



**Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas  
Subterrâneas na Porção Leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil**  
Mapping of Vulnerability and Risk of Groundwater  
Pollution in the Eastern Portion of the Araripe Sedimentary Basin, Ceará, Brasil

Maria da Conceição Rabelo Gomes<sup>1</sup>;  
Luiz Alberto Ribeiro Mendonça<sup>2</sup> & Itabaraci Nazareno Cavalcante<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia,  
Rua Prof. Armando Farias, s/n. Blocos 912 e 913, 60440-554, Campus Universitário do Pici, Fortaleza, CE, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal do Cariri, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil,  
Av. Tenente Raimundo Rocha, s/n, 63048-080, Cidade Universitária, Juazeiro do Norte, CE, Brasil  
E-mails: [conceicaorabelo@yahoo.com.br](mailto:conceicaorabelo@yahoo.com.br); [larm@ufc.br](mailto:larm@ufc.br); [itabaracicavalcante@gmail.com](mailto:itabaracicavalcante@gmail.com)

Recebido em: 09/08/2018      Aprovado em: 11/10/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_252\\_259](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_252_259)

## Resumo

O presente trabalho apresenta a avaliação da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na porção leste da Bacia Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil, por meio dos métodos GOD e POSH. O método GOD apresentou três classes de vulnerabilidade: baixa, moderada e alta, com predomínio de vulnerabilidade moderada (80%). O método POSH classificou as cargas poluidoras em três índices: elevado, moderado e baixo. O mapa de vulnerabilidade associado aos riscos a poluição facilitou a identificação das áreas mais susceptíveis à contaminação, servindo como subsídio para gestores municipais em futuros planos diretores de uso e ocupação do solo urbano e rural.

**Palavras-chave:** Aquífero sedimentar; Cariri cearense; Método GOD; Método POSH

## Abstract

The present work presents the assessment of the vulnerability and risk of groundwater pollution in the eastern portion of the Araripe Sedimentary Basin, Ceará, Brasil, through the GOD and POSH methods. The GOD method presented three classes of vulnerability: low, moderate and high, with a predominance of moderate vulnerability (80%). The POSH method classified the pollutant loads into three indexes: high, moderate and low. The vulnerability map associated with the risks of pollution facilitated the identification of the areas most susceptible to contamination, serving as a subsidy for municipal managers in future plans for use and occupation of urban and rural land.

**Keywords:** Sedimentary aquifer; Cariri cearense; GOD method; POSH method

## 1 Introdução

A poluição por atividades industriais, postos de armazenamento de combustíveis e ausência de saneamento básico estão entre os principais problemas que afetam a qualidade das águas subterrâneas (Moura *et al.*, 2016). Neste sentido, a aplicação de métodos de vulnerabilidade em aquíferos é de fundamental importância, pois através deste é possível conhecer os fatores que comprometem a qualidade da água e os riscos pelos quais ela pode ser poluída (Santos *et al.*, 2010).

Nas últimas três décadas tem-se verificado um crescente desenvolvimento de modelos e técnicas de mapeamento de vulnerabilidade e risco à poluição de aquíferos, como uma ferramenta para sua proteção. Vários métodos para determinação de vulnerabilidade de aquíferos já foram desenvolvidos e suas eficácias dependem diretamente da qualidade dos dados necessários para definição dos parâmetros envolvidos. Segundo Meira *et al.* (2014), os métodos GOD e POSH (*Pollutant Origin, Surcharge Hydraulically*) possuem a simplicidade conceitual e também demandam bases que são, até certo ponto, acessíveis. Desse modo a utilização de tais métodos permite uma avaliação da situação natural, do potencial e do risco à poluição existente em uma dada região.

O método GOD está baseado na avaliação do nível de acessibilidade hidráulica da zona saturada, em função do grau de confinamento do aquífero, da profundidade do nível estático e da capacidade de atenuação dos contaminantes ao longo da zona vadosa (Foster, *et al.* 2002). Enquanto o método POSH refere-se à possibilidade de geração de uma carga poluidora identificando as substâncias tóxicas armazenadas e/ou manipuladas e a existência de carga hidráulica associada à essas substâncias no processo ou no seu destino final. Basicamente, este método ampara-se nos seguintes aspectos: localização da atividade poluidora, início e fim do funcionamento, tipo e tamanho da atividade e uso ou disponibilidade de água (Foster & Hirata, 1988).

