

Aplicação dos Métodos Drastic e Posh para a Determinação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis-MT

Alterêdo Oliveira Cutrim

Universidade Federal do Mato Grosso - UFMT
alteredo@ufmt.br

José Eloi Guimarães Campos

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília - IG/UnB
eloi@unb.br

Recebido: 24/09/09 - revisado: 24/03/10 - aceito: 19/04/10

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada na cidade de Rondonópolis, estado de Mato Grosso e consiste da avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas. A vulnerabilidade foi avaliada através do método DRASTIC que permitiu identificar as classes desprezível, moderada e alta. A vulnerabilidade desprezível corresponde a 44% da área, a moderada a 35% e a alta a 21%. Nas áreas de ocorrência da classe desprezível somente poços tubulares mal construídos e falhamentos nas camadas confinantes podem facilitar a contaminação da zona saturada do aquífero, enquanto que a vulnerabilidade moderada indica que alguns contaminantes podem chegar na zona saturada do aquífero, quando lançados continuamente, e nas áreas de vulnerabilidade alta o aquífero pode ser contaminado por muitos contaminantes, exceto aqueles fortemente absorvidos. As fontes potenciais de contaminação foram classificadas através do método POSH, segundo a geração de cargas: elevada (fonte linear de contaminação), moderada (postos de distribuição de combustíveis) e reduzida (cemitério e lagoas de tratamento de esgoto industrial). O perigo à contaminação decorrente destas fontes é função das classes de vulnerabilidade.

Palavras-chave: DRASTIC, POSH, Aquífero Furnas, vulnerabilidade e perigo à contaminação.

INTRODUÇÃO

Um dos problemas ambientais que tem preocupado muitos pesquisadores e órgãos gestores é a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente nas cidades, tendo em vista que essas águas em muitas partes do mundo são a única ou a principal fonte de abastecimento, se tornando assim, um bem econômico, social, estratégico e indispensável para o desenvolvimento urbano sustentável. Desse modo, esses recursos hídricos devem ser protegidos e preservados para continuarem cumprindo as suas funções essenciais da vida, no entanto, a oferta de água subterrânea vem sofrendo contínua redução em função da sua acelerada degradação, decorrente da implantação progressiva de atividades incompatíveis com os limites da capacidade de depuração dos mananciais.

Esse cenário é igual na cidade de Rondonópolis, com uma população de aproximadamente 150.000 habitantes, caracterizada por um vertiginoso crescimento a partir de 1980, e em franca expansão, graças à intensa atividade agropecuária e agroindustrial no município, constituindo-se no terceiro mais importante núcleo urbano do estado de Mato Grosso. O crescimento urbano desordenado de Rondonópolis vem provocando sérios problemas ambientais, com prejuízos econômicos e sociais incalculáveis. A poluição por esgoto doméstico e o assoreamento do rio Vermelho vem contribuindo para a degradação da qualidade natural dos recursos hídricos superficiais, impossibilitando cada vez mais o abastecimento público da cidade por essas águas.

O crescimento da cidade, associado à degradação da qualidade das águas superficiais vem contribuindo para o uso crescente das águas do Aquífero Furnas, o principal reservatório de água subterrânea da região, suprimindo 53% da demanda do abastecimento público, em torno de 60% do

comércio, 100% da demanda da indústria, lazer, hospitais e irrigação de pequenos pomares e 10% de residências através de poços individuais (Cutrim & Rebouças, 2005a).

Essa grande importância do Aquífero Furnas para Rondonópolis justifica a avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero nesta região. A vulnerabilidade foi avaliada através do método DRASTIC (Aller et al., 1987) e o perigo à contaminação foi avaliado integrando as fontes potenciais de contaminação classificadas através do método POSH (Foster et al., 2002) com as classes de vulnerabilidade do aquífero.

Estudos de vulnerabilidade e perigo à contaminação de aquíferos, a partir dos anos 90, tornaram-se ferramenta importante no planejamento e manejo de aquíferos, principalmente nos países mais desenvolvidos e em alguns países do terceiro mundo. No Brasil, somente em alguns Estados mais desenvolvidos essa metodologia tem sido utilizada, contudo em número reduzido.

Vulnerabilidade à contaminação de um aquífero é o conjunto de características intrínsecas que determinam a sua susceptibilidade a ser eventualmente afetado por uma carga contaminante. Perigo à contaminação de um aquífero é a probabilidade que tem um aquífero de sofrer impactos negativos de uma determinada atividade antrópica, tornando sua água inaceitável para o consumo humano. A vulnerabilidade e perigo são representados na forma de mapas, permitindo aos órgãos reguladores, planejadores e empresários fazerem a melhor avaliação sobre novas propostas de desenvolvimento e sobre prioridades no controle de poluição da água subterrânea e monitoramento de qualidade.

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de gerar conhecimentos para subsidiar a proposição de medidas de controle preventivo aos processos de contaminação do Aquífero Furnas.

ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, com 108km² (9km x 12km), compreende a cidade de Rondonópolis e o seu entorno, localizada no sudeste do estado de Mato Grosso entre os paralelos 16°25'S e 16°30'S e os meridianos 54°40'20''W e 54°34'50''W (Figura 1). Ela está localizada na bacia hidrográfica do rio Vermelho, afluente do rio São Lourenço, ambos inseri-

dos nos domínios do Pantanal Mato-Grossense. A pluviometria média anual da área é de 1.300mm e a temperatura varia de 38 °C a 25 °C.

Geologia da Área

Segundo Cutrim (1999), a geologia da área é composta por rochas devonianas da Formação Furnas, da zona de transição Furnas/Ponta Grossa e da Formação Ponta Grossa, pertencentes ao flanco noroeste da Bacia sedimentar do Paraná e por depósitos aluvionares (Figura 2).

A Formação Furnas é composta por arenitos médios a grossos, sendo que em direção ao topo predominam fácies psamo-pelíticas, constituindo bancos de areia fina micácea intercalados por lâminas decimétricas de argilas e siltes. Os arenitos quartzosos são mais abundantes e apresentam variações feldspáticas, com impregnações de óxido de ferro, grau médio de seleção, grãos esféricos e coloração variando de cinza esbranquiçado a rósea. Na área esta unidade aflora, principalmente, na parte sul e sudoeste, com ocorrência de falhamentos de direção preferencial sudoeste/nordeste. A sua espessura máxima é em torno de 300m (Cutrim & Rebouças, 2005b).

A zona de transição Furnas/Ponta Grossa atinge espessuras entre 10 e 40m e é caracterizada pela interdigitação de finas camadas de arenitos de granulometria fina a muito fina, siltitos e folhelhos silticos com bastante mica detrítica, orientada segundo o plano de acamamento.

A Formação Ponta Grossa é constituída pelas fases pelítica e psamo-pelítica. A fase pelítica, ocorre nas porções noroeste, nordeste e sudeste, e é composta por folhelhos silticos, com intercalações de argilitos, e em direção ao topo siltitos e arenitos muito finos, sendo comum a presença de fósseis nos arenitos e siltitos, o que corresponde à parte de topo da unidade. A fácies psamo-pelítica, ocorre no centro da área, sendo constituída por siltitos e arenitos finos a muito finos e argilitos subordinados, caracterizando a porção intermediária à basal da formação. Esta unidade encontra-se sobreposta à zona de transição Furnas Ponta Grossa, o seu contato inferior com a Formação Furnas é gradacional e concordante ou por falhamentos de gravidade.

Os depósitos aluvionares quaternários são constituídos por sedimentos arenoargilosos e cascalhos subordinados. A sua ocorrência se dá ao longo do rio Vermelho e dos córregos Macaco e do ribeirão Arareao.

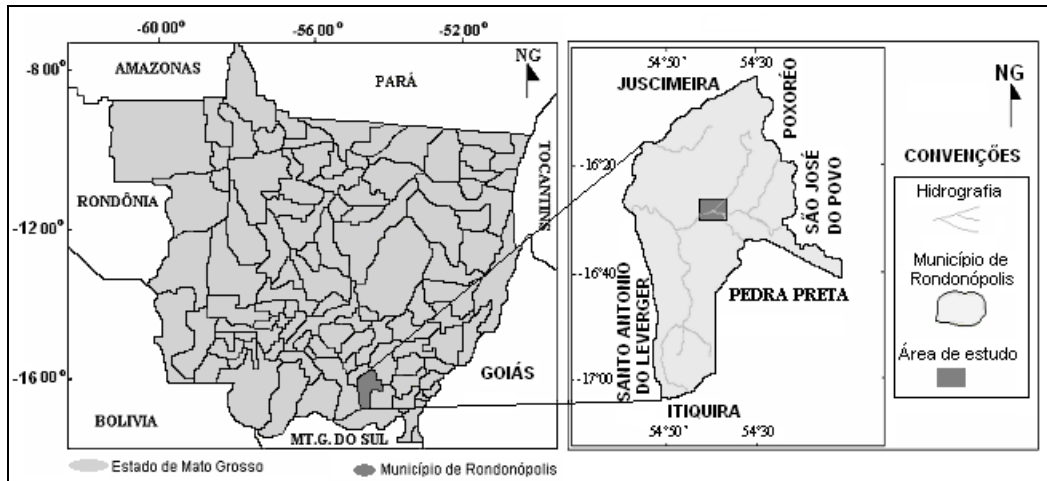


Figura 1 - Localização da área de estudo.

