

# DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA DO AQUÍFERO BAURU NA ZONA URBANA DE ARAGUARI, MG

*Nathália Assunção de Souza<sup>1</sup> & José Eduardo Alamy Filho<sup>2</sup>*

**RESUMO** - A avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos tem se apresentado como um dos mais importantes aspectos para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Neste trabalho, foi estimada a vulnerabilidade intrínseca do aquífero Bauru, localizado na cidade de Araguari, MG. As classes de vulnerabilidade da região em estudo foram definidas a partir de fatores relacionados com a ocorrência de água subterrânea explorável na zona urbana da cidade. Para tal, a presente avaliação atribuiu novos parâmetros à metodologia GOD, como forma de obter uma avaliação mais abrangente. Assim, foi possível comparar o método GOD com o método proposto por este trabalho (método híbrido), que considerou os seguintes parâmetros: ocorrência da água subterrânea, profundidade do lençol freático, declividade do terreno, litologia e condutividade hidráulica da formação superficial do solo. Comparando-se os dois métodos, verificou-se uma diferença nos índices finais de vulnerabilidade. Quando avaliados segundo o método GOD, os índices finais enquadraram-se em intervalos de vulnerabilidade *baixa a média*. Quando aplicado o método híbrido, os índices finais variaram de *alto a muito alto*. Apesar disto, as maiores vulnerabilidades ocorreram para as mesmas regiões, em ambos os casos. De uma forma geral método híbrido mostrou-se mais severo na atribuição dos índices finais.

**ABSTRACT** – The assessment of aquifer vulnerability to pollution stands out as one of the most important aspects to groundwater resources protection. In this paper, it was evaluated the intrinsic vulnerability of the Bauru aquifer, placed under Araguari, at Minas Gerais state. The vulnerability ranges, at analyzed region, were defined by factors linked with the exploitable groundwater at urban zone of the city. In this sense, this assessment attributed new parameters to GOD methodology, to obtain a more extensive evaluation. Thus, it was possible to compare the GOD and the proposed method (hybrid method), which considered the following parameters: groundwater occurrence, depth of water table, land slope, litology and hydraulic conductivity of the surface layer superposed to aquifer. The comparison of the two methods showed differences at final indexes of vulnerability. The assessment with the GOD method provided a range of vulnerability values between *low* and *moderate* indexes. The hybrid method provided *very high* to *high* indexes. Despite this difference, both methods indicated the higher vulnerability indexes at the same regions. In general, the hybrid method was more rigorous to set final vulnerability values.

**Palavras-chave:** águas subterrâneas, vulnerabilidade intrínseca de aquíferos.

---

<sup>1</sup> Mestranda em Engenharia Urbana pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia, MG- Brasil. Telefone: (34)3239-4170. E-mail: nathalia\_ass@yahoo.com.br.

<sup>2</sup> Professor adjunto da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia, MG- Brasil. Telefone: (34)3239-4170. E-mail: zeedu@feciv.ufu.br.

## 1 - INTRODUÇÃO

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à poluição constitui-se em um dos aspectos de maior importância para subsidiar o planejamento de uso do solo e para gerenciar a instalação e o funcionamento de empreendimentos potencialmente impactantes aos recursos hídricos subterrâneos, conforme destaca Bovolato (2005). Nesse aspecto, vários estudos relacionados à avaliação da vulnerabilidade são realizados com intuito principal de proteger os recursos hídricos subterrâneos. A partir da identificação da vulnerabilidade do aquífero, a prática de atividades antrópicas potencialmente poluidoras poderá ser minimizada.

O aquífero Bauru, subjacente à cidade de Araguari, Minas Gerais (ver localização na Figura 1), constitui um aquífero livre. Dessa forma, não existem camadas confinantes superiores que constituam uma barreira natural de contenção da percolação de poluentes pelo solo.

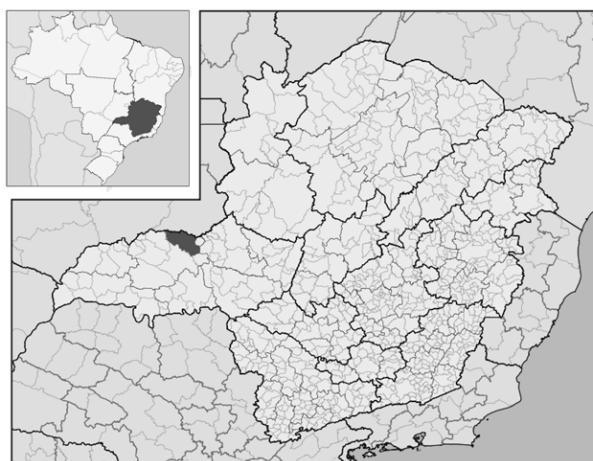


Figura 1 – Localização do município de Araguari, MG, em cuja zona urbana foi analisada a vulnerabilidade intrínseca do aquífero subjacente.

A água de Araguari é captada nos lençóis subterrâneos por intermédio de poços tubulares e abastece cerca de 106 mil habitantes (IBGE, 2008). A cidade conta com cerca de 114 poços, distribuídos na zona urbana, em baterias ou isoladamente. O abastecimento público de água da população da cidade de Araguari é feito exclusivamente por água subterrânea, mediante a exploração do aquífero Bauru (SAE, 2007). Segundo Oliveira e Campos (2004), esse sistema é o de maior potencial em fornecimento de água, concentrando mais de 90% dos poços responsáveis pelo abastecimento de água na região. Isto destaca a importância de se conhecer onde o aquífero é mais vulnerável à poluição.

Dentre as metodologias de avaliação mais conhecidas, podem-se destacar os métodos GOD, DRASTIC, Índice EK<sub>v</sub>, dentre outros. Os critérios utilizados variam de método para método, todavia, é possível destacar alguns dos principais parâmetros como a profundidade do lençol, o tipo

de ocorrência da água subterrânea (aquífero livre ou confinado), a condutividade hidráulica da zona não saturada, a litologia da zona não saturada, a litologia do aquífero e a topografia do local estudado.

Este trabalho faz uma avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero sotoposto à zona urbana de Araguari, utilizando, como base, o método GOD, estabelecido por Foster (1988). Essa vulnerabilidade refere-se às características intrínsecas naturais que determinam a sensibilidade do aquífero ser adversamente afetado por uma carga poluente antrópica imposta. Também é proposta outra forma de avaliação (método híbrido), a qual utiliza mais dois parâmetros (declividade do terreno e condutividade hidráulica da formação superficial de solo), além dos parâmetros utilizados pelo GOD. Uma vez definidos os índices de vulnerabilidade para cada método, é possível construir os mapas de vulnerabilidade intrínseca, os quais identificam as áreas urbanas potencialmente mais susceptíveis à poluição.

