

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM UM ATERRO SANITÁRIO NA AMAZÔNIA OCIDENTAL: ESTUDO DE CASO DE ARIQUEMES, RONDÔNIA

Homero Reis de Melo Junior¹; Glauco Rodrigo Kozersky²

RESUMO - O presente artigo apresenta os estudos hidrogeológicos realizados na fase anterior à implantação do aterro sanitário municipal de Ariquemes, Estado de Rondônia. Os principais parâmetros hidrogeológicos avaliados foram a condutividade hidráulica dos sedimentos na zona vadosa, o sentido do fluxo das águas subterrâneas, a análise granulométrica dos sedimentos, além do mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre. A condutividade hidráulica se apresentou na ordem de 10^{-4} cm/s para os sedimentos constituídos por argila com algum teor de areia fina e seixos compostos por concreções de óxido-hidróxido de ferro. O sentido do fluxo subterrâneo, calculado a partir de quatro poços de monitoramento, se dá de sul para norte, acompanhando a topografia local. A vulnerabilidade natural das águas subterrâneas locais, avaliadas através do método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) apresentou valores altos, com índices entre 105 e 146.

ABSTRACT – The present research concerns a hydrogeologic assessment performed in an early phase to landfill settlement in Ariquemes municipality, Rondônia Estate. The main hydrogeologic parameters evaluated were hydraulic conductivity of vadose zone, groundwater flow, sediments granulometric classification and natural vulnerability index in unconfined aquifer. The hydraulic conductivity presented 10^{-4} cm/s values for clayey sediments with fine sand and oxi-hydroxide iron concretions. The flow sense follows from south to north parts from landfill according to topographic conditions. The groundwater natural vulnerability achieved throughout DRASTIC index (Aller *et al.*, 1987) presented high values, reaching values from 105 to 146.

Palavras-Chave – Águas subterrâneas, aterro sanitário, vulnerabilidade.

1 CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Av. Lauro Sodré 2561 CEP: 78904-300 Porto Velho (RO). Fone: 69 3901-3700 homero@pv.cprm.gov.br

2 Secretaria Municipal de Agricultura, Desenvolvimento Econômico e Ambiental de Ariquemes Av. Tancredo Neves 2230. CEP: 78931-970. Ariquemes (RO) Fone: 69 3535-3849 glauco_ufms@hotmail.com

1. Introdução

Na região amazônica, na maior bacia hidrográfica do mundo, a consciência da maioria da população em relação à preservação dos recursos hídricos praticamente inexistente, uma vez que, a presença de rios de grande porte, assim como seus infinitos igarapés somados aos excelentes aquíferos subterrâneos mascaram a questão da disponibilidade hídrica e da qualidade de suas águas. No entanto, a falta de saneamento básico, o vazamento de tanques de abastecimento subterrâneo de combustíveis, a existência de lixões, a atividade industrial, a impermeabilização da superfície do terreno dentre inúmeras outras atividades antrópicas comprometem enormemente os fatores quantidade/qualidade das águas subterrâneas, assim como nas demais regiões do planeta.

Considerada um dos setores do saneamento básico, a gestão dos resíduos sólidos, historicamente, não tem merecido a atenção necessária por parte do poder público em nosso país. Com isso, compromete-se cada vez mais a já combalida saúde da população, bem como se degradam os recursos naturais, especialmente o solo e os recursos hídricos. A interdependência dos conceitos de meio ambiente, saúde e saneamento é hoje bastante evidente; fato este que reforça a necessidade de integração das ações desses setores em prol da melhoria da qualidade de vida da população brasileira.

Como um retrato desse universo de ação, há de se considerar que mais de 70% dos municípios brasileiros possuem menos de 20 mil habitantes, e que a concentração urbana da população no país ultrapassa a casa dos 80%. Isso reforça as preocupações com os problemas ambientais urbanos e, entre estes, o gerenciamento dos resíduos sólidos, cuja atribuição pertence à esfera da administração pública local (Monteiro *et al.* 2004).

Considerando-se estes fatores, os resíduos sólidos nos centros urbanos se tornaram um tema bastante polêmico gerando diversos focos de discussão; onde se destacam, principalmente, as questões ambientais, sociais e de geração de fonte de renda para populações de baixa renda, que vivem à periferia dos lixões. Inserido neste contexto, o município de Ariquemes vem se destacando no Estado de Rondônia pela efetivação de trabalhos técnicos que objetivam a extinção do atual lixão municipal; superando a outros municípios que, apesar de terem iniciado estudos de seleção de áreas para implantação de aterros sanitários anteriormente a Ariquemes, ainda não conseguiram atingir este propósito. Neste município, as diversas etapas necessárias para a implantação deste empreendimento vêm sendo realizadas de forma eficaz, tais como: seleção de área tecnicamente apropriada para implantação de aterro, elaboração de Plano de Controle Ambiental – PCA (Kozersky e

Melo Junior, 2007), obtenção de Licença Ambiental junto ao órgão estadual responsável, sendo prosseguido pela realização de estudos hidrogeológicos detalhados da área selecionada acompanhado do início das obras do aterro propriamente dito.

