

AVALIAÇÃO DAS VULNERABILIDADES NATURAL, ANTRÓPICA E TOTAL E PERIGO À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO UTIARITI NA CIDADE DE SINOP (MT), USANDO OS MÉTODOS VAN E POSH

EVALUATION OF NATURAL, ANTHROPIC AND TOTAL VULNERABILITIES AND DANGER TO CONTAMINATION OF THE UTIARITI AQUIFER IN THE CITY OF SINOP (MT), BRAZIL, USING THE VAN AND POSH METHODS

**Alteredo Oliveira CUTRIM¹, Joana Angélica Guimarães da LUZ²,
Renato Blat MIGLIORINI¹**

¹Universidade Federal de Mato Grosso – FAGEO- Faculdade de Geociências. Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367 – Bairro Boa Esperança. Cuiabá, MT. E-mails: alteredoc@hotmail.com; rena@ufmt.br

²Universidade Federal do Sul da Bahia – Reitoria. Rua Itabuna, s/n, Rodovia Ilhéus – Vitória da Conquista, km 39, BR 415, Ferradas. Itabuna-BA. E-mail: jasguimaraes7@gmail.com

Introdução
Características da área de estudo
Geologia da área
Pedologia da área
Hidrogeologia da área da pesquisa
Metodologia
Método Van
Método Posh
Resultados e discussão
Vulnerabilidade natural do Aquífero Utiariti
Vulnerabilidade antrópica do Aquífero Utiariti
Vulnerabilidade total Van do Aquífero Utiariti
Risco à contaminação do Aquífero na área
Conclusões e considerações finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Esta pesquisa foi realizada na cidade de Sinop, estado de Mato Grosso e consiste da avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Utiariti, usando os métodos VAN e POSH. O método VAN estima as vulnerabilidades natural, antrópica e total. Foram estimadas as classes de vulnerabilidade natural: moderada, baixa e desprezível; as classes antrópicas: moderada, baixa e desprezível e as classes de VAN total: extrema, muito alta, alta, moderada e baixa. As classes de vulnerabilidade natural e antrópica são iguais, porém as classes de vulnerabilidade natural são distribuídas de modo contínua e a antrópica de forma discreta devido aos tipos de usos do subsolo. O aquífero tem vulnerabilidade diferente da natural somente nos locais onde ocorre o uso do subsolo. Estes resultados mostram que em áreas onde ocorre ou ocorrerá o uso do subsolo deve-se empregar método de vulnerabilidade que estime o impacto desse uso sobre a vulnerabilidade do aquífero, visto que são dados importantes para elaborar planos de prevenção e de remediação à contaminação de aquíferos. Considerando que a vulnerabilidade total VAN é a vulnerabilidade mais real do aquífero, então o aquífero precisa de maiores cuidados nos locais de vulnerabilidades extrema, muito alta, alta e moderada.

Palavras-chave: VAN. POSH. Aquífero Utiariti. Vulnerabilidade e perigo à contaminação.

ABSTRACT - This research was carried out in Sinop city, Mato Grosso State, Brazil, to evaluate the vulnerability and danger to the contamination of the Utiariti Aquifer, using the VAN and POSH methods. The VAN method estimates the natural, anthropic and total vulnerabilities. The classes of natural vulnerability were moderate, low and negligible; the anthropic classes were moderate, low and negligible and the classes of total VAN extreme, very high, high, moderate and low. The classes of natural and anthropogenic vulnerability are the same, but the natural vulnerability classes are distributed continuously, and the anthropic classes are discretely due to the types of subsurface uses. The aquifer has a different vulnerability from the natural, only where the use of the subsoil occurs. These results show that in areas where the use of the subsoil occurs, a vulnerability method should be used that estimates the impact of this use on the vulnerability of the aquifer, since they are important data to elaborate plans of prevention and remediation to the contamination of aquifers. Considering that the total VAN vulnerability is the most real vulnerability of the aquifer, then the aquifer needs greater care in extreme, very high, high and moderate vulnerability locations.

Keywords: VAN. POSH. Utiariti Aquifer. Vulnerability and danger to contamination.

INTRODUÇÃO

Em todo mundo a degradação das águas subterrâneas tem preocupado pesquisadores e órgãos gestores, principalmente nas cidades em que essas águas são a única ou a principal fonte de abastecimento e mantenedor do fluxo de base

de rios e outros corpos d'água superficiais, se tornando assim, um bem econômico, social, estratégico e ambiental indispensável para o desenvolvimento sustentável (Aller et al., 1987; Cutrim & Campo, 2010a,b; Foster et al., 2002; Nolan &

Hitt 2006; Paralta & Francés, 2000; Secunda & Melloul, 1998; Twarakavi & Kaluarachchi, 2005; Van Stempvoort et al., 1992).

A degradação dessas águas é devida às atividades antrópicas nos meios urbano e rural, quando não são considerados os impactos da sua implantação sobre a vulnerabilidade dessas águas. Dessas atividades, as de uso do subsolo podem modificar a vulnerabilidade natural de um aquífero, cuja alteração depende das características hidrogeológicas e da acessibilidade à zona saturada do aquífero.

No processo de urbanização o uso do subsolo é muito intenso e a sua profundidade de penetração é bastante variada, produzindo impactos distintos na vulnerabilidade natural do aquífero.

Já no meio rural esses usos são menos comuns, porém onde existem suas dimensões são maiores que nos meios urbanos, e assim pode ser o impacto sobre a vulnerabilidade do aquífero. Essa característica de usos do subsolo requer, em muitos casos, o conhecimento da vulnerabilidade natural e antrópica para estimar uma vulnerabilidade mais realista do aquífero.

Uma área que contempla todas essas características é a cidade de Sinop-MT, usa as águas do Aquífero Utariti para abastecer 100% das demandas humana e atividades econômicas. Ela tem uma população de 135.874 habitantes, um PIB per capita de R\$ 29.208,33, um IDH de

0,807 e a economia é pautada na agricultura intensiva de soja, arroz e milho. A cidade não tem sistema de coleta e tratamento de esgoto, em 90% do seu entorno é produção agrícola e a hidrografia é constituída por vários tributários do rio Teles Pires, bastante impactados.

O cenário urbano e a total dependência de Sinop ao Aquífero Utariti contribuíram para a aplicação de um método de avaliação de vulnerabilidade que mostrasse o impacto de usos do subsolo na vulnerabilidade natural desse aquífero. Então foi aplicado o método VAN (Cutrim & Da Luz, Inédito) para estimar as vulnerabilidades natural, antrópica e total. O risco à contaminação foi avaliado através da integração dos tipos de vulnerabilidade com as fontes de contaminação classificadas através do método POSH (Foster et al., 2002).

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 Utariti.

CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, com 440km² (20kx22km), compreende a cidade de Sinop e o seu entorno, localizada no centro norte do estado de Mato Grosso, coordenadas 11°50'53''S e 50°38'57''W (Figura 1).

Está localizada na bacia hidrográfica do Rio Teles Pires, tem pluviometria média anual variando de 2.000 a 2.500 mm e temperatura de 38°C a 25°C.

Geologia da Área

A área de pesquisa está inserida na Bacia dos Parecis (Barros, et al., 1982; Bahia, 2007), cuja estratigrafia é constituída pelas Formações: Rio Ávila, Salto das Nuvens, Utariti e Ronuro (Figura 2A), sendo que na área aflora apenas as formações Utariti e Ronuro (Figura 2B).

A Formação Rio Ávila do Jurássico é de origem eólica, constituída por arenitos bimodais, vermelhos a róseos, friáveis, com estratificação cruzada tabular de grande porte. A Formação Salto das Nuvens do Cretáceo é a unidade basal do Grupo Parecis, de ambientes de leque aluvial e canal fluvial, é constituída por conglomerado polimítico,

arenito lítico grosso, arenito fino vermelho, arenito bimodal com estratificação cruzada de grande porte, pelito e argilito, argilito calcífero e marga, fossilífero.

