

# MAPEAMENTO DE VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS DUNAS, BARREIRAS E FISSURAL NA PORÇÃO NORTE DO COMPLEXO INDUSTRIAL E PORTUÁRIO DO PECÉM, ESTADO DO CEARÁ

Pâmella MOURA<sup>1</sup>, José Antonio Beltrão SABADIA<sup>1</sup>, Itabaraci Nazareno CAVALCANTE<sup>1</sup>

(1) Programa de Pós-Graduação em Geologia. Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Bloco 912, Fortaleza/Ceará. Cep: 60455-760. Endereços eletrônicos: pamella\_mm@yahoo.com.br; sabadia@ufc.br; itabaracicavalcante@gmail.com.

Introdução  
Área de Estudo  
Materiais e Métodos  
    Caracterização Climática e Fisiográfica  
    Caracterização Hidrogeológica  
    Método DRASTIC  
    Método GOD  
Resultados e Discussões  
    Comparação Entre os Resultados dos Métodos DRASTIC e GOD  
Considerações Finais  
Agradecimentos  
Referências

**RESUMO** - O presente trabalho apresenta a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos Dunas, Barreiras e Fissural na porção norte do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), estado do Ceará (Brasil), por meio dos métodos DRASTIC e GOD. Teve por objetivo gerar subsídios para o planejamento ambiental, com vistas à gestão das águas subterrâneas locais. Os referidos métodos trabalham com um número de parâmetros distintos, sendo o DRASTIC mais robusto, restritivo e preciso. O método DRASTIC apresentou cinco classes de vulnerabilidade, caracterizando a maior parte da área como de vulnerabilidade alta (25%) ou muito alta (24,7%). O método GOD apresentou duas classes de vulnerabilidade: vulnerabilidade moderada (59%) e vulnerabilidade alta (41%). Em ambos os métodos o aquífero Dunas representa o meio mais vulnerável, onde justamente estão alocadas uma siderúrgica e áreas de ampliação urbana. Em vista disto, ações para a prevenção de possíveis contaminações devem ser implementadas. O meio fissural e o aquífero Barreiras, apesar de menos vulneráveis, devem igualmente merecer atenção e monitoramento. O trabalho apresenta-se como ferramenta aos setores públicos e privados para a gestão mais eficaz das águas subterrâneas locais.

**Palavras-chave:** Águas Subterrâneas, Hidrogeologia, Pecém, Planejamento Ambiental

**ABSTRACT** - This work presents the natural vulnerability evaluation of the Dunes, Barreiras and Fissural aquifers from the northern Pecém Industrial and Harbor Complex, Ceará, Brazil, by using the DRASTIC and GOD methods. It aims to provide subsidies for environmental planning, in order to guide a management of the local groundwater. The mentioned methods use distinct parameters, being the DRASTIC more robust, restrictive and accurate. The DRASTIC exhibits indices between very low and very high, with predominance of high vulnerability (25%) and very high vulnerability (24.7%). The GOD presents indices between moderate (59%) and high vulnerability (41%). Both methods indicate the Dunes Aquifer as the most vulnerable aquifer on the site, precisely where a steel plant and sites for urban expansion are built. Therefore, actions to prevent possible contamination should be implemented. Both Fissural and Barreiras aquifers deserve equal attention and monitoring, despite less vulnerable. This work is presented as a tool for more effective groundwater management by the responsible public and private sector.

**Keywords:** Groundwater, Hydrogeology, Pecém, Environmental Planning

## INTRODUÇÃO

A contaminação 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. Neste sentido, medidas de planejamento ambiental, como a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos, são imprescindíveis no processo de ordenamento do uso e da ocupação do solo, com intuito de prevenir potenciais impactos, principalmente

em situações de grandes instalações industriais e de expansão urbana, como os originados com a instalação do Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no estado do Ceará.

Este Complexo constitui-se em um pólo industrial atrelado ao Porto do Pecém que agregará empresas de diversos setores industriais, como siderúrgicas, termoelétricas, metalúrgicas e refinaria. A área do CIPP é circundada por Unidades de Conservação e por

comunidades residenciais e está assentada, predominantemente, sobre terrenos sedimentares. As baixas taxas de abastecimento de água na região incentivam a utilização das águas subterrâneas pela população e indústrias locais.

Foster & Hirata (1988) definiram que a vulnerabilidade natural de aquíferos representa sua sensibilidade para ser adversamente impactado por uma carga de contaminantes. Ocorre em função, sobretudo, da profundidade das águas subterrâneas e do tipo de aquífero, no que diz respeito ao confinamento e litologia; das características físicas e litológicas da zona vadosa e de fatores geoambientais. Diversos métodos foram desenvolvidos desde que os primeiros estudos de vulnerabilidade foram apresentados, sendo os métodos DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e GOD (Foster & Hirata, 1988) comumente utilizados no Brasil.

O método DRASTIC baseia-se em uma composição de parâmetros que descrevem os principais fatores de influência no movimento da água subterrânea, como litologia e topografia, e considera que os possíveis contaminantes possuem as mesmas características de mobilidade da água. 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.

Diferentes metodologias de vulnerabilidade podem ser aplicadas em uma determinada área, a fim de se avaliar qual delas será a mais adequada, considerando a prevenção da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos (Auge, 2004). Dentre os trabalhos que utilizaram esta abordagem destacam-se Reginato & Ahlert (2013) e Cutrim & Campos (2010a, b), que aplicaram os métodos GOD e DRASTIC para avaliação da vulnerabilidade em parte do Sistema Aquífero Serra Geral e do

Aquífero Furnas, respectivamente. Miranda *et al.* (2015) aplicaram os métodos GOD e EKV, de forma comparativa, para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos rasos na Bacia do Rio Coxim.

