

ANÁLISE DO POTENCIAL DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS VISANDO A IMPLANTAÇÃO DE ATERROS SANITÁRIOS

VULNERABILITY ANALYSIS OF AQUIFERS SEEKING THE IMPLANTATION OF SANITARY LANDFILLS

Lorandi, Reinaldo, *Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos-SP, Brasil, lorandi@power.ufscar.br*

Mendes, Rodolfo Moreda, *Instituto Geológico, Secretaria Estadual do Meio Ambiente, São Paulo-SP, Brasil, rodolfo.mendes@igeologico.sp.gov.br*

Moreira, Marco Antônio Albano, *Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos-SP, Brasil, fmarco@power.ufscar.br*

Cançado, Cláudio Jorge, *Universidade Estadual de Minas Gerais, Divinópolis- MG, Brasil, ccancado@uai.com.br*

Moraes, Maria Eugenia Bruck de, *Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus-BA, Brasil), eugeniabruck@uesc.com.br*

Vitti, Dalva Maria de Castro, *Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos-SP, Brasil, dalvitti@uol.com.br*

Galiano, Valdir Aparecido, *Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, São Carlos-SP, Brasil, pvag@iris.ufscar.br*

RESUMO

Em um curto período de tempo, a disposição final de resíduos sólidos se transformou em um dos mais sérios problemas que afetam as sociedades modernas, causando impactos adversos ao homem e ao ambiente. Entre as soluções propostas para tal problema, encontram-se os aterros, que quando implantados e operados de maneira inadequada são potencialmente causadores de poluição do ambiente e das águas superficiais e subterrâneas. Assim, o presente trabalho objetiva diagnosticar as características geoambientais relacionadas com a contaminação dos aquíferos por disposições inadequadas de resíduos sólidos, utilizando-se como objeto para estudo de caso o município de Descalvado (Brasil), visando a produção de uma carta de potencial de vulnerabilidade de aquíferos para implantação de aterros sanitários, onde as fragilidades e potenciais em relação à essa vulnerabilidade estivessem representados.

ABSTRACT

In a short period of time, the final disposal of solid residues became one of the most serious problems that affect the modern societies, causing a number of adverse impacts to both men and environment. Among the solutions proposed to solve this problem are the landfills which, when implemented and operated in an inadequate way, are potential agents of environmental pollution and superficial and groundwater pollution. Therefore, this work wants to present the geoenvironmental characteristics related to the contamination of aquifers by the inadequate disposition of solid residues, using as a case study the municipality of Descalvado (Brazil), intending to produce a document about the vulnerability potential of aquifers, to the implementation of sanitary landfills, where the fragilities and potentials related to this vulnerability are represented.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico-regional aliados à falta de planejamento do uso e ocupação do solo provocam um descontrole no processo de urbanização. Na maioria dos casos, a não observância de preceitos técnicos necessários ao planejamento e controle do crescimento urbano acarreta graves problemas sócio-ambientais [1].

Com o crescimento dos centros urbanos é cada vez maior a quantidade de resíduos sólidos gerados que pelo homem, que precisam ser descartados e dispostos de maneira adequada. A alternativa comumente utilizada é a construção de aterros, que em muitos casos são implantados em locais sem uma prévia avaliação geotécnica para esta finalidade. Dentre os modos de disposição em aterro, o mais indicado tecnicamente é o aterro sanitário [2].

Os lixões, aterros construídos e operados inadequadamente em áreas urbanas e rurais, constituem uma das maiores fontes de contaminação das águas subterrâneas. Nestas obras o resíduo sólido urbano está sujeito ao processo de lixiviação a partir da percolação das águas de chuvas, originando o “percolado ou chorume”, o qual contém um grande número de espécies de contaminantes orgânicos e inorgânicos [3].

Diversos tipos de estudos têm sido desenvolvidos para verificar a possibilidade de contaminação dos mananciais subterrâneos pela infiltração de chorume. A possibilidade de contaminação do Lago Água Preta (Belém/PA) pela migração em subsuperfície do chorume derivado do depósito de resíduos, foi verificada por [4] a partir de medidas eletromagnéticas e imagens da distribuição da condutividade elétrica do subsolo.

Desta forma, o presente trabalho objetiva analisar a vulnerabilidade dos mananciais subterrâneos visando a escolha de áreas adequadas para a disposição em aterros sanitários, utilizando-se como estudo de caso o município de Descalvado, onde as características geotécnicas do meio físico em relação à disposição de resíduos sólidos urbanos apresenta-se potencialmente frágil.

Pretende-se, assim, contribuir de forma significativa para o entendimento do potencial de contaminação do aquífero Botucatu buscando fomentar o planejamento e gestão ambiental da região.

2. CARACTERIZAÇÃO DO AQUIFERO GUARANY

Na Bacia do Paraná a topografia dominante é constituída por duas principais superfícies com os seguintes intervalos: 0-200; 200-500; 500-800 e 800-1.200 metros [5]. A influência do relevo é mais importante no desempenho de poços em aquíferos fraturados. A superfície potenciométrica dos aquíferos freáticos é profunda no domínio altiplano enquanto ela está subaflorando na zona de depressão do relevo, como ocorre no município de Descalvado (SP).

Aproximadamente 70% da área brasileira pertencem à zona tropical. O mapa de isoietas [6] mostra a precipitação média anual para um período de 29 anos (1931-1960), variando de 1.000 a 2.400 mm. O intervalo de 1.200 a 1.400 mm inclui todo o domínio inter-tropical da Bacia Sedimentar. Os valores acima de 1.400 mm fazendo uma figura concêntrica no domínio montanhoso do Paraná e norte do Estado de Santa Catarina (Brasil).

Segundo [5], o sistema do aquífero Botucatu é composto por uma seqüência de Bacias (área de sedimentos Fanerozóicos de 1.750.000 km²), incluindo a parte da Bacia do Chaco-Paraná, onde a espessura total destes depósitos (sedimentos, lavas e sills) é maior do que 5.000 m. Os arenitos Triássico-Jurássicos cobertos por rochas Cretáceas (basaltos e arenitos) e por rochas

sedimentares Permo-Triássicas subjacentes compõem uma área de 1.940.000 km². A espessura total dos arenitos Triássico-Jurássicos varia mais de 800 m, até sua total ausência em algumas áreas limitadas na subsuperfície.

O sistema do aquífero Botucatu tem uma espessura máxima de 400 m, faixa de condutividade hidráulica de 0,2 a 0,4 m/d na área não confinada (16.000 km²) e 0,5 a 4,6 m/d na área confinada (136.800 km²). Este sistema de aquífero está confinado por rochas basálticas da Formação Serra Geral. A oeste do aquífero Botucatu, a condição de confinamento progressivo aumenta com a profundidade do topo da camada do aquífero, e a temperatura da água subterrânea aumenta vagarosamente. Além disso, o tempo de confinamento aumenta o teor de sal da água no sentido de seu fluxo natural (Sudoeste). Em consequência disso, ocorre a seguinte mudança na composição salina dessas águas: bicarbonato de sódio e magnésio → bicarbonato de sódio → cloreto-sulfato de sódio.