Desta forma, o presente trabalho apresenta os estudos realizados na área do aterro sanitário municipal de Ariquemes, que compreende uma área de 143.548 m², onde foram avaliadas as características hidrogeológicas locais, como condutividade hidráulica (K) da zona não saturada, classificação granulométrica dos sedimentos, determinação do sentido do fluxo subterrâneo; além de se mapear a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no aquífero livre.

2. Área de Trabalho

A área onde se desenvolveu o presente estudo se localiza no município de Ariquemes, porção centro norte do Estado de Rondônia, na Amazônia Ocidental. O aterro sanitário é situado em uma estrada vicinal nas proximidades da Rodovia RO-257, sentido Machadinho D'Oeste, sob as coordenadas UTM 500538 W e 8901693 S (Figura 1).

3. Geologia Local

Na área onde se localiza o aterro sanitário de Ariquemes predominam os litotipos da Suíte Intrusiva Rio Crespo (Payolla *et al.*, 2002), que reúnem os gnaisses graníticos e granulitos charnockíticos, descritos, principalmente, a sul da zona urbana do município (Figura 2). Posteriormente, Rizzotto *et al.* (2003, 2004a) ampliam a área de ocorrência da unidade como resultado do mapeamento na região centro-oeste de Rondônia. A suíte compõe um corpo alongado segundo E-W que se estende desde a confluência dos rios Branco e Pardo à oeste, até próximo da cidade de Ariquemes, onde inflete para NE. Localmente ocorrem diques máficos (anfíbolitos) estirados e boudinados ao longo da trama metamórfica regional, com paragênese da transição da fácies anfíbolito superior a granulito. Xenólitos de metacharnockito e granulitos máficos ocorrem esparsamente.

Predominam gnaisses quartzofeldspáticos, rosados a esverdeados, finos a médios, compostos por bandas leucocráticas quartzo-feldspáticas alternadas com bandas compostas de

hornblenda, magnetita, granada e titanita. Os granulitos charnockíticos são menos freqüentes e ocorrem em lentes de contatos transicionais com os gnaisses quartzo-feldspáticos.