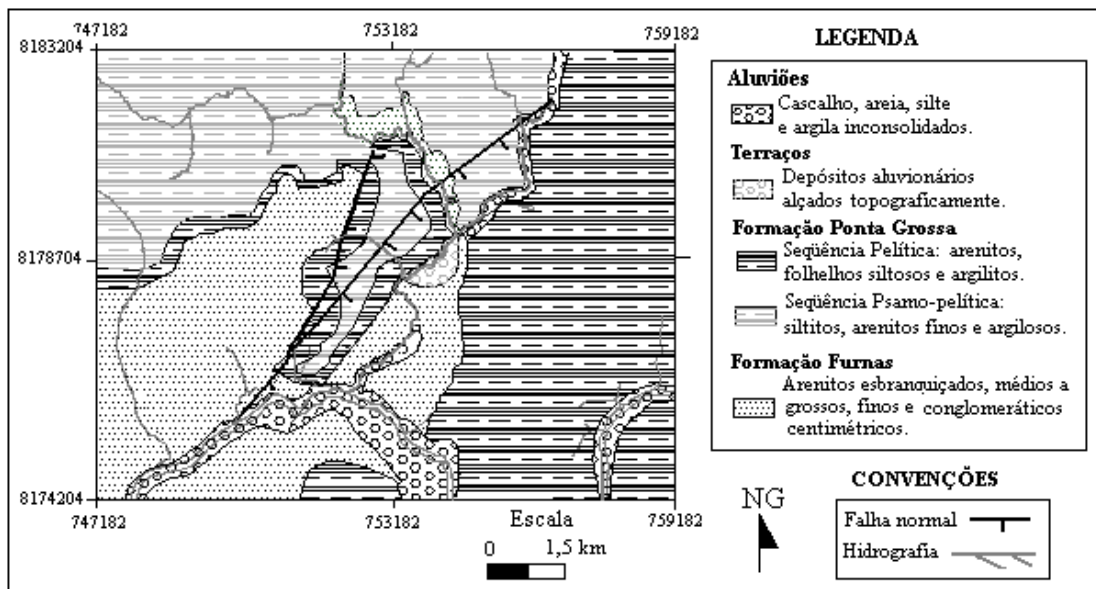


Figura 2 - Mapa geológico da região de Rondonópolis (Cutrim, 1999).

Hidrogeologia

Segundo Cutrim (1999), a hidrogeologia da área é constituída pelo Aquiclude Ponta Grossa e pelos Sistemas Aquíferos Furnas e Transição Furnas / Ponta Grossa (Figura 3). O Aquífero Furnas é o principal reservatório de água subterrânea, podendo produzir vazões em poços individuais de até 250 m³/h, enquanto no Sistema Aquífero Transição Furnas / Ponta Grossa a vazão máxima dos poços é de 14 m³/h.

Morfopedologia

A morfopedologia da área, segundo Salomão et al. (inédito), é constituída por dez unidades (Figura 4). Os tipos e as classes de solos estão descritos de acordo com Embrapa (2006).

A unidade 1 é composta por colinas alongadas com topo plano. Os solos gradam do topo para o centro do vale de NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS Latossólicos a GLEISSOLOS MELÂNCIOS

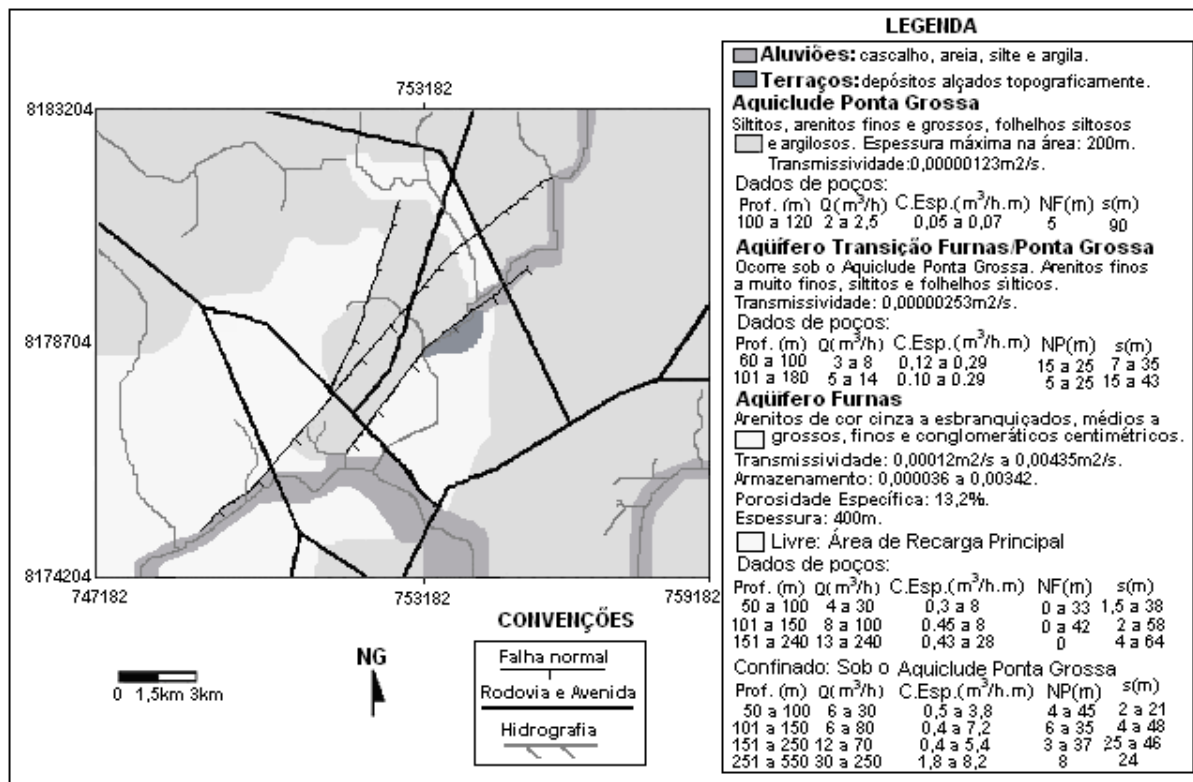


Figura 3 - Mapa hidrogeológico da cidade de Rondonópolis-MT (Cutrim, 1999).

Eutróficos típicos. São solos profundos, com espessuras da ordem de 15 m na parte mais alta. A unidade 2 é constituída por colinas amplas com declividade e vertente suaves. Os seus solos são do tipo LATOSSOLO VERMELHO, de textura média/argilosa, com profundidades em torno de 15 m nas partes mais elevadas. A unidade 3 é caracterizada por colinas com topos arredondados e amplitudes relativamente altas e com ruptura de declive no terço inferior da vertente. Os solos são constituídos na parte baixa da vertente por NEOSSOLOS LITÓLICOS e na porção superior por NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS com espessura em torno de 1 m, seguida pela presença de PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários Eutróficos. A unidade 4 é composta por colinas amplas e vertentes longas com declividade pequena. O seu solo é constituído por NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, cuja espessura aumenta no fundo do vale. A unidade 5 é composta por Planície de Inundação/Terraços Aluvionares, NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS. Ela é caracterizada por uma planície de inundação do rio Vermelho, onde os solos são constituídos por NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS associados a NEOSSOLOS FLÚVICOS. A unidade 6 é constituída por pequenas colinas com

topos estreitos intermediários a pequenos morrotes, amplitudes consideravelmente altas e localmente ao longo das vertentes existem setores associados a depressões e pequenos morrotes. O seu solo é composto por NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS com profundidades menores que 1 m e PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários Eutróficos. A unidade 7 é caracterizada pela presença de colinas alongadas com topo estreito de forma aplainada e alta amplitude. A sua pedologia é constituída por PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários Eutróficos pouco profundos. A unidade 8 é composta por colina ampla, com amplitude relativamente elevada e topo plano com pequenos embaciamentos e vertentes longas. Os solos são do tipo LATOSSOLO VERMELHO de textura argilosa, intercalados com GLEISSOLOS MELÂNCIOS Eutróficos típicos, ocasionalmente ocorrem PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários Eutróficos e a jusante passando para NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS. A unidade 9 é constituída por Terraços e NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS. A unidade 10 é caracterizada por colinas médias com topos aproximadamente convexos intermediários a morrotes com quebra acentuada no relevo do terço inferior das vertentes