Logo, o presente estudo tem como objetivo realizar o mapeamento em Sistema de Informações Geográficas/SIG da vulnerabilidade e risco a poluição das águas subterrâneas na porção leste da Bacia

Sedimentar do Araripe, Ceará, Brasil, permitindo aos órgãos gestores, uma melhor avaliação e controle da poluição e monitoramento da qualidade da água subterrânea na área.

## 2 Área de Estudo

A área de estudo envolve os municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha (9183000 - 9215000 N e 448500 - 479000 S) (Figura 1), que possui clima tipo tropical quente semiárido, no Vale do Cariri e tropical quente semiárido brando, na Chapada do Araripe, com temperatura média de 24 a 26 °C e precipitação pluvial média anual de 925 mm, com período chuvoso de janeiro a maio (IPECE, 2016).

Na área de estudo aflora predominantemente a formação Rio da Batateira, caracterizada por arenitos argilosos médios a finos, com espessura média de 200 m, cimentada na base por siltitos argilosos e folhelhos betuminosos e fossilíferos (Ponte & Appi, 1990), constituindo o aquífero explotado mais importante. Esta formação geológica constitui a base do Grupo Araripe (Mesozóica), que é sotoposta a outras formações na Chapada do Araripe: a Santana, que é composta predominantemente por calcita, gipsita e folhelhos; a Arajara, por siltitos, argilitos e arenitos finos argilosos; e a Exú, por arenitos friáveis, argilosos, de granulometria variável, aflorante no topo da Chapada (Ponte & Appi, 1990). As formações Arajara e Exú são caracterizadas como aquíferos e a Santana, como aquíclode. Sotopostas a formação Rio da Batateira encontram-se as formações Abaiara (não aflorante), Missão Velha, que são aquíferos, e o Brejo Santo, que é um aquíclode, pertencentes ao Grupo Vale do Cariri (Mesozóica). Na base desse pacote sedimentar, encontra-se a formação Mauriti (Paleozóica), que é um aquífero, depositada sobre rochas do embasamento pré-cambriano.

## 3 Material e Métodos

A caracterização hidrogeológica da área de estudo foi feita com base na avaliação de dados geológicos e hidrogeológicos disponíveis em publicações e na interpretação dos perfis construtivos/lito-