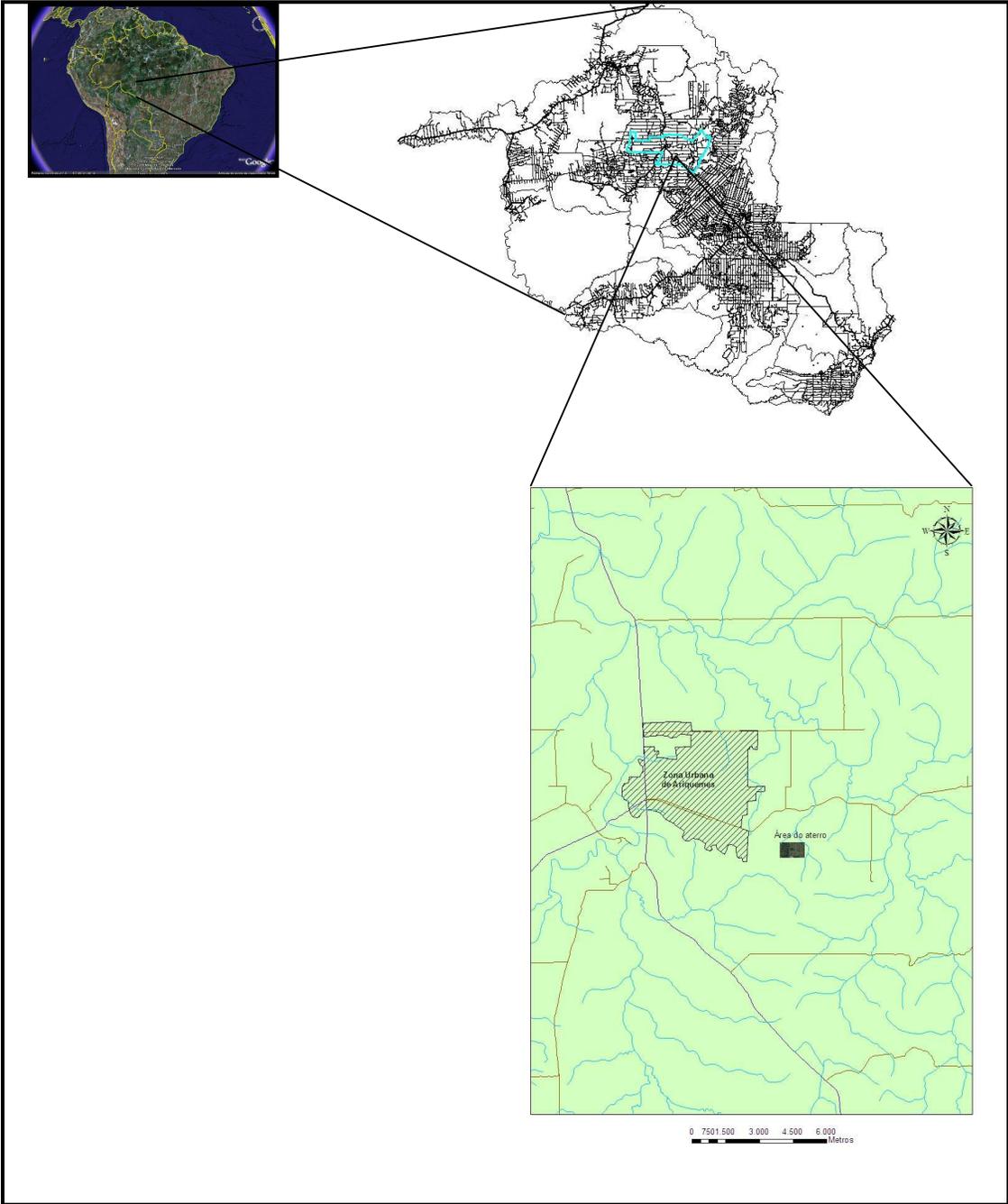


Figura 1 – Localização da área de trabalho.

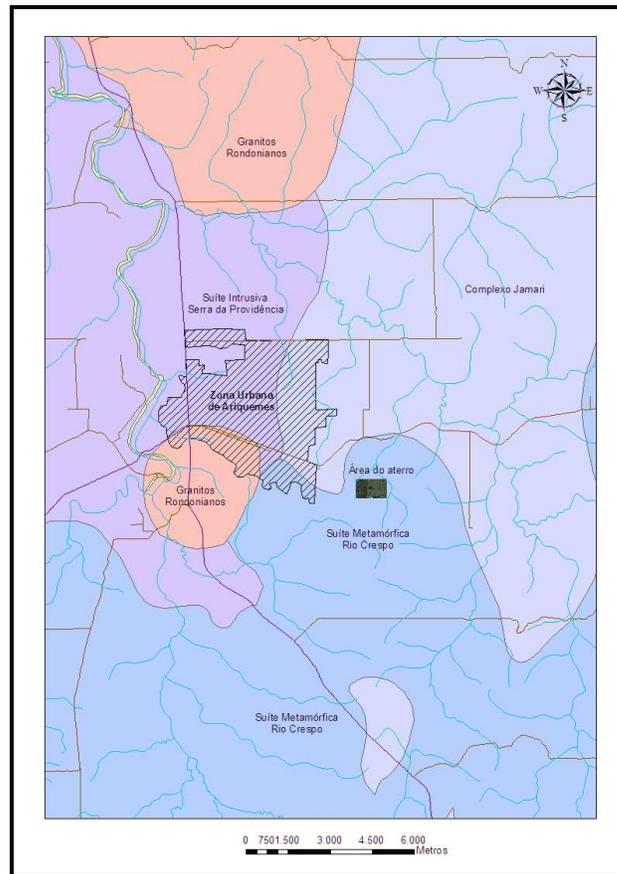


Figura 2 – Mapa geológico local (Rizzoto *et al.*, 2004a).

4. Hidrogeologia Local

As águas subterrâneas em Ariquemes ocorrem, principalmente, no manto de intemperismo das unidades geológicas locais (Granitos Rondonianos, Suíte Metamórfica Rio Crespo, Suíte Intrusiva Serra da Providência e complexo Jamari) na forma de aquíferos livres, sendo exploradas através de poços amazonas, a profundidades que podem chegar até vinte metros nas cotas topográficas mais elevadas. Existem ainda sistemas de juntas e fraturas a profundidades superiores a setenta metros, responsáveis pelo abastecimento de poços tubulares profundos através do aquífero fissural. O aquífero livre se encontra bastante comprometido em relação à qualidade das águas, uma vez que, sistemas de coleta de esgoto inexistem em Ariquemes. Desta forma, de acordo com Campos e Reis (2002) há uma extensa contaminação das águas subterrâneas, em relação a nitrato, cloreto e coliformes termotolerantes, principalmente, nas regiões com maior densidade populacional.

5. Resultados e Discussões

Sondagens e Testes de Infiltração

Foram realizadas vinte e uma sondagens com trado mecânico na área do aterro sanitário municipal de Ariquemes (Figura 3), com o objetivo de realizar seis testes de infiltração para determinação da permeabilidade dos sedimentos (Figura 4), identificar a granulometria predominante dos sedimentos existentes até cinco metros de profundidade, além de utilizar estes dados para o mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre local. A disposição das sondagens na área do aterro sanitário está ilustrada na figura 5.



Figura 3 - Realização de sondagem a trado para coleta de sedimentos.



Figura 4 – Medição do nível da água para determinação da permeabilidade (K) dos sedimentos constituintes da zona não saturada.