## **2 – METODOLOGIA**

Para a avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero da cidade de Araguari, o presente trabalho utilizou como base:

- Os índices utilizados pela metodologia GOD: ocorrência da água subterrânea, profundidade do lençol e litologia da zona não saturada;
- Os índices utilizados pela metodologia DRASTIC, para a definição do parâmetro declividade do terreno;
- Os índices indicados pelo método EK<sub>v</sub>, para a definição do parâmetro condutividade hidráulica da formação superficial.

Cada um dos parâmetros avaliados recebeu um índice e um peso relativo. Os parâmetros foram obtidos pontualmente, a partir do estabelecimento de uma rede de monitoramento de poços, bem distribuída na zona urbana da cidade.

### **2.1 - Método GOD**

A metodologia GOD faz uso de três parâmetros para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos:

- Ocorrência da água subterrânea (Groundwater - G);
- Litologia (Overall - O);
- Profundidade (Depth - D).

O índice final integrado de vulnerabilidade de aquíferos GOD é o produto dos índices obtidos para cada um dos parâmetros, variando de 0,0 (desprezível) até 1,0 (extrema). A Figura 2 ilustra as diretrizes para a obtenção do valor numérico de cada parâmetro.

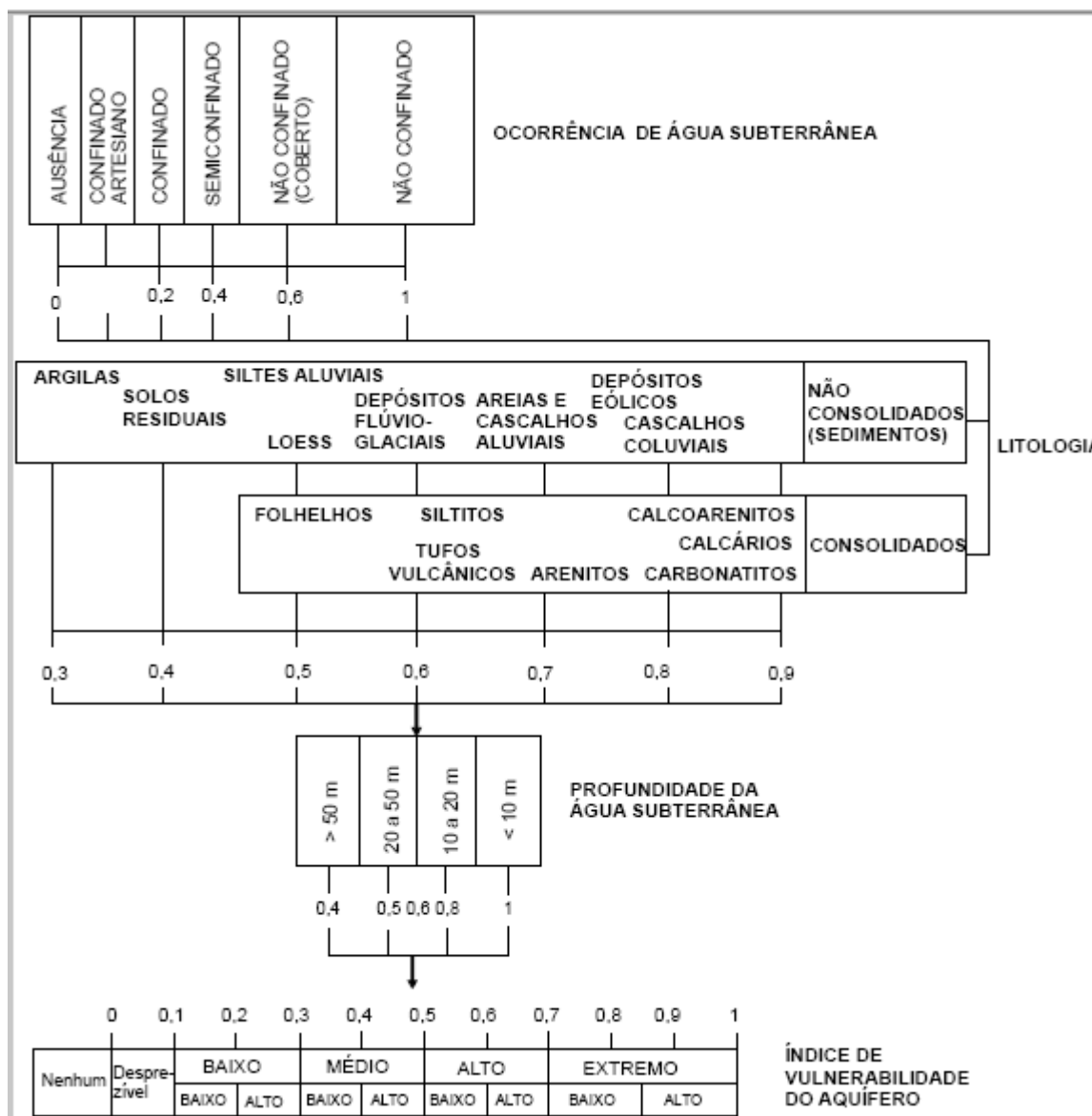


Figura 2 - Diagrama utilizado para indexação dos parâmetros da metodologia GOD.  
Fonte: Bovolato (2005).

## 2.2 – Parâmetros utilizados para avaliação da vulnerabilidade do aquífero

### 2.2.1 - Tipo de ocorrência do aquífero (G)

Este parâmetro teve como base, valores indicados pela metodologia GOD. Segundo essa metodologia, seu valor numérico varia no intervalo de 0,0 a 1,0, correspondendo o grau de vulnerabilidade 1,0 a sistemas não confinados sem cobertura, conforme o caso do aquífero Bauru na região analisada.

### 2.2.2 - Litologia da formação superficial do solo acima da zona saturada (O)

Para a classificação litológica da formação sobreposta à zona saturada, foram utilizados perfis de seis poços da rede de monitoramento. Esses perfis foram extraídos durante processo construtivo dos poços. A Superintendência de Água e Esgoto de Araguari (SAE) não possui arquivo dos perfis de todos os poços, uma vez que muitos deles são antigos e foram executados sem grandes preocupações acerca do conhecimento do subsolo. Esse fator, infelizmente, foi determinante para o pequeno banco de dados sobre o local. De posse dos seis perfis existentes, analisou-se o tipo de solo da camada superficial (2 m abaixo da superfície do terreno). Em Araguari, os solos superficiais variaram de argila a areia. Dentre os perfis estudados, pode-se destacar os seguintes solos encontrados na região: argila arenosa, argila pouco arenosa, argila siltosa e areia siltosa pouco argilosa. A Tabela 1 indica os índices da metodologia GOD, para cada tipo de solo.