As isotermas do aquífero Botucatu geralmente seguem um gradiente de 29°C/km e reflete amplamente sua estrutura. Duas áreas da Bacia possuem temperaturas maiores que 55°C: uma na porção Ocidental de São Paulo e Estado do Paraná e outra na Província de Entre Rios [7].

As rochas basálticas da Formação Serra Geral acumulam espessura de 1.500 m. Esta superfície mergulhando para noroeste e sudeste de forma desigual é devido às baixas e elevadas estruturas, coberta pelos sedimentos do Grupo Bauru. Valores de capacidade específica obtidos neste aquífero fraturado variam de 0,01 a 10 m³/h/m. O teor de concentração salina neste aquífero é < 250 mg/l (96%): 63% de bicarbonato de cálcio, 10% de bicarbonato de cálcio-magnésio e 9% de bicarbonato de sódio.

Por ser o Botucatu um aquífero de extensão continental e de característica confinada, muitas vezes jorrante, sua dinâmica ainda se mostra pouco conhecida, necessitando maiores estudos para seu entendimento, de forma a possibilitar uma utilização mais racional e o estabelecimento de estratégias de preservação mais eficientes.

A vulnerabilidade de um aquífero à poluição e à contaminação se condiciona a fatores naturais, como a acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes e a capacidade de atenuação da carga poluidora. A interação desses fatores com elementos poluidores, sua disposição no solo e a mobilidade físico-química, permite avaliar o grau de risco de poluição do aquífero. Assim, o estudo de [8] aponta que, entre os sistemas aquíferos da região das bacias dos rios Moji-Guaçu, Pardo e Grande, o Botucatu-Pirambóia apresenta os maiores índices de vulnerabilidade, devido a sua constituição arenosa, com baixo teor de argila e caráter homogêneo. Os maiores índices ocorrem nas áreas onde os aquíferos estão a menos de 10 m de profundidade.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, situa-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo, região sudeste do Brasil, distante, aproximadamente, 250 quilômetros da capital do Estado, compreendendo o município de Descalvado, com uma área de aproximadamente 756 km², delimitada pelas coordenadas UTM fuso 23: $x_{\min}= 210000$; $x_{\max}= 242000$; $y_{\min}= 7558000$ e $y_{\max}= 7598000$ (ver Figura 1).

O clima da região estudada é classificado, de acordo com o sistema de Köppen, como sendo do tipo Cwa, isto é, mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° C e a do mês mais quente ultrapassa 22° C. Com relação a vegetação, as principais formações florestais correspondem ao cerrado, cerrado, mata mesófila e mata ciliar.

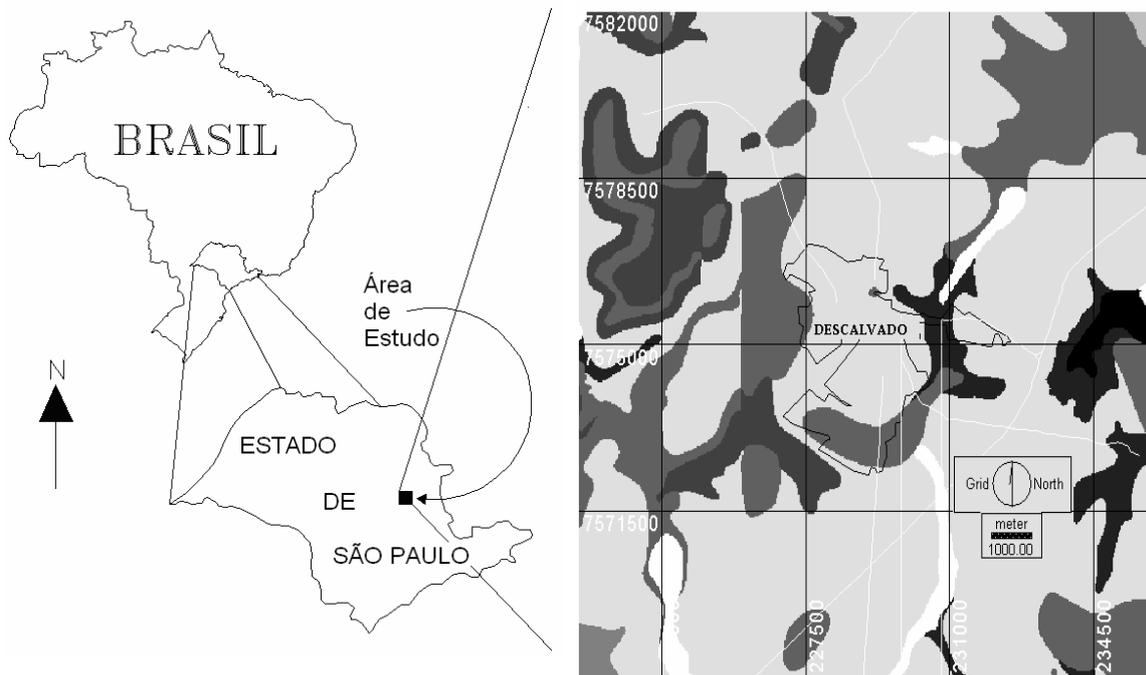


Figura 1. Localização da área estudada no Brasil e no Estado de São Paulo.

Levando-se em conta a questão do balanço hídrico, há uma nítida distinção entre a estação seca (maio a setembro), com conseqüente deficiência hídrica e, a chuvosa (outubro a abril) [9]. Com relação à precipitação na região [10], observa-se números anuais da ordem de 1.442 mm.

Segundo a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo [11] o município de Descalvado (Brasil) está inserido na Unidade Morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, abrangendo parcialmente duas Unidades Morfoesculturais: Planalto Ocidental Paulista, ocupando praticamente 50% da área total do Estado de São Paulo, com relevo levemente ondulado e predomínio de colinas amplas e baixas com topos aplanados, e Depressão Periférica Paulista, representada na área pela unidade morfológica denominada Depressão de Moji-Guaçu, com predomínio de formas de relevo denudacionais, cujo modelado constitui-se basicamente por colinas de topos tabulares amplos.

Na maior parte da área estudada, a camada de cobertura cenozóica origina-se da Formação Santa Rita do Passa Quatro, constituindo-se de material areno-argiloso, sobrejacente a Formação Botucatu, que por sua vez, se constitui quase que inteiramente de arenitos de granulação fina à média, uniforme, com boa seleção de grãos. Abaixo da Formação Botucatu, situa-se a Formação Pirambóia constituída por arenitos geralmente de granulação fina à média, possuindo fração argilosa maior na parte inferior que na superior da formação, onde localmente ocorrem arenitos grossos conglomeráticos. Na base do perfil ocorre a Formação Serra Geral constituída por magmatitos básicos (basaltos e diabásios). A ocorrência e a distribuição da freqüência das formações geológicas na área estudada são mostradas nas Figuras 2 e 3, respectivamente.

