

COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE VULNERABILIDADE NA REGIÃO DO BAIXO CURSO DO RIO PARAÍBA, BRASIL

Camila Macêdo Medeiros*; Dayse Luna Barbosa**; Maria Adriana de Freitas Mágero Ribeiro***; André Felipe Duarte Santos ***; José do Patrocínio Tomaz Albuquerque***; Janiro Costa Rêgo**

* Bolsista Capes; ** Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Caixa Postal 505, Campina Grande, Paraíba, Brasil, CEP 58429-140; *** Bolsista CNPq. camilamedeiros@gmail.com

Abstract: It is observed in recent decades a concern with groundwater due to overexploitation and the dependence of some regions for its public water supply. The management of these resources should promote its protection related to quantity and quality. The vulnerability allows the identification of areas most susceptible to contamination, determined by the physical, chemical and biological means. This paper presents a comparison of two methods for assessing vulnerability in part of the sedimentary basin in the Lower Course of the river Paraíba, Paraíba. The methods used were the Vulnerability Assessment Index (AVI), which uses the thickness of layers of different materials that are situated above the saturated zone and its hydraulic conductivity and GOD method based on the degree of containment, the occurrence of strata coverage and the distance to the groundwater or the ceiling of the confined aquifer.

Palavras-chave: Vulnerabilidade dos aquíferos, AVI, GOD.

INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um recurso natural vital para o abastecimento humano nos meios urbano e rural, e desempenha papel fundamental para o bem estar tanto dos seres humanos como de muitos ecossistemas aquáticos (FOSTER *et al.*, 2002). Porém, os aquíferos estão sob risco de contaminação devido ao crescimento populacional, das atividades agrícolas, e do desenvolvimento econômico (industrial, turístico, comercial).

Observa-se nas últimas décadas uma preocupação com as águas subterrâneas, devido à superexploração e à dependência de algumas regiões para o seu abastecimento público. Os recursos hídricos subterrâneos que se encontram menos expostos a extração direta do homem, já apresentam, em algumas partes do mundo, elevado nível de degradação. Segundo Barbosa *et al.* (2007), com o crescimento urbano as reservas de águas superficiais sofrem sucessiva perda de qualidade, devido a sua alta vulnerabilidade à contaminação através dos poluentes. Percebe-se que o uso e a ocupação do solo interferem nas características do meio ambiente. De acordo com Brollo *et al.* (2000), a interrelação entre as diferentes atividades humanas e as potencialidades e fragilidades do meio físico podem acarretar tanto situações de risco ao homem e a seus empreendimentos, como impactos ambientais que alteram negativamente as características naturais de um ambiente e, conseqüentemente, provocam a degradação de áreas e riscos à saúde pública.

De acordo com Frederico (2011), a implementação de estratégias de proteção das águas subterrâneas pode melhorar a qualidade de um aquífero e sensibilizar os interessados nas questões hídricas para a gestão das águas subterrâneas. Avaliar a vulnerabilidade de um aquífero é o primeiro passo para uma gestão cuidadosa dos recursos hídricos subterrâneos. Uma vez contaminado, a recuperação do aquífero é extremamente difícil e onerosa. É praticamente consensual que existem dois tipos de vulnerabilidade: a intrínseca ou hidrogeológica e a específica. A primeira se relaciona com as propriedades do meio hidrogeológico natural e a segunda leva em consideração o tipo de contaminante e a sua maior ou menor probabilidade de propagação.

Neste trabalho, a vulnerabilidade abordada é a hidrogeológica, definida de acordo com o conjunto de características essenciais dos estratos que separam a camada saturada do aquífero saturado, determinando sua sensibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante (qualquer que seja ela) aplicada na superfície (FOSTER *et al.*, 2002). Desta forma, a vulnerabilidade é função da facilidade de acesso do contaminante à zona saturada e da capacidade das camadas situadas acima dessa zona, de filtrar contaminantes, atenuando os seus efeitos.

Neste contexto, este artigo apresenta uma comparação entre duas metodologias de avaliação da vulnerabilidade, aplicada na Bacia Sedimentar na Região do Baixo Curso do rio Paraíba, na Paraíba. As metodologias utilizadas foram o Índice de Avaliação da Vulnerabilidade (AVI), que utiliza a espessura das camadas dos diferentes materiais que se encontram situados acima da zona saturada junto com a respectiva condutividade hidráulica, e o Método GOD, que se baseia no grau de confinamento, na ocorrência de estratos de cobertura e na distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado.

METODOLOGIA

A pesquisa da vulnerabilidade possibilita a identificação de áreas mais suscetíveis à contaminação e é desenvolvida em função das características físicas, químicas e biológicas do meio. São apresentadas a seguir duas metodologias de avaliação da vulnerabilidade do aquífero.

