

# AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA URBANA, USANDO O MÉTODO SI, EM RONDONOPOLIS, MATO GROSSO, BRASIL

*ASSESSMENT OF URBAN GROUNDWATER VULNERABILITY TO POLLUTION USING SI  
METHOD IN RONDONOPOLIS, MATO GROSSO, BRAZIL*

**Alteredo Oliveira CUTRIM<sup>1</sup>, Fernando Ximenes de Tavares SALOMÃO<sup>1</sup>, Joana Angélica  
Guimarães da LUZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal do Mato Grosso. Rua Quarenta e Nove, 2367 - Boa Esperança, Cuiabá – MT.  
E-mails: alteredoc@hotmail.com; ximenes.salomao@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal do Sul da Bahia. Rodovia de Acesso para Itabuna, km 39 - Ferradas, Itabuna – BA.  
E-mail: jasguimaraes7@gmail.com

Introdução  
Características da Área da Pesquisa  
Geologia e Hidrogeologia  
Metodologia  
Método SI  
Parâmetros do SI na Área de Estudo  
Resultados e Discussão  
Conclusão e Considerações  
Referências

**RESUMO** - Esta pesquisa foi realizada na cidade de Rondonópolis, estado de Mato Grosso, com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Furnas, usando o método SI - *Susceptibility Index*. O SI gerou as vulnerabilidades desprezíveis, baixas, moderadas e altas. Essas vulnerabilidades são consistentes com as características hidrogeológicas do aquífero e os tipos de uso e ocupação da área. Este desempenho do SI está relacionado às suas características e os ajustes feitos à área de estudo. Estes resultados podem ser usados para elaborar plano de gestão do aquífero, para estabelecer área de proteção de poço e rede de poços de monitoramento de qualidade de água.

**Palavras-chave:** Método SI, Aquífero Furnas, Águas subterrâneas urbanas, Rondonópolis.

**ABSTRACT** - This research was carried out in the city of Rondonópolis, State of Mato Grosso, Brazil, to assess the vulnerability to contamination of the Furnas aquifer, using the SI – *Susceptibility Index* method. The SI generated vulnerability negligible, low, moderate, and high. These vulnerabilities are consistent with the hydrogeological characteristics of the aquifer and the types of uses and occupation. This performance of the SI is related to its characteristics and the adjustments made to the study area. These results can be used to prepare the management plan for this aquifer, to establish protection area well and for deploying network wells of monitoring water quality.

**Keywords:** SI method, Furnas Aquifer, urban groundwater, Rondonópolis.

## INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas urbanas têm sofrido pressões qualitativas devido à grande diversidade dos tipos de uso e ocupação do meio físico urbana em todo mundo. Tipos específicos de uso e ocupação urbana, como tanques de armazenamento de hidrocarbonetos, cemitérios, fossas sépticas e negras e lagoas de tratamento de esgotos doméstico e industrial, rede de drenagem e hidrografia contaminadas são localizados em subsuperfície, portanto, são as fontes potenciais de contaminação mais ameaçadoras das águas subterrâneas urbanas.

A frequência e a intensidade da alteração da qualidade natural dessas águas, devido a esses usos e ocupações urbana, dependem do grau de vulnerabilidade do aquífero, da estrutura técnica e da área de proteção de poços que exploram suas águas.

A vulnerabilidade à contaminação de um aquífero indica a sua susceptibilidade a ser eventualmente afetado por uma carga contaminante, e está diretamente relacionada às características, tais como o seu modo de ocorrência, a profundidade da água, a recarga, a condutividade hidráulica e a litologia da zona não saturada, além do comportamento físico hídrico da cobertura pedológica (Foster et al., 2002; Aller et al., 1987; Cutrim & Campos, 2010).

O poço coloca o aquífero em contato direto com a superfície do terreno, portanto a sua estrutura técnica inadequada altera a vulnerabilidade natural do aquífero, favorecendo o deslocamento de contaminantes até ele (Cutrim & Campos, 2010). A área de proteção de poço o isola de atividades antrópicas, impedindo que

contaminantes sejam dispostos nas suas vizinhanças e transportados pela infiltração de águas de superfície para o aquífero (Custodio & Llamas, 1976; Cutrim, 1999).

A minimização e a prevenção da alteração da qualidade natural das águas subterrâneas urbanas podem ser feitas através da execução de plano de gestão, cuja elaboração depende em grande parte do conhecimento da vulnerabilidade do aquífero, a qual deve ser determinada pelo método mais adequado às características hidrogeológicas de cada área.

Os métodos de vulnerabilidade mais usados são o DRASTIC (Aller et al., 1987), GOD (Foster et al., 2002), AVI (Van Stempvoort et al., 1993), SINTACTS (Civita, 1994), EPIK (Doerfliger, et al., 1999), PI (Goldscheider et al., 2000) e SI (Francés, et al., 2001), porém são pouco aplicados em áreas urbanas devido, principalmente, às suas características de escala de aplicação.

### CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DA PESQUISA

A área da pesquisa, com 108km<sup>2</sup>, 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

No Brasil, estudo de vulnerabilidade de aquífero urbano é pouco comum, tendo maior frequência nos estados do sul e sudeste. No estado de Mato Grosso, embora mais de 80% das cidades usem águas subterrâneas para o suprimento de suas demandas, somente uma cidade tem esses estudos.

Diante desse quadro em nosso estado, da disponibilidade de dados para aplicar o método SI na cidade de Rondonópolis, é que esta cidade foi escolhida para a realização desta pesquisa. Na área, o principal aquífero é o Furnas, ocorre de modo livre e confinado, contém reservas reguladora de 10,5x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/ano, permanente de 6,97x10<sup>9</sup>m<sup>3</sup> e explotável de 429x10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/ano (Cutrim & Rebouças, 2005a). Nessa cidade, esse aquífero supre 55% do abastecimento público, 100% da indústria e lazer, 90% do comércio e aproximadamente 10% de residências com poços particulares (Cutrim & Rebouças, 2005b).

localizada na bacia hidrográfica do rio Vermelho, afluente do rio São Lourenço, ambos inseridos 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.