Na área de estudo, as rochas mais importantes para os aquíferos são as que apresentam apreciável porosidade, pois possibilitam a movimentação da água no meio rochoso e conseqüentemente o armazenamento da água nos mananciais subterrâneos. Um exemplo são os arenitos correlacionáveis à Formação Botucatu e Pirambóia que formam aquíferos regionais

com grandes quantidades de água potável. Esses aquíferos constituem uma das maiores reservas subterrâneas de água doce do planeta, sendo hoje denominados Aquífero Guarani.

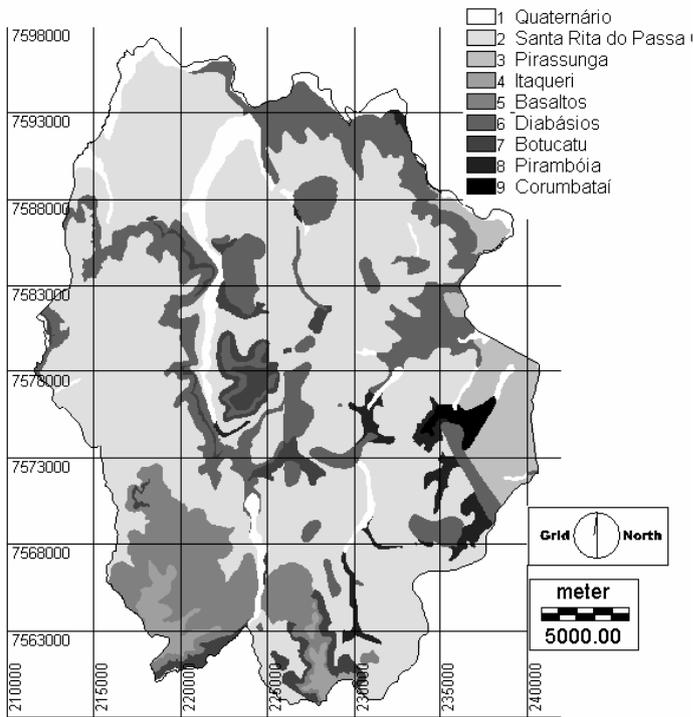


Figura 2. Ocorrência das formações geológicas de superfície.

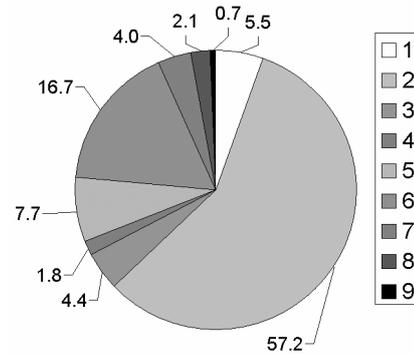


Figura 3. Distribuição da frequência das formações geológicas de superfície.

4. MATERIAIS E METODOLOGIA

Os solos da região estudada foram amostrados e caracterizados por [12] [13] e [14] que determinaram os valores de permeabilidade e granulometria. Os resultados desses ensaios são mostrados na Tabela 1. Analisando-se esses resultados, quanto a granulometria, verifica-se a predominância de materiais inconsolidados de textura arenosa na área de estudo.

Quanto à permeabilidade, segundo [15] praticamente todas as amostras da Formação Serra Geral, Pirambóia, Pirassununga, Santa Rita do Passa Quatro e Botucatu se apresentaram como médias (valores de k_{20} entre 10^{-1} e 10^{-3} cm/s). As amostras da Formação Corumbataí, com a variação da profundidade dos horizontes de coleta apresentaram valores de permeabilidade média na superfície a muito baixa nos horizontes mais profundos (valores de k_{20} entre 10^{-5} e 10^{-7} cm/s).

Tabela 1. Resultados dos ensaios de permeabilidade e granulometria.