Índice de Avaliação da Vulnerabilidade (AVI)

O método foi desenvolvido pelo National Hydrology Research Institute (NHRI), no Canadá. É um dos métodos de mais fácil aplicação, pois abrange apenas dois parâmetros físicos, são eles:

- bi – espessura cada camada sedimentar acima da zona saturada (m);
- Ki – condutividade hidráulica estimada de cada uma dessas camadas (m/s).

Conhecidos estes dois parâmetros, o método AVI obtêm a resistência hidráulica (c), de acordo com a equação (1):

$$c = \sum \frac{b_i}{K_i} \quad (1)$$

A relação entre a vulnerabilidade e a resistência hidráulica (c) é apresentada na Tabela 01

Tabela 01 Classes de vulnerabilidade do índice AVI.

Resistência Hidráulica (c) (anos)	Vulnerabilidade
0-10	Extremamente Alta
10-100	Alta
100-1.000	Moderada
1.000-10.000	Baixa
> 10.000	Extremamente Baixa

Fonte: Lobo Ferreira e Oliveira (2003) *apud* Souza (2009)

O método AVI contém muitas simplificações geológicas e hidrogeológicas. Para facilitar sua aplicação, este método faz algumas considerações, como por exemplo, considera que não existem falhamentos e juntas nas camadas geológicas situadas acima da zona saturada do aquífero. Analisa também a existência de poços tubulares com estrutura técnica inadequada, além de outros fatores que podem limitar o seu desempenho. Ressalta-se que sua principal vantagem de aplicação é a utilização de poucas variáveis. Desta forma, se faz necessária a utilização de outro método, com a finalidade de comparar e/ou confirmar o desempenho da utilização do método estudado.

Método GOD

Este método foi proposto por Foster (1987) e amplamente testado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, devido a sua simplicidade conceitual e de aplicação tornou-se um método bastante utilizado.

O índice GOD baseia-se nos seguintes fatores:

- G – confinamento do aquífero (Groundwater hydraulic confinement), o qual pode ser classificado em confinado não drenante, confinado drenante ou livre;
- O – natureza composicional da zona não saturada e/ou aquífero e seu grau de fraturamento (Overlying Strata);
- D – profundidade do lençol freático ou da base da camada confinante (Depth to groundwater table).

O índice final de vulnerabilidade de aquíferos será o produto dos índices obtidos para cada um dos parâmetros, variando de 0 (desprezível) até 1,0 (extrema). Foster e Hirata (1998) subdividiram as classes de vulnerabilidade em cinco grupos, com suas respectivas definições e índices de vulnerabilidade, conforme Figura (2).