Apesar das diferenças entre o número de parâmetros utilizados pelos dois métodos e as implicações que estas diferenças podem conduzir, a apresentação simultânea destas duas ferramentas possibilita a tomada de decisões mais abalizadas por parte dos gestores públicos e privados que atuam na área. E de acordo com Xavier *et al.* (2004), a utilização de métodos distintos em uma mesma área possibilita a análise da eficácia da aplicação e acurácia de cada método.

Entre outras possibilidades de aplicação, Hirata & Ferreira (2001) apontam que a avaliação da vulnerabilidade apresenta-se como instrumento útil para a preservação da qualidade das águas subterrâneas, de forma a orientar as áreas mais adequadas e menos susceptíveis para a instalação e desenvolvimento de atividades potencialmente poluidoras. Essa análise serve de parâmetro para ações gerenciais que promovam o uso racional e a gestão adequada dos aquíferos por parte dos órgãos públicos, com relação à implementação de políticas de controle e preservação (Santos *et al.*, 2010).

A relevância dos métodos utilizados na presente pesquisa resulta no mapeamento e avaliação de vulnerabilidade das distintas formações geológicas ali presentes, a partir da aplicação comparativa entre os métodos DRASTIC e GOD. Desta forma, este trabalho tem por objetivo gerar subsídios técnicos que possam embasar a gestão qualificada e preventiva dos recursos hídricos subterrâneos da região do Pecém, haja vista o potencial poluidor das atividades industriais que já estão sendo desenvolvidas no local, a fragilidade ambiental da área e a demanda populacional e industrial pelo uso das águas subterrâneas.

## ÁREA DE ESTUDO

A área está localizada no distrito do Pecém, 60 km a oeste de Fortaleza, e compreende a porção norte do CIPP (cerca de 53km<sup>2</sup>), a área do Jardim Botânico de São Gonçalo do

Amarante, parte da Estação Ecológica do Pecém e áreas residenciais. O acesso principal é realizado pela rodovia CE-085 (Figura 1).

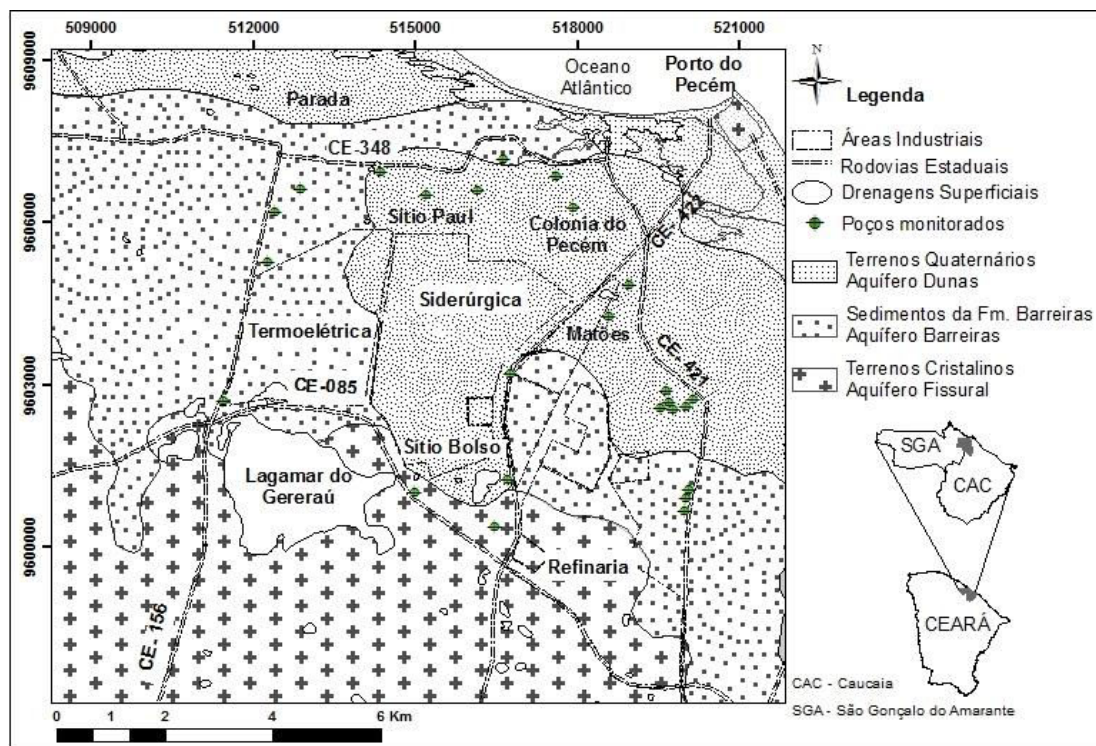


Figura 1. Localização, poços cadastrados, geologia e principais sistemas aquíferos da região do CIPP.