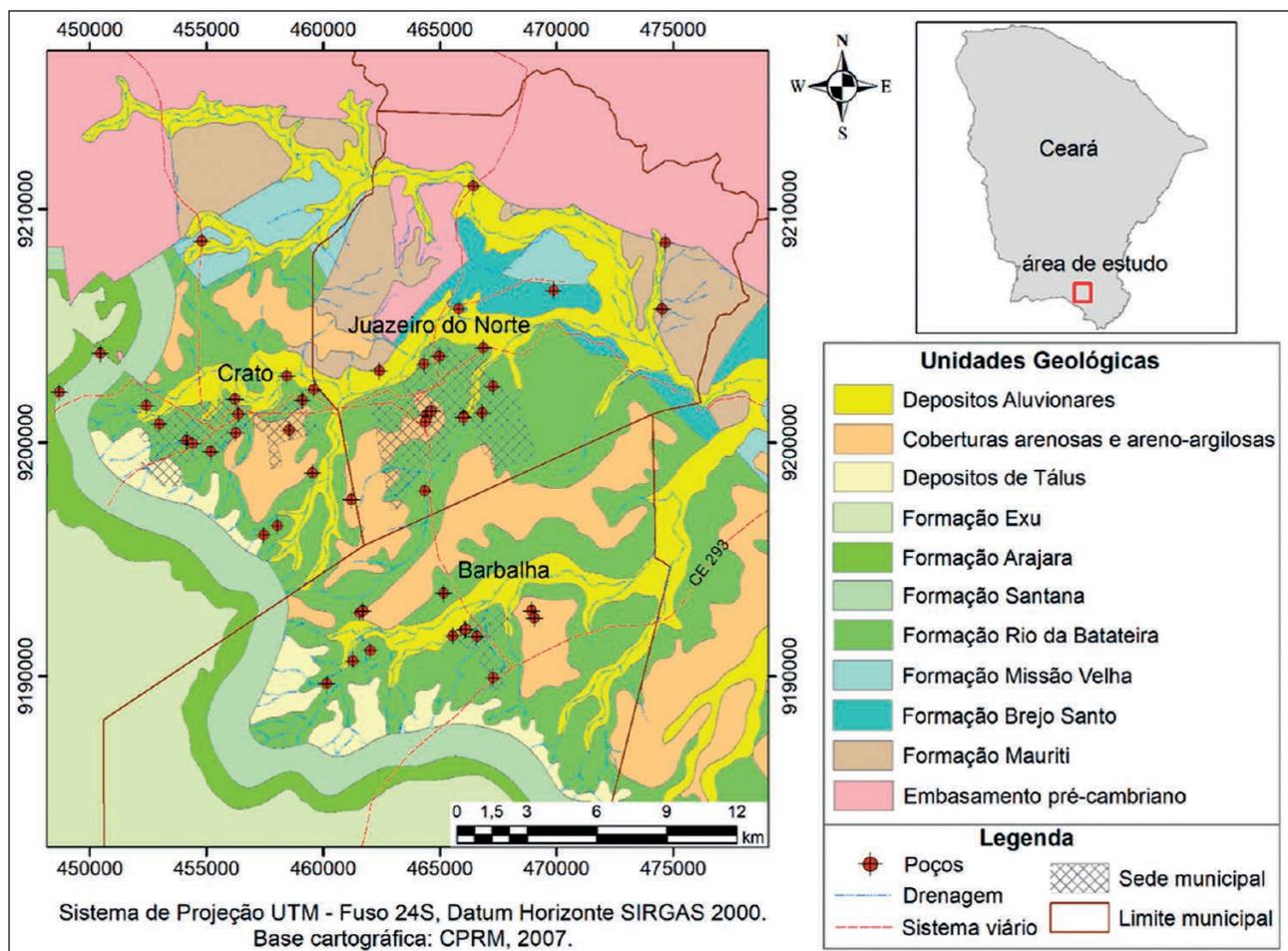


Figura 1 Localização da área de estudo, unidades geológicas aflorantes e poços visitados *in situ* (modificado de CPRM, 2007).

lógicos de poços obtidos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Tais dados foram complementados, quando necessário, a partir de informações adicionais obtidas em campo. Também se realizou a análise de imagens de satélites e dados populacionais, com o objetivo de classificar o tipo de uso e ocupação do solo na área de estudo.

A determinação da vulnerabilidade natural do aquífero a poluição foi realizada utilizando a metodologia GOD (Foster & Hirata, 1991). Essa metodologia envolve os seguintes parâmetros: G (*groundwater occurrence*): identificação do tipo de confinamento de água subterrânea, com a posterior indexação desse parâmetro na escala de 0,0 – 1,0; O (*overall of litology of aquiperms*): especificação dos estratos de cobertura da zona saturada do aquífero em termos de grau de consolidação com provável

presença ou ausência de permeabilidade por fissuras e tipo de litologia com porosidade indiretamente dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica; isto leva a uma segunda pontuação, em uma escala de 0,4 – 1,0 e D (depth): estimativa da profundidade até o lençol freático (de aquíferos não confinados) ou da profundidade do primeiro nível principal de água subterrânea (para aquíferos confinados), com posterior classificação na escala de 0,6 – 1,0.

O índice de vulnerabilidade natural de aquífero é obtido a partir do produto dos três índices desses parâmetros. Sendo assim, obtém-se a vulnerabilidade natural do aquífero à poluição, que pode ser classificada como: insignificante (valores entre 0 e 0,1); baixa (0,1 e 0,3); média (0,3 e 0,5); alta (0,5 e 0,7) e; extrema (0,7 e 1,0).

Os parâmetros G e O foram obtidos de perfis construtivos/litológicos dos poços adquiridos no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS, 2017) e o parâmetro D obtido através das medidas de nível d'água de 49 poços (Figura 1) *in situ* (setembro/2015), com medidor eletro-sonoro JACIRI com capacidade de até 100 m de profundidade.

Para a interpolação dos parâmetros G, O e D foi utilizado o método IDW (*Inverse Distance Weighting*) (Landim, 1998), uma vez que na comparação com outros interpoladores, foi o que melhor representou a distribuição dos dados. Posteriormente foi utilizado a ferramenta *Raster Calculator* do QGIS 2.18, onde foi executada a multiplicação dos dados (G, O e D) no formato raster, pixel a pixel para gerar uma nova imagem, onde cada pixel tem um valor atribuído igual ao resultado da multiplicação dos valores das imagens originais. Logo, essa imagem foi convertida a visualização de formato vetorial (polígonos) para o formato GRID, para assim ter a geração do mapa de vulnerabilidade natural do aquífero.