Formação Geológica	Amostras	Profundidade (m)	Permeabilidade (cm/s)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Formação Geológica	Amostras	Profundidade (m)	Permeabilidade (cm/s)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Serra Geral	P ₁₆ A	0,5-2,0	9,70 x 10 ⁻³	46	19	35	Santa Rita do Passa-Quatro	P ₂ A	1,5-1,7	1,71 x 10 ⁻³	79	4	17
	P ₁₆ B	2,5-3,0	9,08 x 10 ⁻³	45	18	37		P ₂ B	4,0-4,2	6,73 x 10 ⁻³	74	6	20
	P ₁₆ C	3,2-3,7	1,03 x 10 ⁻²	34	26	40		P ₁₀ A	0,2-0,5	1,72 x 10 ⁻³	73	10	17
	P ₁₆ D	4,0-4,5	2,16 x 10 ⁻³	35	29	36		P ₁₀ B	1,4-1,7	2,10 x 10 ⁻³	70	9	21
Corumbataí	P ₃ A	1,5-1,7	1,59 x 10 ⁻³	50	15	35		P ₁₀ C	3,0-3,3	1,59 x 10 ⁻⁴	72	6	22
	P ₃ B	3,0-3,5	1,90 x 10 ⁻³	41	13	46		P ₁₄ A	0,2-0,5	3,24 x 10 ⁻³	76	8	16
	P ₉ A	0,5-0,8	1,18 x 10 ⁻³	75	7	18		P ₁₄ B	2,5-2,7	1,36 x 10 ⁻³	74	9	17
	P ₉ B	2,0-2,3	5,01 x 10 ⁻⁴	73	7	22		P ₁₄ C	3,5-3,7	2,30 x 10 ⁻³	27	55	18
	P ₉ C	5,0-5,3	7,35 x 10 ⁻⁷	28	20	52		P ₁₃ A	0,4-0,6	1,17 x 10 ⁻³	51	29	20
	F ₆ A	0,2-0,4	6,54 x 10 ⁻³	60	5	35		P ₁₃ B	1,4-1,7	1,36 x 10 ⁻²	70	7	23
	F ₆ B	4,0-4,2	9,29 x 10 ⁻⁴	52	16	32		P ₁₃ C	2-2,3	1,58 x 10 ⁻²	73	13	14
	F ₆ C	7,2-7,4	1,98 x 10 ⁻⁷	10	26	54		P ₁₇ A	1-1,2	2,38 x 10 ⁻³	83	6	11
Pirambóia	P ₅ A	0,4-0,6	1,85 x 10 ⁻³	75	9	16		P ₁₇ B	3-4,5	1,47 x 10 ⁻³	75	11	14
	P ₅ B	3,4-3,6	2,08 x 10 ⁻⁴	75	7	18		P ₂₀ A	0,8-1,5	3,00 x 10 ⁻³	59	8	33
	P ₂₆ A	0,5-0,7	3,40 x 10 ⁻³	82	10	8		P ₂₀ B	2,2-3,8	1,75 x 10 ⁻³	60	7	33
	P ₂₆ B	1,8-2,0	2,63 x 10 ⁻³	83	10	7		P ₂₂ A	0,1-0,3	5,06 x 10 ⁻⁴	70	19	11
	P ₂₆ C	2,4-2,6	1,10 x 10 ⁻³	79	9	11		P ₂₂ B	1,6-1,8	2,39 x 10 ⁻⁴	72	15	13
	F ₁ A	0,2-0,4	2,31 x 10 ⁻³	95	7	8		P ₂₂ C	2,5-2,7	1,26 x 10 ⁻⁶	56	28	16
	F ₁ B	3,5-3,7	1,03 x 10 ⁻⁵	79	10	11		P ₂₃ A	0,8-1,0	1,14 x 10 ⁻³	80	3	17
	Pirassununga	P ₈ A	0,2-0,4	2,23 x 10 ⁻⁴	64	12		24	P ₂₃ B	2,0-2,2	9,70 x 10 ⁻³	90	4
P ₈ B		1,2-1,4	2,32 x 10 ⁻³	74	10	16		P ₂₄ A	0,6-0,8	9,30 x 10 ⁻³	93	2	5
P ₁₈ A		0,2-0,5	1,24 x 10 ⁻⁴	-	-	-		P ₂₄ B	1,3-1,5	9,20 x 10 ⁻³	91	4	5
P ₁₈ B		0,8-1,0	1,52 x 10 ⁻⁴	21	24	55		P ₂₅ A	0,2-0,4	5,50 x 10 ⁻³	82	5	13
P ₁₈ C		1,2-1,5	2,57 x 10 ⁻³	11	47	42		P ₂₅ B	1,0-1,2	6,50 x 10 ⁻⁴	80	7	13
P ₂₇ A		0,4-0,6	2,95 x 10 ⁻³	78	9	13		F ₂ A	0,2-0,4	2,29 x 10 ⁻³	80	5	15
P ₂₇ B		1,6-1,8	7,79 x 10 ⁻³	70	17	13		F ₂ B	3,5-3,7	6,08 x 10 ⁻³	80	4	16
F ₄ A		0,4-0,6	2,57 x 10 ⁻³	87	3	10		F ₂ C	6,8-7,0	3,74 x 10 ⁻³	82	5	13
F ₄ B		4,5-4,7	1,76 x 10 ⁻³	81	5	14		F ₈ A	0,5-0,7	1,34 x 10 ⁻²	86	4	10
F ₅ A		0,4-0,6	2,30 x 10 ⁻²	86	4	10	F ₈ B	2,3-2,5	1,13 x 10 ⁻²	84	4	12	
F ₅ B		3,4-3,6	1,93 x 10 ⁻²	83	5	12	Quaternário	P ₂₈ A	-	4,33 x 10 ⁻⁴	60	29	11
F ₅ C		5,3-5,5	1,69 x 10 ⁻²	84	4	12	Itaqueri	F ₃ A	-	1,73 x 10 ⁻⁶	41	16	43
F ₇ A		0,2-0,4	1,10 x 10 ⁻²	62	10	28		F ₃ B	-	1,10 x 10 ⁻⁶	32	14	54
F ₇ B		4,0-4,2	4,10 x 10 ⁻³	58	10	32	Botucatu	F ₉ A	-	3,10 x 10 ⁻³	81	5	14
								F ₉ B	-	9,79 x 10 ⁻³	79	3	18

Fonte: [12] [13] e [14]

Quanto ao uso do solo (Figura 4), a área de estudo constitui-se de uma bacia leiteira, sendo ocupada prioritariamente por expressivas áreas de pastagem e secundariamente pelo cultivo da cana-de-açúcar e do milho. Na região também existem áreas de florestamento (eucalipto) e citricultura, que são cultivados em solos de textura arenosa a areno-barrenta [16]. Cabe ressaltar, porém, que a disseminação de granjas de aves e suínos, constituem-se, localmente, em focos pontuais de poluição do sistema solo-água, conforme relatado por [17].

A escolha de áreas adequadas à implantação de aterros sanitários foi realizada a partir da elaboração de um produto cartográfico voltado para a avaliação da vulnerabilidade natural de

aquíferos à contaminação. Para a elaboração deste produto cartográfico foram considerados alguns atributos do terreno que condicionam a avaliação da vulnerabilidade: perfis geológicos de poços profundos, perfil do solo e litologia, morfologia e morfometria do relevo, e escoamento superficial. Os atributos considerados foram hierarquizados em grau de importância considerando sua interferência no fenômeno estudado na seguinte ordem: perfis geológicos dos poços profundos, perfil de solo, escoamento superficial e litologia.