A Formação Utariti do Cretáceo é a porção superior do Grupo Parecis, é de origem fluvial, composta por arenito fino a médio, de cores vermelha, amarela e branca, com estratificação delgados cruzada de pequeno porte, com subordinadas intercalações de siltitos, argilitos e raros níveis de conglomerados, localmente com seixos esparsos.

Esta formação aflora em 92% da área (Figura 2B). A Formação Ronuro é de idade terciária/quaternária, constituída por sedimentos pouco consolidados, composto por areia, silte, argila, cascalho e lateritas. Aflora em 8% da área ao longo das drenagens (Figura 2B).

Pedologia da área

Na área de estudo os solos predominantes são o Latossolo, Gleissolo e Plintossolo (Figura 3A). O Latossolo ocorre em 92% da área, nas partes mais

elevadas de relevo plano e suave ondulado, tem textura essencialmente argilosa, estrutura bem desenvolvida, espessura variando de 2,5m a 6m e condutividade hidráulica com máximo de 1,55 e mínimo

de 0,65 m/dia (Figura 3B). O Gleissolo e o Plintossolo ocorrem nos vales e nas encostas ao longo das drenagens, ocupando 9% da área, são solos permanente ou periodicamente saturados por água.

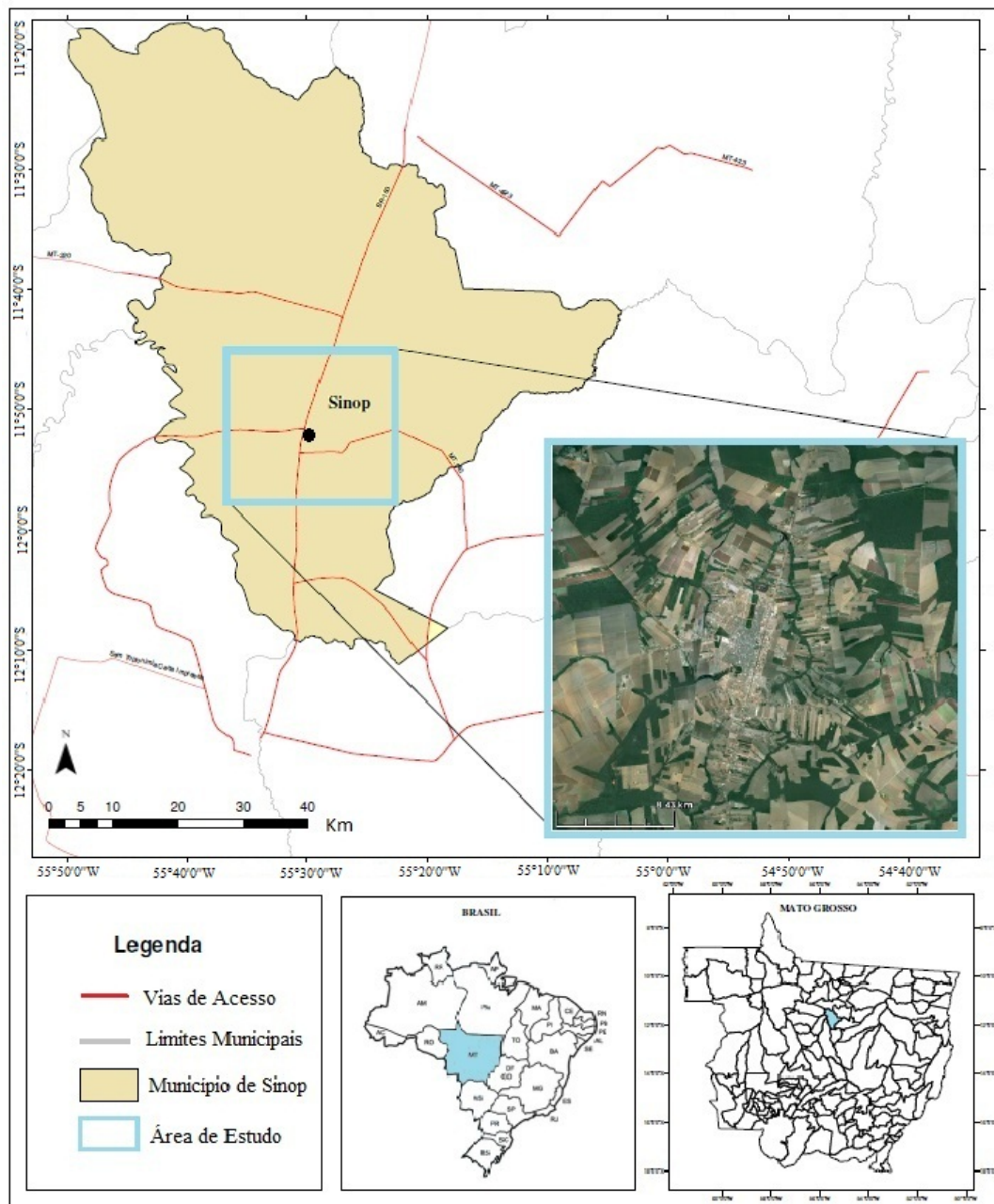


Figura 1- Localização da cidade de Sinop - MT. Fonte: Boldrin, 2012.

Hidrogeologia da Área da Pesquisa

A hidrogeologia da área da pesquisa é constituída pelos aquíferos Rio Ávila, Salto das Nuvens e Utiariti, no entanto, aflora somente o Utiariti (Figura 4A). O Aquífero Salto das Nuvens, com espessura variando de 80 a 550m, é do tipo livre coberto em meio poroso, ocorre em toda área, é coberto pelo Aquífero Utiariti. Os poços produzem vazões variando 15 a 50 m³/h, com rebaixamento médio de 25 metros.

O Aquífero Utiariti é um dos principais aquíferos da área da pesquisa e mais explorado, é do tipo livre

em meio poroso, com transmissividade de $2,65 \times 10^{-2}$ m²/s, condutividade hidráulica de $3,49 \times 10^{-4}$ m e coeficiente de armazenamento de $3,54 \times 10^{-3}$. A sua litologia e os valores desses parâmetros indicam que este aquífero tem boas condições para armazenamento e circulação de água. Os poços que exploram este aquífero produzem vazão de até 100 m³/h com rebaixamento médio de 25 m. O nível estático varia de 0,7 a 12,7 m (Figura 4B). As suas reservas permanente, renovável e explorável foram estimadas em 2013 em $226,9 \times 10^8$ m³, $18,58 \times 10^7$ m³/ano e $4,6 \times 10^7$ m³/ano respectivamente (Lussi, 2013).

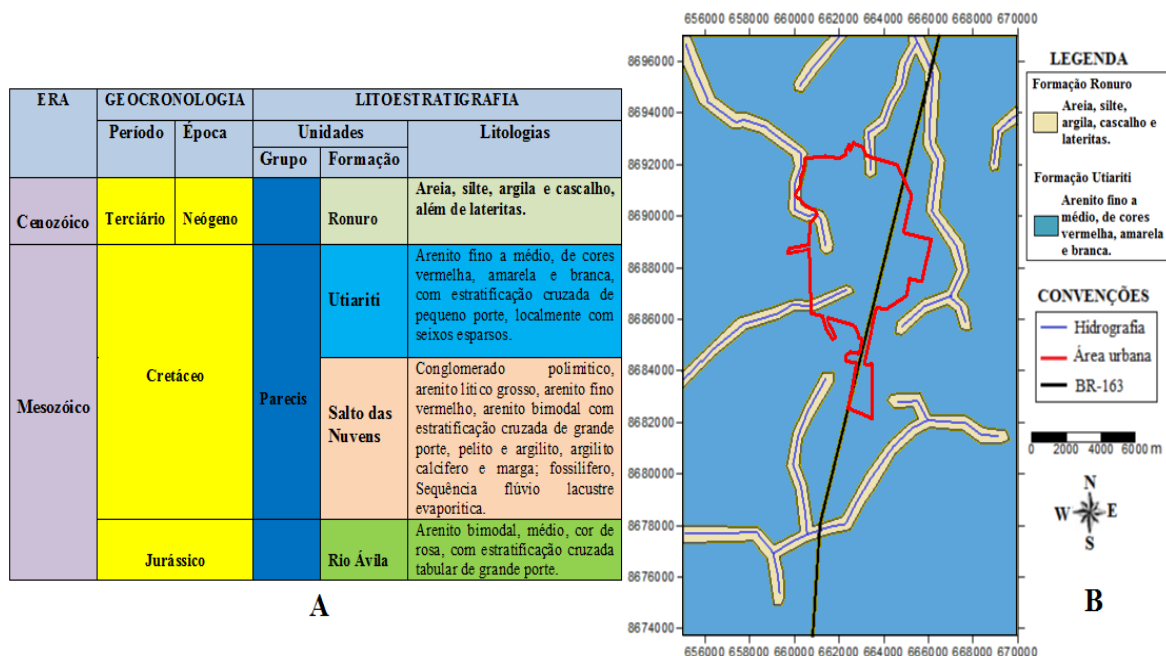


Figura 2 - Carta estratigráfica (A) e mapa geológico da área (B).