O Pecém possui 9156 habitantes, 30% residentes em área urbana, e densidade demográfica de 81,7hab./km<sup>2</sup>. A taxa de cobertura de abastecimento de água é de 38% e de domicílios com serviço de coleta de lixo é de aproximadamente 73%. O total de domicílios

com esgotamento sanitário adequado é de 31% (IBGE, 2010). O IDHM do município do qual o Pecém faz parte (São Gonçalo do Amarante) é de 0,665 (ONU, 2013). Dados do IPECE (2010) indicam para a região um crescimento industrial superior a 80% na última década.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas informações vetoriais de geologia, pedologia e topografia (Cavalcante *et al.*, 2003, IPECE, 2007 e 2009, respectivamente), além da análise e vetorização do Plano Diretor do CIPP (Ceará, 2009). Tais dados foram complementados, quando necessário, a partir de informações adicionais coletadas em campo. Também se realizou a análise de dados climáticos por meio da série histórica de precipitação (1982-2013), disponibilizados pela FUNCEME (2013).

Os dados de nível estático foram obtidos através do cadastro e monitoramento dos poços em campo, realizados em duas etapas no período das chuvas e duas etapas no período seco (Tabela 1). As medidas de nível estático, bem como os valores estimados de recarga, foram submetidas à operação de interpolação tipo *krigagem*.

Para a avaliação da vulnerabilidade os métodos DRATIC e GOD foram tratados em ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas). Arquivos em formato *shape* para cada um dos parâmetros utilizados foram convertidos para *raster*, sendo atribuídos os valores propostos por cada classe de feições. Os arquivos foram submetidos a operações de álgebra de mapas, com multiplicação dos dados de acordo com as expressões propostas para o cálculo da vulnerabilidade.

### Caracterização climática e fisiográfica

A média pluviométrica da região é de 1020 mm/ano e a temperatura anual média de 27°C. O regime de chuvas é controlado por uma estação seca, de junho a dezembro, e outra chuvosa, com aproximadamente 75% das precipitações entre fevereiro e maio (FUNCEME, 2013).

A região apresenta terrenos quaternários que constituem a Planície Litorânea. São campos de dunas e paleodunas que ocorrem ao norte da área, caracterizados como principal área de recarga das águas subterrâneas, com presença de lagos interdunares sazonais e planícies flúvio-marinhas, além de outros sistemas deposicionais costeiros: areias marinhas recentes, planícies de deflação e depósitos aluviais (Aguilar *et al.*, 2000; Brandão, 1995a e b; e Sabadia, 2000). Sobre as paleodunas, desenvolvem-se neossolos quartzarênicos de cor alaranjada e espessura variada (de poucos centímetros a cerca de 3m).

Na porção central afloram terrenos neógenos constituídos por arenitos imaturos (em parte arcoseanos), lamitos e conglomerados da Formação Barreiras. Apresentam-se com topografia plana e de pequenas variações altimétricas, caracterizando os Tabuleiros Pré-Litorâneos (Brandão, 1995b). Nesta porção, ocorrem argissolos de cor avermelhada e bastante espessos.

Aflorando apenas na porção sul, encontra-se um embasamento formado, principalmente, por migmatitos, gnaisses aluminosos e lentes quartzíticas, bastante alteradas, agrupados no Complexo Ceará. De idade pré-cambriana, este embasamento associa-se aos terrenos planos e dissecados da Depressão Sertaneja (Brandão, 1995b). Neste contexto, encontram-se mantos de alteração e pacotes incipientes de planossolos, muitas vezes recobertos por sedimentos oriundos dos campos de dunas.

### Caracterização hidrogeológica

A região apresenta três sistemas aquíferos principais: Fissural, Barreiras e Dunas (Figura 1). O sistema aquífero Fissural recobre aproximadamente 14% da área e é formado por rochas do embasamento, solos residuais e saprólitos oriundos de tais rochas cristalinas, como observado em campo. As possibilidades aquíferas deste sistema são baixas e dependem da presença de fraturas interconectadas com as zonas de recarga ou da captação de águas nos mantos de alteração. Cavalcante (1997) aponta condutividade hidráulica em torno de  $10^{-5}$  m/s e porosidade menor que 1%.

O sistema aquífero Barreiras recobre aproximadamente 36% da área e constitui-se de rochas sedimentares pouco consolidadas, de

composição arenosa a silto-argilosas, granulação fina a média, presença de lateritas ferruginosas e níveis conglomeráticos (Bianchi *et al.*, 1984, Brandão, 1995b). Sabadia (2001) aponta um comportamento hidrodinâmico bastante variável devido à ampla heterogeneidade do pacote, possibilitando o desenvolvimento de estratos aquíferos bastante produtivos, intercalados vertical ou lateralmente com porções aquíferas. A condutividade hidráulica e porosidade efetiva apresentam valores da ordem de  $1,8 \times 10^{-6}$  m/s e 10%, respectivamente (Bianchi *et al.*, 1984).

O sistema aquífero Dunas recobre aproximadamente 50% da área e constitui-se de aquíferos livres formados por sedimentos quaternários, principalmente areias quartzosas de granulação fina a média, bem selecionadas, com intercalações ocasionais de níveis silto-argilosos a argilosos. Cavalcante (1997 e 1998), entre outros, apontam vazão média de 2,4 m<sup>3</sup>/h para a região, com valores de condutividade hidráulica da ordem de  $1,4 \times 10^{-4}$  m/s (Nogueira *et al.*, 2005) e porosidade efetiva de aproximadamente 13% (Ceará, 2011).

Por sua natureza intrínseca, o aquífero Dunas recebe maior recarga, promovendo, a partir de seus níveis potenciométricos mais elevados, a manutenção da cunha salina mais distante da linha de costa, sendo esta dinâmica fundamental para a sustentabilidade hidroambiental da região.