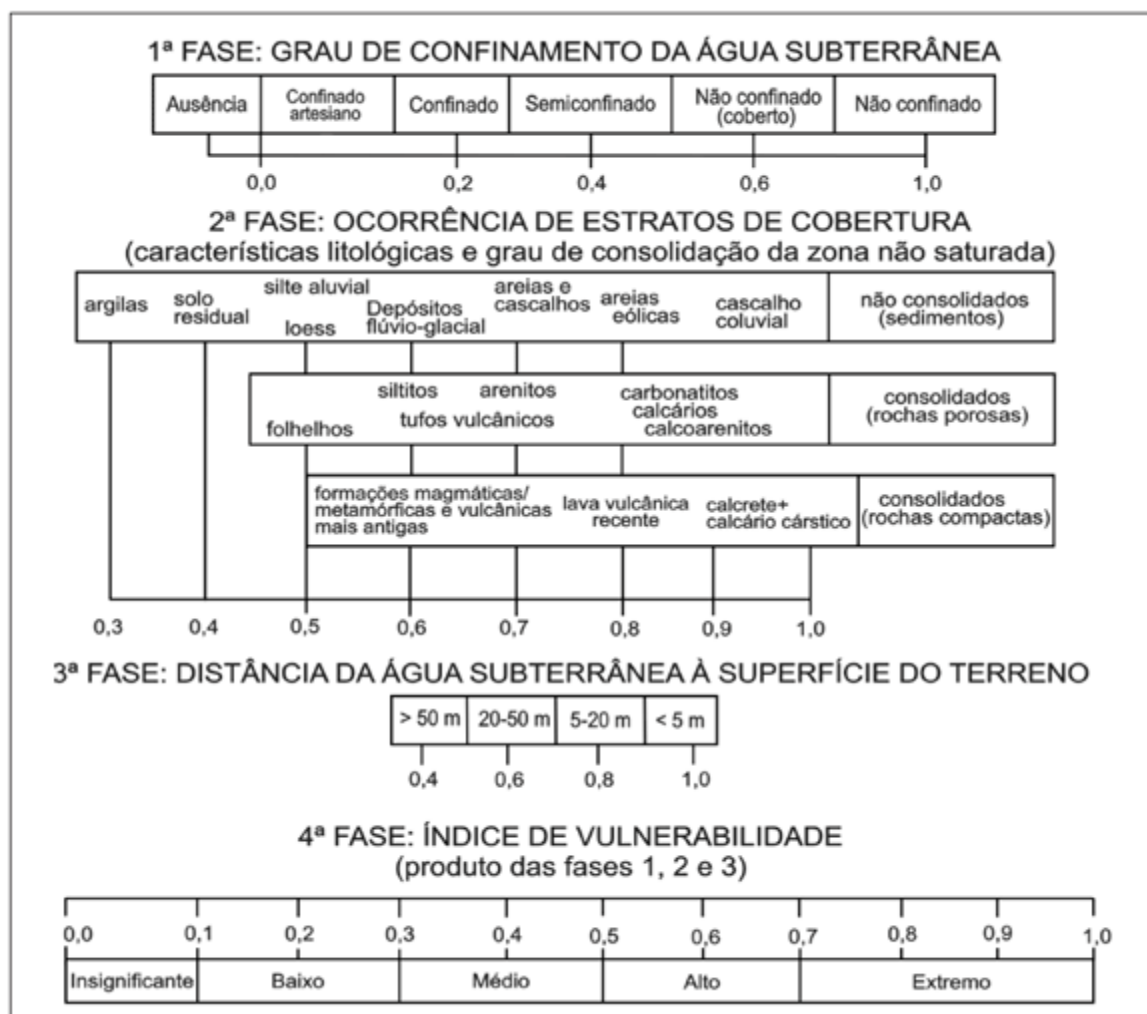


Figura 1 – O método de vulnerabilidade GOD (FONTE: Tavares *et al.*, 2009).

Área de Estudo

A Região do Baixo Curso do rio Paraíba está situada na parte litorânea do Estado da Paraíba (Figura 2), corresponde a uma porção da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba. A área objeto de avaliação da vulnerabilidade, pelos métodos considerados, é a parcela sudeste do Baixo Curso do rio Paraíba, onde a urbanização é muito pronunciada. Possui uma área com cerca de 1.129,35 km², abrangendo 10 municípios, dos mais populosos do Estado, entre os quais a sua capital, João Pessoa.

Geologicamente, esta área da bacia sedimentar PE-PB, é a que apresenta, na sua parte emersa, a sequência lito-estratigráfica mais completa, ocorrendo as seguintes formações, da base para o topo:

- Beberibe Inferior, de idade Cretácea, de arenitos embasados por conglomerados, ambos de grãos e seixos predominantemente quartzosos, com espessura média em torno de 30 metros;
- Beberibe Superior, também conhecida como Formação Itamaracá, também sedimentada no Cretáceo, maioritariamente constituída de arenitos calcíferos com intercalações subordinadas de siltitos, folhelhos e até de calcários, sendo a mais espessa das Formações, com média de cerca de 200 metros;
- Gramame, ainda do Cretáceo, de calcários argilosos e margas, bastante duros, amarelos e cinzentos, apresentando espessura média de 40 metros;
- Formação Barreiras, sedimentada no Terciário, predominantemente constituída de areias, com intercalações de siltes e de argilas, com espessura situando-se, também, em torno de 40 metros;
- Terminando a sequência sedimentar, os sedimentos Quaternários, compreendendo, desde os aluviões que atapetam os leitos da rede hidrográfica sobre estabelecida, passando pelos depósitos flúvio-marítimos constituintes da Planície Costeira, até as areias finas que formam as dunas e os sedimentos de praia.

Esta parcela é limitada, a oeste-noroeste, pela denominada Falha de Cabedelo, de natureza gravitacional que, pela sua ação, resultou na formação do bloco leste-sudeste descendente, com toda a estratigrafia preservada, e onde se localiza a área objeto deste estudo. O bloco contíguo, elevado após a

sedimentação da Formação Gramame, teve esta formação erodida, em consequência do que não ocorre nas áreas ocidentais da Região do Baixo Curso do rio Paraíba.

Hidrogeologicamente, a área estudada é parte integrante do Sistema Aquífero Pernambuco-Paraíba, correspondente à bacia sedimentar homônima, sendo composto de dois subsistemas: o inferior, sob pressão, regionalmente confinado, contido nas Formações Beberibe Inferior e Superior; e o subsistema superior, de natureza livre, inserido no contexto de rochas das Formações Barreiras e sedimentos Quaternários sobrepostos. O subsistema inferior, denominado de Beberibe, tem como substrato inferior impermeável, as rochas do Cristalino Pré-Cambriano e como limite superior, igualmente impermeável, a Formação Gramame. Esta Formação constitui, portanto, a base impermeável do subsistema Livre, o qual tem como limite superior a superfície hidrostática, indistinta e continuamente contida nas camadas aquíferas das Formações Barreiras e sedimentos Quaternários citados. Esta superfície encontra-se, nos tabuleiros esculpidos na Formação Barreiras, a profundidades que variam, geralmente, entre os 30 e 40 metros. Nos sedimentos Quaternários a profundidade desta superfície varia entre 1 e 5 metros, de uma maneira geral.