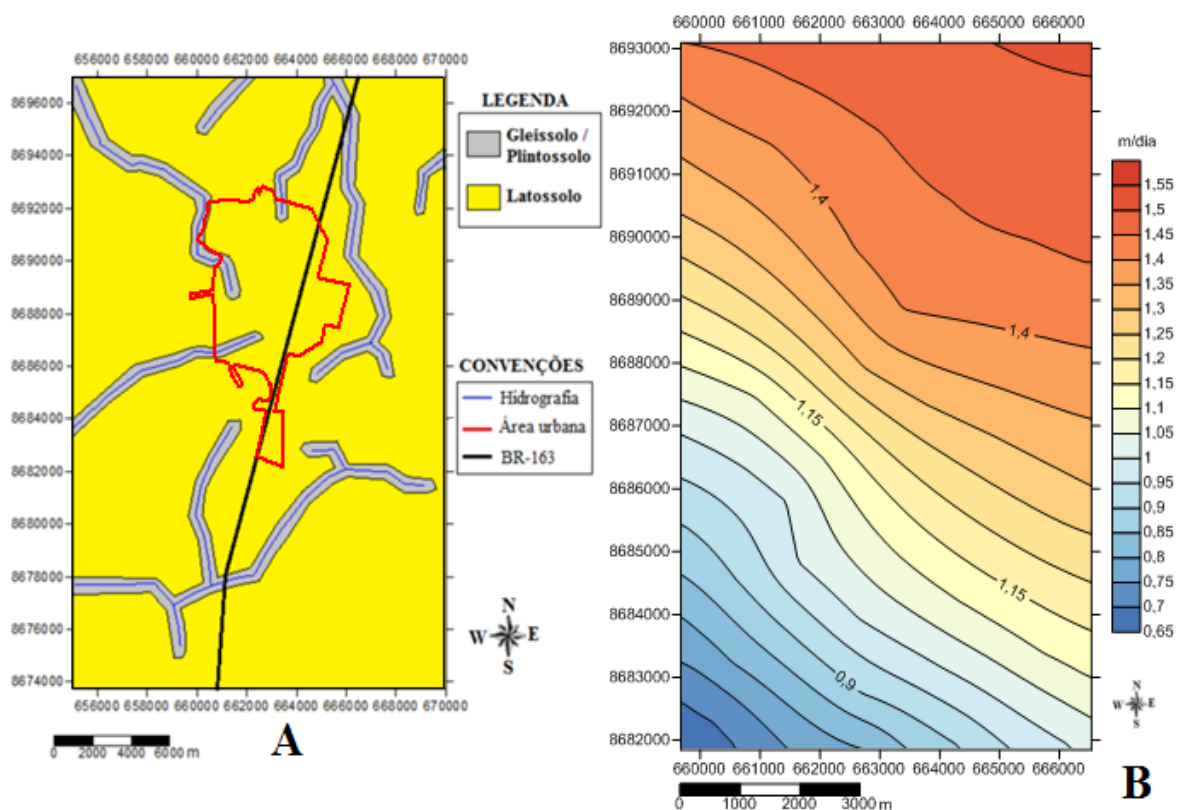


Figura 3 – Mapas de solo (A) e condutividade hidráulica de solo (B).

METODOLOGIA

Método Van

O método VAN (Cutrim & da Luz, inédito) considera que o contaminante tem a mobilidade da água e pode ser incorporado à zona saturada do aquífero através da infiltração de águas pluviométricas e de usos das zonas não saturada e saturada. Desse modo o VAN foi desenvolvido para avaliar as vulnerabilidades antrópica (V_a), natural (V_n) e total (VAN) de aquífero,

considerando os parâmetros hidrogeológicos: modo de ocorrência do aquífero, profundidade da água no aquífero, condutividade hidráulica da zona não saturada e topografia da área e o parâmetro antrópico: profundidade de uso das zonas não saturada e saturada (Figura 5).

Essas vulnerabilidades são estimadas de acordo com o fluxograma da Figura 5, que mostra a determinação das vulnerabilidades (V_a) e (V_n)

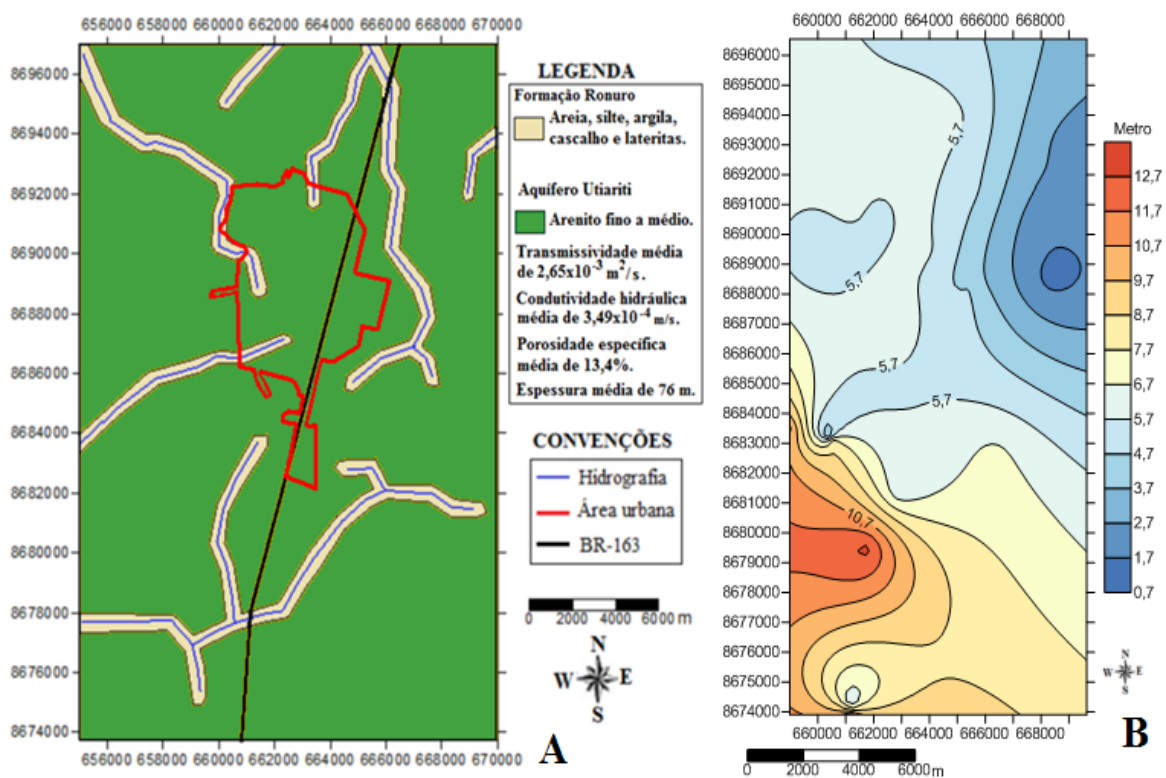


Figura 4 - Mapas hidrogeológico (A) e de nível estático (B) do Aquífero Utiariti.