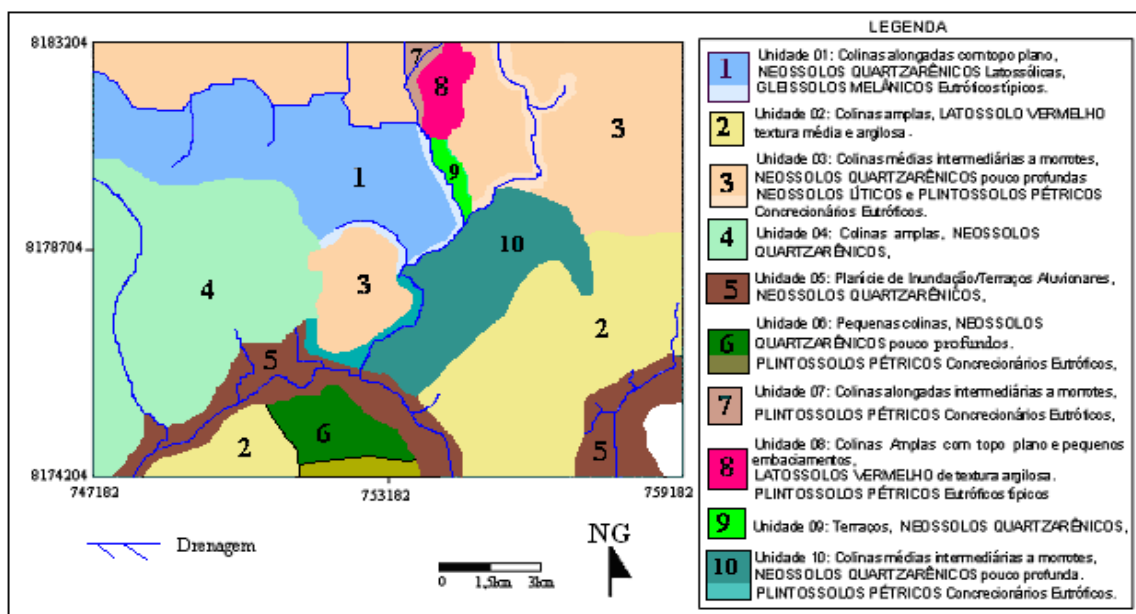


Figura 4 - Mapa morfopedológico da cidade de Rondonópolis (Cutrim, 1999).

Ocorrem também nas vertentes pequenas depressões ao longo da linha de talvegue. O seu solo é composto por NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS pouco profundos e PLINTOSSOLOS PÉTRICOS Concrecionários Eutróicos.

METODOLOGIA

Método Drastic

Neste trabalho foi utilizado o método DRASTIC (Aller et al., 1987) para determinar as classes de vulnerabilidade à contaminação. O método DRASTIC consiste em classificar hierarquicamente os parâmetros hidrogeológicos: profundidade da água do aquífero, recarga do aquífero, litologia do aquífero, tipo de solo, topografia, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero. A cada um desses parâmetros é atribuído um número r entre 1 e 10, dependendo da faixa de valores, e estes números são multiplicados por um peso w entre 1 e 5, onde os parâmetros mais importantes recebem peso 5.

O índice DRASTIC é então calculado através da seguinte equação:

$$\text{DRASTIC} = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw, \quad (1)$$

onde:

D = profundidade da água do Aquífero

R = recarga do aquífero

A = litologia do aquífero

S = tipo de Solo

T = topografia local (inclinação em %)

I = impacto da zona vadosa

C = condutividade hidráulica do aquífero

w = Peso geral de cada parâmetro do DRASTIC

r = número relacionado à faixa de valores de cada parâmetro

O índice DRASTIC mais elevado significa maior vulnerabilidade. Esses índices são distribuídos em classes de vulnerabilidade e representados na forma de mapa que mostra os fatores hidrogeológicos divididos em subáreas com características intrínsecas, representando os diferentes ambientes hidrogeológicos.

No método DRASTIC assume-se que o contaminante é introduzido à água subterrânea desde a superfície; o contaminante é incorporado à água subterrânea através da infiltração de água pluviométrica; o contaminante tem a mobilidade da água e a área de estudo deve ser igual ou superior a 41 km².

As classes de vulnerabilidade e suas definições podem ser encontradas em Foster et al. (2002). A vulnerabilidade extrema significa que o aquífero é vulnerável à maioria das águas poluídas, com rápido

impacto em muitos cenários de poluição. A vulnerabilidade alta indica que o aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles fortemente absorvidos ou transformados em muitos cenários de poluição. A vulnerabilidade moderada significa que o aquífero é vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando lançados ou despejados continuamente. A vulnerabilidade baixa indica que o aquífero é vulnerável somente a poluentes conservativos em longo prazo, quando continuamente e largamente despejados ou lançados. A vulnerabilidade desprezível significa que o aquífero é confinado por camadas com insignificante fluxo vertical de água subterrânea. A menor vulnerabilidade não significa que o aquífero seja totalmente imune à contaminação.

Tanto em teoria quanto na prática o mapa envolve muitas simplificações de situações geológicas e hidrogeológicas, as quais na maioria dos casos são, naturalmente, bastantes complexas. No entanto, as investigações locais específicas resolvem os problemas locais e, assim, a avaliação do perigo de poluição da água subterrânea é possível.

Foster et al. (2002) apresentam o resultado de avaliações do DRASTIC realizada por vários autores, onde concluíram que os índices gerados por este método são pouco claros, devido a interação demasiada de parâmetros ponderados, visto que alguns deles não são independentes, mas sim correlacionados. O método gera uma vulnerabilidade relativa, subestima a vulnerabilidade de aquífero fraturado e considera, sem necessidade, um parâmetro que reflete a mobilidade de contaminantes. Mesmo diante dessas avaliações o DRASTIC é a técnica mais aplicada no estudo de vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea nos países desenvolvidos, com modificações voltadas à realidade de cada área e obtidos resultados satisfatórios, como, por exemplo, Medina (2001), Barber et al. (1996), Ferreira & Oliveira (2004).

Do mesmo modo, neste trabalho o DRASTIC foi aplicado com modificações dos valores das categorias: do solo, da recarga do aquífero e nos limites dos valores que definem as classes de vulnerabilidade, o que permitiu resultados mais condizentes com as características hidrogeológicas da área.

Determinação da contribuição dos parâmetros ao índice DRASTIC

A profundidade da água no aquífero (D) corresponde à profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a água do aquífero.

Para as áreas de ocorrência livre do aquífero este parâmetro foi considerado como o nível freático obtido no monitoramento de 34 poços localizados nessas áreas, no final do período pluviométrico e no final da estiagem no ano de 2007, e para as áreas onde o aquífero é confinado este parâmetro foi considerado igual à profundidade do aquífero obtida em relatório dos poços. O mapa deste parâmetro foi elaborado com auxílio do programa Surfer (2000), usando malha de 60x60 pontos, método de interpolação por krigagem, modelo linear e anisotropia com raio 1,5 e ângulo de 135°.

A recarga (R) do aquífero é a quantidade de água que chega à sua zona saturada, é o parâmetro responsável pelo transporte dos contaminantes, e o seu volume determina o potencial de poluição do aquífero. Para o aquífero livre a recarga foi determinada a partir da variação do nível d'água nos poços de monitoramento (Figura 7), observados em março de 2007 (final do período chuvoso) e em outubro de 2007 (final da estiagem) e da porosidade específica média (13,2%) do Aquífero Furnas (Cutrim, 1999), conforme abaixo:

$$R = h \cdot \eta_e \quad (2)$$

onde:

R = recarga

h = variação do nível d'água no ano de 2007 em cada poço.

η_e = Porosidade efetiva média do Aquífero Furnas estimada em laboratório (Cutrim, 1999).

Para as áreas onde o aquífero é confinado a recarga foi estimada pela eq.(2) usando o coeficiente de armazenamento médio de $1,34 \times 10^{-3}$ (Cutrim, 1999) ao invés da porosidade específica.

Com o valor da recarga estimado em cada poço foi elaborado o mapa de recarga da área, através do Surfer (2000), usando malha de 66x66 pontos, krigagem, modelo linear, anisotropia com raio 1,5 e ângulo de 135°.

A litologia (A) do Aquífero determina a sua capacidade de atenuação, uma rocha de textura grossa tem menor capacidade de atenuação do que uma rocha de textura fina. Na área a litologia é constituída essencialmente por arenito de textura média e bastante homogêneo (Figura 2). Portanto, foi considerada apenas uma categoria, arenito maciço, cuja classe é 3 e Ar.Aw é 9.