Em relação ao Subsistema Confinado, a base da Formação confinante (Gramame) situa-se, comumente, nas áreas topograficamente rebaixadas, a profundidades em torno de 80 a 90 metros. Nas áreas topograficamente elevadas (tabuleiros), esta profundidade atinge 120 metros ou mais.

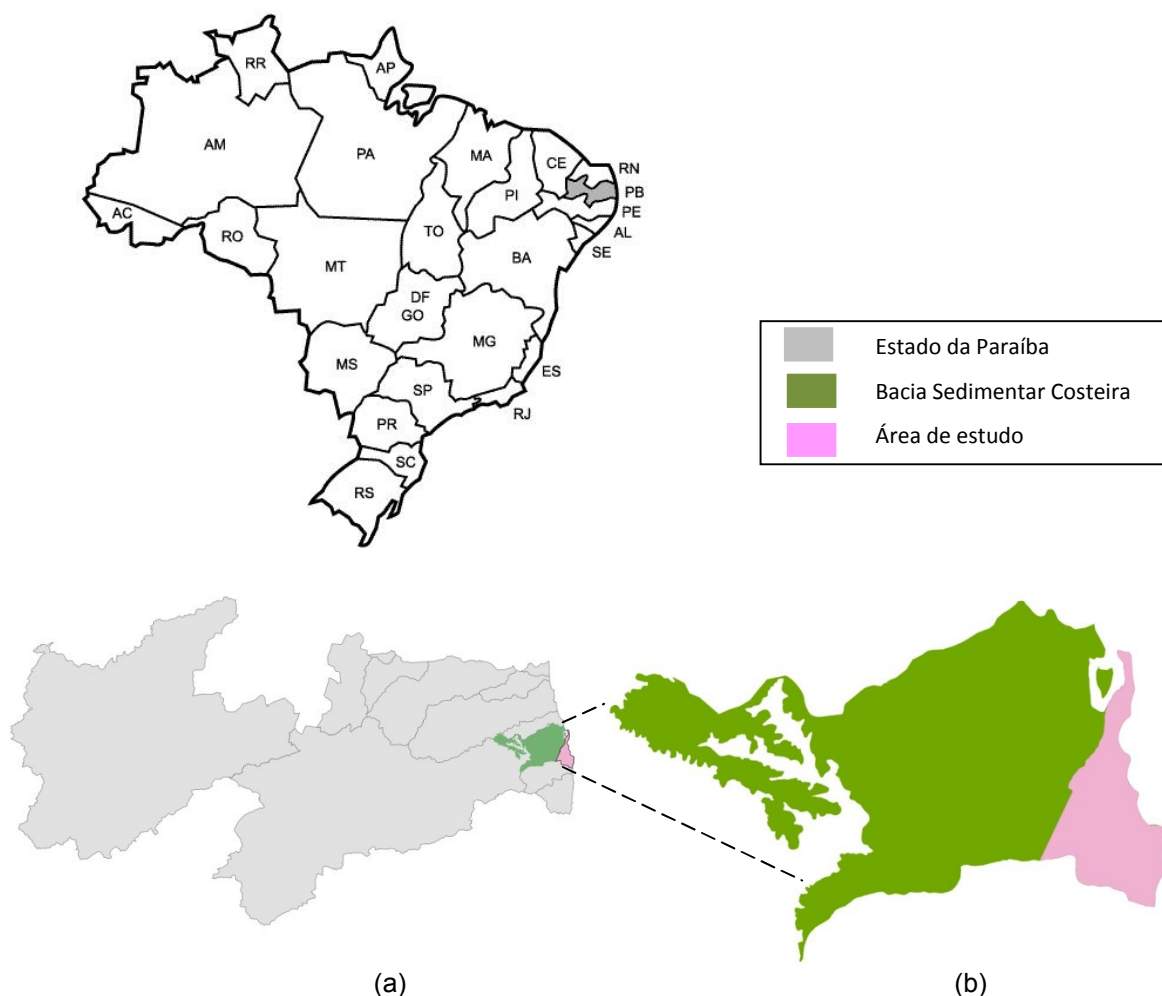


Figura 2 – (a) Estado da Paraíba com a Bacia Sedimentar; (b) Região do Baixo Curso do rio Paraíba com a área de estudo.

Para este estudo, foram selecionados 28 poços na área de estudo e no seu entorno (Figura 3), sendo 19 poços do cadastro da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA (AESA, 2010), 2 do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2010) e 7 da Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba – (CDRM, 2011) sendo todos os poços do aquífero livre. As informações contidas nos cadastros referem-se à localização, ao perfil litológico, nível estático, tipo do aquífero entre outros.