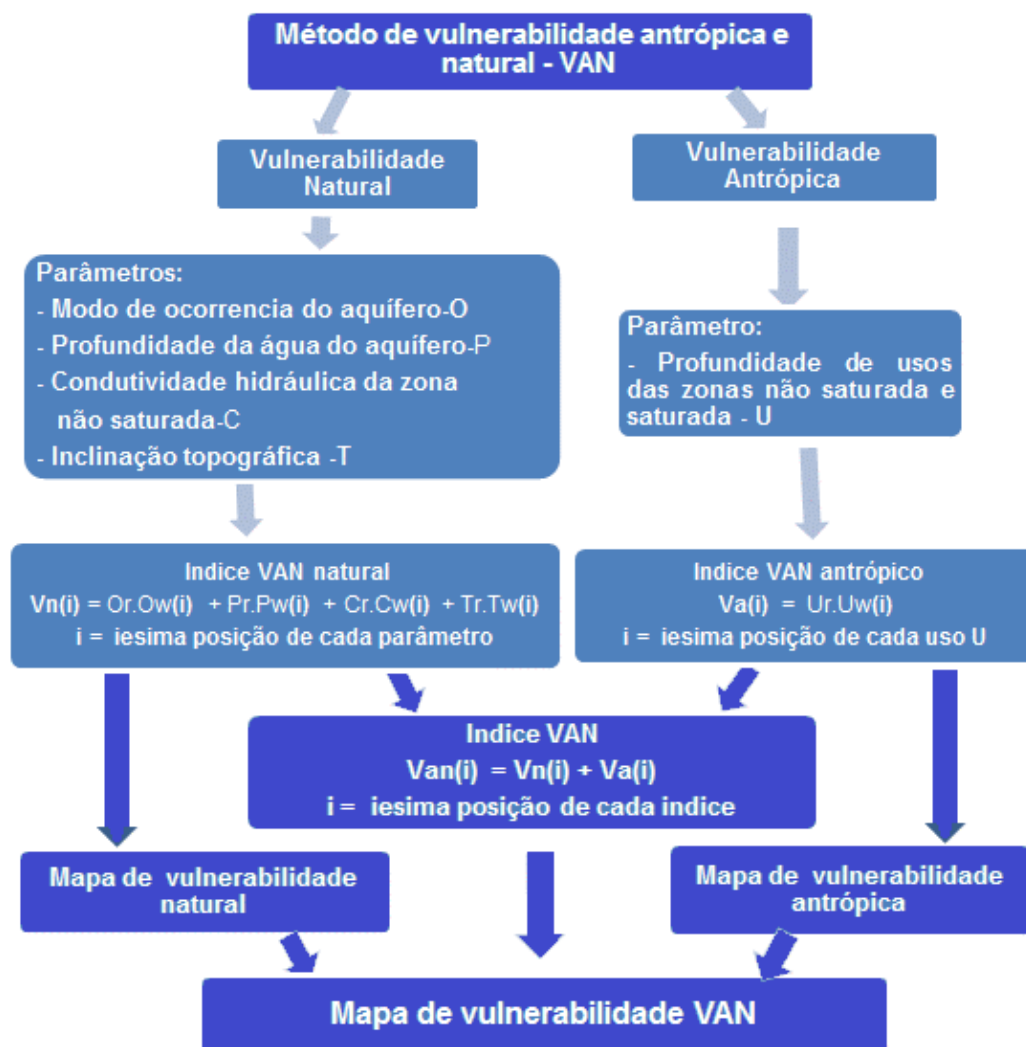


Figura 5 – Fluxograma esquemático do desenvolvimento do método VAN.

em função somente da soma ponderada dos seus respectivos parâmetros na mesma posição, assim como a vulnerabilidade VAN gerada pela soma de (Va) e (Vn). Portanto, este método produz três mapas de vulnerabilidade, um para (Va), um para (Vn) e um para (VAN). O mapa VAN pode ser elaborado pela superposição dos mapas Va e Vn, usando software específico, ou pela digitalização dos mapas Va e Vn, adotando uma malha de digitalização que contemple a diversidade dessas vulnerabilidades.

Para quantificar os tipos de vulnerabilidade VAN, todos os seus parâmetros receberam um fator de ponderação w, atribuídos conforme a sua importância para a vulnerabilidade de aquífero (Figura 6A). Cada parâmetro foi dividido em classes (r) de contribuição ao índice VAN, sendo que a classe de maior contribuição recebe valor

10 e a menor 1, e estes números são multiplicados pelo fator de ponderação w de cada parâmetro (Figuras 6B a 6F). A diferença de contribuição de cada parâmetro natural ao índice VAN é entendida através da sua influência à acessibilidade à zona saturada do aquífero.

O modo de ocorrência (O) de aquífero (livre exposto, livre coberto e confinado) tem relação direta com a sua vulnerabilidade, pois cada um deles indica o seu nível de contato com a superfície e com os usos da subsuperfície do terreno (Figura 6B).

A profundidade do nível estático (P) corresponde à profundidade que o contaminante terá de percorrer para alcançar a água do aquífero. Em aquífero livre P é igual ao seu nível freático e em aquífero confinado P é igual à profundidade do seu topo (Figura 6C).

Ponderação dos Parâmetros do VAN			Tipo de ocorrência do aquífero		
Parâmetro	Descrição	Fator de ponderação- W	Ocorrência	Classe – Or	Or.Ow
O	Ow	5	Livre (exposto)	10	50
P	Pw	5	Livre coberto por solo arenoso	8	40
C	Cw	4	Livre coberto por solo areno argiloso	6	30
T	Tw	2	Livre coberto por solo argilo arenoso	4	20
U	Uw	5	Livre coberto por solo argiloso	2	10
			Confinado	(B) 1	5

Profundidade da água do aquífero			Condutividade hidráulica da zona não saturada		
Categoria (m)	Classe – Pr	Pr.Pw	Categoria(m/dia)	Classe – Cr	Cr.Cw
0 a 1,5	10	50	0,030 a 4,000	1	4
1,5 a 4,6	9	45	4,000 a 10,00	2	8
4,6 a 9,1	7	35	10,000 a 20,000	4	16
9,1 a 15,2	5	25	20,000 a 40,000	6	24
15,2 a 22,9	3	15	40,000 a 80,000	8	32
22,9 a 30,5	2	10	> 80,000	10	40
>30,5	1	5			

Inclinação topográfica percentual			Profundidade e usos das zonas não saturada e saturada		
Categoria %	Classe – Tr	Tr.Tw	Razão U/P	Ocorrência do aquífero	Classe-Ur Ur.Uw
0 a 1	10	20	≥ 100%	Confinado e livre	20 100
1 a 5	8	16	99,9 a 70%	Livre	15 75
5 a 10	5	10	70 a 40%	Livre	10 50
10 a 20	3	6	40 a 10%	Livre	5 25
>20	1	2	10 a 5%	Livre	2 10
			5 a 0%	Livre	(F) 1 5

Figura 6 – Ponderação e classificação dos parâmetros do método VAN.

A condutividade hidráulica (C) expressa a capacidade de percolação de fluxo e depende das propriedades do meio e do fluxo. Portanto, C da zona não saturada corresponde à média de C dos tipos de solos e/ou rochas situadas acima da zona saturada do aquífero. Este parâmetro condiciona o tempo de deslocamento dos

contaminantes e os vários processos de atenuação (Figura 6D).

A inclinação porcentual da topografia (T) tem grande influência na velocidade do escoamento superficial, no gradiente hidráulico e no direcionamento de fluxos preferenciais, principalmente nos aquíferos livres (Figura 6E).