O solo (S) corresponde à parte da zona vadosa onde estão localizadas as raízes das plantas. Cada tipo de solo tem sua capacidade de atenuação,

um solo essencialmente arenoso tem menor capacidade de atenuação do que um solo argiloso. Os tipos de solo da área foram obtidos a partir do mapa morfopedológico (Figura 3).

A inclinação porcentual da topografia (T) tem grande influência na velocidade do escoamento superficial dos contaminantes, no gradiente hidráulico e no direcionamento de fluxos preferenciais, principalmente nos aquíferos livres. Este parâmetro foi determinado através do mapa topográfico da área na escala de 1:20.000. As cotas topográficas foram digitalizadas ao longo de perfis, mantendo constante a longitude e variando a latitude. A partir desses dados foram determinadas as distâncias entre as cotas e as diferenças das respectivas cotas, para então calcular a inclinação porcentual em cada ponto, usando a seguinte expressão:

$$h = (h_2-h_1)/(d_2-d_1).100, \quad (3)$$

onde,

h= inclinação porcentual da topografia.

h1 = cota do ponto 1

h2= cota do ponto 2

d1= posição do ponto 1

d2= posição do ponto 2

Com essas inclinações porcentuais foi elaborado o mapa de declividade porcentual (Figura 8), usando o software Surfer (2000).

O Impacto da zona vadosa (I) é decorrente de todo o material geológico que constitui a zona não saturada. Este meio condiciona o tempo de deslocamento de contaminantes e os vários processos de atenuação. Os dados deste parâmetro foram determinados a partir da digitalização do mapa geológico (Figura 2).

A condutividade hidráulica (C) expressa a capacidade de percolação de água através do aquífero e depende das propriedades do meio e do fluxo. Os valores de condutividade hidráulica do Aquífero Furnas usados para calcular os índices DRASTIC foram determinados em 11 poços da área (Cutrim & Rebouças, 1999).

Método Posh

As fontes potenciais de contaminação da área foram classificadas através do método POSH – Pollutant Origin Surcharge Hydraulically (Foster et al., 2002). O método POSH classifica as fontes em

três níveis qualitativos de geração de carga contaminante: reduzida, moderada e elevada. Esta classificação leva em consideração o tipo de atividade, sua capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada.

O inventário das atividades potenciais de contaminação consideradas mais relevantes para o estudo foi realizado através de inspeção de ruas e avenidas da cidade, e plotando cada uma delas no mapa urbano de Rondonópolis na escala de 1:14.000. A partir da digitalização deste mapa e da classificação das fontes de contaminação, foi então elaborado o mapa de classificação das fontes, de acordo com os critérios apresentados em Foster et al. (2002), na mesma escala do mapa de vulnerabilidade à contaminação.

Tabela 1 - Profundidade da água (DRASTIC / Modificado) Dw=5.

Categorias (m)	Classe – Dr	Dr.Dw
0 a 1,5 (●)	10	-----
1,5 a 4,6(●)	9	-----
4,6 a 9,1(●) / 5 a 10*	7 / 7	35
9,1 a 15,2(●) / 10 a 15*	5 / 5	25
15,2 a 22,9(●) / 15 a 20*	3 / 3	15
22,9 a 30,5 (●) / 20 a 30*	2 / 2	10
>30*	1	5

(●) DRASTIC

* categoria modificado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores da profundidade da água no aquífero estão apresentados na tabela 1 e na Figura 5. Variações de 5 a 30 m ocorrem nas áreas onde o aquífero é livre, ocupando em torno de 31% da área, situada a sudoeste e parte do centro da área. Nos restantes 69% da área o aquífero é confinado e a sua profundidade varia de 30 a 165 m, sendo que as maiores profundidades estão localizadas a leste e nordeste da área (Figura 5). A partir destes valores foram determinadas as categorias de 5 a 10m, 10 a 15m, 15 a 20m, 20 a 30 m e maior que 30 m, e as respectivas classes (Dr), que produziram os valores de Dr.Dw, os quais estão contidos na Tabela 1 e na Figura 9A.

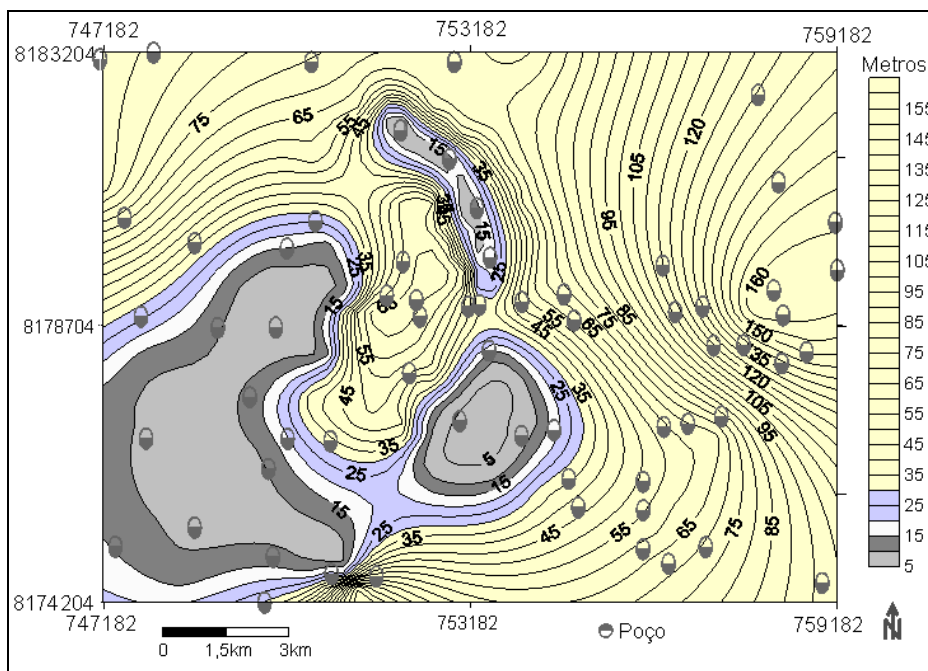


Figura 5 - Mapa potenciométrico do Aquífero Furnas na região de Rondonópolis.

Tabela 2 – Recarga (DRASTIC / Modificado) $Rw=5$.

Categorias (mm/ano)	Classe – Rr	Rr.Rw
0 a 50 (●) / 0 a 40 *	1 (●) / 1	5
50 a 102 (●) / 40 a 80 *	3 (●) / 3	15
102 a 178 (●) / 80 a 160 *	6 (●) / 6	30
178 a 254 (●) / 160 a 240 *	8 (●) / 8	40
>254 (●) / >240 *	9 (●) /	-----

*Categoria modificada (●) DRASTIC

A recarga do aquífero em 2007 está apresentada na Figura 7 e a variação do nível d'água no aquífero na Figura 6. O nível d'água nas áreas de confinamento do aquífero variou de 0 a 0,6 m, sendo que os menores valores estão localizados nas áreas onde o aquífero é mais profundo. Nas áreas onde o aquífero é livre, a variação do nível d'água apresentou máximo de 1,6 m e mínimo de 0,7 m. A recarga anual do aquífero variou de 205 a 25 mm nas áreas onde o aquífero é livre, e na área confinada variou de 25 a 0 mm. As categorias, as classes e os valores Rr.Rw deste parâmetro estão contidas na

Tabela 2 e a distribuição dos valores de Dr.Dw na área estão na Figura 9 (B).

A litologia (A) do aquífero na área é constituída essencialmente por arenito de textura média, e muito homogêneo, portanto foi considerada apenas uma categoria, arenito maciço, cuja classe (Ar) é 6, e o peso Aw é 3, portanto Ar.Aw é 18 (Tabela 3).

Tabela 3 - Litologia do aquífero (DRASTIC) $Aw = 3$.

Tipo de Meio aquífero	Categoria	Classe - Ar	Ar.Aw
Arenito maciço	4 - 9	6	18

Os solos da área foram distribuídos em sete categorias, cujas classes e valores de Sr.Sw estão contidos na Tabela 4, e a distribuição dos valores de Sr.Sw estão apresentados na Figura 9 (C).