A identificação das potenciais fontes de poluição foi realizada em duas fases: a primeira consistiu no levantamento dos trabalhos realizados anteriormente e imagens de satélite, e a segunda fase consistiu na verificação em campo de locais com atividades potencialmente poluidoras. Após o levantamento dessas informações, as áreas foram tabeladas e classificadas de acordo com método POSH (Foster *et al.*, 2002), que classifica o potencial de carga contaminante no subsolo em três níveis qualitativos: reduzido, moderado e elevado.

Após a caracterização das potenciais fontes de poluição, o mapeamento do risco de poluição foi realizado em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas) por meio da multiplicação do mapeamento da vulnerabilidade (obtida pelo método GOD) com a classificação das cargas poluidoras (classificação pelo método POSH), seguindo o mesmo método apresentado para o mapeamento da vulnerabilidade.

Também foi elaborado um mapa da superfície potenciométrica (diferença da cota do terreno e o nível estático de cada poço) para o conhecimento da direção do fluxo hídrico subterrâneo através de um

tratamento geoestatístico, mediante *krigagem* dos dados, utilizando o software *Surfer* (versão 8). Este método de interpolação está baseado no princípio de que pontos próximos no espaço tendem a apresentar valores semelhantes, se comparados com os pontos mais afastados.

Para a interpolação dos valores e a apresentação dos resultados em forma de mapas, utilizou-se o Sistema de Informações Geográficas – SIG, com coordenadas UTM e Datum SIRGAS 2000.

#### 4 Resultados e Discussão

As características hidrogeológicas verificadas permitem classificar a área com a ocorrência da água subterrânea de forma não confinada (aquíferos livres), com valores de Índice G variando de 0,6 a 0,9. Quanto à caracterização dos estratos de cobertura, constata-se a predominância de arenitos, sobrepostos por sedimentos não consolidados constituídos de argila, areia, cascalho, margas, folhelhos e calcários conferindo uma variação do Índice O entre 0,6 e 0,9. E, com relação ao nível da água subterrânea, destaca-se que 47% da área apresenta níveis entre 5 e 20m e 33%, entre 20 e 50m, predominando, portanto, os Índices D iguais a 0,8 e 0,7.

Os resultados obtidos pelo método GOD indicam que a vulnerabilidade dos aquíferos na área de estudo varia de baixa a alta (entre 0,30 e 0,60), com predomínio de vulnerabilidade moderada (80%) (Figura 2).

Analisando a vulnerabilidade por município, destaca-se Crato, Barbalha e Juazeiro do Norte com aproximadamente, 89%, 91% e 63%, respectivamente, dos seus mananciais subterrâneos classificados como moderadamente vulneráveis (Figura 2). Segundo Hirata e Fernandes (2008), no caso do índice moderado, a área é vulnerável a alguns poluentes quando continuamente lançados e lixiviados (sais, nitratos e hidrocarbonetos). Juazeiro do Norte apresenta a maior área com vulnerabilidade baixa (36%) em relação aos demais municípios. Nessa classe somente é vulnerável a contaminantes persistentes em longo prazo, quando continua e amplamente lançados e lixiviados, tais como sais e nitratos (Hirata &

Fernandes, 2008). Na porção norte da sede de Crato, onde ocorre as coberturas arenosas, o índice obtido (0,60) indica alta vulnerabilidade em detrimento do grau de consolidação da zona vadosa, formada predominantemente por arenitos e pela influência de níveis estáticos mais rasos (< 5 metros de profundidade). Nesse caso, segundo Hirata e Fernandes (2008), a área é vulnerável a muitos poluentes, exceto os pouco móveis e persistentes (hidrocarbonetos, compostos aromáticos, bactérias, vírus, sais e nitratos).

A partir dos dados obtidos na literatura (Veríssimo, 1999; Cajazeiras, 2007; Viana, 2007), imagens de satélites e das visitas realizadas em campo, identificaram-se as principais fontes potenciais de poluição na área e classificou-se o potencial de carga contaminante no subsolo de acordo com o método POSH.

O risco de poluição é a correlação da vulnerabilidade natural com as cargas poluidoras. As principais fontes poluidoras estão nas sedes municipais,

tendo sido realizada uma caracterização do risco por município, propiciando o conhecimento sobre que unidade municipal está sofrendo o maior lançamento de poluentes no meio ambiente.