Os testes de infiltração seguiram a metodologia adotada pela ABGE (1996) para ensaios de rebaixamento e os valores da condutividade hidráulica variaram entre $8,99 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,38 \times 10^{-4}$ cm/s ou 0,078 m/dia e 0,292 m/dia nas sondagens HJ-01 e HJ-07, respectivamente, conforme apresentado nas figuras 6 e 7. Estes valores de condutividade hidráulica, de acordo com Fetter (2001), correspondem a silte arenoso, areia fina, silte, areia siltica e argila arenosa; e, através da análise granulométrica realizada, foram classificados como argila com pouca areia fina e seixos.



Figura 5 – Localização das 21 sondagens realizadas na área do aterro sanitário municipal de Ariquemes (Fonte: *Google Earth*, 2007).

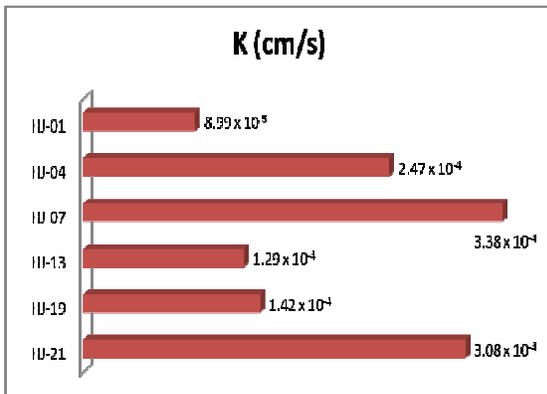


Figura 6 – Valores da condutividade hidráulica (K) da zona não saturada expressos em cm/s.

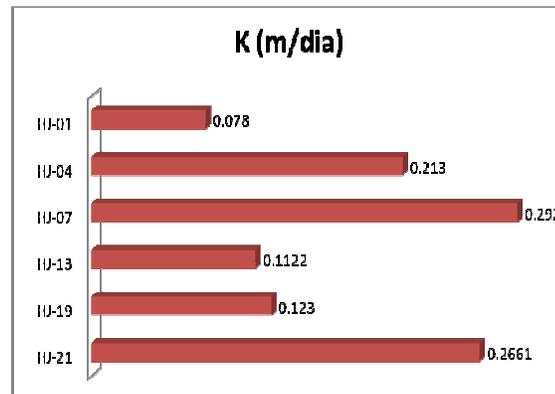


Figura 7 – Valores da condutividade hidráulica (K) da zona não saturada expressos em m/dia.

Análise Granulométrica

As amostras de sedimentos coletadas a cada metro, durante as sondagens efetuadas no aterro sanitário municipal de Ariquemes, foram analisadas no Laboratório de Geologia da

CPRM – Serviço Geológico do Brasil, em Porto Velho, através da Norma NBR7181 da ABNT (1984) para análise granulométrica de solos, a qual estabelece os intervalos em milímetros para as classes argila, silte, areia e pedregulho (seixo). Através de uma análise estatística mais detalhada, foram obtidos os teores médios de cada classe granulométrica analisada nas vinte e uma sondagens realizadas. A tabela 1, apresenta desta forma, os valores médios de cada tipo de sedimento e em sua linha final o teor médio obtido para seixo, areia, silte e argila.

De acordo com os dados apresentados pela tabela 1 e ilustrado na figura 8, em média, há uma grande predominância de sedimentos argilosos em relação às demais classes granulométricas investigadas; sendo que, estes compõem cerca de 60% do total analisado, contra 28% de areia, 11% de concreções de óxido-hidróxido de ferro, correspondente a granulometria seixo, e, apenas 0,13% de silte.

Tabela 1 – Valores médios obtidos por análise estatística das quatro classes granulométricas investigadas no presente estudo, para cada sondagem realizada.

Sondagem	UTM N	UTM E	% em Peso Médio			
			Seixo	Areia	Silte	Argila
HJ - 01	8901984	500598	0.3	21.8	0.1	77.8
HJ - 02	8901974	500668	6	28.02	0.22	65.8
HJ - 03	8901976	500515	14.94	27.44	0.14	57.48
HJ - 04	8901982	500430	56.2	10.7	0.2	32.9
HJ - 05	8901898	500546	9	25.68	0.12	65.4
HJ - 06	8901896	500513	9.04	24.44	0.1	66.42
HJ - 07	8901954	500527	15.65	29.65	0.1	54.6
HJ - 08	8901824	500658	15.85	31.52	0.2	52.42
HJ - 09	8901688	500668	5.05	28.47	0.125	66.35
HJ - 10	8901564	500661	5.88	29.16	0.14	64.82
HJ - 11	8901450	500658	7.6	31.46	0.2	62.36
HJ - 12	8901394	500580	9.32	29.72	0.12	46.8
HJ - 13	8901400	500484	21.2	34.2	0.1	44.5
HJ - 14	8901480	500482	11.46	33.88	0.1	54.56
HJ - 15	8901520	500527	19.78	28.78	0.1	51.34
HJ - 16	8901642	500602	4.9	26.8	0.1	68.2
HJ - 17	8901784	500589	17.38	20.64	0.1	61.88
HJ - 18	8901480	500392	2.34	33.94	0.1	63.62
HJ - 19	8901608	500409	2.95	33.7	0.1	63.25
HJ - 20	8901754	500410	3.02	37.42	0.1	59.46
HJ - 21	8901866	500409	0.45	38.6	0.1	60.85
Média			11.35	28.86	0.13	59.09