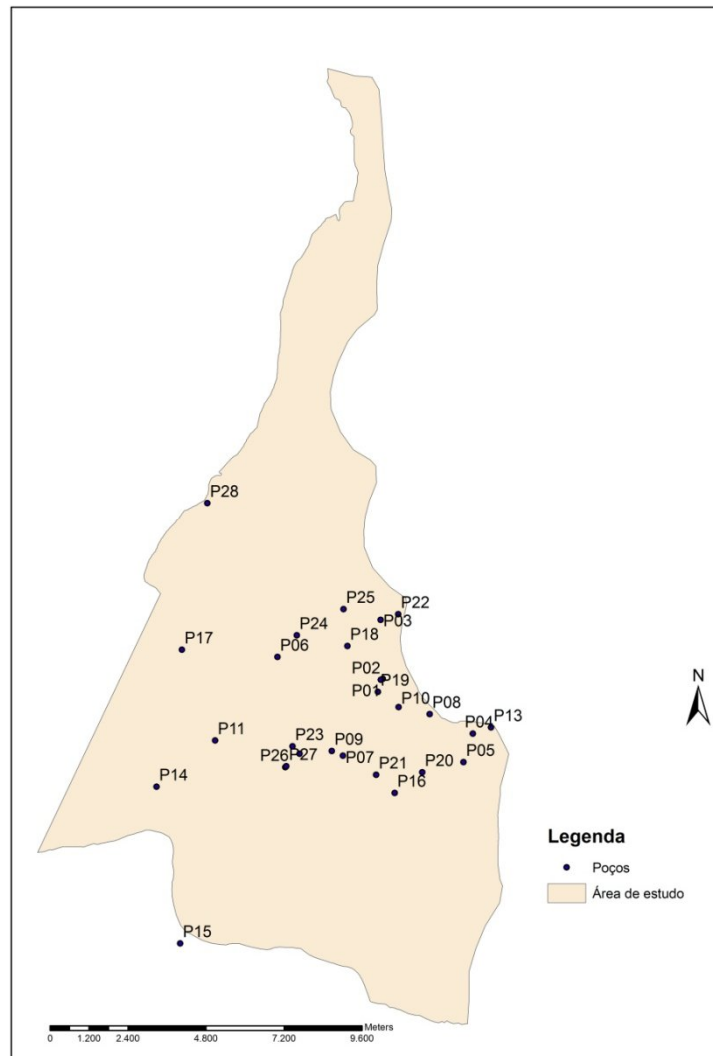


Figura 3 – Distribuição dos poços na área de estudo.

RESULTADOS

Índice de Avaliação da Vulnerabilidade (AVI)

A partir da utilização do método AVI pode-se confeccionar o mapa da vulnerabilidade (Figura 4) com o auxílio do software ArcGIS 9.2[®] e suas extensão *Spatial Analysis Tool*. Conforme antes explicado, este método, a vulnerabilidade é dada de acordo com a resistência hidráulica do poço, sendo esta, medida em anos. Para se obter uma superfície a partir dessa resistência utilizou-se a ferramenta de interpolação pelo método IDW (LANDIM, 2000) do software citado.

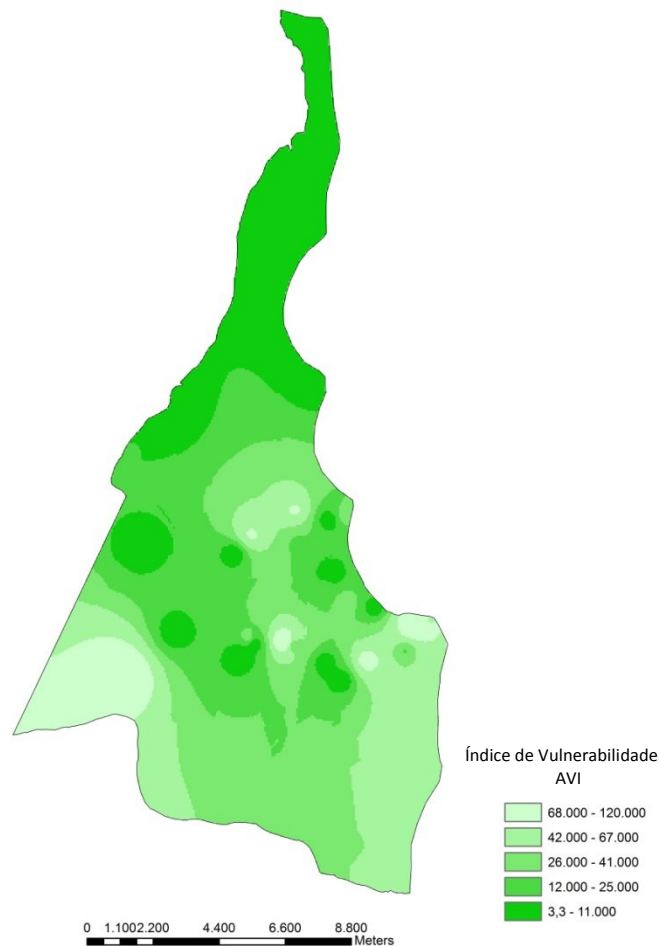


Figura 4 - Mapa da vulnerabilidade pelo método AVI.