Tabela 1 – Tipos de solo e respectivos índices, segundo o método GOD.

<b>S – tipo de Solo</b>	<b>Índice</b>
Argila	0,3
Solos residuais	0,4
Folhelhos	0,5
Silitos	0,6
Arenitos	0,7
Calcoarenitos	0,8
Calcários e carbonatos	0,9

Fonte: Aller et al. (1987).

Como a formação superficial variou de argila a areia, uma faixa muito restrita dentro da metodologia GOD, foi necessária a fixação de índices intermediários proporcionais. Dessa forma, os respectivos índices proporcionais foram:

- Argila: 0,3;
- Argila siltosa: 0,325;
- Argila siltosa ou argilo siltosa pouco arenosa; 0,35;
- Argila arenosa: 0,375;
- Areias ou solos residuais: 0,4.

Adotado o índice para cada situação, este foi ponderado pelo peso 1,0, quando da aplicação do método desenvolvido por este estudo. A utilização desse peso baseou-se no mesmo valor proposto pela metodologia GOD.

### 2.2.3 - Profundidade do nível da água ou do teto do aquífero (D)

A determinação da profundidade da superfície freática constitui um dos principais parâmetros para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à poluição. A relevância desse fator é ampliada nos aquíferos livres, os quais são desprovidos de uma camada impermeável superior. Com o objetivo de incluir a profundidade do lençol na avaliação da vulnerabilidade, foi realizado o monitoramento de nível da superfície freática em vários poços da rede de monitoramento (ver Figura 3).

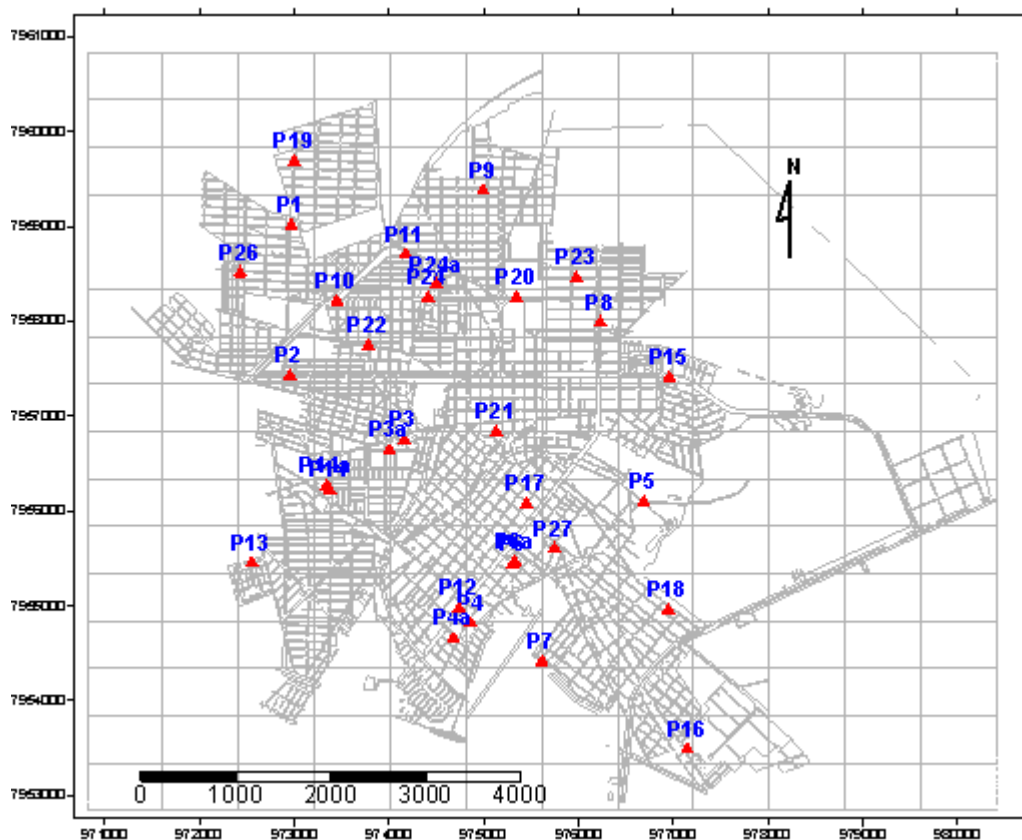


Figura 3 – Poços de monitoramento da profundidade do lençol.

Na Figura 3, os poços (P24 e P24a, P3 e P3a, P4 e P4a, P6 e P6a, P14 e P14a), estão localizados em uma mesma bateria. No contexto da cidade analisada, as baterias são áreas com vários poços tubulares, restritas à concessionária de abastecimento local. Dessa forma, nas baterias, os poços encontram-se muito próximos.

O monitoramento da profundidade da água foi realizado mensalmente, durante o período de um ano, a partir dos poços da SAE-Araguari. Os poços monitorados encontram-se bem distribuídos

na zona urbana da cidade, o que permite uma melhor interpolação espacial dos dados amostrados/coletados. As profundidades foram monitoradas em poços desligados e em operação, de maneira a propiciar um retrato mais fiel da superfície freática atual do aquífero. No procedimento de leitura das profundidades da água nos poços, foi utilizado um medidor automático JACIRI MNJ 250 m, segundo ilustra a Figura 4. Esse instrumento emite um sinal sonoro quando o sensor (localizado na ponta do cordão que o conduz ao fundo do poço) entra em contato com a superfície da água, acusando que o nível de água foi encontrado. Assim que o sinal era emitido, tomava-se a medida a partir do comprimento do cordão introduzido dentro do poço. Com as medições dos níveis de água, em cada um desses poços, realizaram-se interpolações numéricas para estimar as iso-linhas de profundidade do lençol sob toda a zona urbana da cidade.



Figura 4 – Medição da profundidade do lençol nos poços de monitoramento.

Tomando por base a metodologia GOD, a profundidade do aquífero (parâmetro D), tem graus de vulnerabilidade entre 0,4 e 1,0 (aquíferos rasos). A metodologia GOD ainda sugere que, para profundidades de 20 a 50 m, seja utilizado o índice 0,5. Para detalhar melhor esse parâmetro, esse fator foi dividido em intervalos menores, conforme indica a Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalos de valores de profundidade do lençol e respectivos índices.