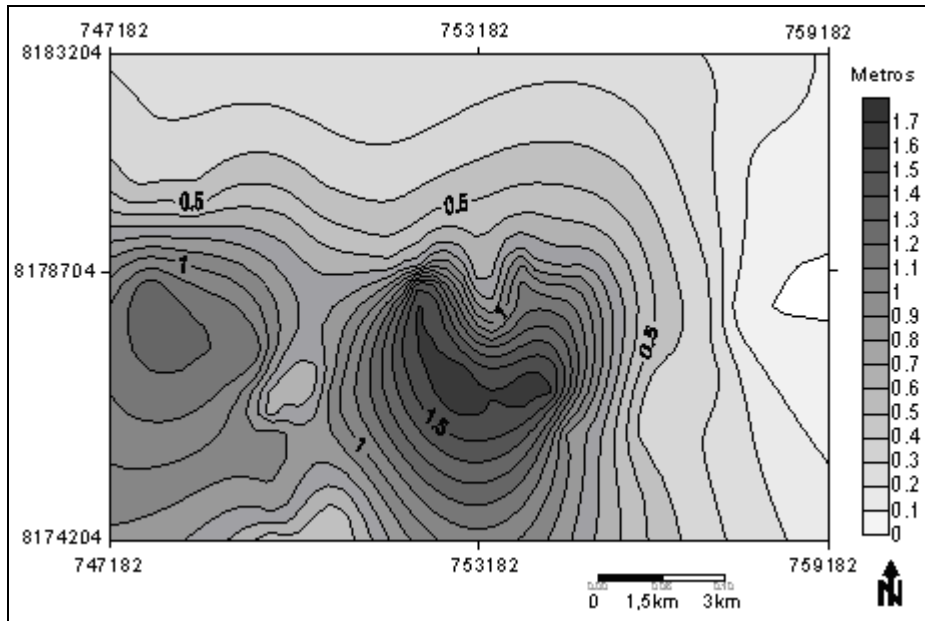


Figura 6 - Mapa de variação do nível d'água nos poços do Aquífero Furnas no período de março de 2007 a outubro de 2007.

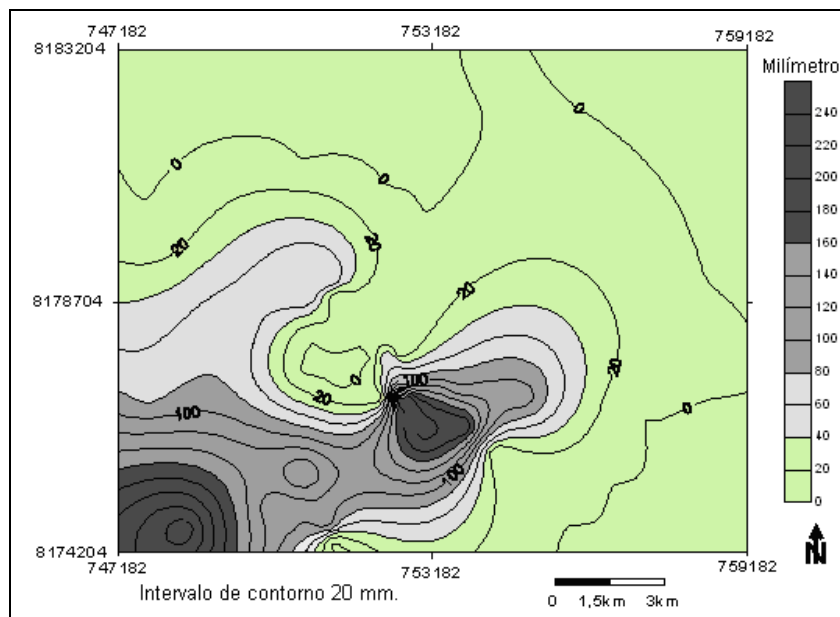


Figura 7 - Mapa de recarga do Aquífero Furnas do ano de 2007.

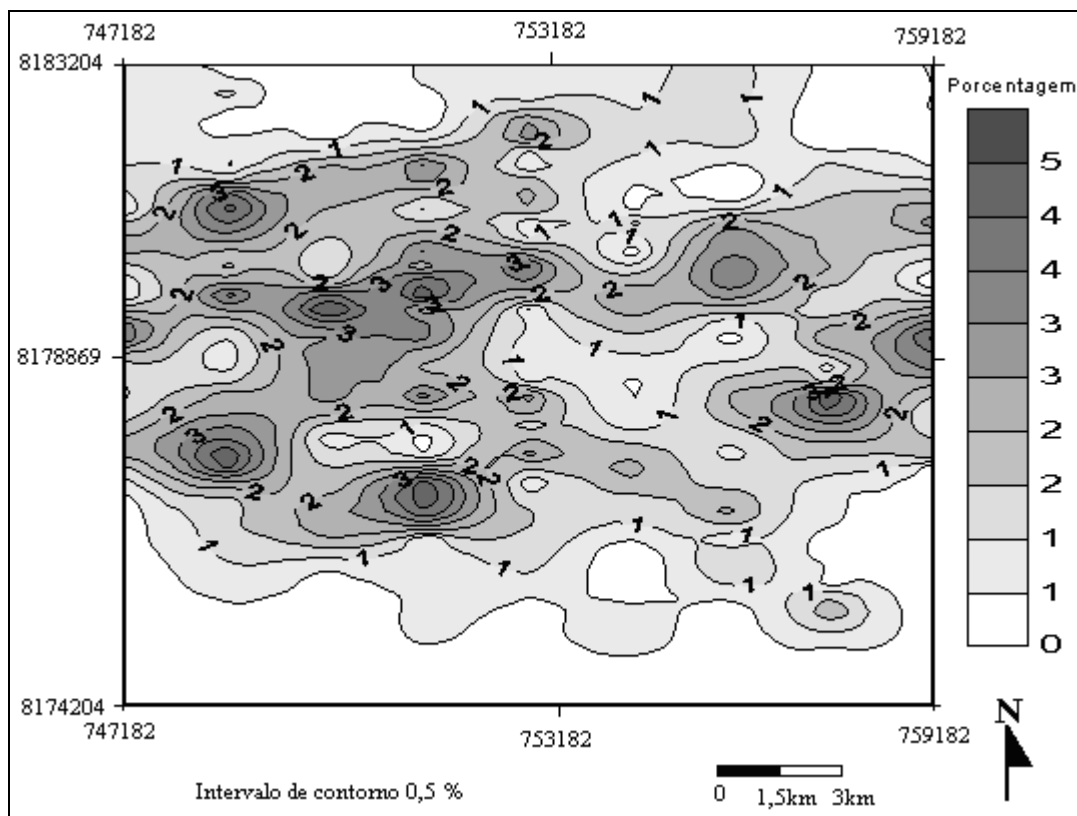


Figura 8 - Mapa de inclinação percentual da topografia.

Tabela 4 - Tipos de solos (DRASTIC) Sw=2.

Categorias	Classe-Sr	Sr.Sw
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO pouco espessa	9	18
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO / Terraços	9	18
LATOSSOLO de textura média argiloso	7	14
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Latossólico	7	14
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO com presença de argila	6	12
NEOSSOLO LÍTICO E PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Eutrófico	3	6
PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário Eutrófico	1	2

A inclinação topográfica da área está apresentada na Figura 8, com valores variando de 0 a 6%. Estes valores foram distribuídos nas categorias de 0% a 2% e 2% a 6% e as respectivas classes de 10 e 9 (Tabela 5), cujos valores de Tr.Tw estão contidos na Figura 9D.

Tabela 5 - Inclinação topográfica percentual (DRASTIC) Tw=1.

Categorias %	Classe -TR	Tr.Tw
0 a 2*	10	10
2 a 6*	9	9
6 a 12	5	5
12 a 18	3	3
>18	1	1

* Categoria dos dados.

Tabela 6 - Impacto da zona vadosa (DRASTIC) $I_w=5$.

Categorias		Classe – Ir	Ir.Iw
Arenito maciço	2 a 7	7	35
Aluviões / Arenito maciço	2 a 7	7	35
Terraços / Arenito maciço	2 a 7	7	35
Aluviões	2 a 7	6	30
Estrato confinante	1	1	5

O impacto da zona vadosa foi determinado a partir do mapa geológico (Figura 2). As suas categorias e classes estão contidos na Tabela 6, a distribuição dos valores de Ir.Iw estão apresentados na Figura 9E.

A condutividade hidráulica do Aquífero Furnas varia de 0,388 m/dia a 2,548 m/dia, portanto restrita à primeira categoria (Tabela 7), tendo classe 1 e Cr.Cw igual a 3 para toda área.

Tabela 7 - Condutividade hidráulica (DRASTIC) $C_w = 3$.

