de Excedente Hídrico Anual, de 1550 mm. O cálculo mostrou que não há deficiência hídrica, sempre existindo excedentes. Esse excedente será escoado pelas drenagens superficiais e infiltrado no solo, recarregando o aquífero freático.

O Clima foi classificado como Superúmido, Mesotérmico.

A taxa de infiltração em subsolo foi estimada como sendo 22% do total precipitado. Esse valor percentual foi definido com base nas informações regionais de escoamento

básico em áreas similares no Estado de São Paulo (Serra da Mantiqueira e Litoral Norte, que possui as mesmas ordens de precipitação e fisiografia) (DAEE 1990).

O escoamento básico definido para a área portanto é de 565 mm. Essa taxa corresponde ao valor de água que é infiltrado em subsuperfície, alimentando o aquífero freático.

Assim, o Balanço Hídrico apresenta a seguinte equação e valores:

$$P - ETR - R - I = \delta S, \text{ onde } \delta S \text{ foi considerada desprezível em relação à ordem de grandeza dos demais valores.}$$

Assim, o escoamento médio anual é calculado em $R = 985$ mm e a equação fica então assim expressa:

$$P = ETR + R + I \quad \longrightarrow \quad 2570 \text{ (100\%)} = 1020 \text{ (40\%)} + 985 \text{ (38\%)} + 565 \text{ (22\%)}$$

Salienta-se que os resultados de balanço hídrico acima são estimativas e baseados em fórmulas empíricas, mas esses valores e ordem de grandezas poderão ser utilizados para o manejo e controle das exploração de poços na região de trabalho.

B) Hidrogeologia. A área de trabalho está inserida em dois aquíferos de significância:

O Aquífero Cristalino, principal corpo armazenador de água, fissural e de cunho regional, na área é composto pelo Complexo Migmatítico onde ocorrem as seguintes Unidades:

- **Unidade Bingen** onde predominam biotita, gnaisses graníticos e gnaisses porfiríticos (pelbg);
- **Unidade Santo Aleixo** com predominância de migmatitos com estrutura estromática dobrada (pelsa);
- **Granito Andorinha** classificado como um biotita granito, de grão médio, com tendência porfirítica, cor cinza azulada, formando corpos tabulares, diques e apófises (Grad).

Esse aquífero apresenta-se bastante estruturado, com sistemas de direção nordeste, norte-sul e noroeste (Reis 1998).

O Aquífero Aluvionar, de extensão restrita às planícies de inundação dos rios da região, apresenta-se composto por sedimentos inconsolidados, como areias grossas e imaturas, e argilas plásticas. Predominam na área as seguintes formações:

- **Formação Caceribú** com predomínio de areias feldspáticas grosseiras, estratificadas, selecionadas; arenitos grosseiros; com matriz caulínica; conglomerados ortoquartzíticos e blocos e seixos de petrografia variada.

- **Depósito de Várzea** composto por areias feldspáticas selecionadas e argilas sílticas orgânicas.

Os poços da área apresentaram, em relatórios anteriores, os valores de capacidade específica apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Informações sobre vazão, rebaixamento e capacidade específica dos poços da área de trabalho.

Fontes/Poços	Vazão (m ³ /h)	Rebaixamento (m)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)
Dois Irmãos	30,0	87,4	0,34
Santana	7,2	141,4	0,05
Poço 5	10,0	70,9	0,14

Fonte: Relatórios Técnicos Finais da GEOPLAN – Assessoria, Planejamento e Perfurações Ltda. 1998.

Os valores distintos de capacidade específica dos poços da área de trabalho revelam anisotropia e heterogeneidade, cujas diferenças detectadas são atribuídas às características de um aquífero fissural.

Os resultados do teste de aquífero e da configuração geológica da área de estudo indicam que o aquífero cristalino explotado pelos poços tubulares (Dois Irmãos e Santana) comporta-se como aquífero semi-livre, heterogêneo e anisotrópico.

Um esboço da situação dos poços na área está apresentado no Figura 1.