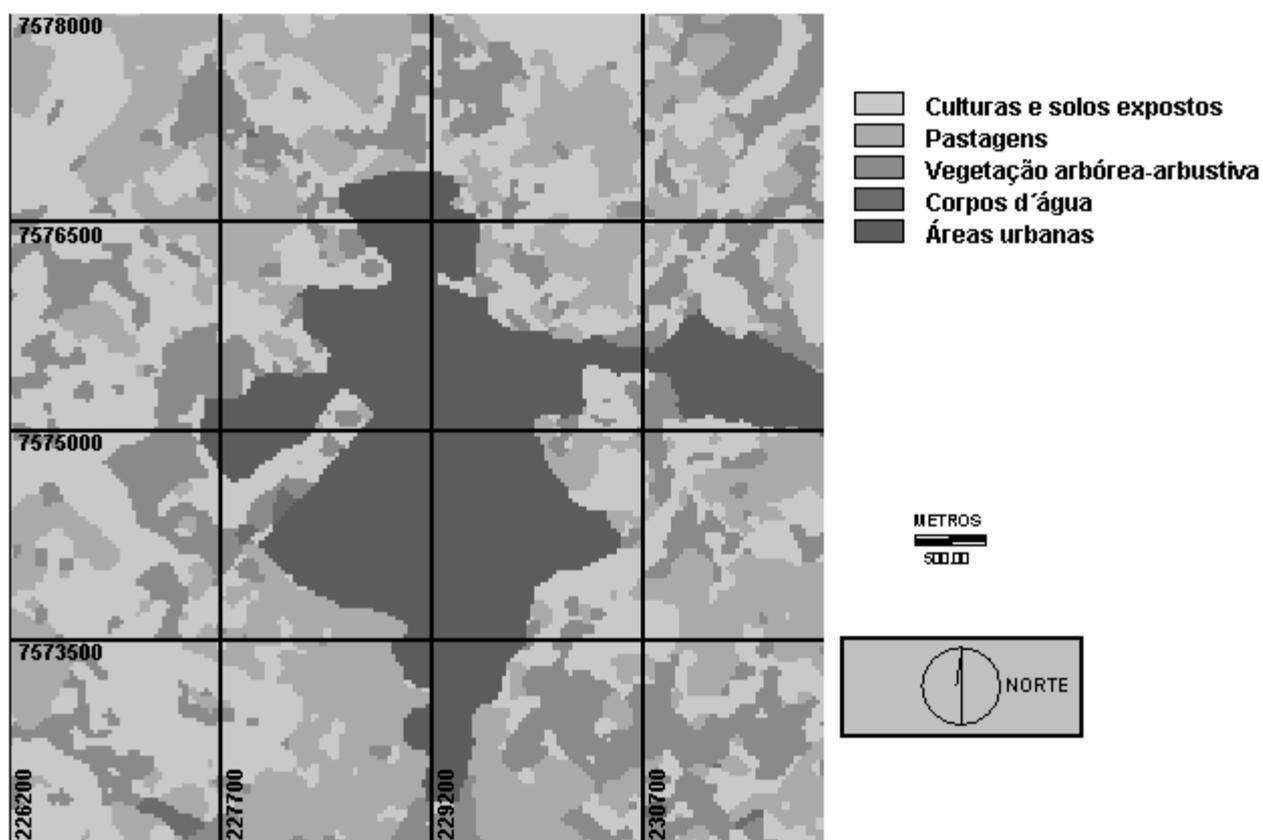


Figura 4. Distribuição do uso do solo.

Perfis geológicos de poços profundos: Para a obtenção deste atributo, consultou-se um banco de dados contendo informações sobre os poços tubulares profundos existentes na área de estudo, pertencentes à empresa pública responsável pelas águas subterrâneas. Através da análise dos perfis geológicos dos poços juntamente com a litologia, elaborou-se uma carta intermediária para análise do potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos.

Perfil de alteração: Para este atributo, utilizou-se o mapa de materiais inconsolidados da área de estudo, elaborado por [16] e [18] os quais fizeram uma abordagem para os materiais inconsolidados, considerando as correlações entre o comportamento do relevo, com destaque para o atributo declividade e as categorias dos materiais encontradas em campo, e as informações sobre as formações geológicas de superfície existentes na área de estudo, visando o entendimento para o substrato rochoso formador de cada uma das classes de material inconsolidado.

Escoamento superficial: Para este atributo, utilizou-se a carta do potencial de escoamento superficial da área de estudo, elaborado por [18], que apresenta uma graduação das áreas com maior ou menor potencial ao escoamento, cuja ordem inversa determina as regiões onde predomina a infiltração. Elaborou-se esta carta, utilizando-se a metodologia de [19] a qual

considera vários atributos do meio físico, dentre os quais citam-se a declividade que, obtida a partir dos elementos da altimetria do terreno que guarda relação com as formas de relevo, condiciona os processos erosivos e de escorregamentos, e também a relação entre escoamento superficial e infiltração de cargas poluidoras.

Litologia: Para a obtenção deste atributo, utilizou-se o mapa das formações geológicas de superfície da área de estudo em formato digital [18], obtido a partir das folhas de formações geológicas de superfície dos municípios que integram a área estudada: Luis Antonio, Descalvado e Corumbataí [20].

No intuito de considerar apenas os atributos mais relevantes na elaboração da carta do potencial de vulnerabilidade de aquíferos, fez-se uma análise integrada dos vários atributos, estabelecendo a inter-relação entre os parâmetros para a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas em relação à implantação de aterros sanitários na área estudada.

Desta forma, foram estabelecidas as correlações entre os atributos das cartas intermediárias para gerar uma única carta que refletisse a vulnerabilidade do terreno na área estudada. Para tanto, definiram-se as seguintes classes: muito alta, alta, média, baixa e muito baixa. Os locais que obtiveram, após as correlações, os valores mais baixos são aqueles que segundo os critérios estabelecidos se apresentam mais adequados à implantação de aterros sanitários.

A carta de vulnerabilidade foi elaborada pelo módulo CROSSTAB do SIG IDRISI32 [21] que permitiu efetuar a combinação das cartas intermediárias a partir do uso de uma matriz de correlação dos atributos considerados, auxiliando o processo de tomada de decisão quanto à importância de cada atributo e o resultado cartográfico obtido (Tabela 2).

Tabela 2. Exemplo da Matriz de Decisão - Primeira Combinação versus Escoamento Superficial

1ª Combinação Escoamento	Classe (1) MB	Classe (2) B	Classe (3) M	Classe (4) A	Classe (5) MA
Classe (1) -MA	B	M	A	MA	MA
Classe (2) - MA	B	M	A	MA	MA
Classe (3) - A	B	M	M	A	MA
Classe (4) - A	B	M	M	A	MA
Classe (5) - M	MB	B	M	A	MA
Classe (6) - M	MB	B	M	A	MA
Classe (7) - MB	MB	B	M	A	MA
Classe (8) - MB	MB	B	M	A	MA

Legenda: (1) - MB=Muito Baixa; (2) - B=Baixa; (3) - M=Média; (4) - A=Alta; (5) - MA=Muito Alta

Utilizando-se o módulo CROSSTAB procedeu-se, então, à sobreposição de imagens (duas a duas) de modo que a partir do resultado da sobreposição da primeira imagem com a segunda, pudesse realizar em seguida uma nova sobreposição do resultado obtido com a terceira imagem e assim por diante. Após cada etapa de sobreposição, reclassificou-se a imagem intermediária gerada, utilizando-se o módulo RECLASS do IDRISI32, conforme as classes de vulnerabilidade adotadas. De posse de todas as sobreposições, chegou-se a carta do potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos para a implantação de aterros sanitários, onde as diversas classes de vulnerabilidade foram individualizadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A carta do potencial de vulnerabilidade natural de aquíferos voltada para a implantação de aterros sanitários (Figura 5) apresenta cinco classes do potencial de vulnerabilidade - classes 1 a 5. Portanto, quanto maior o potencial de vulnerabilidade, menos adequada se apresenta a área para a implantação de aterros sanitários.

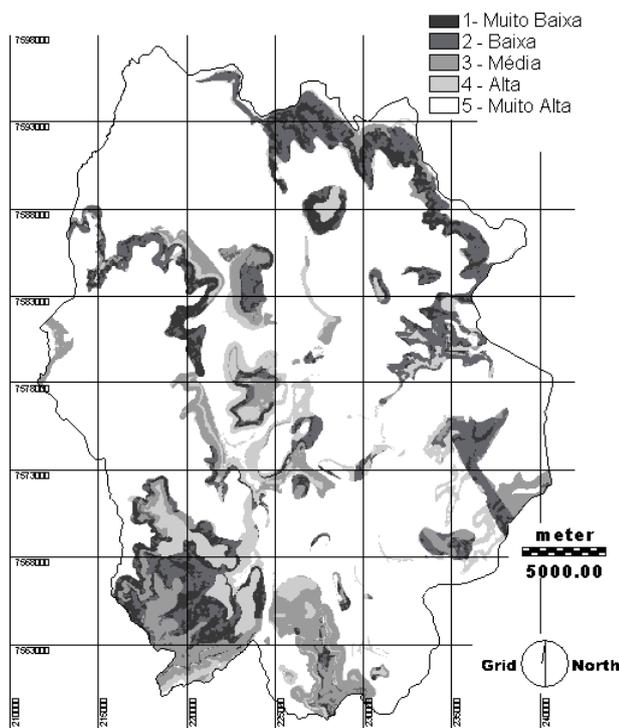


Figura 5. Carta do Potencial de Vulnerabilidade do Aquífero na área estudada.