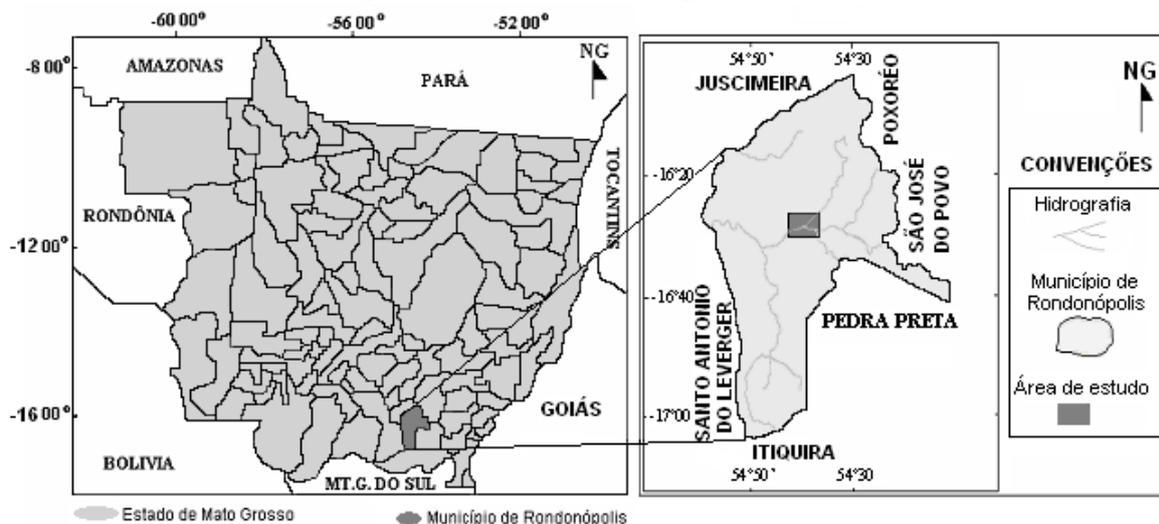


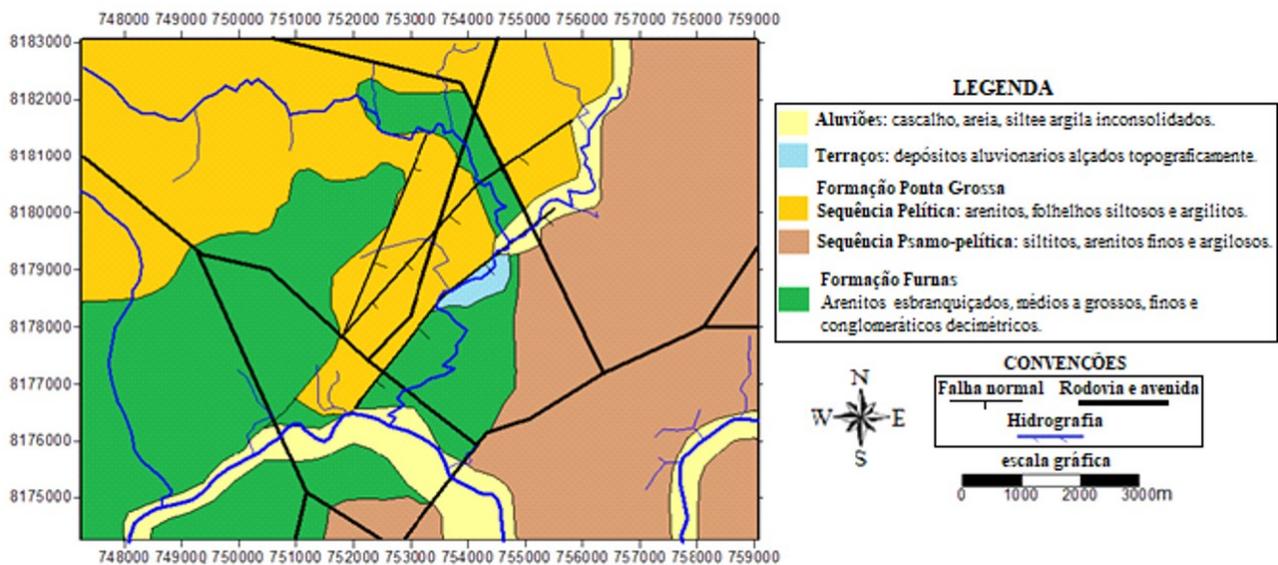
Figura 1 - Localização da área da pesquisa.

### Geologia e Hidrogeologia

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 micáceas 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 esbranquiçada a rósea. Na área esta unidade aflora, principalmente, na parte sul e sudoeste, com ocorrência de falhas de direção preferencial sudoeste/nordeste. A sua espessura máxima é em torno de 30 m (Cutrim & Rebouças, 2005c).