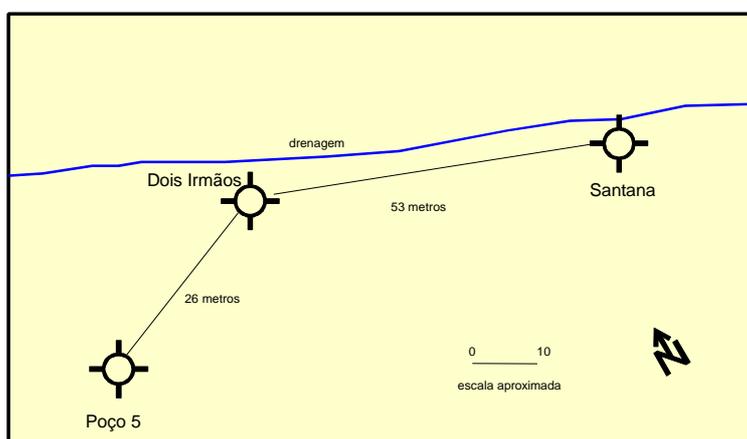


Figura 1 – Esboço de situação das Fontes e poços monitorados no Teste de Aquífero.

Os parâmetros hidrodinâmicos determinados são apresentados na tabela 2

armazenamento menores em seguida. A queda repentina de nível dinâmico no 16º segundo sugere o encontro de barreira hidráulica no aquífero, ou início da exploração do aquífero cristalino, aqui interpretado pelas rochas do Granito Andorinha. A transmissividade e coeficiente de armazenamento similares aos resultados medidos na Fonte Santana e Poço 5, induz a concluir que a transmissividade do aquífero cristalino a ser explorado é da ordem de $2,0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e o coeficiente de armazenamento, de $1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

C) Hidroquímica e Qualidade das Águas. As águas das fontes Santana e Dois Irmãos apresentam baixa mineralização, com teores de Resíduo de Evaporação por volta de 65 mg/l e Condutividade Elétrica ao redor de 100 $\mu\text{hos/cm}$. A presença de Gás Carbônico, 66,24 e 58,88 mg/l respectivamente, induz a uma água mais ácida (5,88 e 4,38), a presença de bicarbonatos e ausência de carbonatos. A ausência de amônio e baixa concentração de nitritos indica que não há aporte direto de águas subsuperficiais com matéria orgânica no aquífero explorado. As águas apresentam valores de Dureza Total e Permanente por volta de 34 mg/l CaCO_3 e ausências de Nitrogênio nas suas diferentes formas.

Pelos resultados das análises executadas pelo LAMIN (REIS 1998), notam-se as presenças significativas dos elementos menores Fluoretos nas águas (0,163 e 0,189 mg/l, respectivamente Fontes Santana e Dois Irmãos), Brometos (0,043 e 0,033 mg/l), Arsênio (0,01 e 0,01 mg/l), Bário (0,058 e 0,048 mg/l), Fosfatos (0,122 e 0,159 mg/l), Lítio (0,011 e 0,006 mg/l), Estrôncio (0,113 e 0,093 mg/l) e Zinco (0,002 e 0,006 mg/l).

No tocante aos cátions maiores, há presença do Cálcio em maior concentração (11,4 mg/l e 10,3 mg/l, Fontes Santana e Dois Irmãos, respectivamente) em relação aos demais, como Magnésio (1,35 e 1,22 mg/l), Sódio (7,72 e 7,60 mg/l) e Potássio (2,31 e 2,12 mg/l). Quanto aos ânions há a predominância do Bicarbonato (48,54 mg/l e 45,81 mg/l), seguido pelo Nitrato (4,99 e 4,16 mg/l), Sulfatos (4,19 e 3,85) e Cloretos (3,72 e 3,23 mg/l).

A presença significativa da radioatividade do gás Radônio-222, produto da desintegração do elemento Rádio-226, é explicada pela presença de minerais de alta solubilidade, ricos em elementos radioativos como os feldspatos e micas, por sua vez encontradas em rochas de composição granítica, como as encontradas na área de trabalho.

Em geral a composição química das águas das fontes avaliadas expressa as seguintes seqüências de concentrações de íons principais (em meq/l)

$$rCa > rNa > rMg > rK \text{ e } rHCO_3 > rCl = rNO_3 = rSO_4$$

No Diagrama de Piper (Figura 2) as águas são classificadas como Bicarbonatadas Cálcicas.