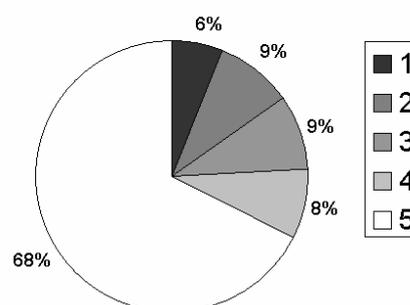


Figura 6. Distribuição da frequência das classes de vulnerabilidade

A Figura 6 apresenta a distribuição da frequência das classes de vulnerabilidade, onde se verifica a predominância da classe 5, representando 67,47% da área estudada. As restantes classes, por ordem decrescente de frequência são: a classe 2 com 8,95%, a classe 3 com 8,93%, a classe 4 com 8,45% e a classe 1 com 6,20%. A predominância da classe 5 na área de estudo é devido principalmente à presença de solos constituídos por textura arenosa (aproximadamente 73%), seguida de uma quantidade menor de solos com textura argilosa (aproximadamente 27%), confirmando o potencial de fragilidade da área de estudo quanto a vulnerabilidade do aquífero.

A distribuição espacial da vulnerabilidade do aquífero que ocorre na área estudada foi também evidenciada por [9]. A partir do estudo de uma área de 223 km², situada dentro dos limites municipais de Descalvado e Porto Ferreira, tais autores encontraram apenas 1,3% de áreas propícias para a implantação de aterros sanitários, relacionados aos seguintes atributos determinantes: baixa declividade, lençol freático profundo, baixo a médio coeficiente de permeabilidade, profundidade elevada do substrato rochoso, textura areno-argilosa e predominância de escoamento superficial laminar.

Visando complementar o critério de seleção de áreas adequadas para implantação de aterros sanitários, buscou-se analisar espacialmente as informações provenientes de poços profundos a

partir de alguns perfis geológicos e de superfícies tridimensionais. Devido à inexistência de um número significativo de poços profundos para toda a área estudada, optou-se por adotar uma área piloto de 36 km², caracterizada por sua apreciável densidade de poços profundos. A área piloto está delimitada pelas seguintes coordenadas UTM: X_{min}= 226000; X_{máx}= 232000; Y_{min}= 7572000 e Y_{máx}= 7578000, onde encontram-se distribuídos 14 poços profundos, sendo que 9 foram escolhidos por apresentarem descrições detalhadas e confiáveis (Figura 6).

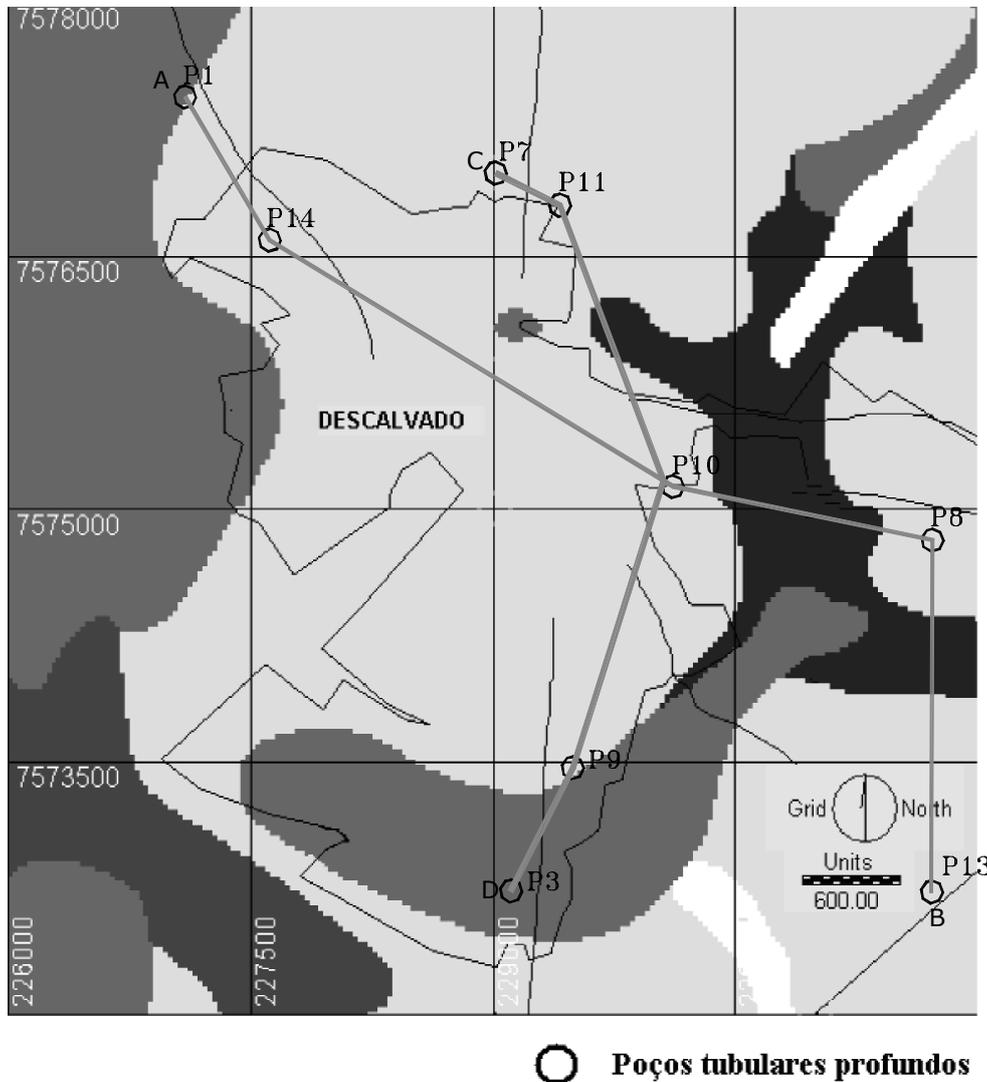


Figura 6 – Área piloto e distribuição dos poços tubulares profundos.

Utilizando-se o software [22] e as informações existentes nos poços profundos sobre a estratigrafia da área piloto, obteve-se a representação tridimensional da superfície topográfica juntamente com as superfícies geológicas em profundidade (Figuras 7a, 7b, 7c e 7d).

Como as Formações Botucatu e Pirambóia constituem-se de arenitos, estruturas geológicas que permitem a infiltração do percolado proveniente dos aterros sanitários, as mesmas foram representadas numa única superfície geológica, sendo tratadas como arenito. A Formação Serra Geral, por esta constituir-se de magmatitos básicos, foi tratada como basalto e diabásio.