Categorias (m/dia)	Classe – Cr	Cr.Cw
0.04075 – 4.075	1	3
4.075 – 14.11	2	6
14,11 – 28,525	4	12
28,525 – 40,75	6	18
40,75 – 81,5	8	24
> 81,75	10	30

A Figura 9 mostra a distribuição da contribuição dos parâmetros D, R, S, T e I aos índices DRASTIC. Os valores de Dr.Dw (Figura 9A) variam de 5 a 35, sendo que os maiores valores (15 a 35) ocorrem onde o aquífero é livre e os demais valores (5 a 10) onde o aquífero é confinado. Os valores de Rr.Rw (Figura 9B) variam de 5 a 40, tendo os valores mais elevados (15 a 40) distribuídos nas áreas livres do aquífero, e o valor 5 nas áreas onde o aquífero é confinado. Os valores de Sr.Sw (Figura 9C) variam de 2 a 18, distribuídos em seis faixas de valores, sendo que apenas parte dos valores de 18 e 12 ocorrem onde o aquífero é livre, os demais valores ocorrem onde o aquífero é confinado. Os valores de Tr.Tw

(Figura 9D) são 9 e 10, sendo que o valor 10 ocorre em torno de 70% da área. Os valores de Ir.Iw (Figura 9E) variam de 5 a 35, sendo que o maior valor ocorre onde o aquífero é livre e o menor onde é confinado. Os valores de Ar.Aw e Cr.Cw são 9 e 3 respectivamente para toda área.

Observa-se que os parâmetros recarga do aquífero (Rr.Rw), profundidade da água (Dr.Dw) e impacto da zona vadosa (Ir.Iw) apresentaram valores muito superior aos demais parâmetros nas áreas de ocorrência livre do aquífero, mostrando que nessas áreas estes parâmetros tem maior contribuição na definição dos índices DRASTIC que os demais, nas áreas onde o aquífero é confinado, com exceção do solo, todos os parâmetros apresentaram valores relativamente baixos e similares, demonstrando pouca diferença na contribuição dos índices DRASTIC nessas áreas.

Os índices DRASTIC foram calculados através da eq. (1), usando os valores de Dr.Dw, Rr.Rw, Ar.Aw, Sr.Sw, Tr.Tw, Ir.Iw, e Cr.Cw da área. Os intervalos para as classes de vulnerabilidade foram modificados (Tabela 8) de modo a assegurar a melhor coerência das características hidrogeológicas do aquífero com as vulnerabilidades.

Tabela 8 - Classes de vulnerabilidade DRASTIC e modificadas

Valor do índice (DRASTIC / Modificado)	Classe de vulnerabilidade
< 100	Desprezível
101 a 119	Muito baixa
120 a 139	Baixa
140 a 159 (●) / 70 a 115*	Moderada
160 a 179 (●) / 115 a 160*	Alta
180 a 199	Muito alta
> 200	Extrema

*Modificado (●) DRASTIC

Os níveis de vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Furnas produzidos pelo DRASTIC estão apresentados na Figura 10. Os índices DRASTIC variam de 165 a 30, os quais foram distribuídos em três classes de vulnerabilidade: desprezível (30 a 70) cor cinza clara, moderada (70 a 115) cor cinza escura e alta (115 a 165) cor escura.

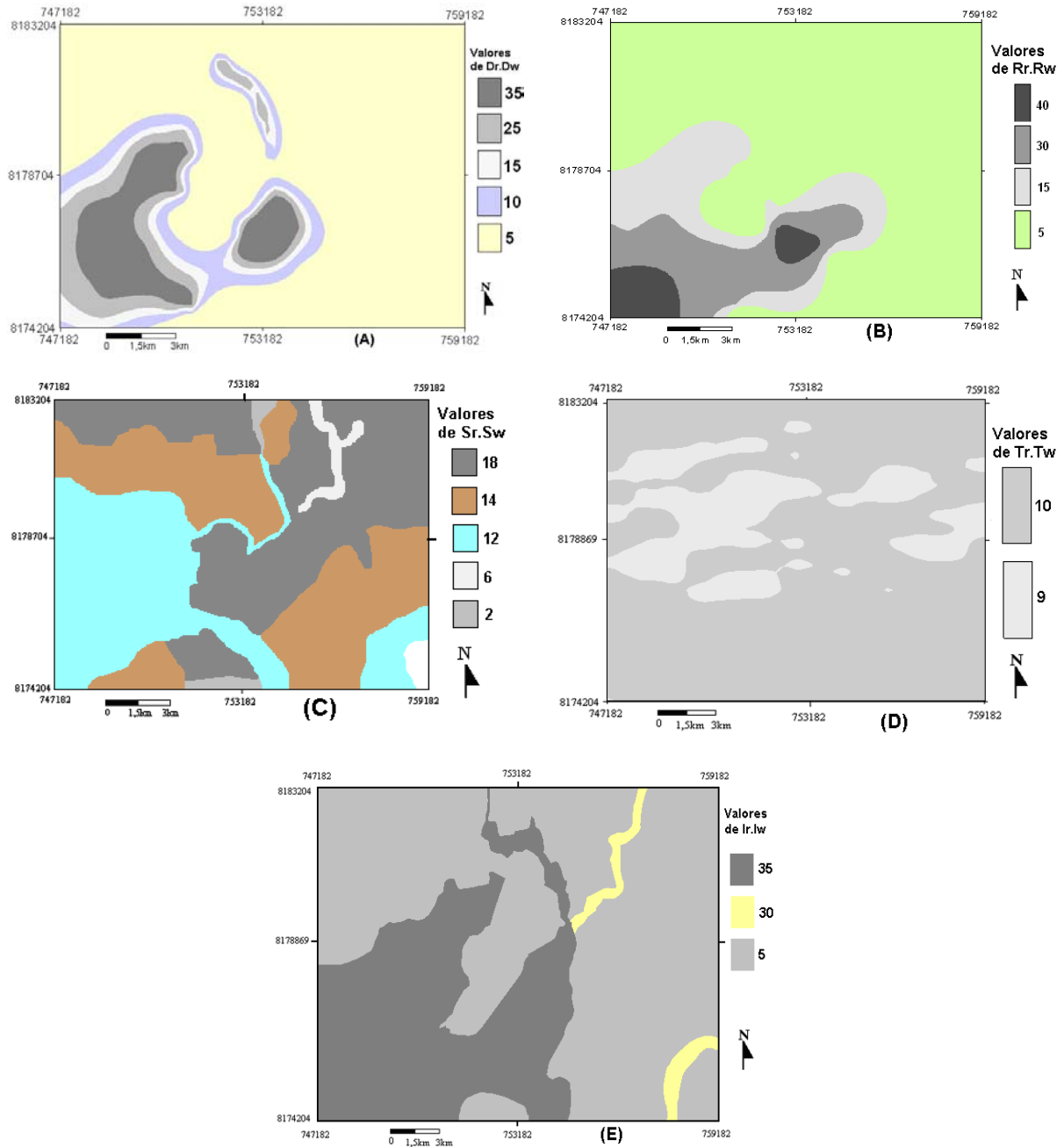


Figura 9 - Distribuição dos valores de Dr.Dw (A), Rr.Rw (B), Sr.Sw (C), Tr.Tw (D) e Ir.Iw (E) na área.

A vulnerabilidade desprezível está distribuída em 44% da área total (69% da área do Aquífero Furnas confinado), onde o confinamento é constituído pelo Aquiclúde Ponta Grossa e pelo Aquífero transição Furnas /Ponta Grossa, a profundidade da água varia de 55 a 163 m e a recarga do Aquífero varia de 0 a 20 mm/ano. Esta vulnerabilidade indica uma probabilidade remota de qualquer contami-

nante atingir a zona saturada do Aquífero, visto que o fluxo vertical no Aquiclúde Ponta Grossa é insignificante.

A vulnerabilidade moderada abrange em torno de 35% da área total, sendo 24% (31% da área de confinamento do aquífero), onde a profundidade da água varia de 30 a 55 m e a recarga máxima é de 25 mm/ano, e 11% (30% da área de