Essas características físico-químicas e composicionais das águas sob estudo são típicas de águas de rochas cristalinas, com baixo tempo de residência, em áreas com alta taxa de precipitação.

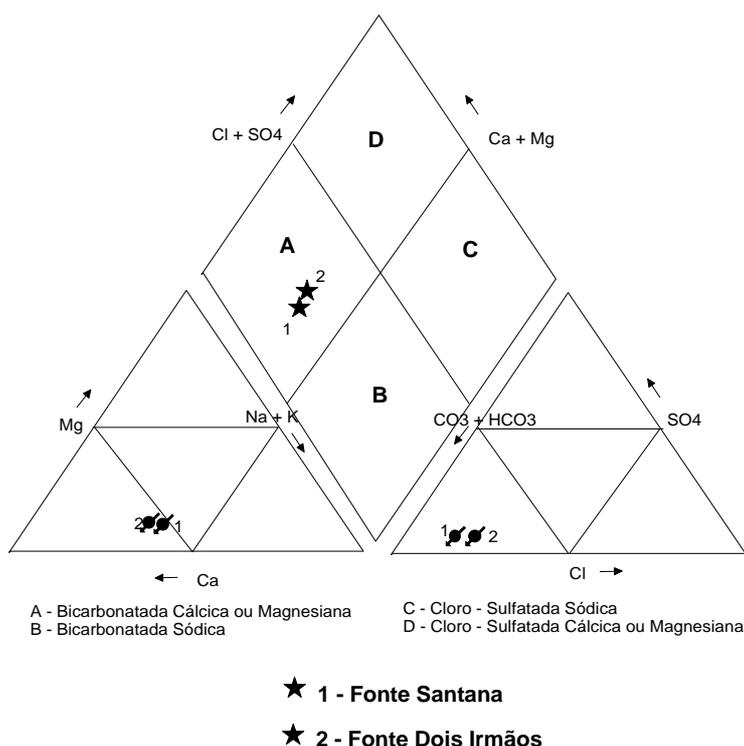


Figura 2 – Classificação das águas segundo o Diagrama de Piper

A análise da qualidade das águas das fontes sob avaliação foram baseadas nos resultados físico-químicos e bacteriológicos dos exames químicos da LAMIN/ CPRM, e da Portaria no. 36, de janeiro de 1990, do Ministério da Saúde, Resolução no.310 de 16 de julho de 1999, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Ministério da Saúde.

Os resultados indicam que as águas analisadas encontram-se dentro desses padrões físico-químicos e bacteriológicos exigidos.

D) Estudos de Proteção dos Aqüíferos e das Fontes

D.1. Vulnerabilidade de Aqüíferos. A classificação da vulnerabilidade dos aqüíferos da área de trabalho baseou-se na metodologia desenvolvida por Foster & Hirata (1988) denominada Metodologia GOD, porém adaptada para o uso em Sistema de

Informações Geográficas. Para a classificação da vulnerabilidade dos aquíferos na região de trabalho, utilizaram-se parâmetros que influenciavam na caracterização das condições de ocorrência dos aquíferos.

Na área de trabalho encontram-se dois tipos de aquíferos: o Cristalino, de porosidade fissural (secundária), principal sistema armazenador de água subterrânea, e o sedimentar, de porosidade primária (meio poroso), de grande extensão, situada às margens das grandes drenagens da região. Estes aquíferos foram delimitados por classificação do mapa geológico.

As fontes Santana e Dois Irmãos são captadas por poços tubulares profundos construídos na planície aluvial, e grande parte no embasamento cristalino.

Os poços tubulares apresentaram, no período de novembro de 1999, os níveis estáticos rasos, da ordem de dois metros (Tabela 3).

Tabela 3 – Níveis Estáticos dos Poços sob análise e informações relativas à profundidade do poço, espessura e características do aquífero

Fonte	Profundidade do poço (m)*	Nível Estático (m)	Espessura do Aquífero (m)*	Descrição do Aquífero*
Dois Irmãos	102	1,15	21,0	Solo arenoso, grosseiro
Santana	149	1,72	32,0	Solo arenoso, grosseiro
Poço 5	114	1,27	22,6	Sedimentos inconsolidados, argilas plásticas com intercalações de areia grossa

* Dados obtidos nos relatório de construção de poços da GEOPLAN – Assessoria, Planejamento e Perfurações LTDA.