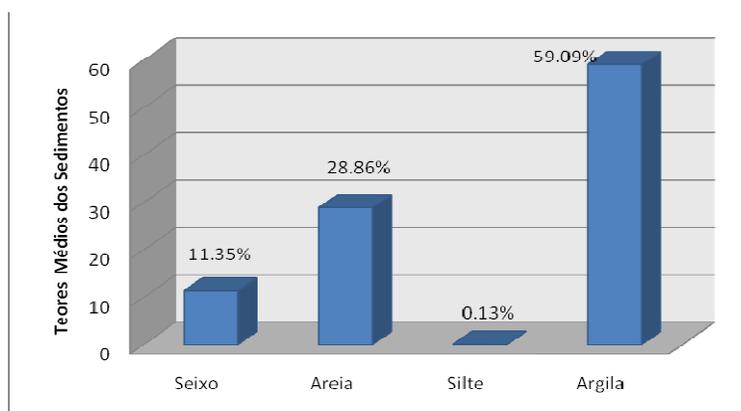


Figura 8 – Teores médios obtidos através de análise granulométrica dos tipos de sedimentos identificados na área de estudo.

Mapa Piezométrico

A determinação do sentido do fluxo das águas subterrâneas corresponde a um dos parâmetros mais importantes para a avaliação de contaminação de aquíferos e para o monitoramento apropriado das águas subterrâneas, principalmente, em uma área onde a atividade exercida compreende risco elevado para os recursos naturais.

Na área do aterro sanitário de Ariquemes existem instalados quatro poços de monitoramento, com previsão de serem implantados mais quatro; no entanto, através do método de triangulação com apenas três poços se torna possível determinar o sentido do fluxo subterrâneo. Neste estudo se utilizou o software Surfer 8 para elaboração do mapa piezométrico. A tabela 2 apresenta os parâmetros investigados para determinar o sentido do fluxo subterrâneo e as respectivas coordenadas dos piezômetros.

Tabela 2 – Parâmetros investigados para determinar a piezometria na área do aterro sanitário de Ariquemes e respectivas coordenadas dos poços de monitoramento.

Poço	UTM E	UTM N	Cota Topográfica (m)	Nível Estático (m)	Nível Piezométrico (m)
PM-01	500430	8901960	155	14,5	140,5
PM-02	500537	8901844	159,5	13,12	146,38
PM-04	500660	8901953	153	12,67	140,33
PM-08	500460	8901398	168,5	12,47	156,03

O efeito da piezometria se dá dos pontos com maior potencial para os pontos com menor potencial piezométrico; sendo que, este parâmetro é obtido subtraindo-se do valor da cota topográfica de cada poço de monitoramento instalado, o valor do nível estático, ambos em metros. O mapa da figura 9 ilustra o sentido do fluxo subterrâneo na área investigada,

onde se observa que a piezometria acompanha as cotas topográficas do aterro sanitário, ou seja, os pontos com maior potencial se encontram na porção sul do aterro e os de menor potencial, na porção norte do mesmo, sendo este o sentido principal do fluxo subterrâneo.