A vulnerabilidade para este método é dada em função do tempo (anos), que um contaminante jogado na superfície do solo levará para atingir a zona saturada e assim, contaminar o aquífero. Neste mapa, as áreas mais escuras, representam aquelas com maior vulnerabilidade, ou seja, mais suscetível à contaminação.

Método GOD

A partir da utilização do método GOD, foram confeccionados mapas temáticos do aquífero livre (Figura 5) no software ArcGIS 9.2[®] e suas extensão *Spatial Analysis Tool*, são elas:

- Mapa de Ocorrência da água subterrânea (G)
Elaborado a partir das unidades geológicas regionais localizadas nas fichas cadastrais de cada poço.

- Mapa de litologia da zona não saturada (O)
Para este mapa foram utilizados dados dos perfis litológicos disponíveis em suas fichas cadastrais. Para cada camada do perfil foi atribuído um valor conforme a metodologia descrita, e foi realizada uma média com os valores de cada camada.

- Mapa de profundidade do lençol freático (D)
Criado através das informações de profundidade do nível estático de cada poço cadastrado.

Para confeccionar cada mapa utilizou-se dos coeficientes obtidos pela aplicação do método (Figura 1) e listados na tabela 02.

Tabela 02 - Coeficientes utilizados para o método GOD

Id	Poço	UTM (longitude)	UTM (latitude)	NE	G	O	D	GOD
P01	Altiplano do Cabo Branco I	298174	9211109	32,00	1	0,50	0,70	0,35
P02	Altiplano do Cabo Branco II	298113	9211078	33,00	1	0,72	0,70	0,50
P03	Altiplano do Cabo Branco III	298105	9212921	28,65	1	0,68	0,70	0,47
P04	Assoc. Paraibana de Equoterapia	300942	9209426	22,00	1	0,40	0,70	0,28
P05	Cabo Branco Res. Privê	300654	9208547	30,00	1	0,49	0,70	0,34
P06	Cond. Exped. III	294940	9211783	26,00	1	0,56	0,70	0,39
P07	Cond. Res. Camboriú	296947	9208747	15,00	1	0,48	0,80	0,38
P08	Cond. Res. Cláudio Cavalcante	299611	9210024	5,00	1	0,55	0,90	0,49
P09	Cond. Res. Nara	296606	9208891	24,00	1	0,47	0,70	0,32
P10	Cond. Vila Real	298659	9210241	32,00	1	0,29	0,70	0,20
P11	Cristo Redentor Limpa Fossa	293026	9209214	23,00	1	0,40	0,70	0,28
P12	ECOMAX EMP. IMOB.	295615	9208806	18,00	1	0,57	0,80	0,45
P13	Estação Ciência	301500	9209616	18,10	1	0,45	0,80	0,36
P14	Favela Boa Esperança	291221	9207793	22,90	1	0,40	0,70	0,28
P15	Granja da CINEP	291947	9202972	2,40	1	0,40	0,90	0,36
P16	Id. Polpa Fruta Ideal	298541	9207598	18,40	1	0,65	0,80	0,52
P17	INOCOP	292002	9212005	37,85	1	0,46	0,70	0,32
P18	JHL Construtora I	297087	9212117	15,00	1	0,48	0,80	0,38
P19	JHL Construtora II	298023	9210710	13,00	1	0,48	0,80	0,38
P20	Loteamento Mirante do Cabo Branco	299388	9208234	20,00	1	0,45	0,80	0,36
P21	Mangabeira/FEBEMAA	297971	9208158	24,10	1	0,69	0,70	0,48
P22	Pousada Tamandaré	298648	9213095	3,00	1	0,55	0,90	0,49
P23	Res. Água Fria	295402	9209033	23,00	1	0,57	0,70	0,39
P24	Res. San Diego	295531	9212449	23,00	1	0,63	0,70	0,44
P25	Res. Vila Lobos	296966	9213254	26,00	1	0,49	0,70	0,34
P26	UNIPÊ - Poço I	295177	9208393	11,80	1	0,53	0,80	0,42
P27	UNIPÊ - Poço II	295208	9208424	16,50	1	0,49	0,80	0,39
P28	Cabedelo	292783	9216541	3,70	1	0,72	0,90	0,65