A presença de nível estático sub-aflorante nos poços tubulares profundos, o material de cobertura de caráter inconsolidado e essencialmente arenoso definem as condições de aquífero livre a semi-livre do aquífero explorado. O nível de água sub-aflorante foi definido em toda área de ocorrência dos depósitos sedimentares.

D.1.1. Elaboração do Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos e dos Canais de Drenagem. Para a obtenção de um mapa que pudesse refletir a vulnerabilidade dos aquíferos, foram levados em conta os diferentes tipos de aquíferos e seu condicionamento com relação a declividade e os canais de drenagem. O mapa final resultou na combinação dos mapas de Vulnerabilidade dos Canais de Drenagem (Mapa 3) e Vulnerabilidade dos Aquíferos (Mapa 4).

Mapa de Vulnerabilidade dos Aqüíferos (Mapa 4). O Mapa de Vulnerabilidade dos Aqüíferos foi obtido através da combinação do Mapa de Potencial da Declividade (Mapa 1) e do Mapa de Potencial Geológico (Mapa 2).

Mapa de Potencial Geológico (Mapa 2). Este mapa foi gerado de forma a representar a maior susceptibilidade do substrato rochoso à percolação da água. A legenda geológica foi classificada de acordo com valores que pudessem representar sua capacidade como meio armazenador e de percolação da água.

Este mapa está representado pelas seguintes categorias:

Rochas sedimentares (Formação Caceribú e Depósitos de Várzea) – Alta

Granito (Andorinha) – Média

Gnaisses (Unidades Bingen e Santo Aleixo) – Baixa

A combinação dos mapas de Potencial Geológico com o de Declividade originou o Mapa de Vulnerabilidade do Aqüífero (Mapa 4). A combinação entre as diferentes classes dos dois mapas resultou em um novo mapa, onde o valor atribuído a cada área se somou, de forma que as áreas mais propensas a favorecer a contaminação do lençol freático obtiveram classificação de “Muito Alta” (aquelas com formação geológica altamente permeável e que se encontra em área de baixa declividade). Em caso oposto, as áreas situadas em formação geológica de rochas cristalinas gnáissicas pouco fraturadas e com alta declividade receberam classificação quanto a sua vulnerabilidade de “Desprezível”.

Mapa de Potencial da Declividade (Mapa 1). Tal mapa foi obtido a partir do modelo digital de terreno que foi classificado de forma a se obterem três categorias que simbolizassem a maior potencialidade de infiltração da água, através da relação entre escoamento superficial e percolação. Desta forma foram obtidas as seguintes classes com relação aos graus de declividade:

0° a 4° - Alto Potencial

4° a 20° - Médio Potencial

20° a 80° - Baixo Potencial

Mapa de Vulnerabilidade dos Canais de Drenagem (Mapa 3). Levando-se em conta que a drenagem exerce papel importante na dispersão de elementos poluentes, foi gerado o Mapa de Vulnerabilidade da Drenagem. Este mapa foi obtido através da combinação da área percorrida pela drenagem representada por uma área de influência de 20 metros, levando-se em conta a potencialidade de trocas entre o canal de drenagem e o meio condutivo. Este mapa gerado apresentou trechos onde sua vulnerabilidade variou entre “Muito Alta” (trechos que correspondem a formações muito permeáveis – rochas sedimentares) a “Desprezível” (trechos onde o tempo de residência da água

percolante é muito baixa, ou seja, áreas com predominância de rochas gnáissicas, em terrenos de alta declividade)

A tabela abaixo sumariza as características da técnica utilizada e algumas observações a respeito das características dos parâmetros utilizados.

Tabela 4 – Pontuação adotada para a classificação da região sob estudo.