<b>profundidade do lençol (m)</b>	<b>parâmetro D</b>
>50	0,4
40 -50	0,5
30 a 40	0,6
20 a 30	0,7
10 a 20	0,8
<10	1,0

Adotado o índice para cada situação, a profundidade foi ponderada pelo peso de 1,0 quando da aplicação do método proposto neste artigo. Esse valor também teve, com base, a ponderação utilizada pelo método GOD.

#### **2.2.4 - Declividade do terreno (I)**

A declividade do terreno condiciona a probabilidade do poluente escoar superficialmente ou de permanecer na superfície durante um tempo suficiente para infiltrar. Nesse contexto, as cotas da superfície do terreno, na região dos poços de monitoramento e em outros pontos da zona urbana da cidade, foram tomadas com o auxílio do mapa de curvas de nível da cidade de Araguari. Esse mapa, fornecido pela SAE, apresenta curvas de nível espaçadas de 1,0 m. De posse das cotas do terreno em alguns pontos da cidade, realizaram-se interpolações numéricas para estimar a superfície do terreno (iso-linhas de cota do terreno) sob toda malha da zona urbana da cidade. Essas iso-linhas foram construídas a partir de uma malha regular de 7600 pontos interpolados, a partir dos quais foram calculadas as declividades.

Para inserir o parâmetro declividade na avaliação da vulnerabilidade intrínseca, foram utilizados os critérios estabelecidos pelo método DRASTIC. Nesse método, são atribuídos índices de 1 a 10 para respectivos valores de declividade. Analogamente, para aplicação do método proposto neste trabalho, foram estabelecidos os índices proporcionais para cada valor de declividade. A Tabela 3 relaciona os índices para cada declividade percentual.

Tabela 3 - Classes de declividade e respectivo índice.

<b>T – Topografia (declive em %)</b>	<b>Índice DRASTIC</b>	<b>Índice proporcional utilizado</b>
<2	10	1,0
2 – 6	9	0,9
6 - 12	5	0,5
12 – 18	3	0,3
> 18	1	0,1



No método proposto, o índice da declividade foi ponderado pelo peso de 3/5, como propõe a metodologia DRASTIC. Esse peso foi obtido pela comparação que a metodologia DRTASTIC faz entre a declividade e a profundidade do aquífero.

### **2.2.5 - Condutividade Hidráulica Vertical da formação superficial (K)**

Condutividade hidráulica, em linhas gerais, é o índice físico que representa a facilidade da água escoar entre um ponto e outro do meio poroso. O conhecimento da condutividade hidráulica superficial encontra relação direta com o estudo da vulnerabilidade de aquíferos, haja vista que esse parâmetro indica a maior ou menor dificuldade do poluente percolar pelo solo.

Nesse aspecto, definiram-se dezenove pontos, bem distribuídos na área em estudo, com o objetivo de levantar os respectivos valores da condutividade hidráulica superficial. Os pontos selecionados encontram-se próximos (1m de raio) de alguns poços do monitoramento de profundidade, descritos no item 2.2.3. Salienta-se aqui, que esta condutividade hidráulica relaciona-se com o manto superficial, medida a aproximadamente 0,6 m abaixo da superfície do terreno. Nesse aspecto, ela atua como um indicador da facilidade de um poluente, lançado superficialmente (vazamentos em redes de esgoto, infiltração em sumidouros, fertilizantes, entre outros), percolar para regiões mais profundas.

Para esta estimativa, optou-se pela realização de ensaios de campo, com a intenção de garantir uma representatividade maior dos valores obtidos nos testes. Nesse contexto, optou-se pelo teste de infiltração. A metodologia utilizada seguiu os procedimentos estabelecidos pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE, 1996). Nesse ensaio, também denominado Infiltração a Nível Constante, utiliza-se uma carga hidráulica constante (nível de água), medindo a vazão necessária para mantê-la.

A condutividade hidráulica, em cada ponto, foi calculada a partir da equação:

$$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{C_u \cdot r} \quad (1)$$

Na Equação (1),  $C_u$  é um coeficiente empírico,  $Q$  é a vazão constante do ensaio (L/min),  $h$  é a carga hidráulica (m),  $r$  é raio do furo de sondagem (m). Com o uso dessa fórmula empírica, a condutividade hidráulica apresenta a unidade de cm/s. Para a determinação do coeficiente  $C_u$ , utilizou-se o ábaco proposto pela ABGE (1996), o qual é ilustrado pela Figura 5.

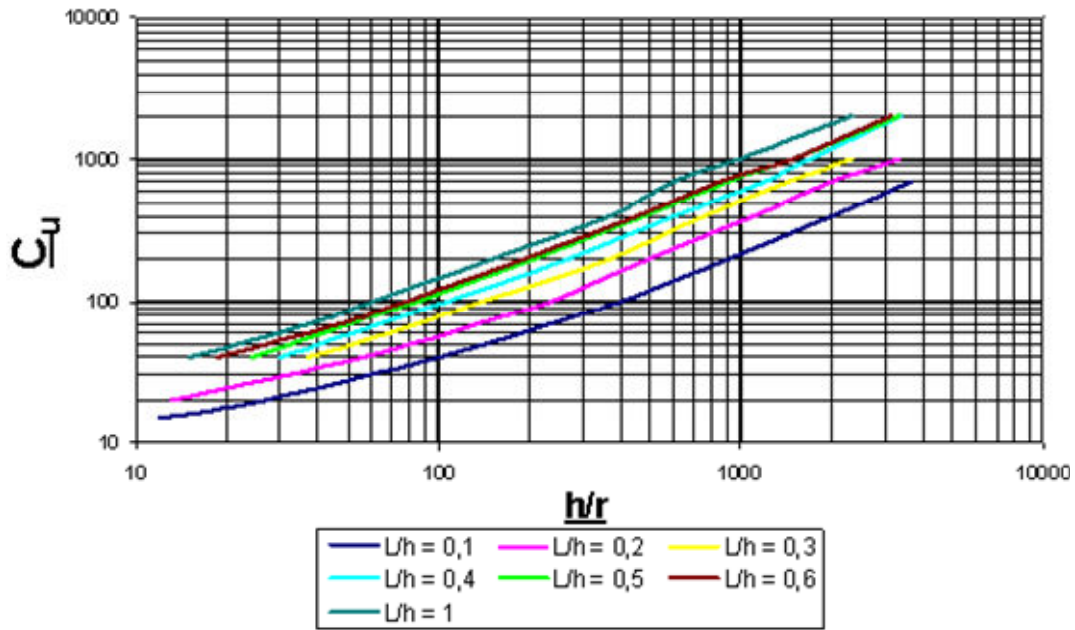


Figura 5 – Ábaco para determinação do coeficiente empírico  $C_u$ .