**Figura 2** - Mapa geológico da área de pesquisa (Modificado de Cutrim, 1999).

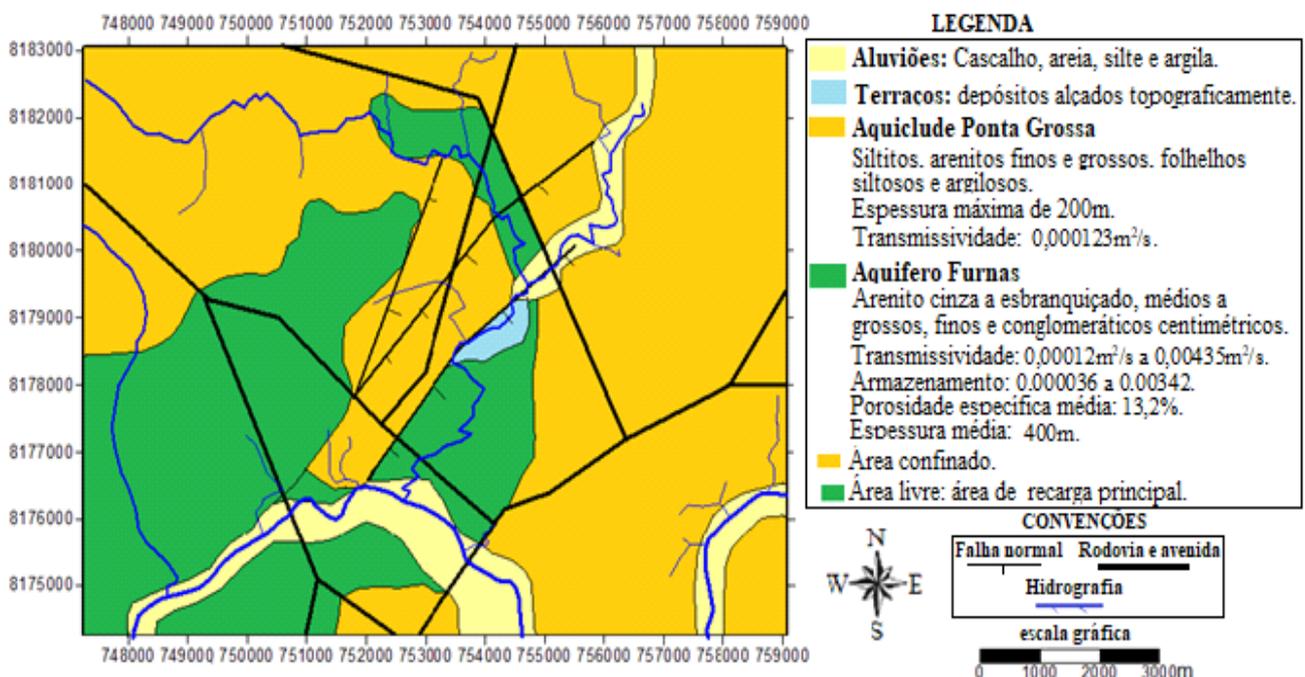
A zona de transição Furnas/Ponta Grossa atinge espessuras entre 10 e 40m e é caracterizada pela interdigitação de finas camadas de arenitos de granulometria fina a muito fina, siltitos e folhelhos silticos com bastante mica detrítica, orientada segundo o plano de acamamento.

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 é marcada por 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 a basal da formação. Esta unidade se encontra 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 areno-argilosos e cascalhos subordinados. A sua ocorrência se dá ao longo do rio Vermelho e dos córregos Macaco e do ribeirão Arareau.

Segundo Cutrim (1999) a hidrogeologia da área é constituída pelo Aquicludo Ponta Grossa e pelo Sistema Aquífero Furnas e Transição Furnas/Ponta Grossa (Figura 3).



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

O Aquífero Furnas é o principal reservatório de água subterrânea, podendo produzir vazões em poços de até 250 m<sup>3</sup>/h, enquanto no Aquífero

Transição Furnas / Ponta Grossa a vazão máxima dos poços é de 14 m<sup>3</sup>/h. A profundidade da água no Aquífero Furnas varia de 5 a 165m (Figura 4).

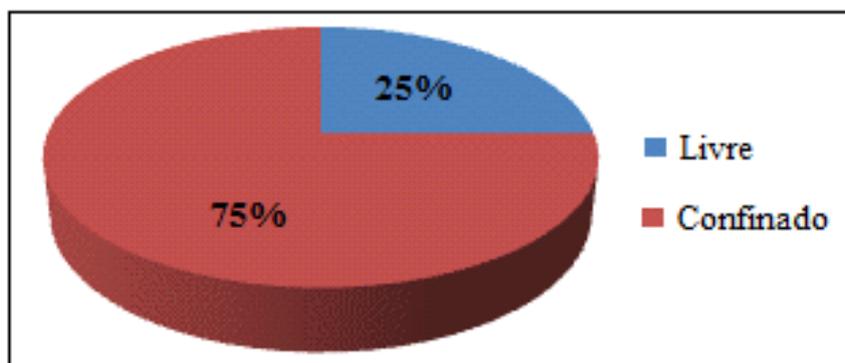


Figura 4 - Percentagem do modo de ocorrência do Aquífero Furnas na área de estudo.

## METODOLOGIA

### Método SI

Neste trabalho foi aplicado o método de avaliação de vulnerabilidade SI – Índice de Susceptibilidade (Francés et al., 2001), é uma modificação do método de vulnerabilidade DRASTIC (Aller et al., 1987), do qual foram suprimidos os parâmetros S (Solo) e C (Condutividade hidráulica) e acrescentado o parâmetro ocupação do solo LU (Tabela 1). Ao

considerar a informação da ocupação do solo, o SI torna-se um índice de vulnerabilidade específico, enquanto o DRASTIC é um índice de vulnerabilidade intrínseco, pois considera somente as condições naturais.

O parâmetro LU divide o uso do solo em classes, cujos valores variam de 0 a 100 (Tabela 2). O valor 100 indica as atividades mais poluidoras (Francés et al., 2001).

Tabela 1 - Parâmetros do índice SI.

Parâmetro	Descrição	Fator de ponderação
D	Profundidade da água no aquífero	0,186
R	Recarga do aquífero	0,212
A	Litologia do aquífero	0,259
T	Topografia da área	0,121
LU	Ocupação do solo	0,222

Tabela 2 - Classificação da ocupação do solo.