Os tipos de usos das zonas não saturada e saturada (U), principalmente aqueles que penetram estas zonas, tornam mais fácil o acesso de fluido à zona saturada do aquífero, portanto, cria uma vulnerabilidade antrópica. O nível desta vulnerabilidade está relacionado com o modo de ocorrência do aquífero e com a distância do uso à zona saturada do aquífero. Em aquíferos confinados somente os usos que penetram o topo do aquífero originam esta vulnerabilidade. Nos aquíferos livres esta vulnerabilidade existe em toda a espessura da zona não saturada, ela aumenta com a aproximação e penetração na zona saturada do aquífero (Figura 6F). Ressalta-se a importância do mapeamento e

georreferenciamento desses usos, considerando que alguns deles têm caráter espacial pontual, como poço tubular, cacimba, fossas sépticas e negras e depósitos de combustíveis, e outros de dimensões alongadas e estreitas, como rede de esgoto, valas pluviais urbanas, canais para desvios de rios, tuneis, etc, e outras com maiores dimensões, como cavas para lixão, aterro sanitário, lagoas de tratamento de esgoto, represas, etc. Todas essas dimensões são muito pequenas quando comparadas às dimensões do aquífero.

O índice VAN é calculado através da soma ponderada dos seus parâmetros, conforme a seguinte equação:

$$VAN = Or.Ow + Pr.Pw + Cr.Cw + Tr.Tw + Ur.Uw \quad (1)$$

Onde:

O = Ocorrência do aquífero.

P = profundidade da água do Aquífero.

C = condutividade hidráulica da zona não saturada.

T = topografia local (inclinação em %).

U = profundidade do uso da zona não saturada.

w = fator de ponderação geral do VAN.

r = número relacionado à faixa de valores de cada parâmetro.

Os valores do índice VAN são distribuídos em intervalos ordenados para formar as classes de vulnerabilidade (Tabela 1). Na determinação dessas classes é considerada a influência de cada parâmetro, de modo que elas gerem um cenário de vulnerabilidade com maior coerência hidrogeológica e uso das zonas não saturada e saturada, produzindo assim um melhor realismo de acessibilidade para o aquífero. Essas classes devem ser apresentadas em mapa para mostrar a distribuição espacial e viabilizar o seu uso nas diversas áreas de plano de gestão de águas subterrâneas.

O método VAN considera que o contaminante pode ser incorporado à zona saturada do aquífero através da infiltração de águas pluviométrica e de usos da zona não saturada; o contaminante tem a mobilidade da água. Para a utilização deste método a área de estudo deve ser de detalhe.

A vulnerabilidade extrema significa que o aquífero é vulnerável a todas as águas poluídas, com rápido impacto em todos os cenários de poluição. A vulnerabilidade muito alta indica que o aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles com extrema capacidade de absorção. A vulnerabilidade alta indica que o

aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles fortemente absorvidos. 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 continua e largamente despejados ou lançados. A vulnerabilidade desprezível significa que o aquífero é confinado por camadas com insignificante fluxo vertical.

Ainda que o método de geração do mapa de vulnerabilidade envolva simplificações geológicas, hidrogeológicas e de uso da zona não saturada, parâmetros esses que, na maioria dos casos, são bastante complexos, a sua aplicação em locais específicas podem resolver problemas locais e específicos e assim, a avaliação da vulnerabilidade do aquífero é possível.

Método Posh

O método POSH – Pollutant Origin and its Surcharge Hydraulically (Foster et al., 2002) classifica as fontes potenciais de contaminação em três níveis qualitativos de geração de carga contaminante: reduzida, moderada e elevada, considerando o tipo de atividade, a sua capacidade geradora de contaminante e a carga hidráulica associada. O inventário das atividades potenciais de contaminação consideradas mais relevantes para o estudo foi efetuado através de inspeção em todos os acessos da área de estudo e os dados foram georreferenciados através de GPS. Essas fontes foram classificadas e plotadas em mapa na mesma escala do mapa de vulnerabilidade à contaminação do VAN.

Tabela 1 - Classes de vulnerabilidade VAN.

Classes de vulnerabilidade VAN	
Valor do índice VAN	Classes de vulnerabilidade VAN
<70	Desprezível
70 a 90	Baixa
90 a 110	Moderada
110 a 130	Alta
130 a 150	Muito alta
>150	Extrema

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vulnerabilidade Natural do Aquífero Utiariti

A vulnerabilidade natural do aquífero (Figura 8) foi estimada através dos parâmetros, modo de ocorrência do aquífero que em toda área é livre coberto por solo argilo-arenoso, logo a sua contribuição à vulnerabilidade é $Or.Ow=20$ (Figura 6B).

A contribuição da profundidade da água Pr.Pw (Figura 7A), varia de 25 a 46, sendo que os valores maiores que 40 ocorrem a leste e

pequena parte do sudoeste, os menores que 30 localizam-se no sudoeste e os valores de 30 a 40 no restante da área. A contribuição da inclinação topográfica $Tr.Tw$ é 20 (Figura 6E), pois a sua variação é 0,05 a 0,85% em toda área (Figura 7B). A condutividade hidráulica da zona não saturada varia de 0,9 a 1,5 m/d (Figura 3B), portanto, em toda área, a sua contribuição à vulnerabilidade é $Kr.Kw=4$ (Figura 6D).

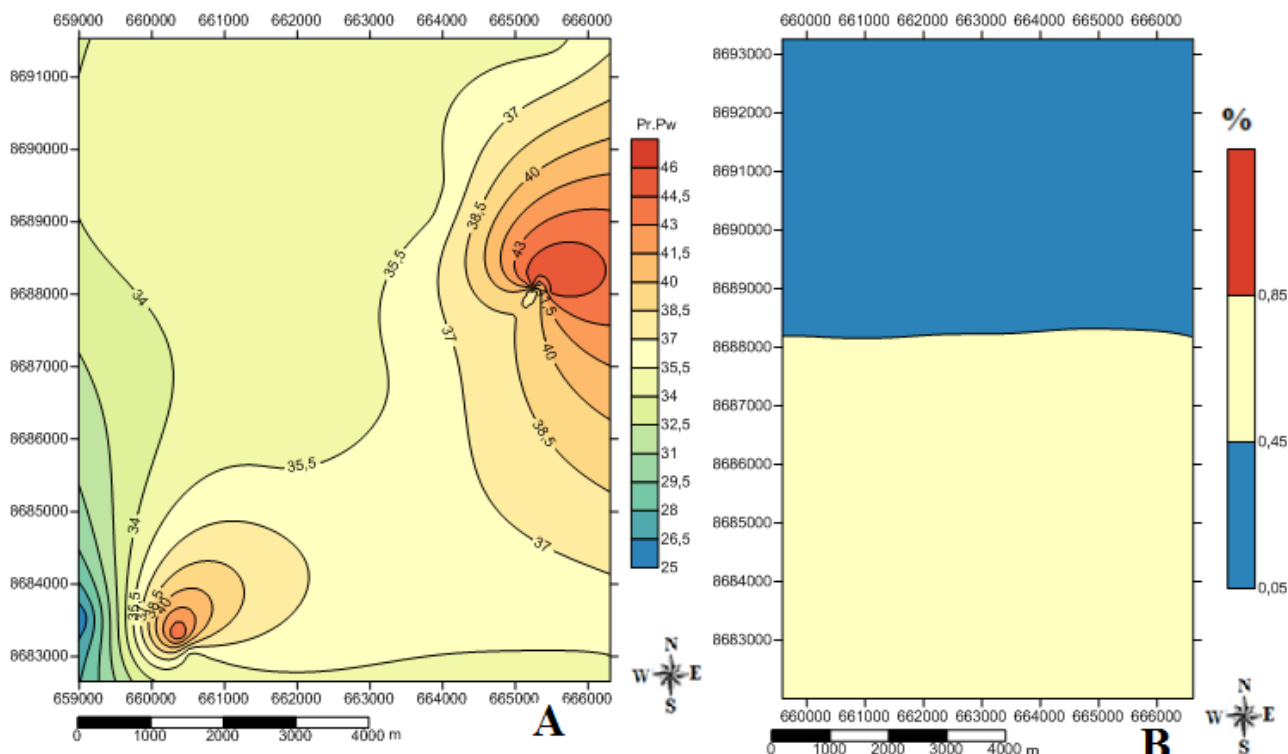


Figura 7 – Contribuição da profundidade da água do Aquífero Utiariti (A) e inclinação topográfica da área (B) à vulnerabilidade.