Parâmetros	Classes	Pontuação	Observações
Declividade	0° a 4°	10	Áreas de declividade menores são ocorrentes em áreas de várzeas e planícies aluvionares, onde o nível de água subterrânea é raso. Por outro lado em áreas de topografia elevada, o nível de água torna-se mais profundo.
	4° a 20°	5	
	20° a 80°	2	
Geologia	Aluvião	10	Alta porosidade e permeabilidade são encontradas nos depósitos sedimentares haja visto sua granulometria, seleção e grau de consolidação. Nas rochas ígneas foi considerada a potencialidade de fraturamento nas rochas. Os granitos possuem potencial de produzir poucas fraturas, mas fraturas abertas. Já nos metamorfizados, o grau de fraturamento é maior porém as fraturas podem estar mais fechadas.
	F. Caceribu	10	
	Biotita Gnaisse	3	
	Biotita Gnaisse	3	
	Porfíritico	4	
	Granito Andorinha	4	
	Granito Suruí	3	
Migmatito Estromatítico			
Canais de Drenagem	Canais de Drenagem com área de influência de 20 metros para cada margem	10	Os canais de drenagem são os corpos receptores de água da bacia, como também de possíveis agentes contaminantes, daí sua alta pontuação e sensibilidade.
Lineamentos	Dentro (10 metros de cada lado)	10	As fraturas são consideradas zonas de fraqueza das rochas e sensíveis a alguma contaminação.

A vulnerabilidade do aquífero explorado é alta e requer medidas de proteção e prevenção em relação às atividades potencialmente contaminadoras.

O Sistema Aquífero Cristalino aflorante é caracterizado por relevos de altas altitudes e declividades, formando as escarpas e serranias.

A vulnerabilidade desse tipo de aquífero encontra-se nos fraturamentos (nos canais de drenagem), nas conformações das sub-bacias formadas e nas características hidrodinâmicas do aquífero sob análise.

A tabela 5 sintetiza as características de vulnerabilidade detectadas para a área.

Tabela 5: Caracterização dos Índices de Vulnerabilidade dos Aquíferos da Área de Trabalho.

VULNERABILIDADE	AQUÍFERO	CARACTERÍSTICAS
MUITO ALTA ALTA	Aluvial	Porosidade primária, sedimentos inconsolidados de alta permeabilidade (predomínio de areias), com espessuras da ordem de 20 metros. Nível de água sub-aflorante (< 2 metros)
MÉDIA ALTA	Cristalino	Porosidade secundária, são terrenos menos declivosos e sem canais de drenagem. Grande parte engloba o Granito Andorinha.
MÉDIA MÉDIA BAIXA		Áreas com declividades menos acentuada (baixas vertentes). Potencial mediano de infiltração gradiente hidráulico alto.
BAIXA MUITO BAIXA DESPREZÍVEL		Áreas elevadas com alto grau de declividade, baixo potencial de infiltração e alto potencial de escoamento superficial. Gradiente hidráulico elevado, influenciado pela alta declividade dos terrenos e nível estático mais profundo. Área de recarga regional.

D.2. Definição das Áreas de Proteção. A definição das áreas de proteção de fonte envolveram análises de diversos temas da área de trabalho, visando:

- Delimitar as áreas de proteção da fonte a ser explorada, conforme a Portaria DNPM vigente, com base nos estudos hidrogeológicos, geológicos e climáticos realizados;
- Caracterizar o meio físico e as atividades de uso e ocupação da terra, no sentido de avaliar a vocação da região onde está inserida a área de trabalho e mapear os diversos tipos de ocupação da terra no entorno.
- Avaliar com o cruzamento das informações de uso da terra, meio físico e hidrogeologia da área, possíveis medidas de proteção da fonte, e recomendar diretrizes de preservação da mesma.

A definição do perímetro de proteção da fonte exigiu a aplicação de vários métodos para definição das Zonas de Contribuição (ZC), Zona de Influência (ZI) e a Zona de Transporte (ZT) ou de Captura.

A **Zona de Contribuição (ZC)** é definida pela Portaria DNPM no 231 (31/07/1998) como “a área de recarga associada ao ponto de captação (fonte ou poço), delimitada pelas linhas de fluxo que convergem a este ponto”.

Assim, a Zona de Contribuição delimitada consiste nas duas sub-bacias hidrográficas localizadas a jusante das fontes, uma vez que definidas como área de recarga, dadas as condições fisiográficas e hidrogeológicas locais.