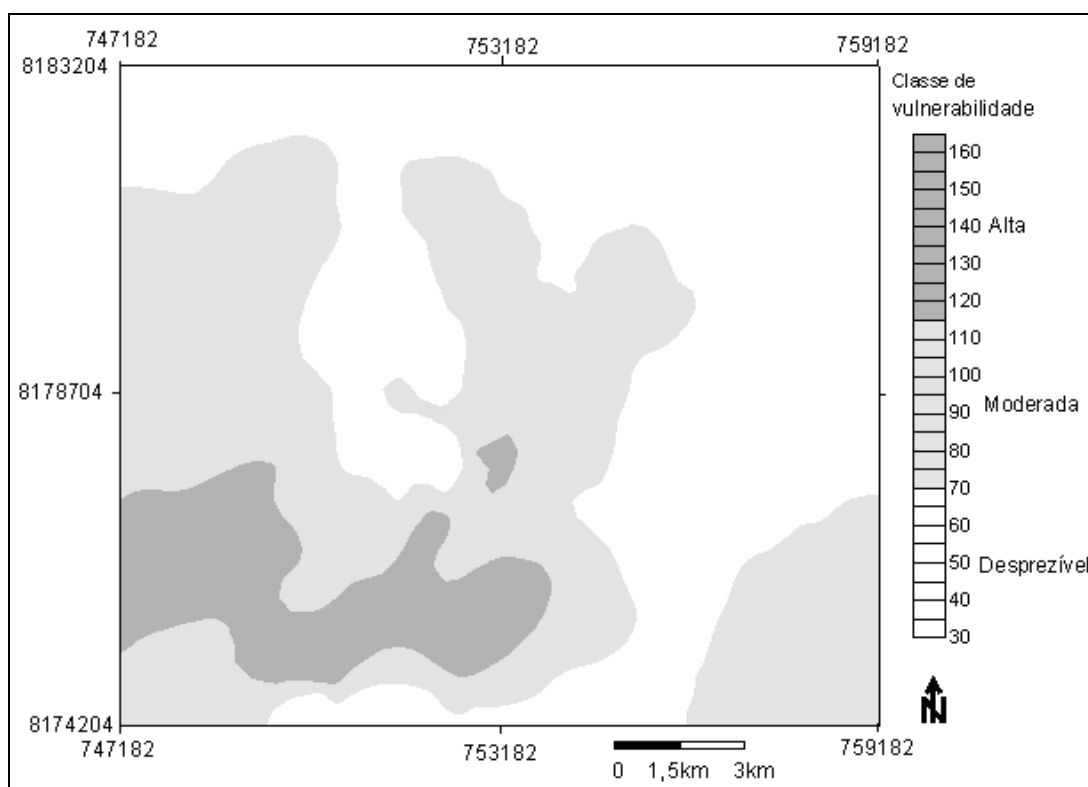


Figura 10 - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC/modificado do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis – MT.

ocorrência livre) tendo profundidade da água variando de 20 a 30 m e recarga anual de 25 a 80 mm. Esta vulnerabilidade indica que nestes locais somente alguns contaminantes podem alcançar a zona saturada do aquífero quando lançados continuamente, pois o fluxo vertical de água é muito pequeno.

A vulnerabilidade alta ocorre em cerca de 21% da área total (70% da ocorrência livre). Nestes locais a profundidade da água varia de 3 a 15 m e a recarga varia de 90 a 265 mm/ano. Esta vulnerabilidade indica que estes locais são vulneráveis a muitos contaminantes, exceto aqueles fortemente absorvidos ou transformados.

Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas

O perigo à contaminação do aquífero foi avaliado através da integração da vulnerabilidade do aquífero com as classes de fontes potenciais de contaminação da área (Figuras 11 e 12).

Na área foram identificadas quatro fontes potenciais pontuais de contaminação, classificadas

em três categorias, a saber: fontes pontuais urbanas, lagoa de tratamento de esgoto industrial e fonte linear (Figura 11).

Na classe de fontes pontuais urbanas estão os postos de distribuição de combustíveis com moderado potencial de geração de carga contaminante e cemitério com reduzido potencial de geração de carga contaminante. Os postos de combustíveis estão localizados na área urbanizada, tendo a sua maior concentração na parte central, correspondendo a grande parte das áreas de vulnerabilidades alta e moderada e um pequeno número em locais de vulnerabilidade desprezível (Figura 12). Como esta fonte é de moderada geração de contaminantes ela oferece perigo à contaminação do aquífero, o qual é maior nos locais de vulnerabilidade alta e menor em vulnerabilidade moderada e nenhum em vulnerabilidade desprezível. O cemitério está situado em área de vulnerabilidade alta (Figura 12), embora sendo uma fonte com reduzida capacidade de geração de carga contaminante, ela gera perigo à contaminação do aquífero, principalmente por cargas patogênicas como vírus e bactérias.

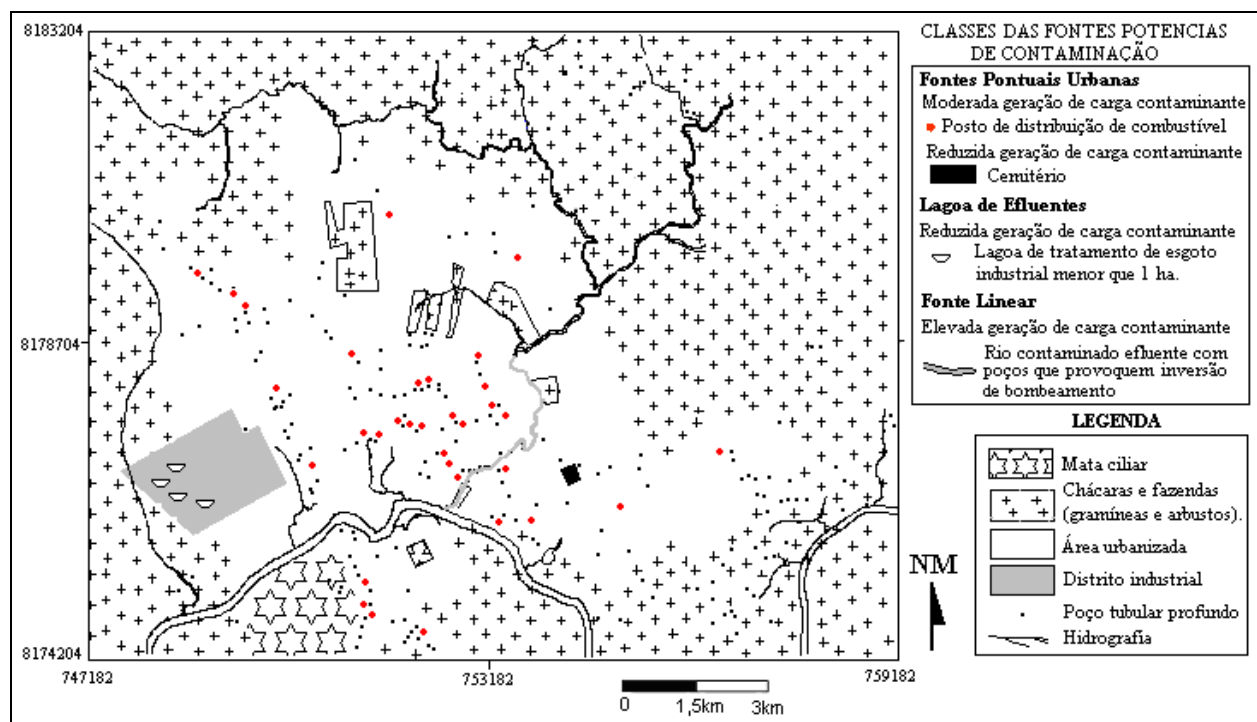


Figura 11 - Mapa das fontes potenciais de contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT.

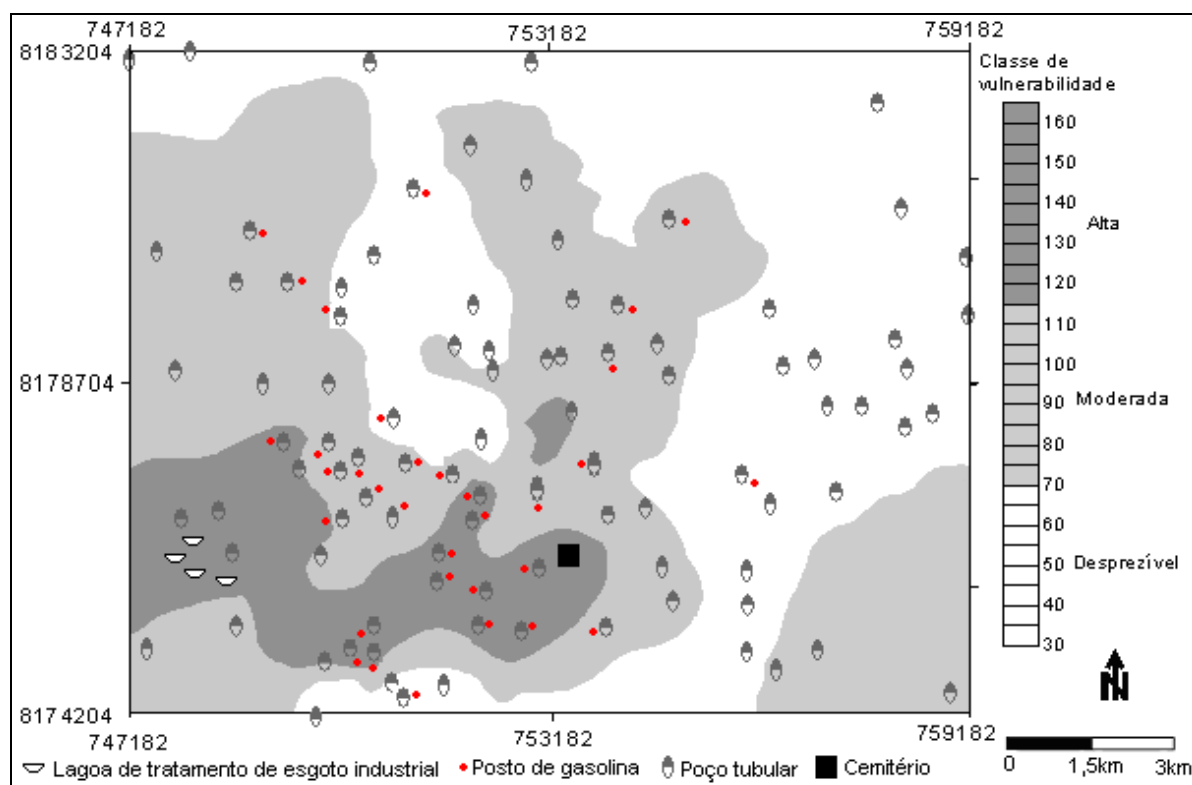


Figura 12 - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC/modificado e fontes potenciais de contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis - MT.