### Método DRASTIC

O índice DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) avalia a vulnerabilidade por meio dos parâmetros: (*Depth*) profundidade do nível estático; (*Recharge*) recarga; (*Aquifer*) litologia do aquífero; (*Soil*) solo; (*Topography*) topografia; (*Impact*) impacto sobre a zona vadosa e (*Conductivity*) condutividade hidráulica. Cada parâmetro possui um peso, nomeado de índice de ponderação (**w**): 5 para os de maior significância e 1 para os de menor significância.

Os parâmetros estão divididos em classes e para classe é definido um valor (**r**), sendo o resultado obtido pela soma do produto entre os índices de ponderação de cada parâmetro (**w**) e o valor de cada classe (**r**). O valor obtido é comparado com faixas de vulnerabilidade que classificam o aquífero desde vulnerabilidade

insignificante ( $\leq 100$ ) até vulnerabilidade extrema ( $\geq 200$ ).

A profundidade do nível estático (**D**) foi classificada de acordo com as classes propostas pelo método DRASTIC, considerando as medidas de nível estático obtidas em campo (Tabela 1). O parâmetro recarga (**R**) foi estimado pelo produto da porosidade efetiva do aquífero ( $S_y$ ) e variação do nível estático nos poços monitorados ao longo de 2013 (Tabela 1), conforme metodologia utilizada por Cutrim & Campos (2010a).

A litologia do aquífero (**A**) foi classificada de acordo com as características litológicas da área: aquífero Barreiras como arenitos, conglomerados, argilitos e siltitos; aquífero Dunas como areias eólicas; e aquífero Fissural na classe de rochas ígneas e metamórficas.

Os solos (**S**) identificados em campo foram classificados de acordo com as características de EMBRAPA (2006), e partir disso, comparou-se com as classes pedológicas apresentadas no método. Quanto à topografia (**T**), os dados topográficos em cota de 5m (IPECE, 2009) foram tratados por meio de técnicas de triangulação da superfície (*Triangulated Irregular Network*). As relações de declividade foram expressas em porcentagem, adequadas ao intervalo proposto pelo método DRASTIC.

O parâmetro (**I**) foi determinado relacionando-se a descrição apresentada no método com as características das distintas formações geológicas locais. Para a condutividade hidráulica (**C**) considerou-se os valores descritos para os aquíferos da região, tendo por base os trabalhos de Cavalcante (1997 e 1998) para o meio cristalino fissural; Bianchi *et al.* (1984), Brandão (1995b) e Beltrão & Manoel Filho (1973) para a Formação Barreiras; e Aguiar *et al.* (2000),

CAGECE (1976a; 1976b; 1977 e 1978), Nogueira *et al.* (2005) e Sabadia *et al.* (2000), para o sistema aquífero Dunas. Como são muitos os autores e relatórios técnicos da companhia de água do estado do Ceará, reunindo trabalhos específicos na área e nas suas adjacências, foram considerados os valores médios.

### Método GOD

O índice de vulnerabilidade GOD (Foster & Hirata, 1988) avalia a vulnerabilidade dos aquíferos considerando os parâmetros: grau de confinamento da água subterrânea (**G**), litologia e consolidação da zona vadosa (**O**) e profundidade do nível estático (**D**).

Os parâmetros possuem o mesmo peso e apresentam valores que variam de 0 a 1. O índice de vulnerabilidade é obtido pelo produto dos valores estabelecidos para cada parâmetro. O valor obtido é comparado com as faixas que variam de 0 a 1, e classificam o aquífero desde a vulnerabilidade insignificante até extrema.

Os aquíferos locais foram classificados como não confinados, dado o caráter livre e nível estático raso, com base nos dados coletados e na avaliação dos poços monitorados. O nível estático foi classificado em duas classes: valores médios inferiores a 5m e valores médios entre 5m e 20m.

Para a litologia e consolidação da zona vadosa a área foi classificada em três diferentes classes: aquífero Dunas correspondente às areias eólicas; aquífero Fissural correspondente às formações ígneas e metamórficas; e aquífero Barreiras, que embora predominantemente formado por arenitos, foi classificado com um valor intermediário entre as classes argilitos e siltitos, em função da descontinuidade de suas camadas e das propriedades arcoseanas do pacote.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

O monitoramento do nível estático indica valores médios de 6,0m para o Aquífero Barreiras e valores médios próximos a 5,0m para os aquíferos Dunas e Fissural (Tabela 1). A variação dos níveis estáticos médios ao longo do ano sugere a influência da infiltração de

águas pluviais na recarga dos aquíferos, considerando o regime pluviométrico. Profundidades acima de 5,0m ocorrem no nordeste e sudeste da área, enquanto profundidades inferiores dominam a área central e oeste (Figura 2).