LU	Classificação
Descargas industriais, áreas de espalhamentos de lixos	100
Área de irrigação	90
Pedreiras, áreas de extração de areia, minas a céu aberto e estaleiros	80
Aeroportos, áreas portuárias, infraestruturas de rede de auto-estradas e de rede ferroviárias	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
Espaços verdes urbanos	75
Áreas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempo livre	75
Área urbano contínuo	75
Área urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinho, pomares, oliveiras, etc.)	70
Culturas associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	50
Sistemas culturais e parcelares complexos	50
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes	50
Territórios agroflorestais	50
Meios aquáticos	50
Florestas e meios seminaturais, superfícies com água	0

O índice SI é calculado pela soma ponderada dos cinco parâmetros D, R, A, T e LU, semelhante ao DRASTIC (eq. 1).

$$SI = \sum_{i=1}^5 SIw(i) * P(i) \quad (1)$$

Onde, P são os parâmetros (D, R, A, T e LU) e SIw são os pesos do SI (Tabela 1).

O índice SI foi determinado através da superposição dos dados dos cinco parâmetros do

SI, adotando uma grade de 1000mx1000m.

Os parâmetros D, R, A e T (Tabela 1) são obtidos diretamente do DRASTIC, sendo que no SI esses valores são multiplicados por 10 para facilitar a interpretação dos resultados finais (Francés et al., 2001). Os intervalos para as classes de vulnerabilidade SI foram determinados através de modificações do índice DRASTIC (Tabela 3), considerando as características hidrogeológicas da área.

Tabela 3 - Classes de vulnerabilidade DRASTIC e SI adotadas.

Índice DRASTIC	Índice SI adotado	Classe de vulnerabilidade
< 100	46 a 52	Desprezível
101 a 119	-----	Muito baixa
120 a 139	52 a 60	Baixa
140 a 159	60 a 70	Moderada
160 a 179	>70	Alta
180 a 190	-----	Muita alta
200	-----	Extrema

### Parâmetros do SI na Área de Estudo

A profundidade da água no aquífero (D) corresponde à profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a água do aquífero. Em área de ocorrência livre do aquífero, D foi considerado como o nível freático e em área confinado D foi determinado a partir

de perfil geológico de poço e de sondagem elétrica vertical – SEV (Cutrim & Campos, 2010). O mapa de D (Figura 5 e 6) foi elaborado com auxílio do software Surfer (2000), usando malha de 75x100 pontos, método de interpolação por krigagem, modelo linear e anisotropia com raio 1,5 e ângulo de 135°.

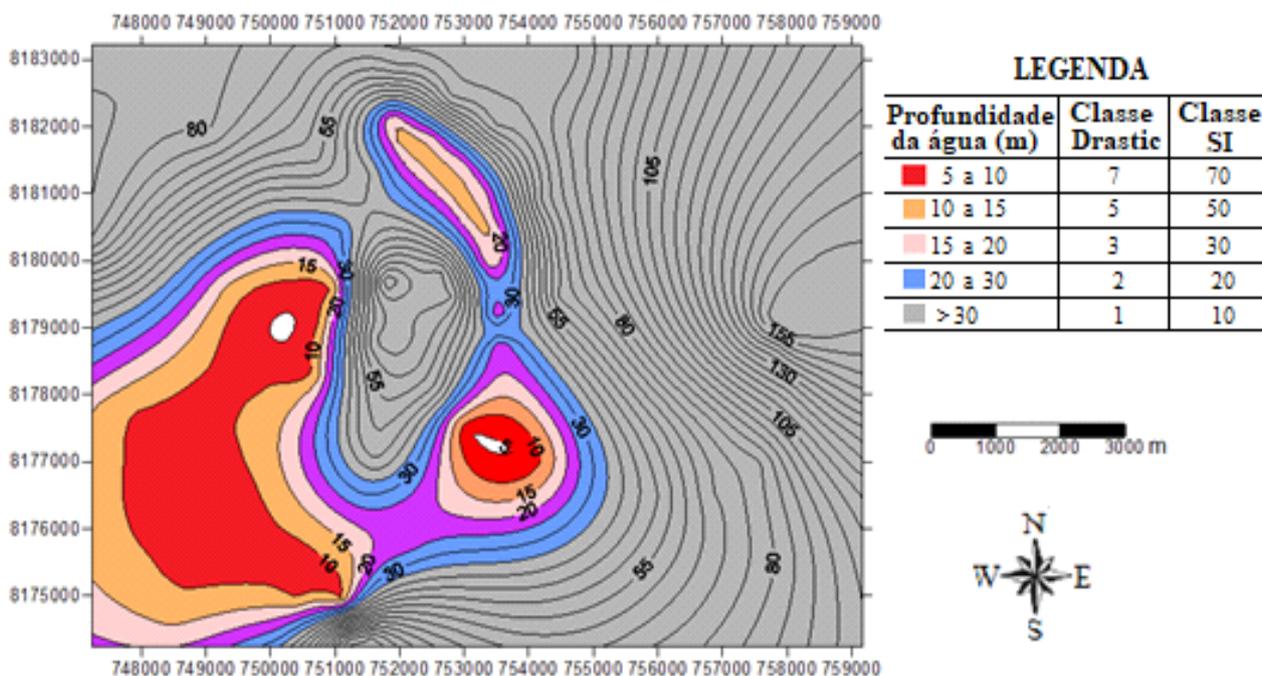


Figura 5 - Mapa de profundidade da água no Aquífero Furnas e sua classe SI.

A recarga (R) do aquífero é a quantidade de água que chega à sua zona saturada no ano

hidrológico, é o parâmetro responsável pelo transporte dos contaminantes. Os dados de

nível d'água usados na estimativa de R foram obtidos em Cutrim & Campos (2010).

Em área livre este parâmetro foi determinado a partir da variação do nível estático de poços de monitoramento no ano hidrológico e da porosidade específica média de 13,2%, conforme abaixo (Cutrim, 1999):

$$Re = h \cdot \rho_e \quad (2)$$

onde: Re = recarga  
h = variação do nível d'água no ano de 2007 em cada poço.  
 $\rho_e$  = Porosidade efetiva média do Aquífero Furnas estimada em laboratório.