Os índices de vulnerabilidade natural variam de 95 a 69, gerando as classes de vulnerabilidade moderada, baixa e desprezível (Figura 8A). A vulnerabilidade moderada (índices de 95 a 90) ocorre em 3,82% (Figura 8B) em parte do centro ao nordeste, onde a profundidade da zona saturada do aquífero varia de 0,7 a 5,7m. Esta vulnerabilidade indica que alguns contaminantes

podem alcançar a zona saturada do aquífero somente se lançados continuamente.

A vulnerabilidade desprezível (índices de 70 a 69) corre em 1,72% da área, na parte sudoeste, onde a profundidade da zona saturada do aquífero é a maior, em torno de 12m. Esta vulnerabilidade indica que nenhum contaminante chegará à zona saturada do aquífero, visto a

constituição essencialmente argilosa do Latossolo que cobre o aquífero tem uma infiltração vertical quase desprezível.

A vulnerabilidade baixa (índices de 90 a 70) está distribuída no restante 94,46% da área (Figura

8B), cuja profundidade da zona saturada do aquífero varia de 5,7 a 8,7m. A vulnerabilidade baixa indica que o aquífero é vulnerável somente a poluentes conservativos em longo prazo, quando continua e largamente despejados ou lançados.

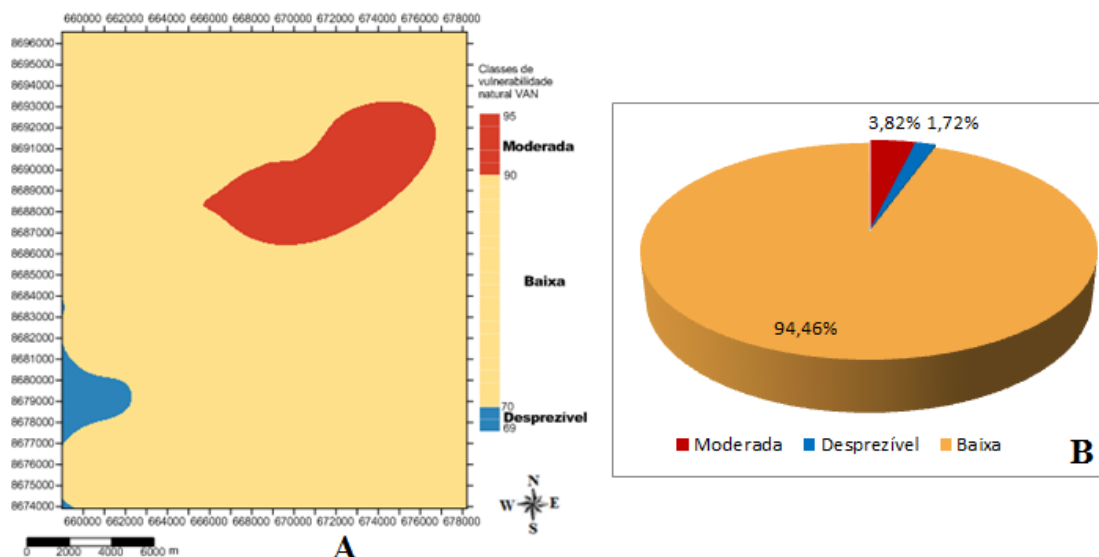


Figura 8 – Mapa de vulnerabilidade natural do Aquífero Utiariti (A) e sua distribuição percentual na área (B).

Vulnerabilidade Antrópica do Aquífero Utiariti

A vulnerabilidade antrópica foi avaliada através da penetração dos usos do subsolo: poço tubular, vala pluvial, disposição de esgoto humano a céu aberto, depósito de combustível, cemitério e fossa séptica (Figura 9). A contribuição à vulne-

rabilidade Ur.Uw dessas atividades estão na figura 10. O poço tubular por penetrar na zona saturada do aquífero tem contribuição 100, vala pluvial e depósito de esgoto a céu aberto tiveram contribuição 75, posto de combustível e cemitério tiveram contribuição 50 e fossa séptica contribuição 25.

Atividade - U	Penetração no subsolo - P
Poço tubular	40 a 140
Vala pluvial	2,0 a 2,30
Disposição de esgoto a céu aberto	3,20
Tanques de combustível	2,30
Cemitério	1,80
Fossa séptica	1,50

Figura 9 – Usos do subsolo.

A vulnerabilidade antrópica apresentou índices de 100 a 25, gerando as classes moderada, baixa e desprezível (Figura 10A).

A vulnerabilidade moderada (índice 100) é produzida por poços tubulares distribuídos na área, correspondendo a 2,127% (Figura 10B) da área total. Esta vulnerabilidade indica que muitos contaminantes podem alcançar a zona saturada do aquífero se o poço não atender aos critérios técnicos da ABNT.

A vulnerabilidade baixa (índice 75) é produzida por vala pluvial e disposição de esgoto humano a céu aberto, correspondendo a 2,127% (Figura 10B) da área total. Esta vulnerabilidade indica que o aquífero é vulnerável somente a poluentes conservativos em longo prazo, quando

continua e largamente despejados ou lançados.

A vulnerabilidade desprezível (índices de 50 a 25) é produzida por depósito de combustível, cemitério e fossa séptica, correspondendo a 6,382% (Figura 10B) da área total. Esta vulnerabilidade indica que nenhum contaminante chegará à zona saturada do aquífero, devido a constituição essencialmente argilosa do LATOSSOLO que cobre o aquífero e a pequena penetração desses usos na não zona saturada do aquífero.

Estas classes de vulnerabilidade são as mesmas do VAN natural, diferenciando apenas no caráter discreto da antrópica, ocupando somente 10,6% da área, enquanto a VAN natural ocorre de forma contínua em toda área.

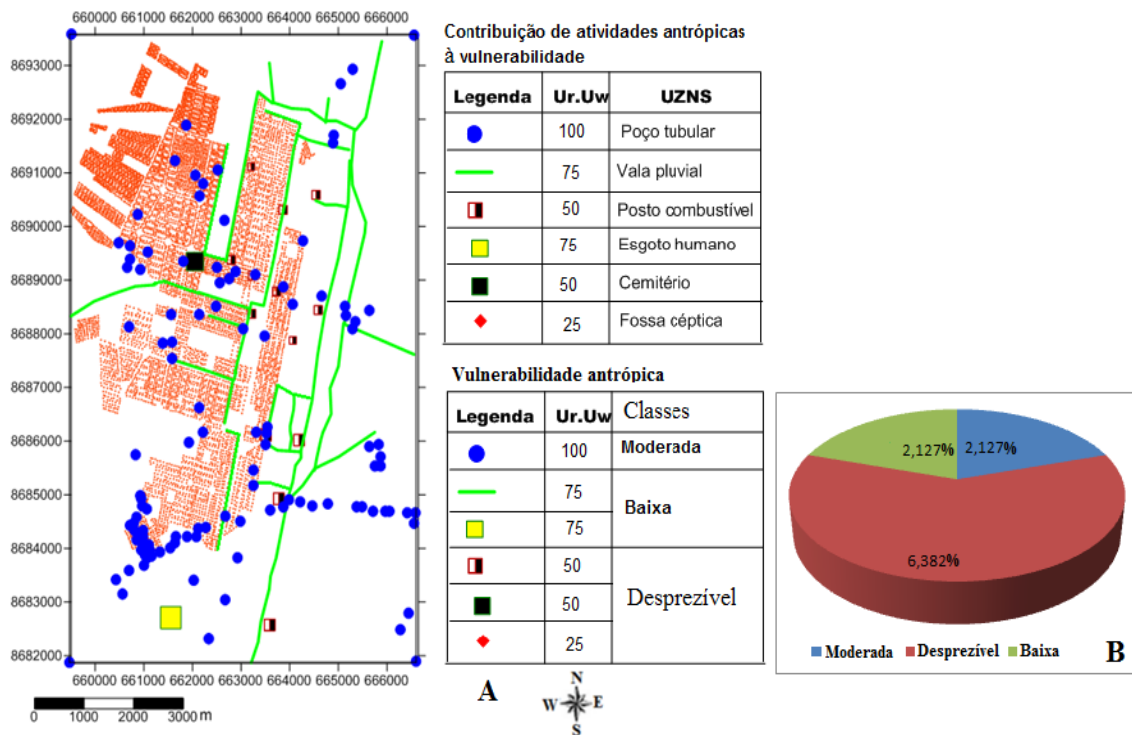


Figura 10 – Mapa de vulnerabilidade antrópica (A) do Aquífero Utariiti produzido pelo VAN e sua distribuição percentual na área urbana (B).