O Mapa 5 apresenta a o Mapa de delimitação da Zona de Contribuição (ZC).

A **Zona de Influência (ZI)** é definida pela Portaria DNPM no. 231 como *“aquela associada ao cone de depressão – rebaixamento da superfície potenciométrica) de um poço em bombeamento ou de uma fonte ou nascente natural, considerado aqui como um afloramento da superfície piezométrica ou freática, equivalente a um dreno”*.

A Zona de Influência (ZI) foi definida pelo cálculo do raio de influência da fonte Dois Irmãos e Santana, utilizando a vazão de produção de 24 m³/h e 7,2 m³/h, respectivamente, com os valores de porosidade efetiva (n_{ef}) de 0,00005 e espessura saturada (b) de 111,5 metros. Considerou-se uma taxa de bombeamento direto de 120 horas (5 dias). Os resultados dos cálculos são apresentados na tabela 6.

O método aplicado foi o Raio Fixo Calculado. A expressão utilizada foi:

$$R = (Q \cdot T / \pi \cdot n_{ef} \cdot b)^{0.5}$$

Tabela 6 – Definição dos Raios de Influência das Fontes Dois Irmãos e Santana

T (horas)	Raio de Influência (m)	
	Dois Irmãos	Santana
120 (5 dias)	406	222

A Zona de Influência (ZI) considerada é definida pelo raio de influência da Fonte Dois Irmãos, uma vez que a o raio de influência da fonte Santana está embutida face sua menor extensão e proximidade da fonte Dois Irmãos.

O baixo valor de coeficiente de armazenamento indica que o aquífero tem características de confinamento, e assim os raios de influências calculados são de grande extensão. Acredita-se que as águas subterrâneas a serem explotadas pelas duas fontes sejam provenientes de uma circulação mais profunda (fraturamentos entre 90 a 96 metros de profundidade na Fonte Santana).

O Mapa 6 apresenta a Zona de Influência sob o mapa de vulnerabilidade dos aquíferos.

A **Zona de Transporte (ZT)** ou de captura é *“aquela entre a área de recarga e o ponto de captação”*. É esta zona que determina o tempo de trânsito que um contaminante leva para atingir um ponto de captação, desde a área de recarga”.

O método aplicado para a delimitação desta zona foi o raio fixo calculado (RFC) da água subterrânea sob duas condições bem distintas: na área mais plana, onde se situa a

planície aluvionar e uma outra, de terrenos escarpados e de altas declividades da Serra dos Órgãos. Na planície aluvionar foram distintas duas compartimentações: a mais superficial, constituída pelos sedimentos dessa planície, e outra mais profunda, que é o aquífero cristalino.

Os parâmetros considerados foram:

- porosidade efetiva estimada para aquífero cristalino = 0,03 (baseado em informações bibliográficas, considerando a porosidade de aquífero fraturado e a porosidade do material de preenchimento das fraturas)
- espessura saturada do aquífero cristalino = 111,5 m
- porosidade efetiva para aquífero aluvionar = 0,20 (baseado em informações bibliográficas)
- espessura saturada do aquífero aluvionar = 25 m
- gradiente hidráulico i para a planície de inundação = 0,0046
- condutividade hidráulica $K = 2 \times 10^{-6}$ m/s

A equação usada é :

$$R = [(Q.t)/(\pi.n_{ef}.b)]$$

Na planície, os valores obtidos são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Distâncias de caminhamento de partículas e respectivos tempos de trânsito.

Tempo de Trânsito (dias)	Aluvião (m)	Cristalino (m)
50	43	1,3
365 (1 ano)	116	9,5
1825 (5 anos)	259	47,5
3650 (10 anos)	366	95,0
18250 (50 anos)	818	475,0

Nos terrenos mais planos a camada mais superficial do terreno apresenta tempo de trânsito menor que em sub-superfície, ou seja, uma partícula levaria menos tempo para caminhar uma mesma distância que no aquífero cristalino.

O alto valor de gradiente hidráulico dos terrenos escarpados demonstra a elevada velocidade de uma partícula nos terrenos topograficamente mais acidentados, estimada em cerca de 80 metros ao dia, ou cerca de 4000 metros em 50 dias.