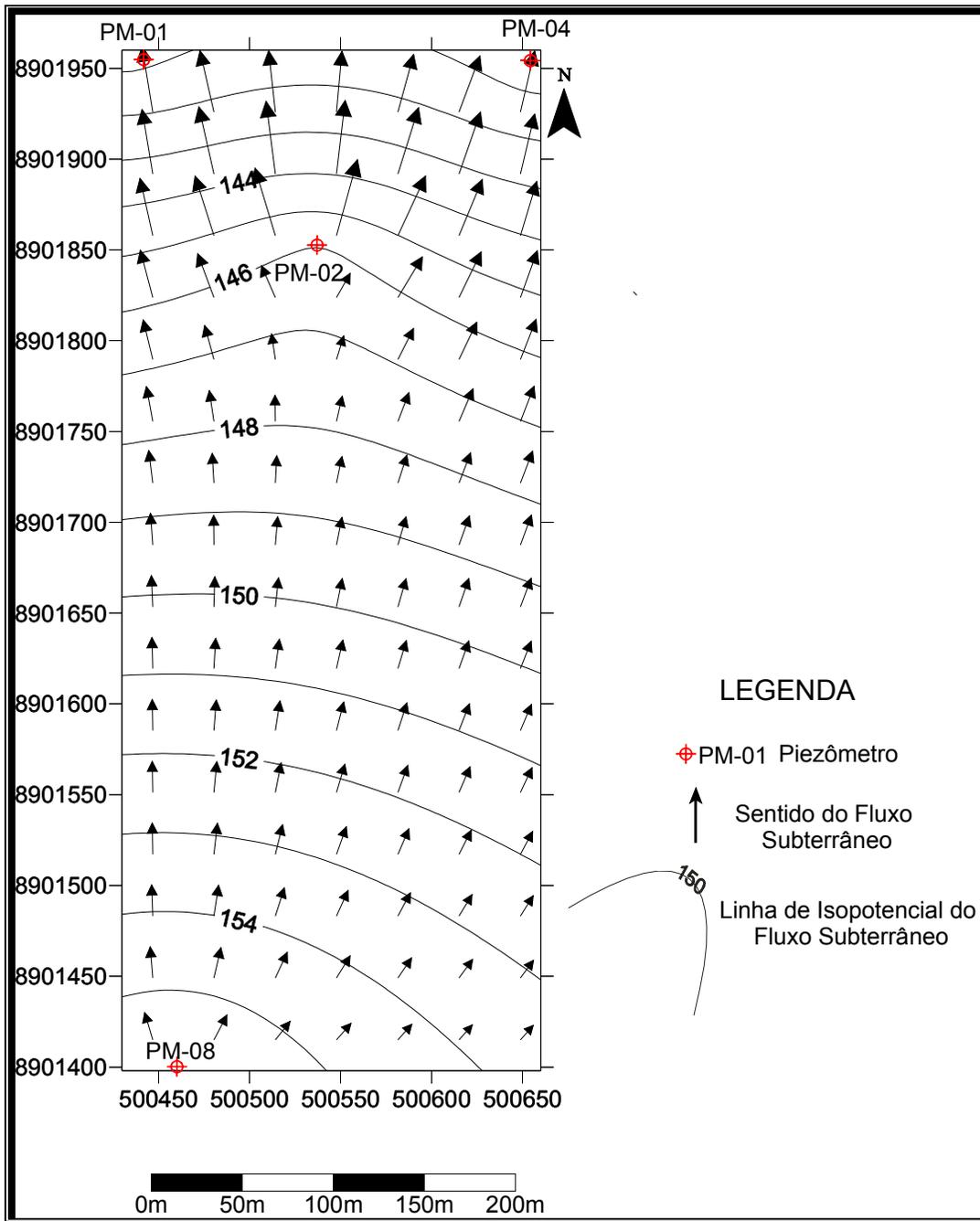


Figura 9 – Mapa piezométrico da área do aterro sanitário, ilustrando o sentido do fluxo subterrâneo.

Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas

Mapas de vulnerabilidade aplicados a uma área reduzida como se apresenta o aterro sanitário municipal de Ariquemes tem como principal aplicação verificar se a área escolhida

para o tipo de empreendimento é razoavelmente adequada e, se os recursos hídricos subterrâneos se encontram naturalmente protegidos desta atividade de risco. O método utilizado na área estudada foi o modelo DRASTIC desenvolvido por Aller *et al.* (1987), sendo que, o mapa foi produzido através do método estatístico da *krigagem* se utilizando o *software* Surfer 8. Os índices obtidos para cada parâmetro DRASTIC se encontram na tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros DRASTIC identificados e seus índices finais de vulnerabilidade.

Sondagem	D (Profundidade do nível estático- m)	R (Recarga - mm/ano)	A (Meio aquífero)	S (solo)	T (Topografia - %)	I (Impacto da zona vadosa)	C (Condutividade hidráulica - m/dia)	Índices Finais DRASTIC
HJ 01	25	40	6	2	9	20	3	105
HJ 02	25	40	6	2	9	30	3	115
HJ 03	25	40	6	2	9	30	3	115
HJ 04	25	40	6	2	9	30	3	115
HJ 05	25	40	9	2	9	30	3	118
HJ 06	25	40	9	6	9	40	3	132
HJ 07	25	40	12	2	9	30	3	121
HJ 08	25	40	15	6	9	40	3	138
HJ 09	25	40	9	2	9	35	3	123
HJ 10	25	40	9	2	9	30	3	118
HJ 11	25	40	12	2	9	35	3	126
HJ 12	25	40	15	2	9	35	3	129
HJ 13	25	40	12	6	9	40	3	135
HJ 14	25	40	12	14	9	40	3	143
HJ 15	25	40	15	14	9	40	3	146
HJ 16	25	40	15	2	9	30	3	124
HJ 17	25	40	15	2	9	35	3	129
HJ 18	25	40	15	14	9	40	3	146
HJ 19	25	40	9	2	9	35	3	123
HJ 20	25	40	15	6	9	40	3	138
HJ 21	25	40	12	6	9	40	3	135
PM-01	25	40	12	14	9	40	3	143
PM-02	25	40	12	14	9	40	3	143
PM-04	25	40	9	14	9	40	3	140
PM-08	25	40	9	14	9	40	3	140

De acordo com Stigter *et al.* (2006), os índices finais DRASTIC podem variar entre 26 (vulnerabilidade nula) e 226 (altíssima vulnerabilidade), sendo que, no caso em estudo foram obtidos valores para o índice DRASTIC entre 105 e 146. Estes valores correspondem a 46% e 64%, respectivamente, do ranking de altíssima vulnerabilidade estabelecido pelo método.