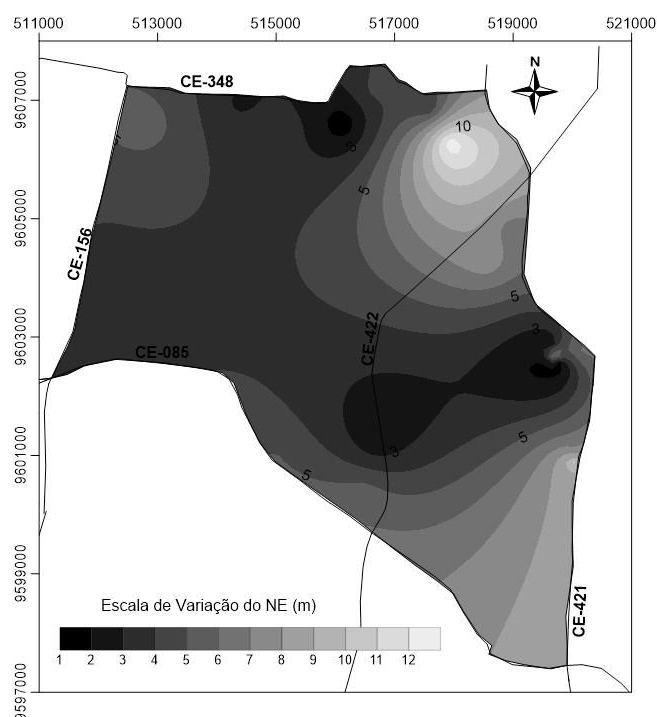
**Tabela 1.** Poços cadastrados em campo, monitoramento do nível estático e estimativa das recargas.

Poço	Coordenadas		Aquífero	Prof do poço (m)	Nível E estático (m)**					Variação máxima	Porosidade*	Recarga (mm/ano)	
	UTM (N)	UTM(E)			Fev	Mai	Set	Dez	Média				
P-01	9600657	519996	Barreiras	-	8.3	8.5	8.4	9.3	8.6	1.0	10%	100	
P-02	9600894	520026	Barreiras	12.0	9.9	10.1	-	10.6	10.2	0.7		70	
P-03	9601074	520062	Barreiras	60.0	7.4	6.8	6.9	7.7	7.2	0.8		82	
P-11	9607182	516645	Barreiras	10.0	4.6	4.0	-	-	4.3	0.7		67	
P-13	9606603	512881	Barreiras	9.0	5.3	4.8	4.6	7.3	5.5	2.7		270	
P-18	9602712	511457	Barreiras	9.0	3.8	2.7	-	3.6	3.4	1.1		110	
P-19	9605267	512264	Barreiras	9.0	4.4	3.6	3.9	4.7	4.1	1.1		114	
P-20	9606197	512406	Barreiras	8.0	5.3	4.7	4.7	5.3	5.0	0.6		65	
<b>Média Aq. Barreiras</b>				<b>16.7</b>	<b>6.1</b>	<b>5.6</b>	<b>5.7</b>	<b>6.9</b>	<b>6.0</b>	<b>1.1</b>		-	<b>110</b>
P-16	9600391	516484	Fissural	7.0	5.5	5.0	5.5	6.2	5.5	1.2		1%	12
P-17	9601013	515000	Fissural	7.0	6.7	3.0	3.8	6.7	5.0	3.7	37		
<b>Média Aq. Fissural</b>				<b>7.0</b>	<b>6.1</b>	<b>4.0</b>	<b>4.6</b>	<b>6.4</b>	<b>5.3</b>	<b>2.4</b>	-		<b>24</b>
P-05	9602732	520150	Dunas	6.0	5.2	6.2	6.5	6.6	6.1	1.4	13%	182	
P-06	9602883	519650	Dunas	10.0	2.2	2.1	2.2	2.5	2.2	0.4		46	
P-07	9602554	519791	Dunas	6.0	1.6	1.1	1.4	1.8	1.5	0.6		82	
P-08	9602576	519536	Dunas	6.0	2.3	1.9	2.1	-	2.1	0.4		47	
P-09	9602681	519705	Dunas	-	9.0	6.5	5.8	-	7.1	3.2		416	
P-10	9604838	518955	Dunas	12.0	5.4	8.4	5.8	6.3	6.5	3.0		393	
P-12	9606586	516146	Dunas	6.0	1.7	0.9	1.1	1.4	1.3	0.8		100	
P-14	9601249	516705	Dunas	6.0	2.1	1.5	1.8	2.4	2.0	0.9		113	
P-21	9604250	518577	Dunas	12.0	7.5	8.3	7.2	8.0	7.7	1.1		144	
P-22	9606279	517927	Dunas	16.0	12.7	12.6	12.8	13.1	12.8	0.5		68	
P-23	9606841	517608	Dunas	-	4.0	3.7	4.8	4.7	4.3	1.1	137		
P-24	9606516	515209	Dunas	6.0	3.8	3.4	3.6	3.7	3.6	0.4	47		
P-25	9606940	514358	Dunas	6.0	3.2	2.5	2.5	3.1	2.8	0.8	101		
<b>Média Aq. Dunas</b>				<b>8.4</b>	<b>4.7</b>	<b>4.5</b>	<b>4.4</b>	<b>4.9</b>	<b>4.6</b>	<b>1.1</b>	-	<b>144</b>	