Analisando simultaneamente as Figuras 7a, 7b, 7c e 7d, verifica-se que em algumas regiões da

área piloto adotada, ocorrem situações onde a Formação Serra Geral (Figura 7d) está sobreposta à formações de arenito (Figura 7c) e sotoposta aos sedimentos cenozóicos da Formação Santa Rita do Passa Quatro (Figura 7b). Como exemplo, tem-se esta situação no local de coordenadas 7575500 e 229000, conferindo às imediações deste local, condições geológicas favoráveis para aterros sanitários.

Esta ocorrência geológica pode ser comparada, por exemplo, com os perfis geológicos dos poços P₁₀ e P₃ da Figura 8. Em ambos os perfis, a Formação Serra Geral se apresenta sobreposta às Formações Botucatu e Pirambóia, respectivamente.

No entanto, nota-se que no poço P₃ a Formação Pirambóia está recoberta por 60 metros de sedimentos recentes e basalto, enquanto que no poço P₁₀ a Formação Botucatu está recoberta por aproximadamente 35 metros de sedimentos recentes e basalto. Além disso, a espessura do basalto (Formação Serra Geral) no poço P₃ se mostra muito maior em relação ao poço P₁₀, dificultando ainda mais a infiltração do percolado.

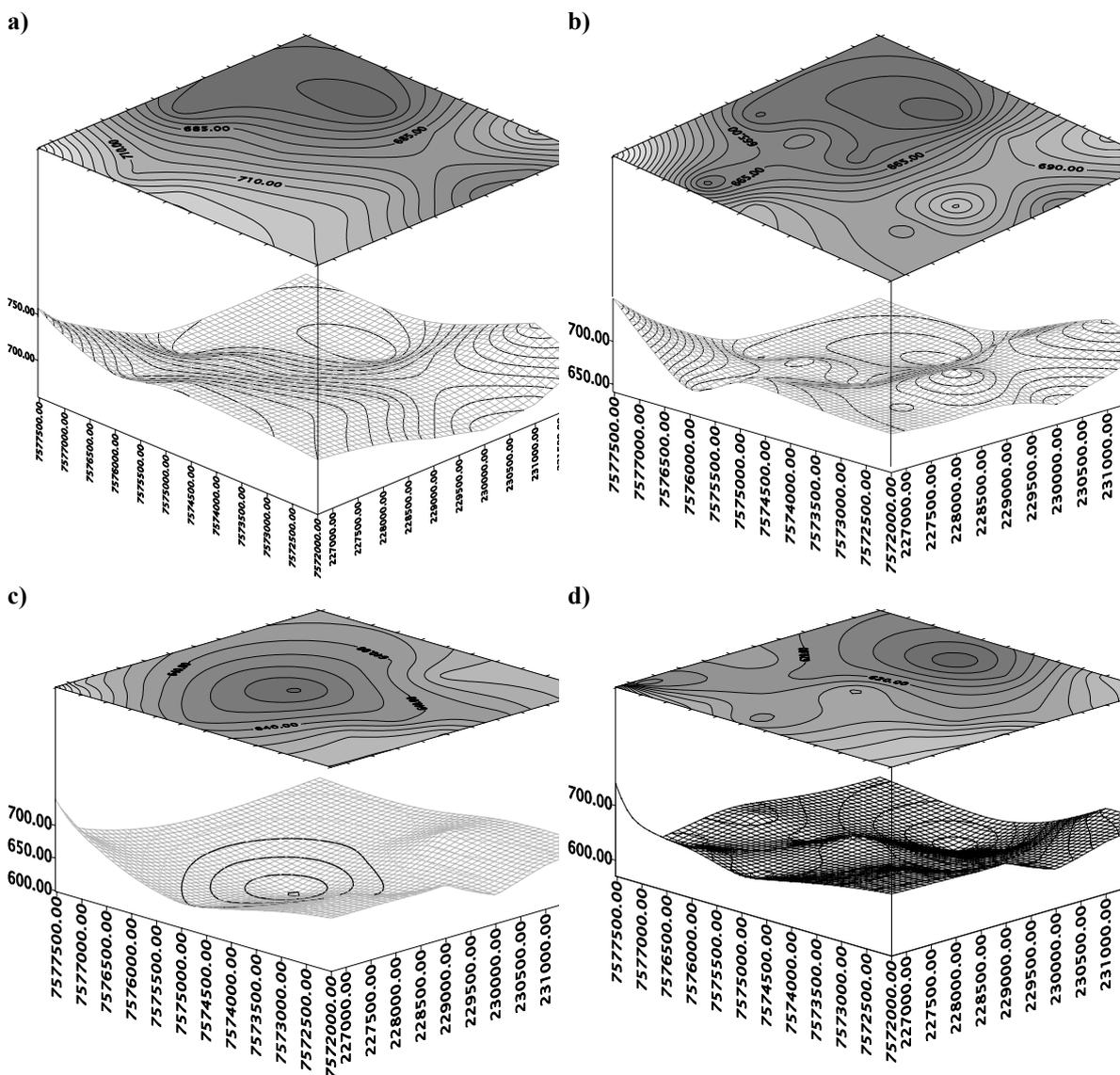


Figura 7. Representação tridimensional das superfícies – (a) topográfica, (b) Formação Santa Rita do Passa Quatro, (c) arenito: Formações Botucatu e Pirambóia, (d) Formação Serra Geral.

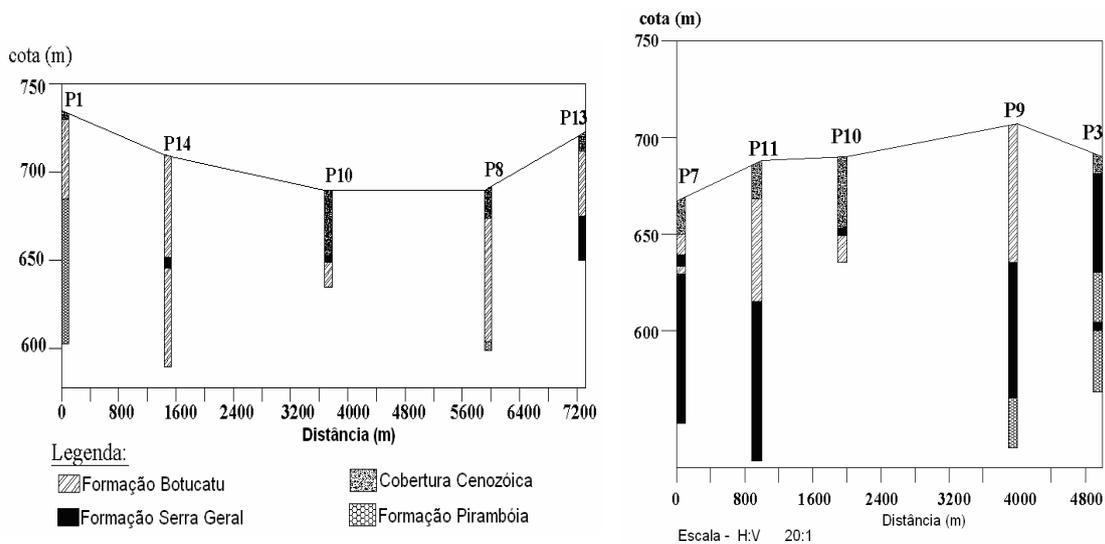


Figura 8. Perfis dos poços profundos mostrando a intercalação das formações geológicas na área piloto adotada.