Para inserir o parâmetro condutividade hidráulica superficial na avaliação da vulnerabilidade natural, foram utilizados os critérios estabelecidos pelo método EKv. Esse método estima um índice de vulnerabilidade baseado na condutividade hidráulica da formação superficial e na profundidade do aquífero. No método EKv, são atribuídos índices de 1 a 5 para os valores de condutividade da zona vadosa superficial. Dessa forma, foram feitas adaptações dos índices para utilização do método híbrido, proposto nesta pesquisa. Os índices considerados para cada condutividade hidráulica são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Intervalos de valores de condutividade hidráulica e respectivos índices.

	<b>Condutividade hidráulica vertical da zona não saturada (K)</b>				
m/dia	$< 1,10^{-3}$	$>1,10^{-3}$ a 0,01	$>0,01$ a 1	$>1$ a 50	$>50$ a 500
Índice (EKv)	1	2	3	4	5
Índice proporcional utilizado	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0

Vale ressaltar que, atribuído o índice de acordo com o intervalo respectivo da condutividade, esta foi ponderada pelo peso de 1,0. Essa ponderação baseou-se na relação de importância entre E (profundidade do aquífero) e Kv (condutividade hidráulica da formação superficial), utilizada pelo método EKv, para obtenção do seu índice de vulnerabilidade.

### 2.3 - Índice final de vulnerabilidade

O índice final integrado de vulnerabilidade GOD é o produto dos índices obtidos para cada um dos parâmetros (G, O e D), variando de 0,0 (desprezível) até 1,0 (extrema).

O índice final, para este estudo de vulnerabilidade (método híbrido), que considera os parâmetros de declividade do terreno, profundidade do lençol, tipo de aquífero, condutividade hidráulica e litologia da formação superficial, foi obtido pela média ponderada dos cinco parâmetros, multiplicados pelos seus respectivos pesos, conforme ilustra a Equação 2.

$$\text{ÍndiceFinal(MétodoHíbrido)} = \frac{G.1 + O.1 + D.1 + K.1 + I.3/5}{1+1+1+1+3/5} \quad (2)$$

Na Equação (2), *G* é o índice de vulnerabilidade do parâmetro ocorrência da água subterrânea; *O* é o índice de vulnerabilidade do parâmetro litologia; *D* é o índice de vulnerabilidade do parâmetro profundidade do lençol; *K* é o índice de vulnerabilidade do parâmetro de condutividade hidráulica superficial e, finalmente, *I* é o índice de vulnerabilidade do parâmetro declividade.

Dessa forma, considerando a metodologia GOD e a metodologia híbrida proposta, o valor mínimo possível é 0 e o valor máximo é 1,0. A Tabela 5 indica os respectivos grau de vulnerabilidade, para ambas as Metodologias.

Tabela 5 - Índice final de vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

<b>Índice</b>	<b>Vulnerabilidade</b>
0,7 a 1,0	Muito Alta
0,5 a 0,7	Alta
0,3 a 0,5	Moderada
0,1 a 0,3	Baixa
0 a 0,1	Desprezível

### 2.4 - Mapas de vulnerabilidade

Mapas de vulnerabilidade são representações gráficas que, mediante algum tipo de codificação, permitem representar espacialmente as informações relacionadas à susceptibilidade de um aquífero à poluição. Para sua confecção, é necessária a determinação de todos os parâmetros referidos no item 2.2, obtendo-se os índices de vulnerabilidade intrínseca, conforme descrito no

item 2.3. No contexto deste trabalho, esses valores numéricos foram interpolados espacialmente, gerando os mapas de vulnerabilidade, para ambas as metodologias (GOD e híbrida).

### 3 – RESULTADOS

#### 3.1 - Ocorrência da água subterrânea (G)

O parâmetro G foi definido para a área de abrangência do aquífero Bauru de Araguari, com índice 1,0 para toda a zona urbana da cidade. Este índice está associado ao tipo do aquífero, que é livre.

#### 3.2 - Litologia acima da zona saturada (O)

Os índices atribuídos para cada um dos seis perfis litológicos, de acordo com a metodologia GOD, encontram-se detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 – Índices de Vulnerabilidade para o parâmetro litologia (O) acima da zona saturada

Poço	Identificação	Tipo de solo	Índice O
Poço novo S. Sebastião	P1	Argila arenosa	0,375
Poço da R. 21	P11	Argila pouco arenosa	0,35
Poço novo da Av. Minas Gerais	P12	Areia siltosa	0,4
Lagoa Seca	P16	Argila siltosa	0,325
Poço da Exposição	P20	Argila pouco arenosa	0,35
R. Tupaciguara	P23	Argila siltosa	0,325

Nota-se que a variação do índice foi pequena, uma vez que cinco dos seis perfis apresentam uma característica predominantemente argilosa.

#### 3.2 - Profundidade do lençol (D)

A profundidade do lençol foi aqui discriminada, recebendo um índice 0,9 para região de níveis de água medidos entre 0 a 5 m; 0,8 para níveis entre 5 a 20 m; índice 0,7 para níveis entre 20 a 50 m; e índice 0,6 para níveis maiores de 50 m. Os índices atribuídos em cada poço encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Índices atribuídos em função do parâmetro profundidade do lençol para cada poço.

Poço/ localização	Identificação	Profundidade média	Índice D
Poço novo S. Sebastião	<b>P1</b>	17,3	0,8
Poço da Coronel Belchior	<b>P2</b>	19,0	0,8
Bateria Fátima P1	<b>P3</b>	28,0	0,7
Bateria Fátima P15	<b>P3a</b>	33,8	0,6
Poço Bat. São Benedito P1	<b>P4</b>	24,4	0,7
Poço Bat. São Benedito P5	<b>P4a</b>	25,1	0,7
Chácara Fernando	<b>P5</b>	4,7	1,0
Bateria Estadual P7	<b>P6</b>	13,6	0,8
Bateria Estadual P12	<b>P6a</b>	39,1	0,6
Poço R. Goiás	<b>P7</b>	22,3	0,7
Poço Miranda	<b>P8</b>	21,2	0,7
Poço da Walter Santiago	<b>P9</b>	30,5	0,6
Poço novo da Passarela	<b>P10</b>	19,6	0,8
Poço da R. 21	<b>P11</b>	9,6	1,0
Poço novo da Minas Gerais	<b>P12</b>	24,1	0,7
Poço Madri	<b>P13</b>	27,3	0,7
Poço Chancia P1	<b>P14</b>	35,4	0,6
Poço Chancia P4	<b>P14a</b>	47,2	0,5
Poço da Theodoreto	<b>P15</b>	36,5	0,6
Lagoa Seca	<b>P16</b>	33,8	0,6
Praça Getúlio Vargas	<b>P17</b>	19,9	0,8
Poço da José de Belém	<b>P18</b>	18,3	0,8
Vieno	<b>P19</b>	11,7	0,8
Poço da Exposição	<b>P20</b>	23,8	0,7
Ginásio	<b>P21</b>	2,1	1,0
Araras	<b>P22</b>	30,5	0,6
R. Tupaciguara	<b>P23</b>	22,6	0,7
Bateria Independência P4	<b>P24</b>	37,2	0,6
Bateria Independência P8	<b>P24a</b>	22,4	0,7
Poço da Jaca P31	<b>P26</b>	42,2	0,5
Praça Jardim Regina	<b>P27</b>	35,2	0,6