A urbanização da área foi intensificada ao longo dos últimos 22 anos, em virtude das atividades econômicas (indústrias, comércios e turismo religioso). A classificação das potenciais cargas poluentes no subsolo (POSH) não estabelece um peso para esse tipo de poluição, logo, nesta pesquisa classificou-se segundo a estimativa populacional de cada município, como: risco reduzido (<100.000 habitantes), moderado (100.000 a 150.000 habitantes) e elevado (>150.000 habitantes). A cidade de Juazeiro do Norte com 263.704 habitantes apresenta um elevado risco, seguido por Crato (127.657 hab.) com moderado risco e Barbalha (58.347 hab.) com reduzido risco.

As atividades industriais (fonte pontual) desenvolvidas na área estão relacionadas a curtume,

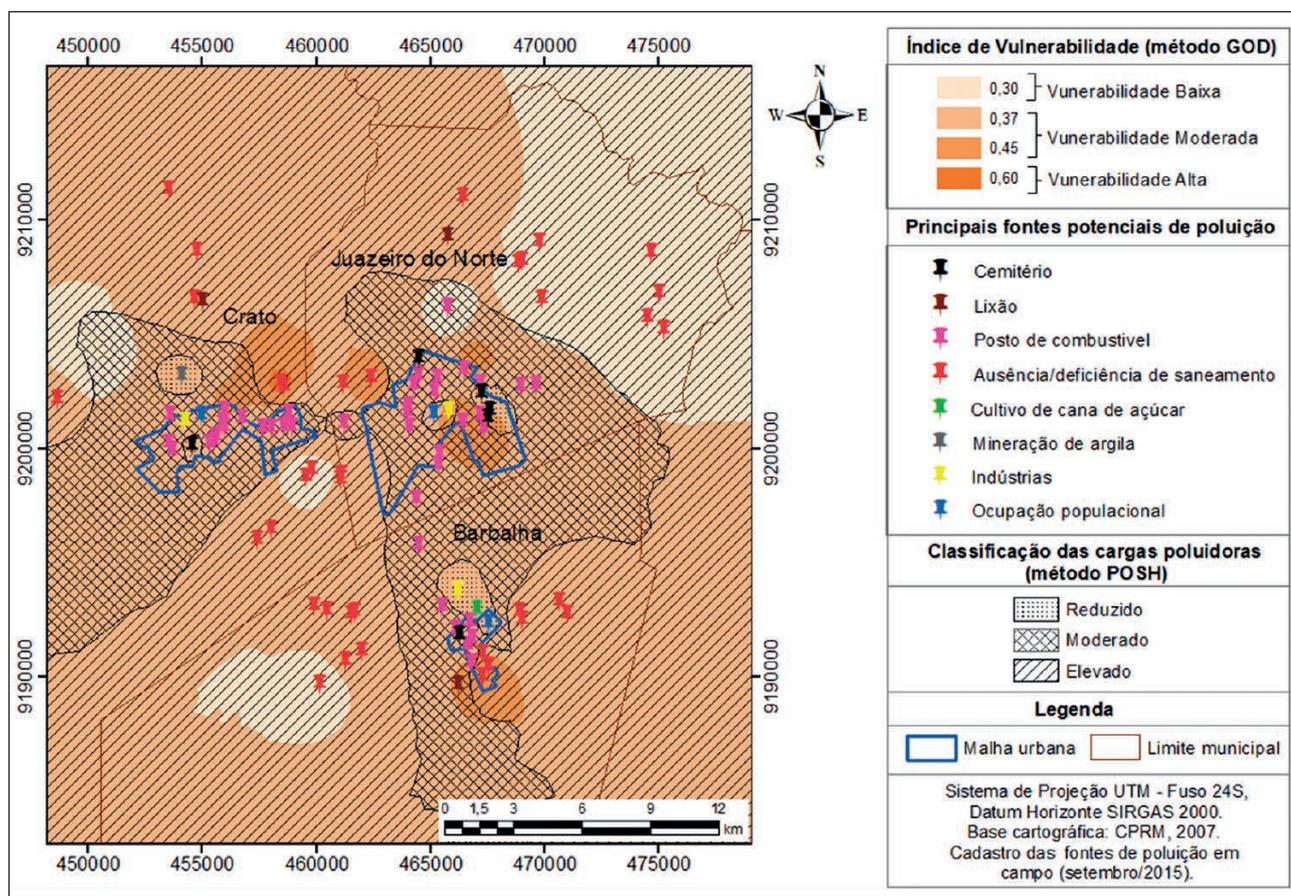


Figura 2 vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na área de estudo.