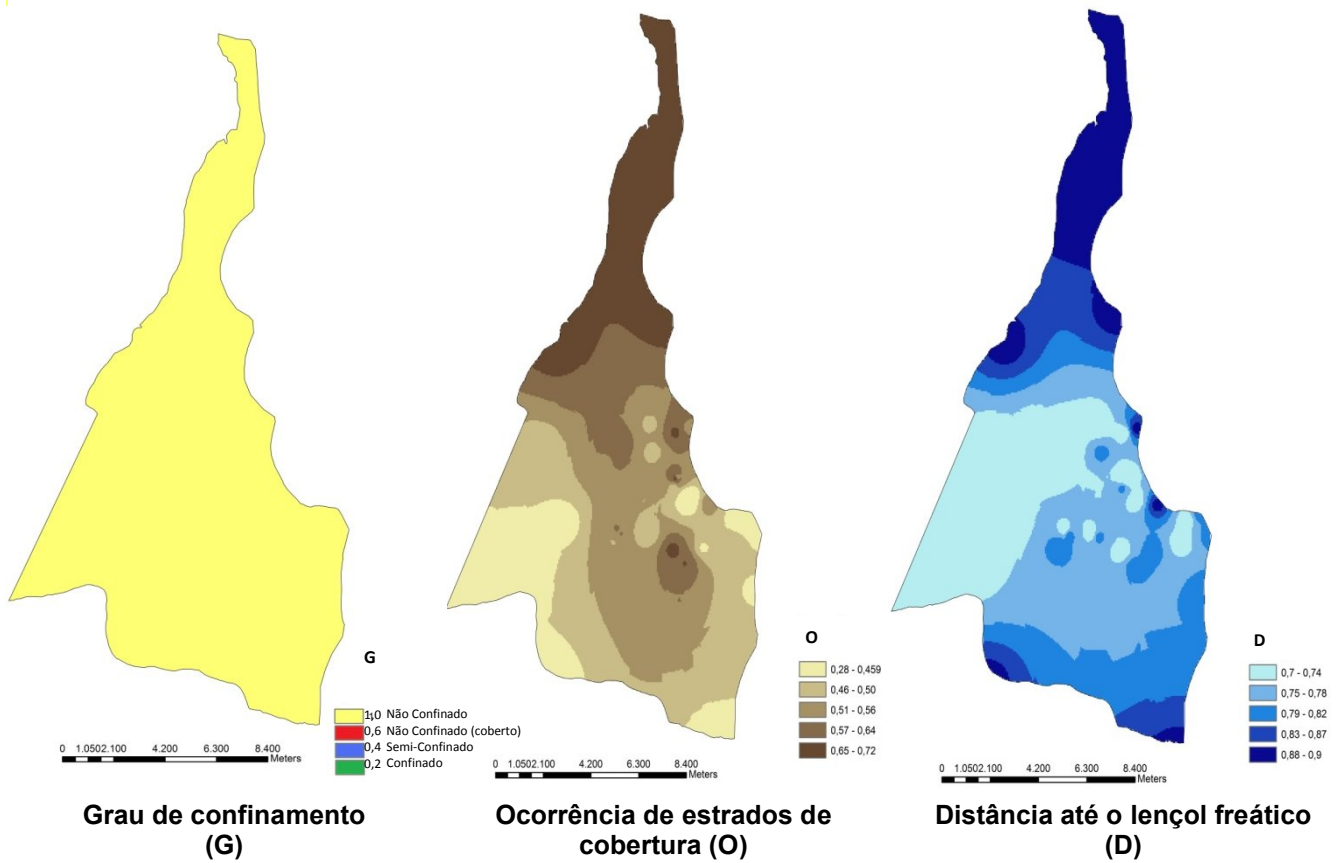


Figura 5 – Mapas Temáticos de cada plano de informação do método GOD.

Aplicação do método GOD: obtenção do mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade foi elaborado a partir da sobreposição dos três mapas referentes aos parâmetros requeridos na metodologia “GOD”. A Figura 6 a seguir apresenta o cálculo realizado para a confecção deste mapa.

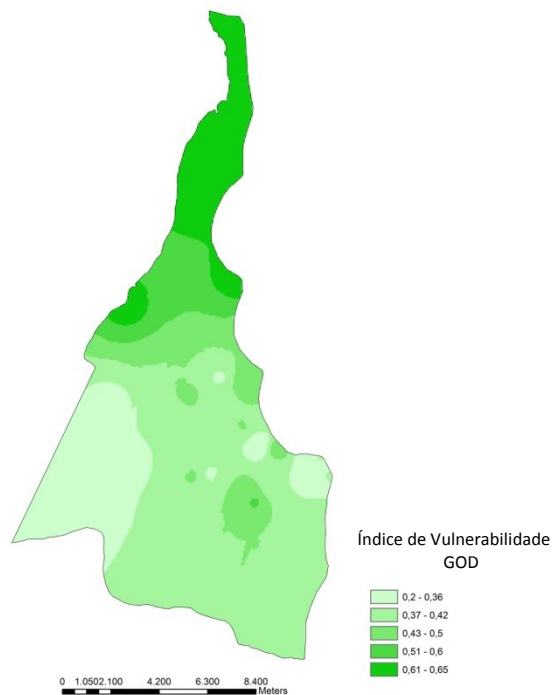


Figura 6 – Mapa de Vulnerabilidade pelo método GOD.