Portanto, pode se considerar que, os valores identificados para a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas no aterro sanitário municipal de Ariquemes são altos, de acordo com a escala definida por Melo Junior (2008) para índices de vulnerabilidade DRASTIC. Estes valores elevados se dão em função, principalmente, dos teores de areia e seixo (concreções de óxido-hidróxido de ferro) identificados no parâmetro “I” (Impacto da zona vadosa) e do parâmetro “T” (topografia), cujo baixo gradiente se torna um fator facilitador para a infiltração de água no solo. O mapa da figura 10 apresenta os índices finais DRASTIC para a área avaliada neste estudo.

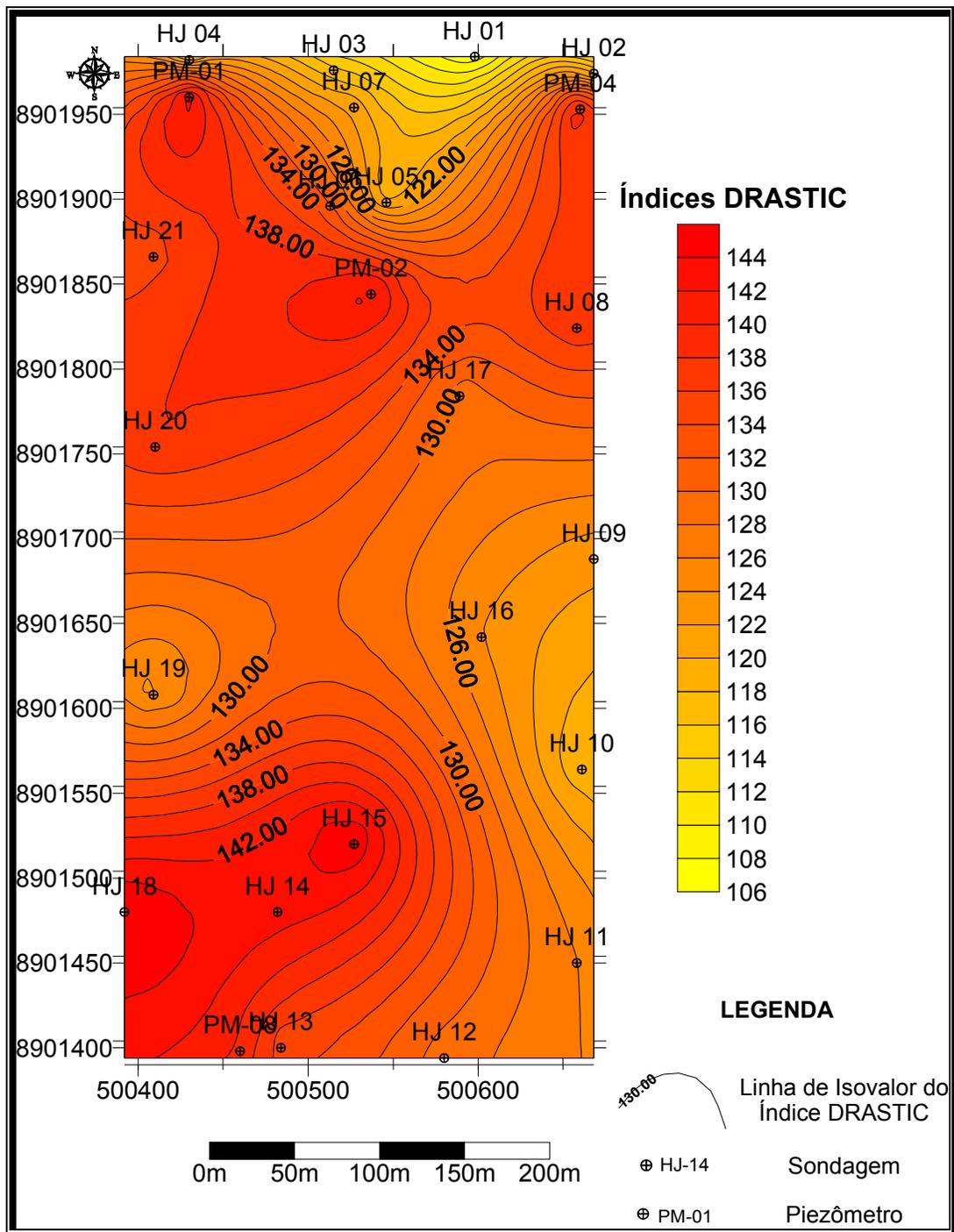


Figura 9 – Mapa com os Índices Finais DRASTIC na área do aterro sanitário municipal de Ariquemes.