matadouros, fábricas de têxteis (que utilizam tintas e químicos tóxicos), galvanoplastia, polo calçadista de Juazeiro (o terceiro maior do país), polo de alumínio também em Juazeiro (é o primeiro do nordeste) e outras. Estas indústrias produzem grandes quantidades de diferentes tipos de poluentes. Segundo a classificação de POSH, o município de Juazeiro do Norte apresenta um índice elevado de risco; Crato com moderado risco e Barbalha com reduzido risco de poluição.

As atuais minerações com concessão de lavra na área não são muito impactantes comparadas às minerações que se utilizam de processos químicos a extração. Na avaliação de risco, considerou-se como risco reduzido para todos os municípios, onde tem-se somente um risco local nas minerações de argila (afloramento da Formação Rio da Batateira), devido a retirada de camadas impermeabilizantes, provocando naturalmente um aumento da vulnerabilidade naquele local.

Na classe de fontes pontuais urbanas estão os postos de distribuição de combustíveis com moderado potencial de geração de carga poluente na área. Segundo Fetter (1993), estudos hidrogeológicos mostram que os hidrocarbonetos não se dispersam através do solo de maneira uniforme e homogênea, mas movem-se através da zona não saturada na forma de acumulações discretas de contaminantes. As características de migração dessas acumulações dependem das propriedades químicas e físicas do solo.

Os resíduos sólidos (domésticos) são colocados nos lixões onde a quantidade de resíduos está diretamente correlacionada a população urbana em cada município. Logo optou-se por classificar esse tipo de atividade conforme a quantidade de tonelada de resíduos/habitantes. Considerando-se 0,500kg/hab/dia, sendo classificado com elevado risco quando produzido mais de 30.000 t/ano; moderado risco (15.000 a 30.000 t/ano) e reduzido (< 15.000 t/ano). Em Juazeiro do Norte (108.000 t/ano) e Crato (43.200 t/ano) apresentam elevado risco; e o município de Barbalha (18.000 t/ano) possui moderado risco de poluição. Na classificação de POSH (baseado na precipitação pluvial média anual), a área de estudo (Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha) é classificada como moderado risco de poluição.

Na classe de fonte difusa está a potencial carga poluente da ausência/deficiência de saneamento *in situ*. Em consideração a população que não é atendida pela rede de esgoto na área, tem-se que a sede do município de Juazeiro do Norte possui 160.860 habitantes (61%) não atendidos por serviço de rede de esgoto, Crato com 85.531 (67%) e Barbalha com 25.090 (43%) habitantes, detentores de elevados riscos de poluição e estão em zona de média a alta vulnerabilidade. Ressalta-se que Franca *et al.* (2006) observaram em uma bateria de poços em Juazeiro do Norte que as águas explotadas por parte desses poços apresentaram indícios de poluição por esgotos domésticos. Machado (2005) também verificou uma forte correlação entre as concentrações de nitrato com cloreto e com CE de amostras de águas subterrâneas coletadas nos municípios de Juazeiro do Norte e Crato, indicando poluição por esgoto doméstico.

Em relação a atividades agrícolas, atualmente não se tem trabalhos que qualifique e quantifique os poluentes que cause risco de poluição das águas subterrâneas pelas práticas da agricultura na área. Sabe-se que o cultivo de cana de açúcar é um dos mais comuns na região, sendo utilizado extensivamente fertilizantes e pesticidas orgânicos e inorgânicos, concentrada no município de Barbalha, que apresenta uma média vulnerabilidade.

A carga poluente proveniente de cemitérios (fonte pontual) na área apresenta vulnerabilidade moderada, e apesar desta fonte apresentar uma reduzida capacidade de geração de carga poluente (segundo a classificação de POSH), deve-se ter cuidado principalmente devido as cargas patogênicas (vírus e bactérias) associadas a esta fonte de poluição. Segundo Foster & Hirata (1991), é possível a existência de um aquífero com média/alta vulnerabilidade, mas com baixo risco de poluição das águas subterrâneas, desde que a carga contaminante potencial seja reduzida ou inexistente.