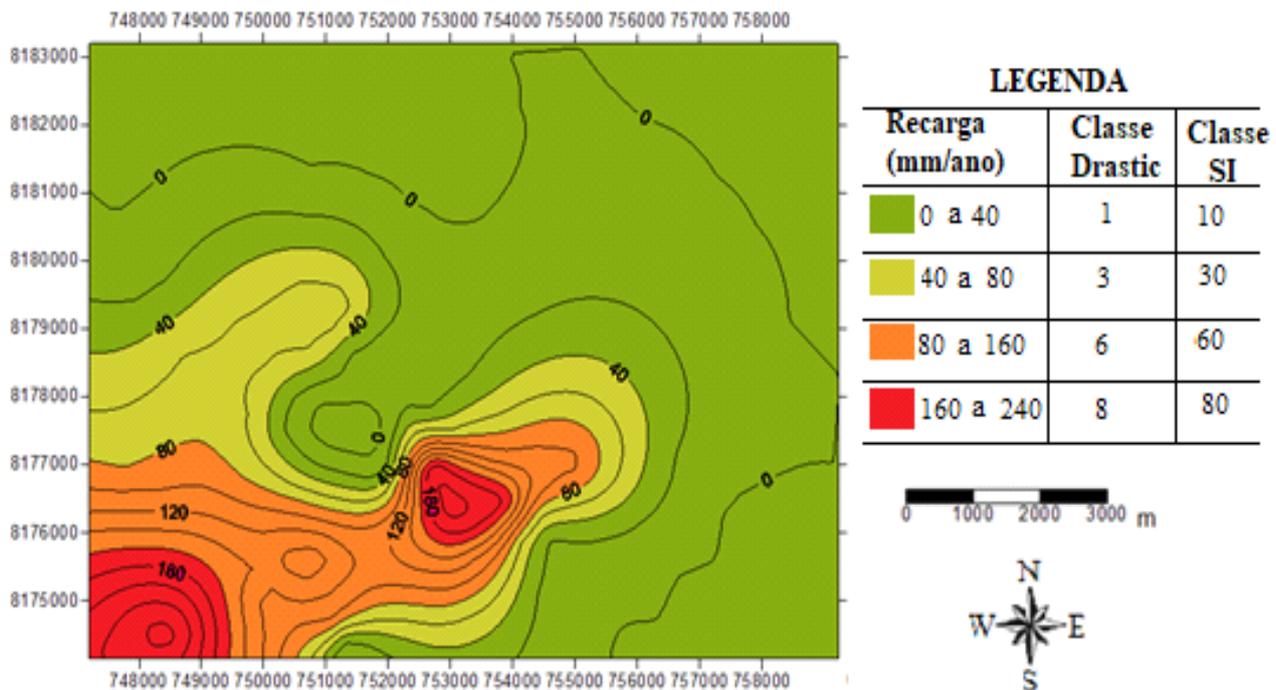


Figura 6 - Mapa de recarga do Aquífero Furnas e sua classe SI

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 a recarga estimado em cada poço foi elaborado o mapa de R (Figura 7), através do Surfer (2000), usando malha de 75x100 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 do aquífero é constituída essencialmente por arenito de textura média (Figura 2). Portanto, foi considerada apenas uma categoria para toda área, arenito maciço, cuja classe é 3 e Ar.Aw é 9.

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:

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

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).

Os tipos de uso do solo (LU) foram determinados através de inspeção na área de estudo, georreferenciado e plotados em mapa em escala de 1:14.000 (Figura 7). Esses dados foram classificados de acordo com a Tabela 2.

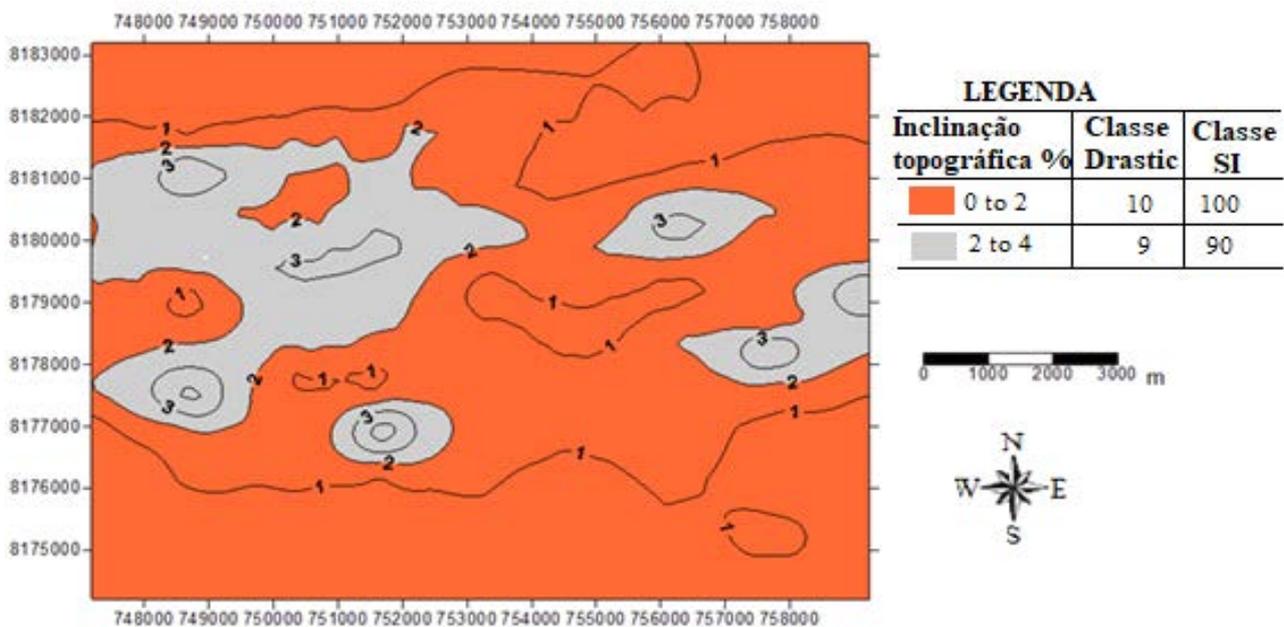


Figura 7 - Mapa de inclinação percentual topográfica e sua classe SI.