### 3.3 – Declividade

A superfície do terreno, gerada mediante interpolação dos dados pontuais de cotas do terreno dos 31 poços de monitoramento, encontra-se ilustrada na Figura 5. Esse tipo de figura permite uma visualização geral do relevo local.

Com a malha de cotas da superfície, foi possível calcular a declividade do terreno para toda a zona urbana. A máxima declividade encontrada foi de 9,16% e a mínima foi de 0,02%. A Figura 6 ilustra as respectivas declividades sobre toda a zona urbana de Araguari.

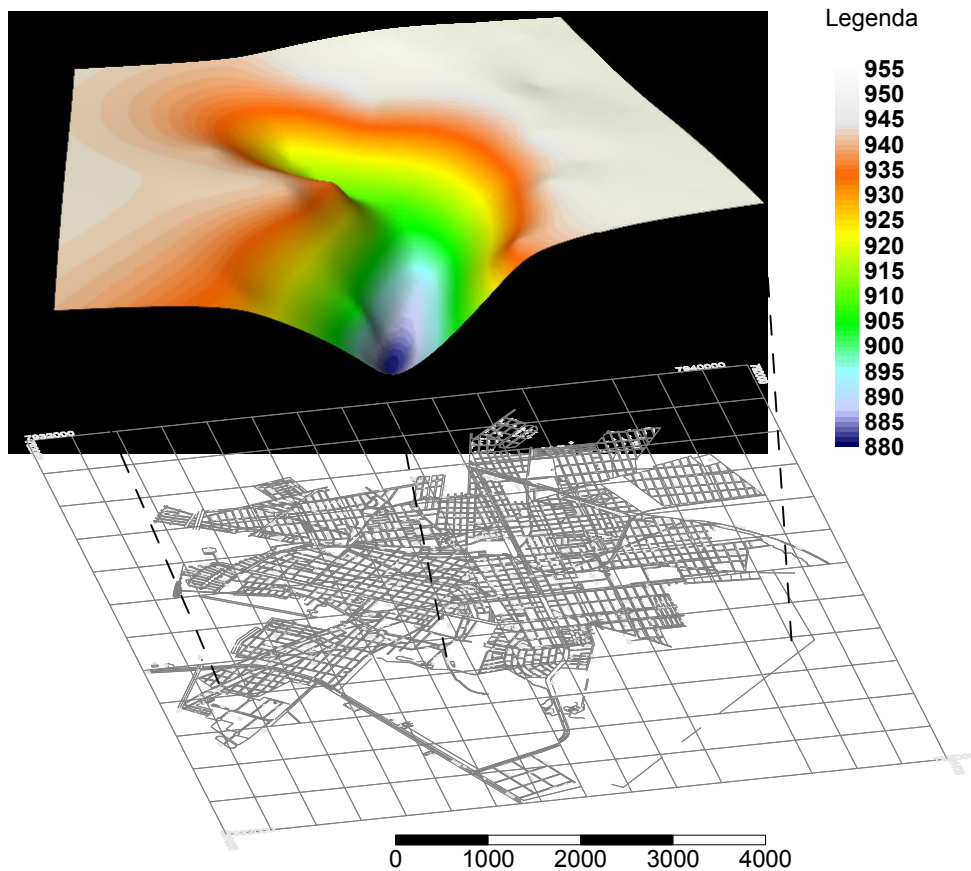


Figura 5 – Superfície do terreno – cotas em metros.

De acordo com a Figura 6, percebe-se que grande parte da área urbana da cidade possui pequena declividade do terreno (de 0 a 4%), o que condiciona uma probabilidade do poluente permanecer na superfície durante tempo suficiente para se infiltrar.