A Figura 3 apresenta a espacialização da superfície potenciométrica indicando a direção do fluxo subterrâneo, traçada pelos vetores, perpendicularmente as linhas equipotenciais. Observa-se, na porção norte e centro da área, os menores valores de superfície potenciométrica, enquanto no restante da área, apresenta os maiores valores potenciométricos

associados aos índices de vulnerabilidade moderados (0,37 a 0,45), indicando as prováveis áreas de recarga (máximo potencial hidráulico) e descarga (menor potencial hidráulico) dos recursos hídricos subterrâneos.

## 5 Conclusões

Os resultados obtidos com a aplicação do método GOD demonstram o predomínio (80%) de moderada vulnerabilidade natural a poluição das águas subterrâneas na área de pesquisa. As cargas poluidoras foram classificadas em três índices: elevado, moderado e baixo. O município de Juazeiro do Norte é o que apresenta um maior risco de poluentes, seguido pelos municípios de Crato e Barbalha.

O mapa de vulnerabilidade associado aos riscos a poluição facilitou a identificação das áreas mais susceptíveis à poluição, servindo como subsídio para gestores municipais em futuros planos diretores de uso e ocupação do solo, devendo ser feito novos estudos no posicionamento dessas fontes potenciais de poluição, identificando detalhadamente zonas impermeáveis, caracterizando zonas de Baixa vulnerabilidade.

## 6 Referências

Cajazeiras, C.C.A. 2007. *Qualidade e Uso das Águas Subterrâneas e a Relação com Doenças de Veiculação Hídrica, Região de Crajubar/CE*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 144p.