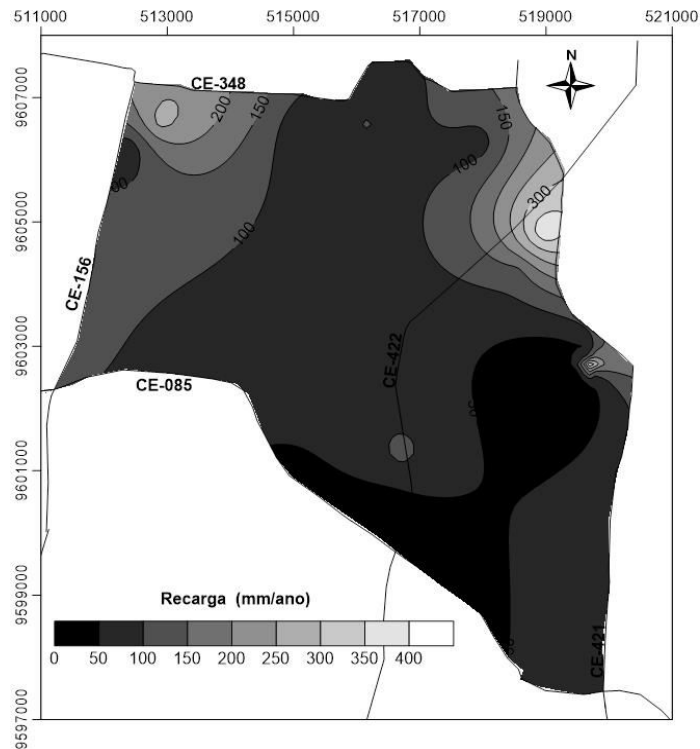
\*Dados extraídos de Bianchi *et al.* (1984), Cavalcante (1997) e Ceará (2011), respectivamente. \*\*Dados referentes ao ano de 2013

A recarga estimada apresenta valores médios distintos para cada sistema: 144mm/ano para o aquífero Dunas, 110mm/ano para o aquífero Barreiras e <50mm/ano para o aquífero Fissural

(Tabela 1). No entanto, verifica-se o predomínio de áreas com recarga entre 50 e 100mm/ano (Figura 3).



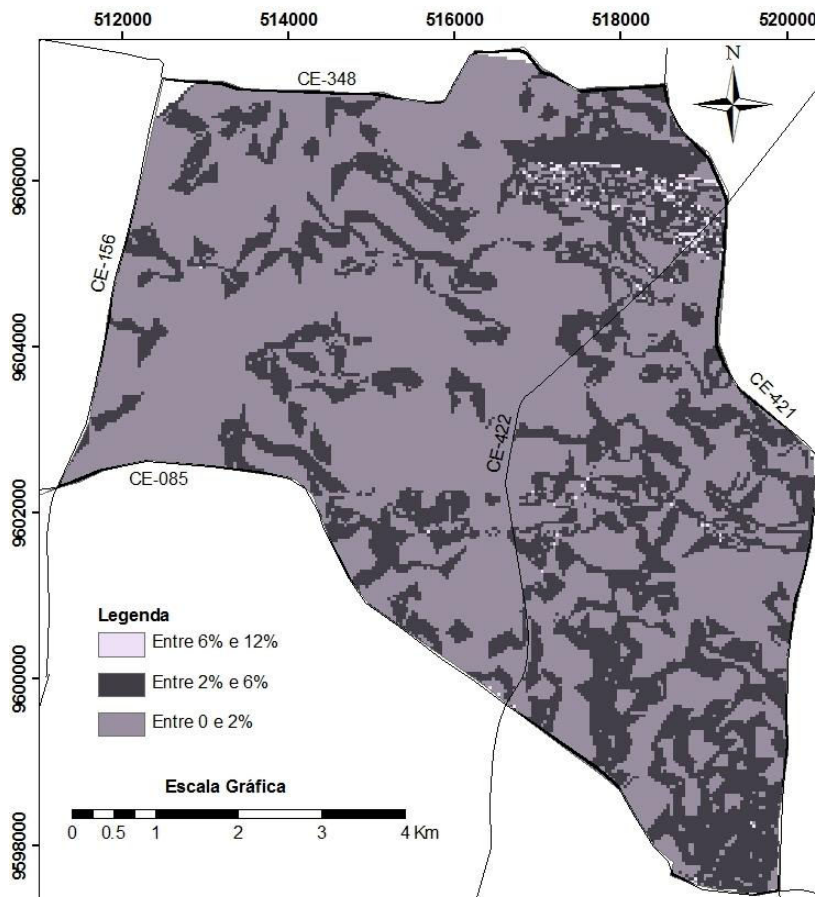
**Figura 2.** Zoneamento tendencial do nível estático para o ano de 2013.



**Figura 3.** Isolinhas das recargas estimadas para o ano de 2013.

No que diz respeito à topografia local, verifica-se o predomínio de áreas planas com declividade inferior a 2%, sendo que a porção leste da área apresenta declives entre 2% e 6%.

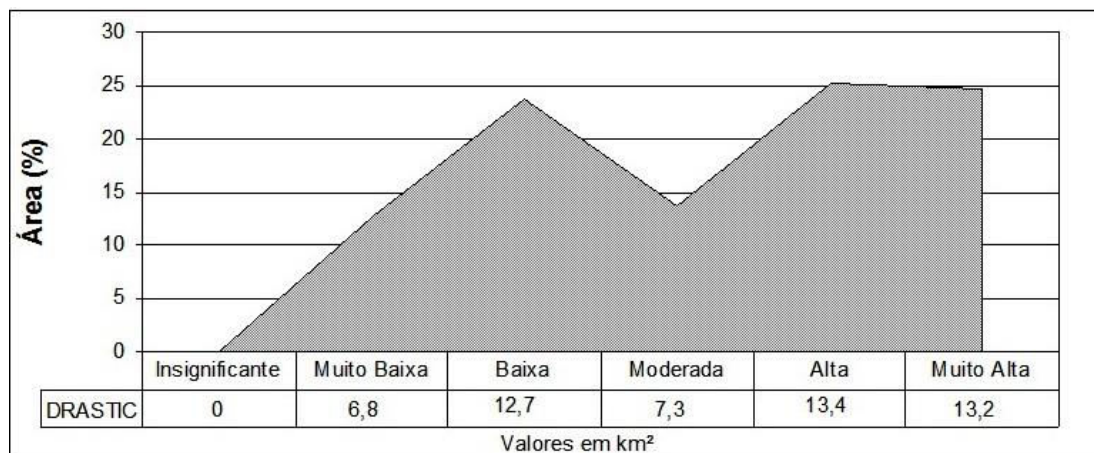
Uma pequena região de elevação das dunas, localizada a nordeste, apresenta declives entre 6% e 12% (Figura 4).