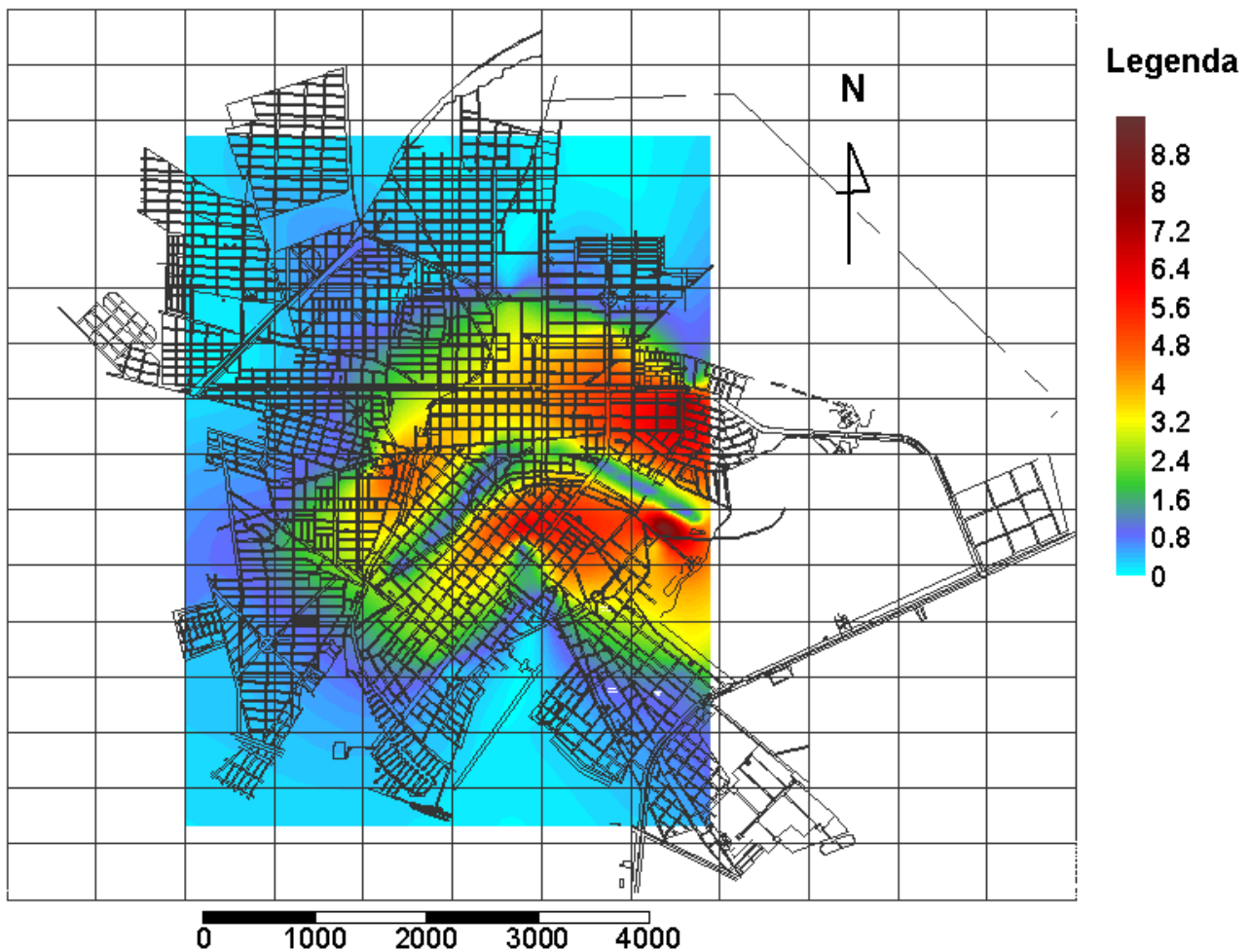


Figura 6 – Contorno de declividade do terreno (%)

### 3.4 - Condutividade Hidráulica vertical superficial (K)

A condutividade hidráulica da camada superficial foi obtida mediante procedimento descrito no item 3.2.5. Nesse procedimento, foram considerados:

- $h$  (carga hidráulica) = 205 cm;
- $L$  (altura livre do furo) = 45 cm;
- $r$  (raio do furo de sondagem) = 3,32 cm;
- $L/h = 0,2195$ ;
- $h/r = 61,7470$ ;
- $C_u$  (coeficiente empírico da fórmula) = 42, de acordo com o ábaco da ABGE (1996).

Em cada ensaio, foi verificada a vazão constante ( $Q$ ) e conseqüentemente a condutividade hidráulica ( $K$ ), conforme Equação (1). Os valores da condutividade hidráulica da formação superficial, calculados para cada ponto, e o respectivo índice de vulnerabilidade (com valores adaptados do método EKv), encontram-se descritos na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores da condutividade hidráulica superficial.

Localização	Identificação	Vazão constante do ensaio (cm <sup>3</sup> /s)	Condutividade hidráulica (cm/s)	Condutividade hidráulica (m/d)	Índice
Bateria Fátima	P3	6,02E+00	2,32E-03	2,01	0,8
Contingente	P29	5,34E+01	2,06E-02	17,79	0,8
Walter Santiago	P9	1,75E+02	6,74E-02	58,23	1,0
Poço Madri	P13	3,02E+00	1,16E-03	1,01	0,8
Poço Chancia P1	P14	3,20E+01	1,23E-02	10,66	0,8
Poço da Theodoreto	P15	6,17E+00	2,38E-03	2,06	0,8
Lagoa Seca	P16	4,80E+00	1,85E-03	1,60	0,8
José de Belém	P18	2,69E+01	1,04E-02	8,96	0,8
Vieno	P19	3,91E+01	1,51E-02	13,03	0,8
Poço da Exposição	P20	3,16E+01	1,22E-02	10,52	0,8
Ginásio	P21	5,58E+01	2,15E-02	18,60	0,8
Araras	P22	4,45E+01	1,71E-02	14,81	0,8
R. Tupaciguara	P23	8,68E+00	3,35E-03	2,89	0,8
Conj Mauá (Poço Jaca)	P26	7,15E+01	2,76E-02	23,82	0,8
Praça Jardim Regina	P27	1,41E+02	5,42E-02	46,81	0,9
Av. Batalhão Mauá	P28	8,15E+01	3,14E-02	27,14	0,9
Poço R. Goiás	P7	6,89E+01	2,66E-02	22,95	0,8
Chácara Fernando	P5	1,81E+01	6,97E-03	6,02	0,8
Bat. Independência. P4	P24	7,76E+01	2,99E-02	25,84	0,9

### 3.6 - Índice final e mapas de vulnerabilidade

A partir da multiplicação dos parâmetros tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade do lençol, foi gerado o mapa de vulnerabilidade do aquífero Bauru, de acordo com a metodologia GOD, conforme apresentado na Figura 7.





Figura 7 – Contorno da vulnerabilidade obtido a partir da aplicação do método GOD.  
Identificação de áreas de vulnerabilidade moderada.

Como resultado da aplicação do método GOD, foram identificados índices de vulnerabilidade baixos (0,19 a 0,3) a moderados (0,3 a 0,37). As regiões destacadas na Figura 7 representam as áreas com vulnerabilidade moderada. As demais áreas da cidade representam as regiões de índices de vulnerabilidade baixos.

Percebe-se que as regiões mais críticas (vulnerabilidade moderada) encontram-se próximas aos poços P21, P5, P2 e P6 (Poço do ginásio, Chácara do Fernando, Poço da Rua Coronel Belchior e Bateria do Estadual). Este fato deve-se principalmente à pequena profundidade da superfície freática nesses poços.

Como forma de comparar os métodos de avaliação da vulnerabilidade, fez-se a média ponderada dos índices de cada parâmetro (tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, profundidade do lençol, condutividade hidráulica da formação superficial e declividade do terreno), ponderados

com os seus respectivos pesos, gerando mapa de vulnerabilidade de acordo com o método híbrido (ver Figura 8).