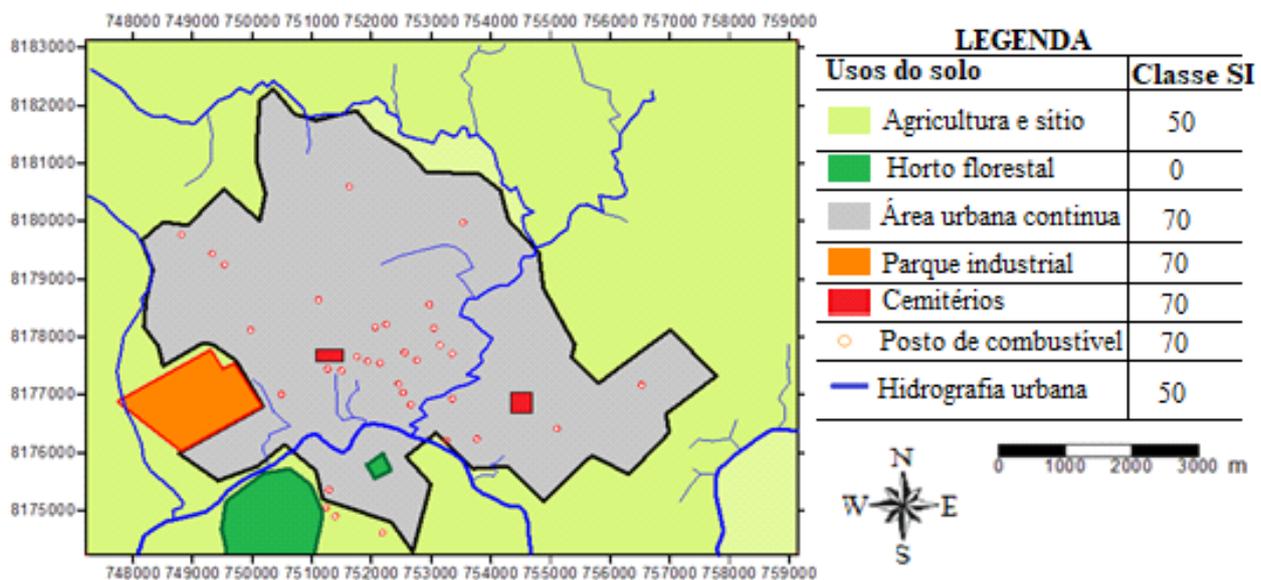


Figura 8 - Mapa de uso do solo e sua classe SI.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da profundidade da água (D) no aquífero estão apresentados na tabela 3 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. No restante 69% da área o aquífero é confinado e a sua profundidade varia de 30 a 165

A recarga do aquífero (R) em 2007 está apresentada na figura 6. 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  $R_r.SI_w$  deste parâmetro estão contidas na Tabela 3 e a distribuição dos valores de  $Dr.SI_w$  na área estão na Figura 10B.

m, sendo que as maiores profundidades estão localizadas a leste, nordeste e noroeste da área. 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 (SI), que produziram os valores de  $Dr.SI_w$ , os quais estão contidos na Tabela 1 e na Figura 10A.

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 ( $A_r$ ) é 6, e o peso  $SI_w$  é 3, portanto  $A_r.SI_w$  é 18 (Tabela 3).

A inclinação topográfica da área está apresentada na figura 7, com valores variando de

0 a 4%. Estes valores foram distribuídos nas categorias de 0% a 2% e 2% a 4% e as respectivas classes de 10 e 9 (Tabela 3), e os respectivos valores de Tr.SIw estão contidos na Figura 10C.

Os tipos de uso do solo (LU) e a classe SI na área estão apresentados na figura 8.