6. Conclusões

O estudo hidrogeológico realizado na área do futuro aterro sanitário municipal de Ariquemes, região centro norte do Estado de Rondônia, mostrou que, os sedimentos

constituintes da zona não saturada são predominantemente argilosos com algum teor de areia e seixo, cujos valores da condutividade hidráulica se apresentam no intervalo de 10^{-4} cm/s. O sentido do fluxo subterrâneo ocorre de sul para norte na área do aterro, acompanhando a topografia local.

O mapa de vulnerabilidade das águas subterrâneas, produzido através do método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987), apresentou valores entre 105 e 146 do índice DRASTIC, considerados altos, de acordo com a proposta de Melo Junior (2008); no entanto, verificou-se que, estes valores se devem, principalmente, à topografia relativamente plana de uma área com dimensões restritas e à presença de areia e concreções de óxido-hidróxido de ferro nas camadas mais superficiais da área estudada. Entretanto, de acordo com Orlandi *et al.* (2002), a área selecionada para o aterro de Ariquemes foi a que melhor se adequou à Norma NBR 10.157 da ABNT (*apud* Monteiro *et al.*, 2004) dentre as disponíveis no município e, segundo Melo Junior e Rocha (2008) a grande quantidade de argila existente na área do aterro sanitário, que será utilizada para a impermeabilização das células de disposição de resíduos sólidos quando compactada, tenderá a diminuir a permeabilidade dos sedimentos constituintes da zona vadosa, podendo atingir índices de 10^{-5} cm/s a 10^{-6} cm/s; sendo que, desta forma, as águas subterrâneas também estarão mais protegidas. Deve se considerar que estas medidas serão corretamente adotadas para que, este recurso natural tão importante seja preservado e, que, a população de Ariquemes não sofra as conseqüências da contaminação das águas subterrâneas por chorume como ocorre em inúmeros municípios de nosso país.

7. Referência Bibliográfica

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). 1996. Ensaio de permeabilidade em solos. Boletim 04. 226p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). 1984. Norma NBR7181 para análise granulométrica de solos. 13p.

ALLER, L., BENNET, T., LEHER J. H., PETTY R. J., HACKETT G. 1987. DRASTIC: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeological settings. EPA 600/2-87-035; 1987. 622p.

CAMPOS, J. C. V. & REIS, M. R. 2002. Subprograma de Apoio ao Desenvolvimento dos Municípios da Amazônia – ADEMA. Município de Ariquemes. Recursos Hídricos. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Residência de Porto Velho. 40p.

FETTER, C. W. 2001. Applied Hydrogeology. 2. ed. Prentice-Hall Inc. Upper Saddle River, New Jersey. 598p.

KOZERSKY, G.R. & MELO JUNIOR, H.R. 2007. Plano de Controle Ambiental (PCA) do Aterro Sanitário Municipal de Ariquemes. Prefeitura Municipal de Ariquemes / Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 178p.

MELO JUNIOR, H. R. & ROCHA, J. M. A. C. 2008. Avaliação hidrogeológica do aterro sanitário municipal de Ariquemes – RO. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, Residência de Porto Velho / Prefeitura Municipal de Ariquemes. Relatório Técnico Final. 53 p.

MONTEIRO, J. H.P et al. 2004. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro. IBAM. 193p.

PAYOLLA, B.L.; BETTENCOURT, J.S.; KOZUCH, M.; LEITE Jr., W.B. FETTER, A.; VAN SCHMUS, W.R. Geological evolution of the basement rocks in the east-central part of the Rondônia Tin Province, SW Amazonian Cráton, Brazil: U-Pb and Sm-Nd isotopic constraints. Precambrian Research, v. 119, p.141-169, 2002.

RIZZOTTO, G. J.; QUADROS, M. L. do E. S. Geologia da folha Juruena SC.21. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DO CENTRO OESTE, 8, 2003, Cuiabá. Boletim de Resumos. Cuiabá: SBG-Núcleo Centro-Oeste, 2003. 211p. p.116-117.

RIZZOTTO, G. J.; QUADROS, M. L. do E. S.; BAHIA, R. B. C.; CORDEIRO, A. V. Folha SC.20-Porto Velho. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S.; ABRAM, M. B.; LEÃO NETO, R.; MATOS, G. M. M.; VIDOTTI, R. M.; RAMOS, M. A. B.; JESUS, J. D. A. de (Eds.). Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. Brasília: CPRM, 2004a. 1 CD-Rom.

STIGTER, T. Y.; RIBEIRO, L. & CARVALHO DILL, A. M. M. 2006. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. Hydrogeology Journal, Volume 14, número 1-2.

ORLANDI F.O, V.; ADAMY, A. & WANDERLEY, V. J. R. Subprograma de Apoio ao Desenvolvimento dos Municípios da Amazônia - ADEMA. Município de Ariquemes, Estado de Rondônia. Seleção de Áreas para a Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. Série ADEMA, vol. 6. Porto Velho, CPRM, 2002.