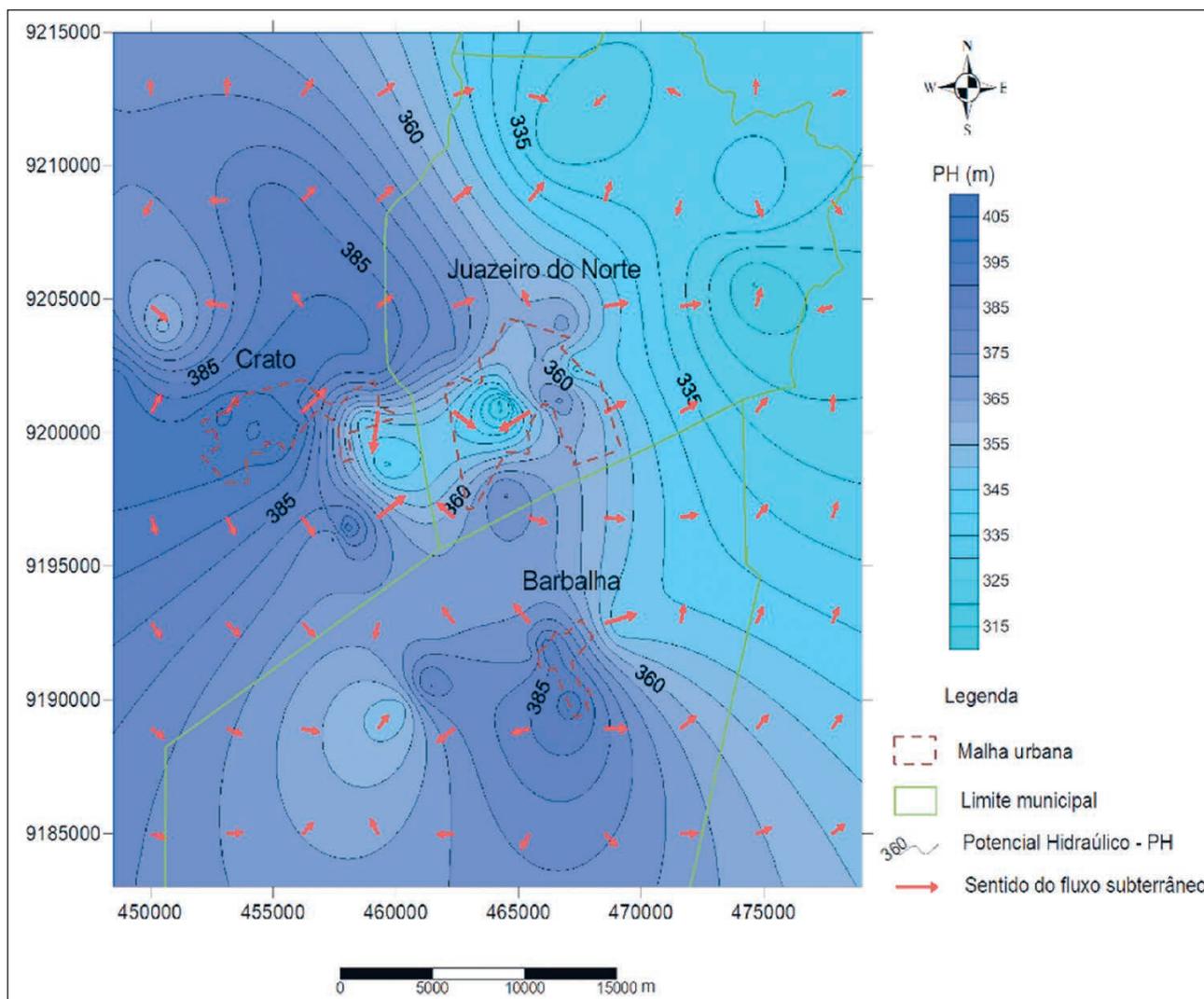


Figura 3 Superfície potenciométrica da área de estudo.

- CPRM. 2007. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Mapa das Bacias Sedimentares da Região Semiárida do Nordeste Brasileiro, escala 1:500.000. Fortaleza.
- Fetter, C.W. 1993. *Contaminant hydrogeology*. MacMillan Publishing Company, New York, 400p.
- Foster, S. & Hirata, R.C.A. 1988. *Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data*. CEPIS/PAHO Technical Report, Lima, 78p.
- Foster, S. & Hirata, R.C.A. 1991. *Determinacion del Riesgo de Contaminacion de Águas Subterrâneas – una metodología basada en datos existentes*. CEPIS, Lima, 81p.
- Foster, S.; Hirata, R.C.A.; Gomes, D.; D'elia, M. & Paris, M. 2002. *Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. World Bank, Washington, 101p.
- Franca, R.M. da; Frischkorn, H., Santos, M.R.P., Mendonça, L.A.R. & Beserra, M. da C. 2006. Contaminação de poços tubulares em Juazeiro do Norte-CE. *Revista Engenharia sanitária ambiental*, 11(1): 92-102.
- Hirata, R. & Fernandes, A. J. 2008. Vulnerabilidade à poluição dos aquíferos. In: FEITOSA, F.A.C.; MANUEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (eds.). *Hydrogeologia: conceitos e aplicações*. Editora CPRM, Rio de Janeiro, p. 405-424.
- IPECE. 2016. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Perfil Básico Municipal. Disponível em: <<http://www.ipece.ce.gov.br>>. Acesso em 06/09/2017.
- Landim, P.M.B. 1998. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. UNESP, São Paulo. 226p.
- Machado, C.J.F. 2005. *Modelagem geoquímica e de fluxos do sistema aquífero subterrâneo na Bacia Sedimentar do Araripe*. Programa de Pós-graduação em Física, Universidade Federal do Ceará, Tese de Doutorado, 159p.
- Meira, J.C.R.; Campos, A.B. & Pereira, L.C. 2014. Vulnerabilidade natural e perigo à contaminação de zona de recarga do aquífero Guarani. *Revista Águas Subterrâneas*, 28(1): 3146.
- Moura, P.; Sabadia, J.A.B. & Cavalcante, I.N. 2016. Mapeamento de vulnerabilidade dos aquíferos dunas, barreiras e fissural na porção norte do complexo industrial e Portuário do Pecém, Estado do Ceará. *Revista Geociências*, 35(1): 77-89.
- Ponte, F.C & Appi, C.J. 1990. Proposta de revisão da coluna litoestratigráfica da Bacia do Araripe. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Natal, 1990. *Resumos*, Natal, SBG, p. 211-226.
- SIAGAS. 2017. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas. Banco de dados dos poços cadastrados. Disponível em: <<http://www.siagasweb.cprm.gov.br>>. Acesso em 22/09/2017.
- Santos, R.A.; Cruz, M.J.M. & Nascimento, S.A.M. 2010. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: Subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos. *Revista Cadernos de Geociências*, 7(1): 54-62.
- Veríssimo, L.S.A. 1999. *importância das Águas Subterrâneas para o Desenvolvimento Socioeconômico do Eixo CRA-JUBAR, Cariri Ocidental - Estado do Ceará*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 117p.
- Viana, N.O. 2007. *Vulnerabilidade e risco à poluição do Sistema Aquífero Médio – entre Crato e Missão Velha, Bacia do Araripe, Ceará*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Dissertação de Mestrado, 132p.