Vulnerabilidade Total VAN do Aquífero Utariiti

Os índices de vulnerabilidade total VAN variam de 190 a 70 (Figura 11A), originando as classes extrema (índices de 190 a 150), muito alta (índices de 150 a 130), alta (índices de 130 a 110), moderada (índices de 110 a 90) e baixa (índices de 90 a 70).

(índices de 90 a 70). As vulnerabilidades extrema, muito alta e alta ocorrem respectivamente, em 0,64%, 0,85% e 0,43% em partes do noroeste, oeste e centro oeste; a moderada ocupa 4,47% em partes do noroeste a sudoeste e do centro ao nordeste; e a baixa em 93,61% do restante da área (Figura 11B).

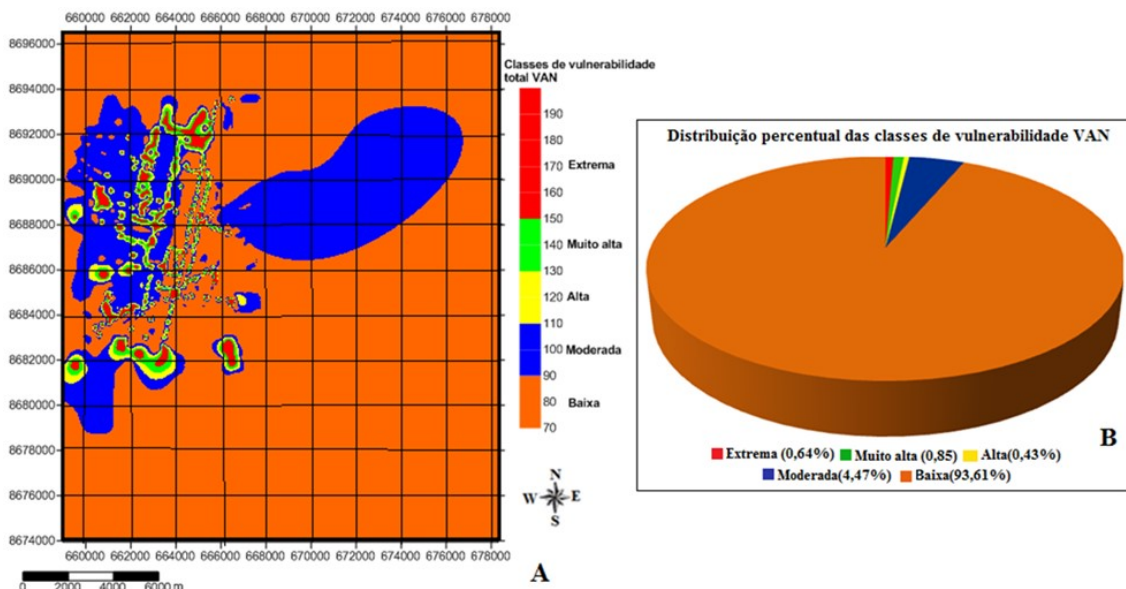


Figura 11 – Mapa de vulnerabilidade total (A) do Aquífero Utariiti produzido pelo VAN e sua distribuição percentual na área da pesquisa (B).

A vulnerabilidade extrema indica que o aquífero é vulnerável a todas as águas poluídas. A vulnerabilidade muito alta indica que o aquífero é vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles com extrema capacidade de absorção. A vulnerabilidade alta indica que o aquífero é

vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles fortemente absorvidos. 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 continua e largamente despejados ou lançados. A vulnerabilidade desprezível significa que a zona não saturada do aquífero tem fluxo vertical insignificante.

Ressalta-se que as vulnerabilidades extrema, muito alta e alta não foram estimadas pelos VAN antrópico e natural, somente pelo VAN total, mostrando a importância de avaliar os três tipos de vulnerabilidade na mesma área para

possibilitar uma concepção mais realista da acessibilidade ao aquífero, o que é indispensável para a elaboração de medidas preventivas e corretivas em plano de gestão de aquífero.

Risco à contaminação do Aquífero na Área

O risco à contaminação do aquífero Utiariti na área foi avaliado através da integração das classes de fontes de contaminação (Figura 12) com as classes de vulnerabilidade natural, antrópica e total do aquífero (Figuras 8, 10, 11).

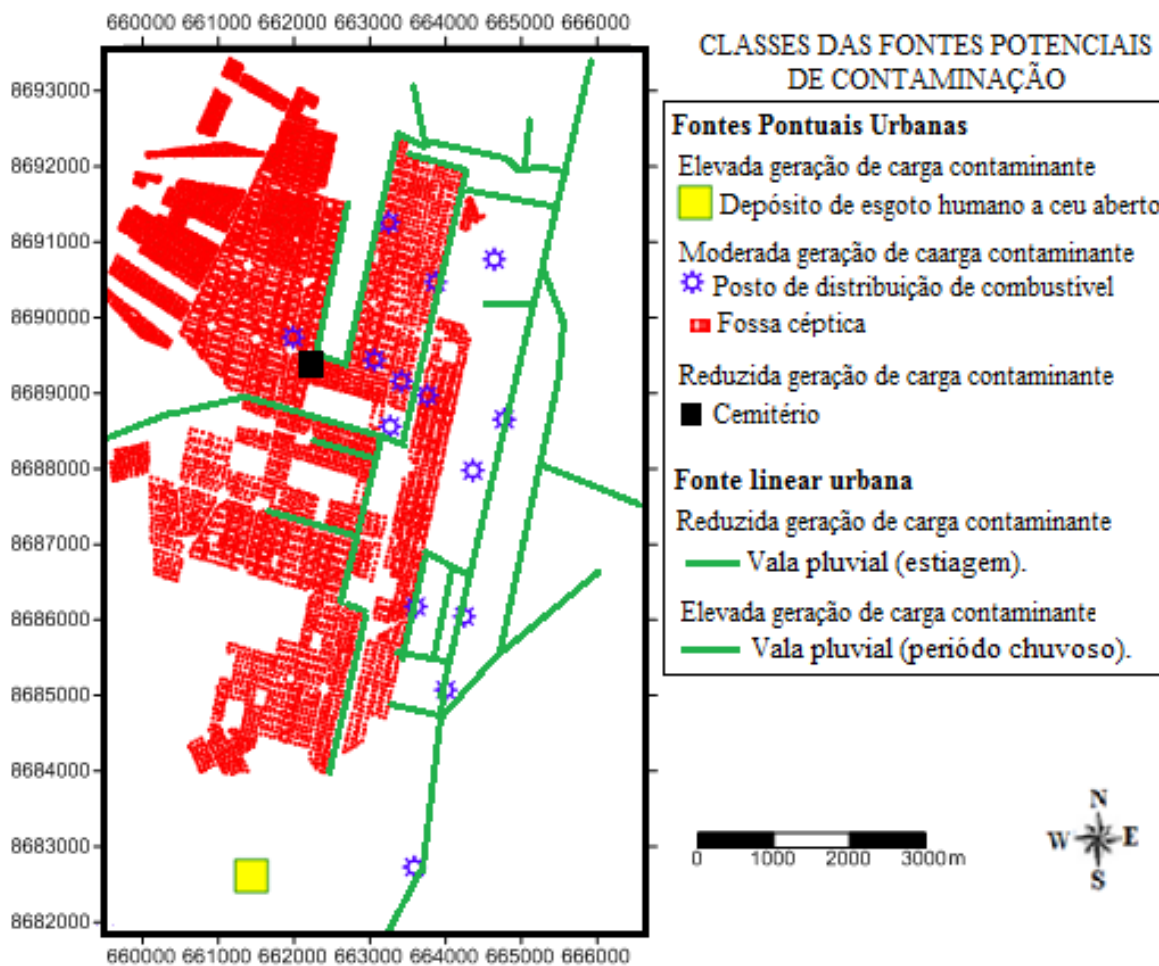


Figura 12 – Mapa de classes de fontes potenciais de contaminação da área da pesquisa.