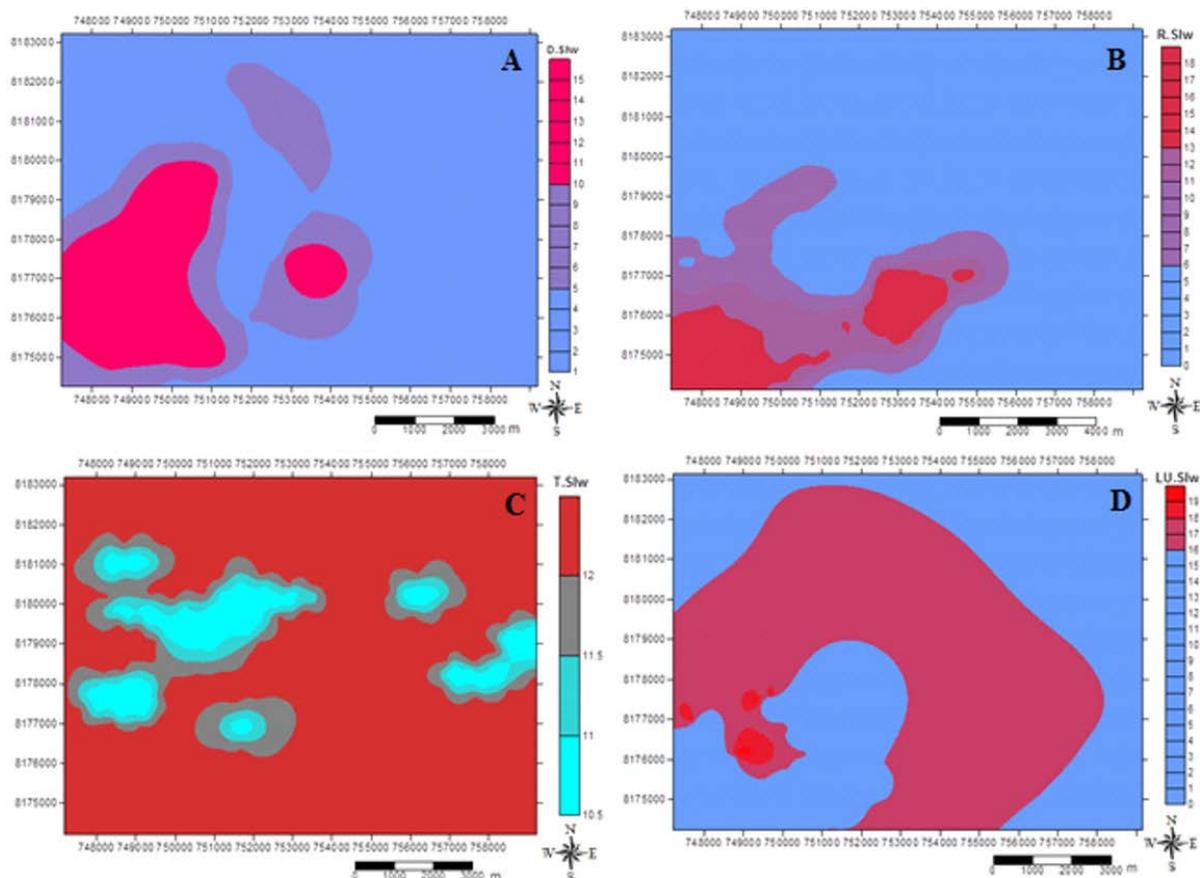
A área urbana continua corresponde a 40%, agricultura e sítios ocupa 59,5%, parque industrial e horto florestal 0,5%. As categorias, as classes e os valores LU.SIw estão contidas na tabela 4 e a distribuição dos valores de LU.SIw na figura 10D.

A figura 9 mostra a contribuição dos parâmetros D, R, T e LU ao índice SI. A contribuição da profundidade da água do aquífero (D.SIw) (Figura 9A) variam de 1 a 15, sendo que os maiores valores (10 a 15) ocorrem onde o aquífero é livre e tem as menores profundidades de água, as contribuições intermediárias (5 a 10) ocorrem em parte da ocorrência livre e confinada, e as menores contribuições (1 a 5) estão localizadas onde o aquífero é confinado e tem as maiores profundidades de suas águas.

**Tabela 4 - Intervalo e peso dos parâmetros SI da área da pesquisa.**

Profundidade da água - D		Recarga - R		Meio Aquífero - A		Inclinação topográfica - T		Uso do solo-LU	
Intervalo (m)	Classe - Dr	Intervalo (mm/ano)	Class - Rr	Litologia	Classe - Ar	Intervalo (%)	Classe - Tr	Tipo	Classe - Lur
5 a 10	7	0 a 40	1	arenito médio a grosso	4 - 9 (8)	0 to 2	10	Área de agricultura heterogênea	50
10 a 15	5	40 a 80	3			2 to 6	9	Ortoflorestal	50
15 a 20	3	80 a 160	6	----		6 to 12	5	Área urbana continua	75
20 a 30	2	160 a 240	8	----	----	12 to 18	3	Hidrografia Urbana	50
> 30	1	> 240	9	----	----	>18	1	---	---
SIw	0.186	SIw	0.212	SIw	0.258	SIw	0.121	SIw	0.222

SIw = Peso SI



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



**Figura 10** - Mapa de vulnerabilidade SI do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis – MT.

A contribuição da recargado do aquífero (R.SIw) (Figura 9B) varia de 0 a 18, tendo as maiores contribuições (13 a 18) distribuídas nas áreas livre do aquífero, contribuições intermediárias (6 a 13) onde o aquífero é livre e pequena parte confinado, as menores contribuições (0 a 6) nas áreas onde o aquífero é confinado.

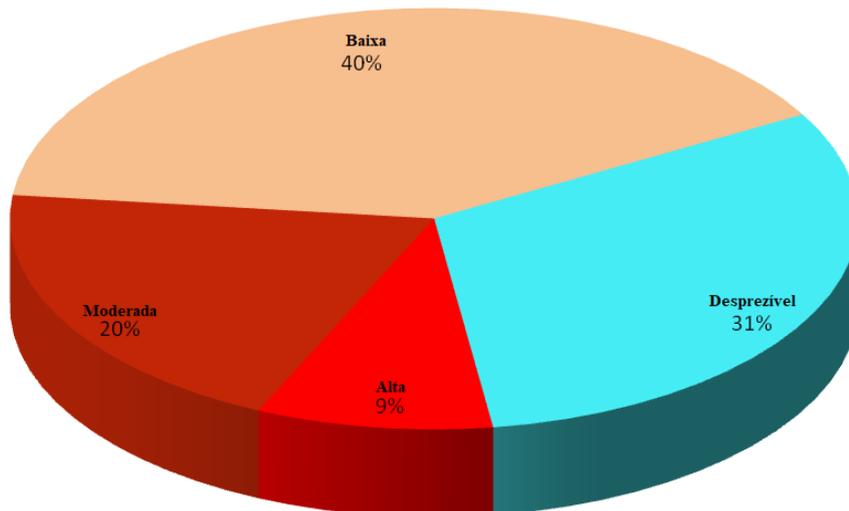
A contribuição da topografia (T.SIw) (Figura 9C) varia de 10,5 a 12, sendo que a maior contribuição 12 ocorre em torno de 75% da área e as menores contribuições (10,5 a 12) em 25% da área.