Face às características acima encontradas definiu-se a Zona de Transporte como aquela que comporta a isócrona de 50 anos (818 metros) para a formação sedimentar da planície.

A Zona de Transporte definida à montante das fontes são as duas sub-bacias, já definidas como Zona de Contribuição. O elevado valor da estimativa obtida pela equação de tempo de trânsito para os terrenos mais acidentados induziu a delimitação de toda a Zona de Contribuição a montante das fontes avaliadas.

O Mapa 7 apresenta a Zona de Transporte sob o Mapa de Vulnerabilidade de Aquíferos.

As características principais das Zonas são apresentadas na tabela 8, abaixo.

Tabela 8 – Características das Zonas de Proteção das Fontes

Perímetro	Área (Km ²)	Perímetro (m)
ZONA DE CONTRIBUIÇÃO	1,05	7.760
ZONA DE INFLUÊNCIA	0,52	2.553
ZONA DE TRANSPORTE	1,50	7600

Ainda, segundo a referida Portaria, a combinação da Zona de Influência com o perímetro imediato da zona ou fonte delimita uma área restritiva a apenas atividades inerentes ao poço, delimitando um entorno de proteção microbiológica.

Assim, essa área foi definida como possuidora de um raio de 43 metros em torno dos poços, com base na Zona de Influência calculada para 50 dias, de caráter restritivo de acesso, e um segundo, de 116, de proteção imediata.

É importante ressaltar que essas Zonas assim definidas possuem uma grande margem de segurança, haja visto a delimitação da Zona de Transporte pela isócrona de 50 anos, e a não consideração da situação do confinamento do aquífero, a alta taxa de recarga na área de trabalho, e a preservação da mata nativa nos terrenos escarpados.

5. CONCLUSÕES

O Sistema de Informações Geográficas revelou-se nesse trabalho uma ferramenta muito eficaz para trabalhos relativos aos aspectos do meio físico e ao uso e ocupação da terra. Esse trabalho é apenas um exemplo do potencial do uso do SIG em estudos hidrogeológicos. Nesse caso, o SIG induziu aos autores amplas discussões para elaboração de metodologias para os estudos hidrogeológicos, a elaboração de cartografias hidrogeológicas, como o mapa de vulnerabilidade e áreas de proteção de

fontes. Além disso, abriu-se um horizonte de investigação e detalhamento para utilização do sistema em outros estudos de hidrogeologia.

6. BIBLIOGRAFIA

Custódio, E. & Llamas, M.R. 1983. *Hidrologia Subterranea*. 2ed. Barcelona. Omega, t1 e 2, 2359 p.

Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). 1990. Plano Estadual de Recursos Hídricos – Primeiro Plano do Estado de São Paulo – 1990 – Síntese. São Paulo. DAEE. 97pp.

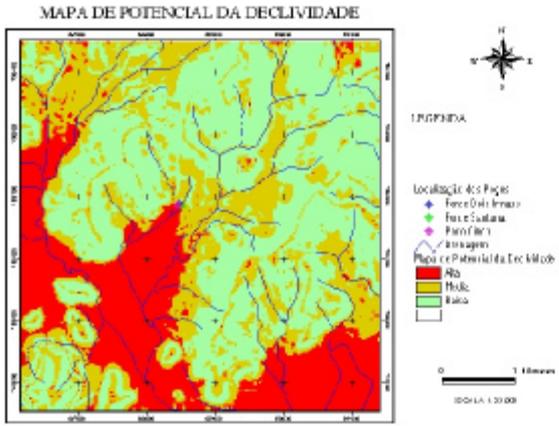
DRM – Departamento de Recursos Minerais. 1979. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro – Folha Petrópolis.

Foster, S. & Hirata, R.C.A. 1991. Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Aguas Subterraneas. CEPIS/PAHO/OMS. 79 pp. Lima. Peru.