As fontes de contaminação foram classificadas em pontual e linear urbanas. A fonte pontual urbana tem elevada geração de carga contaminante constituída por depósito de esgoto humano a céu aberto; moderada geração de carga contaminante composta por posto de combustível e fossa séptica, e reduzida geração de carga contaminante constituída por cemitério. A fonte linear urbana tem reduzida geração de carga contaminante composta por vala pluvial no período da estiagem e elevada geração de carga contaminante constituída por vala pluvial no período chuvoso.

O risco à contaminação, relacionado à vulnerabilidade natural (Figura 8) é moderado devido

a posto de combustível e fossa séptica; reduzido devido a cemitério e elevado devido a vala pluvial no período pluviométrico em parte da área de vulnerabilidade baixa.

Nas áreas de vulnerabilidades moderada e desprezível não ocorrem fontes de contaminação, portanto não existe risco à contaminação do aquífero.

O risco à contaminação, vinculado à vulnerabilidade antrópica (Figura 9), é alto devido a posto de combustível e fossa séptica no entorno dos pontos de vulnerabilidade moderada; reduzido devido a cemitério, fossa séptica e vala pluvial nas vizinhanças de pontos de vulnerabilidade baixa. Nos pontos de vulnerabilidade

desprezível o risco à contaminação que existe é muito baixo e devido a posto de combustível, esgoto humano a céu aberto e fossa séptica.

O risco à contaminação relacionado à vulnerabilidade total VAN (Figura 10) é muito alto em áreas de vulnerabilidade extrema, devido a posto de combustível, cemitério e fossa séptica; é alto nas áreas de vulnerabilidade muito alta quando existem posto de combustível, cemitério e fossa séptica; o risco é alto nas áreas de vulnerabilidade alta, devido a ocorrência de

posto de combustível, cemitério e fossa séptica; o risco é moderado nas áreas de vulnerabilidade moderada devido a posto de combustível e fossa séptica; o risco é baixo na área de vulnerabilidade baixa onde ocorrem cemitério, fossa séptica e vala pluvial.

A divergência do risco à contaminação do aquífero é devido a diferença das vulnerabilidades avaliadas, porém a mais realista é a produzida pela vulnerabilidade total, pois ela é o somatório das vulnerabilidades natural e antrópica.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método VAN possibilitou estimar as vulnerabilidades natural, antrópica e total, mostrando que elas permitem avaliar com mais realismo a vulnerabilidade de um aquífero onde existe o uso do subsolo. As classes de vulnerabilidade natural foram moderada, baixa e desprezível; as classes da antrópica foram moderada, baixa e desprezível e as classes do VAN total foram extrema, muito alta, alta, moderada e baixa.

As classes de vulnerabilidade natural e antrópica são iguais, porém as classes de vulnerabilidade natural são distribuídas de modo contínua e a antrópica de forma discreta devido ao tipo de uso do subsolo. A vulnerabilidade total do aquífero é diferente da natural somente nos locais onde ocorre o uso do subsolo.

Estes resultados mostram que em áreas onde ocorre ou ocorrerá o uso do subsolo deve-se empregar método de vulnerabilidade que estime o impacto desse uso sobre a vulnerabilidade do aquífero, visto que são dados importantes para a elaboração de planos de prevenção e de remediação à contaminação de aquíferos.

Considerando que a vulnerabilidade total VAN é a vulnerabilidade mais real do aquífero, então o aquífero precisa de maiores cuidados nos locais de vulnerabilidades extrema, muito alta, alta e moderada.

O bom desempenho do método VAN está vinculado à adequada qualidade e quantidade dos dados que ele requer, o que custou bastante tempo e recurso para obtê-los, embora a geologia e a hidrogeologia da área sejam relati-

vamente simples. Mesmo considerando essas características distintas e mais onerosas do VAN com relação aos demais métodos de avaliação de vulnerabilidade, os seus resultados justificam a sua aplicação, principalmente em áreas onde a água subterrânea é e será responsável pelo suprimento de demandas de água para a sócio economia, visto que quanto mais seguro o conhecimento da vulnerabilidade de um aquífero, mais apropriadas serão as medidas preventivas e corretivas propostas.

Como a vulnerabilidade VAN envolve dados hidrogeológicos naturais e de uso do subsolo, então essa vulnerabilidade pode sofrer modificação temporal, o que requer atualização periódica para melhor cumprir a sua finalidade.

Considerando que o risco à contaminação de um aquífero aumenta com o poder das fontes de contaminação associados ao aumento da vulnerabilidade, então na área o risco a contaminação do aquífero decresce respectivamente nas áreas de vulnerabilidade extrema, muito alta, alta, moderada e baixa que contém respectivamente fontes de elevada, moderada e reduzida geração de carga contaminante.

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

Os autores agradecem à FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos do Ministério da Ciência e Tecnologia, Chamada Pública MCT/Finep CT Hidro 01/2010) pela concessão do apoio financeiro à 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.
- BAHIA, R.B.C. **Evolução tectonossedimentar da Bacia do Parecis – Amazônia**. Ouro Preto, 2007. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) Universidade Federal de Ouro Preto.
- BARROS, A.M.; SILVA, R.H.; CARDOSO, O.R.F.A., FREIRE, F.A.; SOUZA JÚNIOR, J.J., RIVETTI, M.; LUZ, D.S.; PALMEIRA, R.C.B.; TASSINARI, C.C.G. **Geologia da folha SD-21. Cuiabá** - In: DNPM. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro - RJ. v.26, 531 p, 1982.
- BOLDRIN, M.T.N. **Avaliação de impactos sobre as águas subterrâneas da cidade de Sinop/MT e proposta para sua gestão**. Cuiabá, 2012. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) Instituto de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal de Mato Grosso.
- 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, 2010a.
- CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos God e Posh. Rio Claro, **Revista Geociências**, v. 29, n. 3, 2010b.
- 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, 101p, 2002.
- LUSSI, C. **Avaliação hidrogeológica da cidade de Sinop/MT e seu Entorno**. Cuiabá, 2013. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Instituto de Ciências Exatas e da Terra - Universidade Federal de Mato Grosso.
- NOLAN, B. T. & HITT K. J. Vulnerability of shallow groundwater and drinkingwater wells to nitrate in the United States. **Environmental Science Technology**, v. 40, n. 24, p.: 7834 – 7840, 2006.
- PARALTA, E. & FRANCÉS, A. Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabrodiorítico de Serpa-Brinches (setor oriental do sistema aquífero dos Gabros de Beja). Porto. Geonovas, **Revista da Associação Portuguesa de Geólogos**, n. 4, p. 27-35, 2000.
- SECUNDA, S.M. L. & MELLOUL A.J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. **Journal of Environmental Management**, v. 54, n. 1, p. 39-57, 1998.
- TWARAKAVI, N.K. C. & KALUARACHCHI, J.J. Aquifer vulnerability assessment to heavy metals using ordinal logistic regression. **Ground Water**, v. 43, n. 2, p. 200-214, 2005.
- VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI: A Method for Groundwater Protection Mapping in the Prairie Provinces of Canada**. PPWD pilot project, Sept. 1991 - March 1992. Groundwater and Contaminants Project, Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, 1992.

Submetido em 5 de maio de 2019

Aceito para publicação em 12 de agosto de 2021