As lagoas de tratamento de esgoto industrial da área são menores que 1 hectare, portanto classificadas como de reduzida capacidade de geração de contaminantes. Elas estão situadas em área de alta vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Furnas (Figura 12), mesmo tendo reduzida capacidade de geração de contaminantes, produzem perigo à contaminação do aquífero.

A fonte linear de contaminação é parte do Ribeirão Arareau, com elevado nível de contaminação por esgoto doméstico, portanto classificada como de elevada capacidade de geração de contaminantes. O seu posicionamento em áreas de alta e moderada vulnerabilidade, associado à sua capacidade de geração de contaminantes gera perigos à contaminação alto e moderado, respectivamente às vulnerabilidades alta e moderada. Para o detalhamento do grau de perigo que esta fonte de contaminação representa ao aquífero é necessário um estudo específico de sua efluência, ou em que períodos do ano ela se comporta como uma drenagem efluente ou influente. Algumas drenagens superficiais, apesar de conterem elevada carga de contaminação em solução e suspensão, não causam risco ao aquífero, pois são alimentadas pela água subterrânea em todo o ano hidrológico e em todo seu eixo de drenagem.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

As classes de vulnerabilidade desprezível, moderada e alta resultantes da aplicação do método DRASTIC estão bastante coerentes com as características do Aquífero Furnas na área, visto que a vulnerabilidade desprezível ocupa 69% da área confinada do aquífero, onde ocorrem as maiores profundidades da água; a vulnerabilidade moderada abrange o restante 31% da área confinada e 30% da área livre do aquífero. A vulnerabilidade alta cobre 70% da área onde o aquífero é livre e apresenta as menores espessuras da zona não saturada.

Considerando apenas o mapa de vulnerabilidade, o aquífero exigiria maiores cuidados apenas nos locais de vulnerabilidades moderada e alta. No entanto, em toda área existem muitos poços que exploram o aquífero, e dentre eles ocorrem alguns com estrutura técnica inadequada, o que torna o aquífero mais vulnerável do que foi indicado pelo método DRASTIC, que não foi desenvolvido para determinação de tipo de feição pontual.

O bom desempenho da metodologia DRASTIC nesta área demandou bastante tempo e recursos para a obtenção das informações aplicadas, mesmo

considerando o contexto geológico e hidrogeológico relativamente simples.

O elevado custo e grande tempo, associados com outros fatores mencionados na apresentação do método devem contribuir para a limitada aplicação deste método no Brasil. No entanto, em áreas onde a água subterrânea é e será responsável pelo suprimento de demandas de água, este e outros métodos devem ser aplicados em conjunto, pois quanto mais seguro o conhecimento da vulnerabilidade de um aquífero, mais apropriadas serão as medidas preventivas e corretivas propostas.

Pelo fato da vulnerabilidade DRASTIC ser natural, relativa e envolver muitas simplificações geológicas e hidrogeológicas é necessário cautela e ponderações para as interpretações e utilização dos resultados. Além disso, como o mapa de vulnerabilidade foi elaborado com base nos dados disponíveis no ato da sua construção e alguns desses dados, como a profundidade da água e a recarga do aquífero podem variar temporal e espacialmente, este mapa deverá ser atualizado periodicamente para melhor cumprir a sua finalidade.

Na área existem apenas fontes potenciais de contaminação pontuais classificadas como fontes urbanas, lagoa de tratamento de efluente industrial e fonte linear.

As fontes urbanas, constituídas por postos de distribuição de combustíveis e cemitério, são de moderado e reduzido potencial de geração de contaminantes, respectivamente. Os postos de combustíveis oferecem perigos alto, moderado e desprezível respectivamente às suas localizações em vulnerabilidades alta, moderada e desprezível. O perigo à contaminação devido ao cemitério é moderado, pois está localizado em área de vulnerabilidade moderada.

As lagoas de tratamento de esgoto industrial têm reduzida capacidade de geração de contaminantes, porém a sua localização em área de alta vulnerabilidade produz alto perigo à contaminação do aquífero.

A fonte linear de contaminação tem elevada capacidade de geração de contaminantes e oferece perigos a contaminação alto e moderado, respectivamente às ocorrências em áreas de vulnerabilidades alta e moderada.

Nas áreas onde o perigo à contaminação do Aquífero é maior devem ser adotadas medidas preventivas, envolvendo monitoramento da qualidade de água e o estabelecimento de área de proteção de poços. Nos locais de vulnerabilidade alta devem ser criadas áreas de proteção de qualidade de água, o que permitirá um controle rigoroso sobre as fontes

potenciais de contaminação já existentes e impedirá a instalação de novas fontes.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMAT (Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado de Mato Grosso) pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.; HACKETT, G. **DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. USEPA, EPA/600/2-87/035, EUA., 1987.
- BARBER, C.; BATES, L. E.; BARRON, R.; ALLISON, H. Comparison of standardised and region-specific methods for assessment of the vulnerability of groundwater to pollution: a case study in an agricultural catchment. *Shallow Groundwater Systems. International Contributions to Hydrogeology*, Verlag Heinz Heise, Hannover, v.18., 1996.
- CUTRIM, A.O. 1999. Hidrogeologia, consumo e demanda de água em Rondonópolis-MT: subsídios para o desenvolvimento urbano sustentável. Inst. de Biociências, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Tese de Doutorado, 187 p.
- CUTRIM A.O. & REBOUÇAS A.C. Aplicação de sondagem elétrica vertical na estimativa do topo e da espessura de unidades geológicas da Bacia do Paraná na cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(1):89-98. 2005a.
- CUTRIM A.O. & REBOUÇAS A.C. Tipos de usos das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. 1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul e 1º Simpósio de Águas da AUGM. Santa Maria-RS, CD-ROOM. 2005b.
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. EMBRAPA Produção de Informações e EMBRAPA Solos, 412p, 2006.
- FERREIRA, J.P.L.; OLIVEIRA, M.M. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. **Geofísica International**, vol.43, n. 4, p. 541-550, 2004.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies**. World Bank, GWMAE. Washington, 101p, 2002.
- MEDINA, M. R. Analisis de vulnerabilidad en zonas áridas y semiáridas en las condiciones de Mátape, Sonora, México www.tierra.rediris.es, 2001.
- RUIZ, A.S.; CUTRIM, A.O.; CASARIN, J.C.; VECCHIATO, A.B.; SALOMÃO, F.X.T. Mapeamento geológico da Bacia do Paraná na cidade de Rondonópolis-MT, inédito.
- SALOMÃO, F.X.T.; SANTOS, Jr.,W.; VECCHIATO, A.B.; CUTRIM, A.O. Estudo morfológico da área urbana e periurbana de Rondonópolis - MT., Inédito.
- SURFER. Surface mapping system, version 7. Scientific Software Inc., 2000.

Application Of The DRASTIC And POSH Methods To Determine The Vulnerability And Contamination Risk Of Furnas Aquifer In The Rondonopolis Region, Mato Grosso State, Brazil

ABSTRACT

This research was carried out in Rondonopolis city, Mato Grosso State, Brazil, to evaluate the vulnerability and pollution hazard of the Furnas' Aquifer. Vulnerability was evaluated using the DRASTIC method that allowed identifying three vulnerability classes – negligible, moderate and high. Negligible vulnerability was found for 44% of the area, moderate for 35% and high for 21%. In areas of negligible vulnerability only poorly installed tubular wells with a fault in the confining layers can lead to pollution of the saturated aquifer zone, while moderate vulnerability indicates that some pollutants can reach the saturated aquifer zone, when continuously discharged, and in highly vulnerable areas the aquifer can be contaminated by many pollutants, except those that are strongly absorbed. The potential sources of pollution were classified using the POSH Method according to load generation: elevated (linear source of contamination), moderate (gas station) and reduced (cemeteries and industrial sewage treatment lagoons). The pollution hazard resulting from these sources is a function of the vulnerability classes.

Key-words: *DRASTIC, Furnas Aquifer, vulnerability to contamination.*