**Figura 4.** Topografia da área (representada em declividade percentual).

Os resultados obtidos pelo método DRASTIC indicam que a área possui vulnerabilidade alta a muito alta (25,1 e 24,7%, respectivamente), seguido por áreas de baixa vulnerabilidade (23,8%), (Figura 5). A tabela 2

apresenta as classes e valores atribuídos neste trabalho para o cenário de vulnerabilidade a partir do método DRASTIC.



**Figura 5.** Distribuição das áreas x intervalos de vulnerabilidade pelo índice DRASTIC.

**Tabela 2.** Classes, valores e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo método DRASTIC

Parâmetro	Valor do parâmetro	Índice de Ponderação	Valor Calculado
<b>Profundidade do Nível Estático (D)</b>			
<1,5m	10	5	50
Entre 1,5 e 4,5m	9		45
Entre 4,5 e 9m	7		35
Entre 9 e 15m	5		25
<b>Recarga (R)</b>			
Entre 0 e 50mm	1	4	4
Entre 50 e 100mm	3		12
Entre 100 e 150mm	6		24
Entre 150 e 204mm	8		32
> 250mm	9		36
<b>Litologia do Aquífero (A)</b>			
Rochas ígneas e metamórficas (Aquífero. Fissural)	5	3	15
Arenitos, argilitos e siltitos (Aquífero. Barreiras)	7		21
Areias eólicas (Aquífero. Dunas)	9		27
<b>Tipo de Solo (S)</b>			
Argissolos	3	2	6
Neossolos quartzarênicos	9		18
Planossolos	3		6
<b>Declividade do Terreno (T)</b>			
Entre 0 e 2%	10	1	10
Entre 2 e 6%	9		9
Entre 6 e 12%	5		5
Entre 12 e 18%	3		3
<b>Impacto na Zona Vadosa (I)</b>			
Areias	9	5	45
Areias e cascalhos com teor significativo de silte e argila	7		35
Rochas ígneas e metamórficas	5		25
<b>Condutividade Hidráulica (C)</b>			
Entre $5 \times 10^{-7}$ e $5 \times 10^{-5}$ m/s	1	3	3
Entre $1 \times 10^{-4}$ e $3 \times 10^{-4}$ m/s	4		12