Diferentemente do mapa confeccionado pelo método AVI, ressalta-se que, para este mapa a escala numérica utilizada é crescente, ou seja, da menor vulnerabilidade para a maior. Porém a escala de cor continua do tom mais escuro para o mais claro, sendo o mais escuro representando a maior vulnerabilidade.

DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Ao comparar os mapas de vulnerabilidade, elaborados a partir dos métodos GOD e AVI, observam-se determinados locais em que os métodos foram equivalentes quanto à alta vulnerabilidade, como por exemplo, ao Norte da região estudada, justamente onde o subsistema livre ocorre em áreas topograficamente rebaixada, com as menores profundidades ou espessuras da zona de subsaturação. Percebe-se que o método AVI apresentou uma maior quantidade de áreas com alta vulnerabilidade, com este fato podendo ser explicado pela utilização de uma menor quantidade de parâmetros por este método. Ressalta-se também que a região sudoeste da área estudada apresentou, em ambos os métodos, uma baixa vulnerabilidade, resultante, certamente, da maior profundidade de ocorrência do subsistema livre (áreas topograficamente elevadas), com as maiores profundidades da zona de aeração e um predomínio da constituição argilosa.

A aplicação do método AVI é relativamente simples, pois apresenta apenas dois parâmetros em sua fórmula. Todavia, uma das dificuldades encontradas, foi a obtenção das condutividades hidráulicas dos diversos tipos de solos que formam os estratos de cobertura. As sequências variadas de depósitos encontradas foram, então, representadas pela condutividade hidráulica da litologia predominante nas camadas, ou na camada limítrofe com nível d'água.

Na aplicação do método GOD, foram utilizadas, para obtenção do mapa do parâmetro D, medições de profundidades do nível d'água no aquífero, registradas à época da construção dos poços, portanto em tempos diferentes. Como os níveis freáticos variam temporal e espacialmente, sugere-se que a confecção deste mapa deva ser realizada periodicamente, para um aprimoramento dos resultados.

De acordo com Cutrim e Campos (2010) a comparação entre dois métodos, paralelamente, se faz necessária, devido a uma maior segurança e conhecimento da vulnerabilidade de uma região, e desta forma as medidas preventivas e corretivas que devem ser propostas, serão mais adequadas. É mais vantajoso variar o tipo e o nível de controle das ações preventivas de acordo com a capacidade de atenuação, do que aplicar uma única medida para toda área sobre o uso do solo e as emissões de efluentes (FOSTER *et al.*, 2002).

Ao analisar as metodologias utilizadas para este estudo percebe-se que são métodos simplificados, com poucos parâmetros, portanto simples e de fácil aplicação. Embora a utilização de outros métodos com maior número de parâmetros possa, presumidamente, oferecer resultados com grande número de detalhes, os métodos aqui empregados fornecem ferramentas úteis e confiáveis para gestão dos recursos hídricos e na gestão do uso solo, com o objetivo de delimitar zonas de proteção de tais recursos.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de mestrado concedida à primeira e terceira autoras respectivamente. Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica concedida ao quarto autor e ao MCT/FINEP/CT-HIDRO pelo financiamento do projeto ASUB.

REFERÊNCIAS

AESA (2011). Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/consultas/>. Acesso em: março de 2011.

BARBOSA, D. V.; ZIMMER, J. R.; CUTRIM, A. O. e RUIZ, A. S. (2007). Avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero furnas na área urbana de Rondonópolis (MT), utilizando o método AVI. I Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste. Cuiabá – MT.

BROLLO, J. M.; VEDOVELLO, R.; ODA, G. H. (2000). Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação através de um sistema gerenciador de informações geoambientais – Um instrumento de gestão ambiental. XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. São Paulo.

CDRM (2011). Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba. Cadastro de poços. Documento cedido em março de 2011.

CPRM (2011). Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/> Acesso em: março de 2011.

FOSTER, S. S. D. E HIRATA, R. C. A. (1998). Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru.
81p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. (2002). Proteção da Qualidade da Água Subterrânea um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambiental. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank.

FREDERICO, J. (2011). Pollution of Groundwater: Vulnerability - effects, important, system, source, effect, human. Acesso a internet em 05 de maio de 2011. <http://www.waterencyclopedia.com/Oc-Po/Pollution-of-Groundwater-Vulnerability.html#ixzz1N750olmB>

LANDIM, P.M.B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. UNESP/Rio Claro, Texto Didático 02.

SOUZA, N. A. (2009). Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas – um estudo do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG. 2009. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

TAVARES, P.R.L.; CASTRO, M.A.D de; COSTA, C.T.F da; SILVEIRA, J.G.P da, ALMEIDA JÚNIOR, F.J.B.de (2009). Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. Revista Escola de Minas vol.62 nº. 2 Ouro Preto Abril.\Junho, 2009.