6. CONCLUSÕES

A avaliação do potencial de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação constitui-se em uma abordagem que analisa um dos aspectos de maior importância para o planejamento e uso do solo, servindo para orientar de forma adequada a instalação de obras de engenharia que possam causar significativa alteração na qualidade dos mananciais subterrâneos, como por exemplo os aterros sanitários.

A abordagem metodológica utilizada no presente trabalho permitiu realizar diferentes avaliações da área de estudo, possibilitando correlacionar informações sobre a vulnerabilidade de aquíferos com outras potencialidades do meio físico que podem vir a ser de grande importância para a gestão ambiental.

As áreas mais vulneráveis do município são aquelas onde a Formação Santa Rita do Passa Quatro encontra-se sobreposta às Formações Botucatu e Pirambóia, ambas pertencentes ao aquífero Guarani.

Os resultados revelam ainda a importância da espessura do basalto (Formação Serra Geral) e a textura dos materiais inconsolidados no condicionamento da relação entre o escoamento superficial e infiltração de cargas poluidoras, e conseqüentemente na vulnerabilidade do aquífero.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Brollo, M. J.(2000). Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação através de um sistema gerenciador de informações geoambientais – Um instrumento de gestão ambiental. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental,VI, Porto Alegre, 049, pp. 1-17.

- [2] Menezes, D. B. (1995). Diagnóstico dos impactos do depósito de resíduos sólidos de São Carlos – SP, no meio físico. (Dissertação de Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 160p.
- [3] Santos Filho, M. G. S. (2001): O impacto na qualidade das águas subterrâneas gerado pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos no município de Tatuí-SP. (Dissertação de Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 165p.
- [4] Bahia, V.E.; Luiz, J.G.; Fenzl, N. (2004). Influência do depósito sanitário metropolitano de Belém (Aura) sobre as águas subterrâneas da área. Revista Águas Subterrâneas, ABAS, n.18, pp. 89-101.
- [5] Campos, H. C. S (1998). Applied groundwater modeling in the Botucatu aquifer system, Brazil. 8th International IAEG Congress, IV - , Vancouver , Canadá, vol. 4, pp. 2359 – 2366.
- [6] Rebouças, A.C. (1976). Recursos hídricos da Bacia do Paraná. São Paulo (SP). Tese (Livre Docência). 143p., 2 mapas. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.
- [7] Araújo, L.M.; França, A.B.; Potter, P.E. (1995). Giant Mercosul aquifer of Brazil, Argentina, Uruguay and Paraguay: hydrogeologic maps of Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones and Tucarembó formations. Curitiba, UFPR/PETROBRÁS. 16p. and 8 maps.
- [8] SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente. – SMA. Secretaria da Agricultura e Abastecimento - SAA. Secretaria de Economia e Planejamento – SEPLAN. Macrozoneamento da bacia dos rios Mogi- Guaçu, Pardo e Médio Grande: questões socioambientais e regionais. São Paulo: SMA, 1995. 2v.
- [9] Cançado, C. J.; Lorandi, R.; Feres, R.; Torresan, F. E.; Moraes, M.E.B. (2002). Adequabilidade dos terrenos da bacia do rio Bonito (Brasil) para implantação de aterros sanitários. 8th Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa, Portugal, vol. 3, pp. 1809 - 1818.
- [10] Oliveira, J. B.; Prado, H. (1984). Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos. II Memorial Descritivo. Campinas: IAC.188p. il., (Boletim Técnico, 98).
- [11] São Paulo (Estado). Universidade de São Paulo/Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Fundação de Amparo Pesquisa no Estado de São Paulo. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1997. 64 p. 1 mapa color. 79 cm x 95 cm. Escala 1:500.000. Por (Jurandir Luciano Sanches e Isabel Cristina Moroz (coords.).
- [12] Castro, D. M., (1998). Estudo do potencial à erosão acelerada das áreas urbana e de expansão do Município de Descalvado (SP), escala 1:10000, V.1, São Carlos. (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 150p.
- [13] Lorandi, R., Coelho, F. T., Barbosa, M. F., Quevedo, M., Passarelli, G. M., Muzetti, S., Feres, R. (1999). Regional evaluation of the erosion aspects on weathered material in tropical areas (Brazil). Civil and Environmental Engineering Conference: New Frontiers & Challenges, Bangkok-Tailândia. Proceedings of the Civil and Environmental Conference: New Frontiers & Challenges. Bangkok - Tailândia: Asian Institute of Technology, 1999. v.2. p.11 – 17.

- [14] Torezan (2000). Análise ambiental da bacia do rio Bonito (Descalvado,SP) com ênfase nas atividades de exploração mineral de areia. Dissertação de Mestrado, PPGERN/UFSCar, São Carlos, 2v., 162 p.
- [15] Torresan, F. E. *et al.* (2002). Potencial surface runoff and infiltration rates chart of the rio Bonito river basin (Brazil) as subsidy to the selection of adequate sites for installation of sanitary landfills. 8th International congress, Durban (South Africa).
- [16] Feres, R.. (2002). Análise de processos de erosão acelerada, com base em fotografias aéreas e geoprocessamento: Bacia do Rio Bonito (Descalvado - SP). (Tese de Doutorado), Departamento de Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 142p.
- [17] Neves, F.F., Silva; F.G.B., Crestana, S., Lorandi, R. (2005). A erosão na bacia do rio Bonito (Descalvado-SP) como fator potencializador da poluição por dejetos de granjas. In: Evaldo Luiz Gaeta Espindola & Edson Wendland (Orgs). Trajetórias e perspectivas de um curso multidisciplinar. São Carlos: PPG-SEA, v.4, p. 293-308. (Série: Ciências da Engenharia Ambiental).
- [18] Moreira, M. A. A., (2002). Aplicação de técnicas de geoprocessamento para seleção de áreas para disposição de resíduos sólidos em aterro sanitário no município de Descalvado (SP). (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 144p.
- [19] Pejon, O. J. (1992). Mapeamento geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. (Tese Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2v, 224p.
- [20] São Paulo (Estado). Instituto Geológico (1984). Formações Geológicas de Superfície (folha SF-23-V-C-IV-4/Descalvado). São Paulo. Escala 1:50.000. 1 mapa.
- [21] EASTMAN, J. R. IDRISI 32: guide to GIS and image processing. Clark Labs. Worcester: Clark University, 1999. 193 p.
- [22] Surfer 7.0. (1999). User's guide. Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers. Golden Software, Inc.