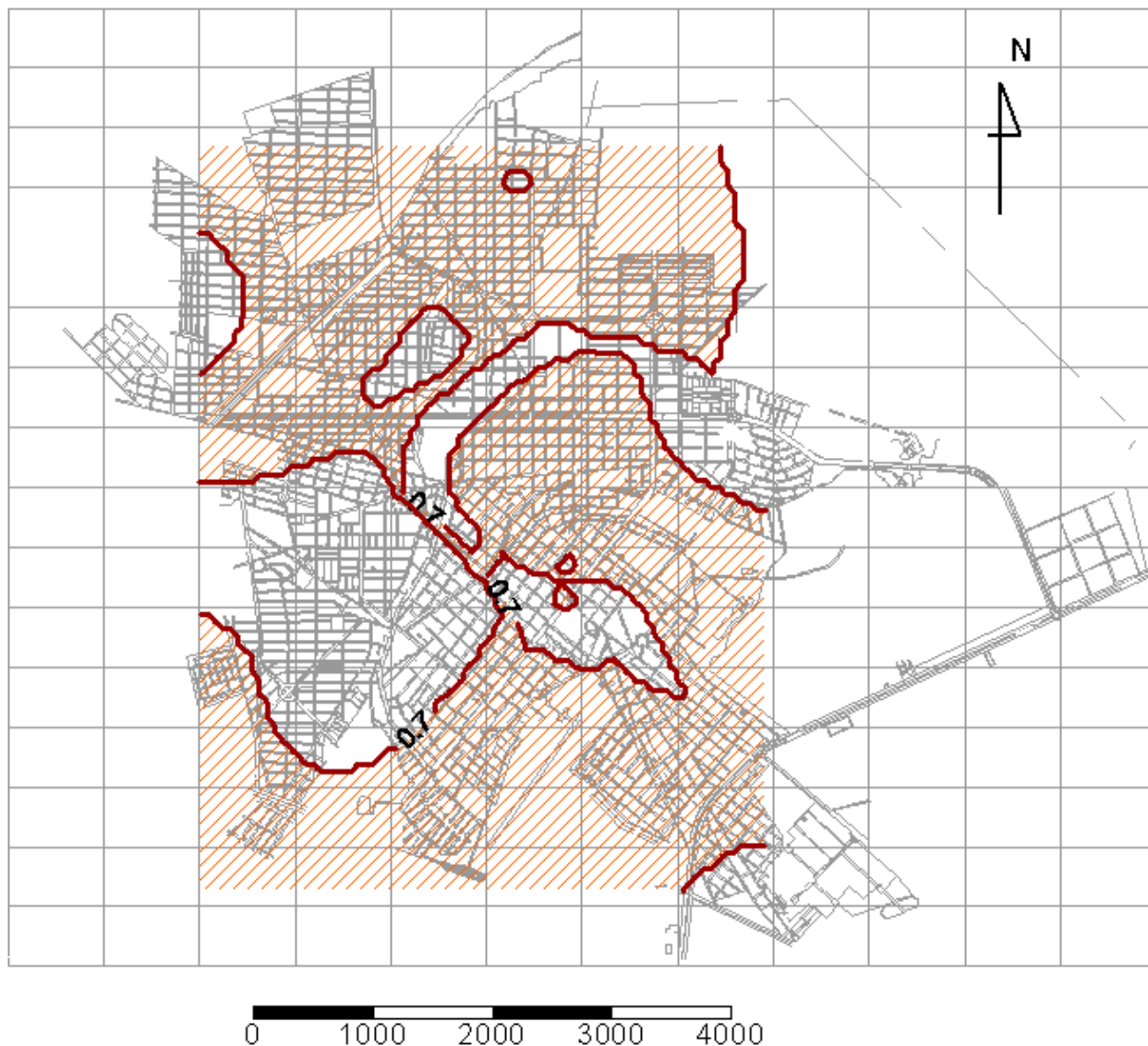


Figura 8 – Contorno da vulnerabilidade obtido a partir da aplicação do método híbrido.

A aplicação do método híbrido revelou resultados mais severos que o método GOD. Dessa forma, a vulnerabilidade, para este método, apresentou índices de vulnerabilidade altos a muito altos. As regiões hachuradas na Figura 8 apresentam índices de vulnerabilidade muito alto (0,7 a 0,77). As áreas não hachuradas apresentaram índices de vulnerabilidade altos (0,61 a 0,7).

As regiões mais críticas, dentro da zona de vulnerabilidade muito alta, são aquelas próximas aos poços P21 e P5 (Poço do Ginásio e Chácara do Fernando). Nessas regiões, os índices de vulnerabilidade são da ordem de 0,77. Este fato deve-se principalmente à baixa profundidade do lençol (menor que 10 m), potencializando o risco de um poluente atingir o aquífero.

Podem ser observadas, de uma maneira geral, vulnerabilidades mais elevadas nas regiões Norte, Sul e Leste da cidade.

#### **4- CONCLUSÕES**

De maneira geral, verificou-se uma diferença nas atribuições dos índices finais de vulnerabilidade, quando comparados os dois métodos. Quando a vulnerabilidade é avaliada levando em consideração apenas o Método GOD, os índices finais são de vulnerabilidades baixa a média. Quando é aplicado o método híbrido, adicionando-se os parâmetros de condutividade hidráulica superficial e declividade do terreno, a zona urbana apresentou índices de vulnerabilidade alta a muito alta. Apesar disto, as regiões indicadas como de vulnerabilidade moderada, no método GOD, estão indicadas com vulnerabilidade muito alta, no método híbrido. Essa analogia, além da expansão de áreas de maior vulnerabilidade, mostram que o método híbrido é mais severo na atribuição dos índices finais. Com a aplicação dos dois métodos, as regiões mais críticas, situaram-se nas proximidades dos poços P11 e P21 (Poço da R. 21 e Ginásio). De uma maneira geral, o centro da cidade apresentou vulnerabilidades maiores. Isto é explicado pela pequena profundidade do lençol na vizinhança do talvegue principal.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem pelo apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio técnico da Superintendência de Água e Esgoto de Araguari (SAE) e da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

#### **BIBLIOGRAFIA**

ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H. e PETTY, R.J. (1987) DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings, Okahama. 1987.

ABGE. Ensaio de Permeabilidade em Solos – Orientação para sua execução no campo. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1996.

BOVOLATO, L.E. Estudo de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas utilizando a metodologia “GOD” para a área urbana de Araguaína/TO.2005.

FOSTER, S.S.D.A; HIRATA, R.C.A. Riscos de poluição de águas subterrâneas; uma proposta de avaliação regional, São Paulo: ABAS, 1988.

Fundação IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2008. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> . Acesso em: Abril de 2008.

OLIVEIRA, L. A.; CAMPOS, J. E. G. Parâmetros hidrogeológicos do sistema aquíferoBauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. Revista Brasileira de Geociências, 2004.

SAE Araguari – Superintendência de Água e Esgoto de Araguari. Plano de saneamento do município de Araguari, MG, 2007.