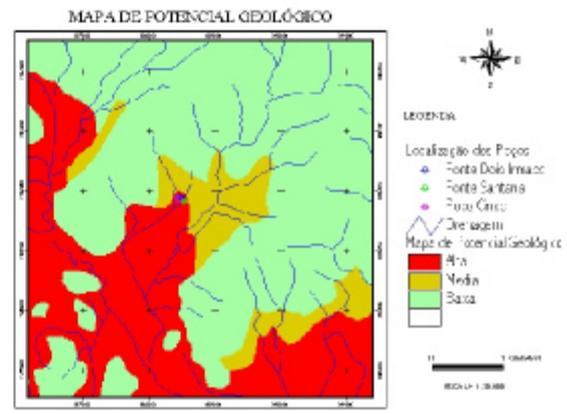
Fundação Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Rio de Janeiro (FIDERJ). 1978. Indicadores Climáticos.

Reis, M. 1998. *Relatório Final de Pesquisa – Fontes Santana e Dois Irmãos*. 59pp

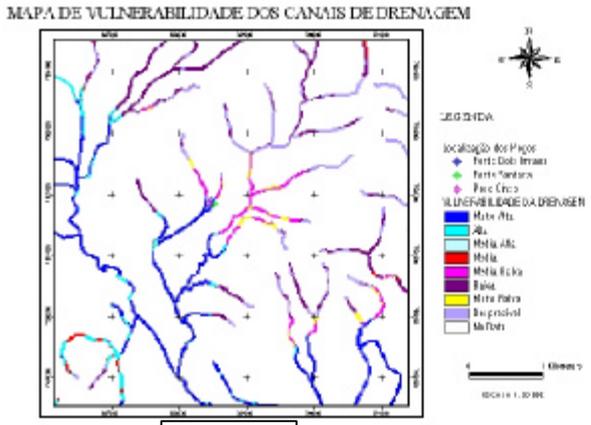
Thorntwaite, C.W. & Mather, J.R. 1955. *The water balance*. Publications in Climatology. Centerton. New York. 104 pp.



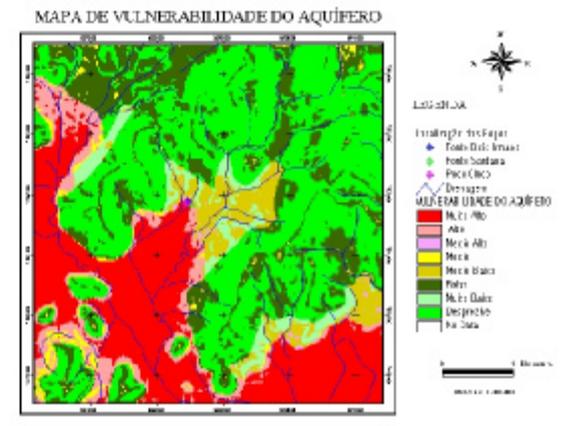
Mapa 1



Mapa 2



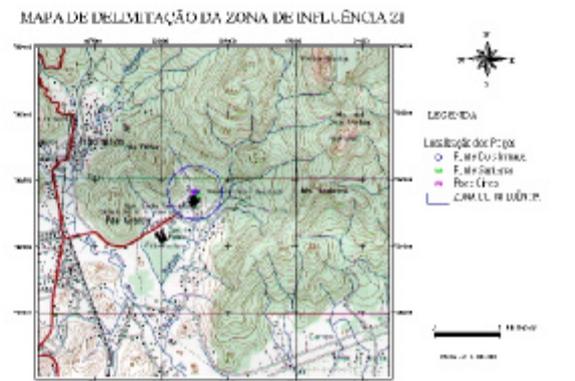
Mapa 3



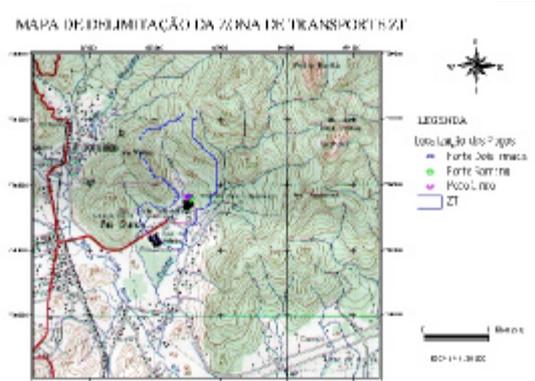
Mapa 4



Mapa 5



Mapa 6



Mapa 7