A contribuição do uso do solo (LU.SIw) (Figura 9D) varia 0 a 19, tendo as maiores contribuições (0

a 16) em torno de 50% da área, de 16 a 18 em 49,5% e de 18 a 19% em 0,5% da área. A contribuição de A.SIw é 20,6 para toda área.

A contribuição dos parâmetros uso do solo (LU) e litologia do aquífero (A) tiveram maior influência que os demais parâmetros sobre o índice SI em toda área. Porém a contribuição da recarga do aquífero (R) e da profundidade da água (D) foram determinantes nas áreas de ocorrência livre do aquífero.

As classes de vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Furnas produzidas pelo SI estão apresentadas na Figura 10, e a distribuição percentual na Figura 11.



**Figura 11** - Percentuais de vulnerabilidade SI do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT.

Os índices SI variam de 78 a 46, os quais foram distribuídos em quatro classes: desprezível (46 a 52), baixa (52 a 60), moderada (60 a 70) e alta (70 a 78).

A vulnerabilidade desprezível está distribuída em 31% da área total, correspondendo a 65% da área do aquífero confinado, onde ocorrem as maiores espessuras do Aquífero Ponta Grossa, a profundidade da água maior que 30 m, a recarga do aquífero varia de 0 a 40 mm/ano e o LU é agricultura e urbanização.

Esta vulnerabilidade indica possibilidade remota de qualquer contaminante atingir a zona saturada do aquífero, dado o insignificante fluxo vertical no Aquífero Ponta Grossa.

A vulnerabilidade baixa ocorre em torno de 40% da área total, ocupando 30% da área de confinamento do aquífero, onde a profundidade da água varia de 20 a 30 m e a recarga varia de 160 a 240 mm/ano, e 20% da área de ocorrência livre, com a profundidade da água variando de 10 a 15 m e a recarga anual de 40 a 80 mm/ano. Na área desta vulnerabilidade o LU principal é a urbanização, nela somente alguns contaminantes podem

alcançar a zona saturada do aquífero, quando lançados continuamente, pois o fluxo vertical de água é muito pequeno.

A vulnerabilidade moderada ocupa em torno de 20% da área total, sendo 5% da área de confinamento do aquífero, onde a profundidade da água varia de 10 a 15 m e a recarga varia de 40 a 80 mm/ano, e 30% da área de ocorrência livre, com a profundidade da água variando de 5 a 10 m, a recarga anual de 160 a 240 mm/ano e o LU é a urbanização e parque industrial. 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 torno de 9% da área total, equivalente a 50% da ocorrência livre do aquífero, a profundidade da água varia de 5 a 10 m, a recarga é maior que 240 mm/ano e o LU é a urbanização e parque industrial.

Esta vulnerabilidade indica que estes locais são vulneráveis a muitos contaminantes, exceto aqueles fortemente absorvidos ou transformados.

## CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES

O método SI produziu classes de vulnerabilidade coerentes com as características hidrogeológicas naturais do aquífero, mesmo com o impacto urbano no meio físico.

Esse bom desempenho está relacionado às características do SI e às adequadas adaptações nele realizadas para o cenário urbano. O SI compartimentou a área em quatro classes de vulnerabilidade: desprezível 31%, baixa 40%, moderada 20% e alta 9%.

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 SI, o qual não foi desenvolvido para este tipo de uso do solo.

O bom desempenho da metodologia SI nesta área demandou bastante tempo e recursos para a obtenção dos dados usados, mesmo considerando o contexto geológico e hidrogeológico relativamente

simples.

O elevado custo e tempo 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 importantes 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.

Embora a vulnerabilidade SI seja intrínseca é necessário cautela e ponderações para as interpretações e utilização dos resultados, pois ela envolve muitas simplificações geológicas, hidrogeológicas e de uso do solo.

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, a recarga do aquífero e o uso do solo podem variar no tempo e no espaço, este mapa precisará ser atualizado periodicamente para melhor cumprir a sua finalidade.

## 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.

CIVITA, M. **La carta Del vulnerabilitá degli acquiferi all inquinamiento**. Pitagora, Bologna, 1994.  
CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. **Hidrologia subterrânea**. Tomo II, Ediciones Omega, S.A, Barcelona. p. 1165-2359, 1976.

- CUTRIM, A.O. **Hidrogeologia, consumo e demanda de água em Rondonópolis-MT: subsídios para o desenvolvimento urbano sustentável**. Cuiabá, 187 p., 1999. Tese (Doutorado), Instituto de Biociências, Universidade Federal de Mato Grosso.
- 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**, v. 23, n. 1, p. 89-98, 2005a.
- CUTRIM, A.O. & REBOUÇAS, A.C. Tipos de usos das águas subterrâneas do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. In: 1º SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL E 1º SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM. SANTA MARIA-RS. 2005b. **Atas...**Santa Maria: ABas CD-ROOM, 2005b.
- CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. Aplicação dos métodos Drastic e Posh para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 127-142, 2010.
- DOERFLIGER, N.; JEANNIN P.Y.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multiattribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environ Geol**. v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.
- 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, **GWmate**. Washington, 101 p, 2002.
- FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FEERNANDES, J.; RIBEIRO, L. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index. In: 3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUTURE GROUNDWATER RESOURCES AT RISK, Lisboa, 2001. **Actas...**Lisboa, 2001.
- GOLDSCHIEDER, N.; KLUTE, M.; STURM, S.; HOTZL, H. The PI method - a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration on karst aquifers. **Z Angew Geol.**, v. 46, n. 3, p. 157-166, 2000.
- SURFER. **Surface mapping system, version 7**. Scientific Software Inc., 2000.
- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. Aquifer vulnerability Index (AVI): A GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping. **Can Water Res J**. v. 18, p. 25-37, 1993.

*Submetido em 31 de outubro de 2018*

*Aceito para publicação em 28 de janeiro de 2021*