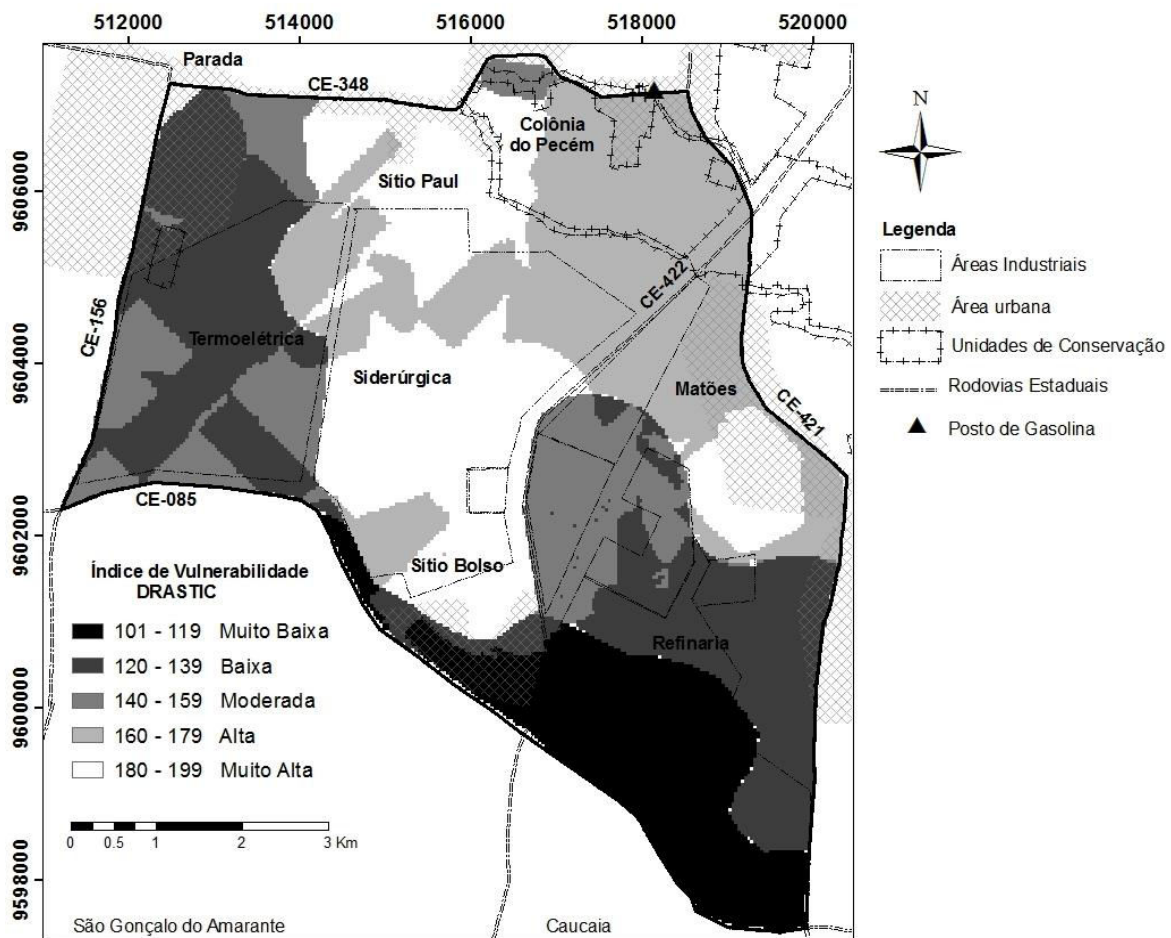


As áreas de vulnerabilidade muito alta predominam na região central (85%) e leste (15%), e representam afloramentos do aquífero Dunas onde o nível estático ocorre em profundidades de até 5m (Figura 6). Estas regiões fazem parte da área destinada para a siderurgia e áreas residenciais, próximas ao Sítio Paul.

As áreas de vulnerabilidade alta também ocorrem associadas ao aquífero Dunas em porções do terreno com nível estático entre 4,5 a 9m de profundidade, e compreende parte da área destinada à siderúrgica. Áreas de vulnerabilidade moderada ocorrem associadas ao aquífero Barreiras com níveis estáticos com até 5m de profundidade e taxas de recarga estimada entre 100 a 180mm/ano. Abrangem áreas destinadas a termelétricas, norte da refinaria e áreas residenciais, como a Colônia do Pecém (Figura 6).

As áreas de vulnerabilidade baixa também ocorrem junto ao aquífero Barreiras e compreendem parte do terreno destinado à termelétrica, refinaria e residências próximas a localidade de Parada. Na porção sudeste, os índices sofrem influência de níveis estáticos entre 4,5 e 9m e taxas de recarga entre 50 e 100mm/ano. Na porção noroeste, a influência ocorre em função de níveis estáticos mais rasos (<5m), porém com taxas de recarga entre 100 e 200mm.

Áreas de vulnerabilidade muito baixa ocorrem associadas ao aquífero Fissural, que apresenta níveis estáticos entre 4,5 e 9m e taxas de recarga inferiores a 50mm/ano. Compreendem parte do terreno destinado a refinaria e áreas residenciais próximas a rodovia CE-085 (Figura 6).

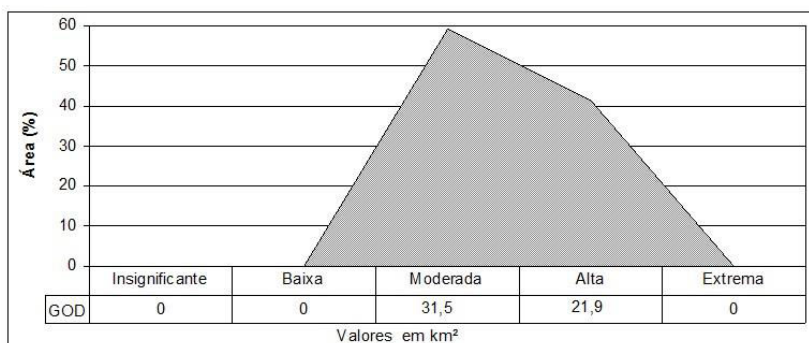


**Figura 6.** Resultados da vulnerabilidade natural dos aquíferos utilizando-se o método DRASTIC.

Os resultados obtidos pelo método GOD indicam que a vulnerabilidade dos aquíferos na área de estudo varia de moderada à alta, com

predomínio de vulnerabilidade moderada, em 59% da área (Figura 7). A Tabela 3 apresenta as classes e valores atribuídos neste trabalho para

o cenário de vulnerabilidade a partir do método GOD.



**Figura 7.** Distribuição das áreas x intervalos de vulnerabilidade pelo índice GOD.

**Tabela 3.** Classes e pesos atribuídos neste trabalho para os parâmetros utilizados no mapeamento da vulnerabilidade pelo método GOD.

Parâmetro	Valor do Parâmetro
<b>Confinamento da Água Subterrânea (G)</b>	
Não confinado	1,0
<b>Litologia e Consolidação da Zona Vadosa (O)</b>	
Dunas (Areias Eólicas)	0,60
Fm. Barreiras (arenito/ argilitos / siltitos)	0,55
Rochas Cristalinas	0,60
<b>Profundidade do Nível Estático (D)</b>	
<5 metros	0,90
Entre 5 e 20 metros	0,80

Na porção central os índices obtidos para o aquífero Dunas indicam vulnerabilidade alta, em função do baixo grau de consolidação da zona vadosa formada predominantemente por areias eólicas (Figura 8).

Na região centro-leste os aquíferos Barreiras e Fissural apresentam vulnerabilidade alta possivelmente por níveis estáticos mais rasos (<5m). Esta área compreende o terreno destinado à construção de uma siderúrgica, refinaria e áreas residenciais de Bolso, Matões e Sítio Paul (Figura 8). Neste contexto, a inserção da siderúrgica, atividade de grande potencial de risco de contaminação, bem como a expansão da área residencial, merecem ser reavaliadas por parte dos gestores públicos.

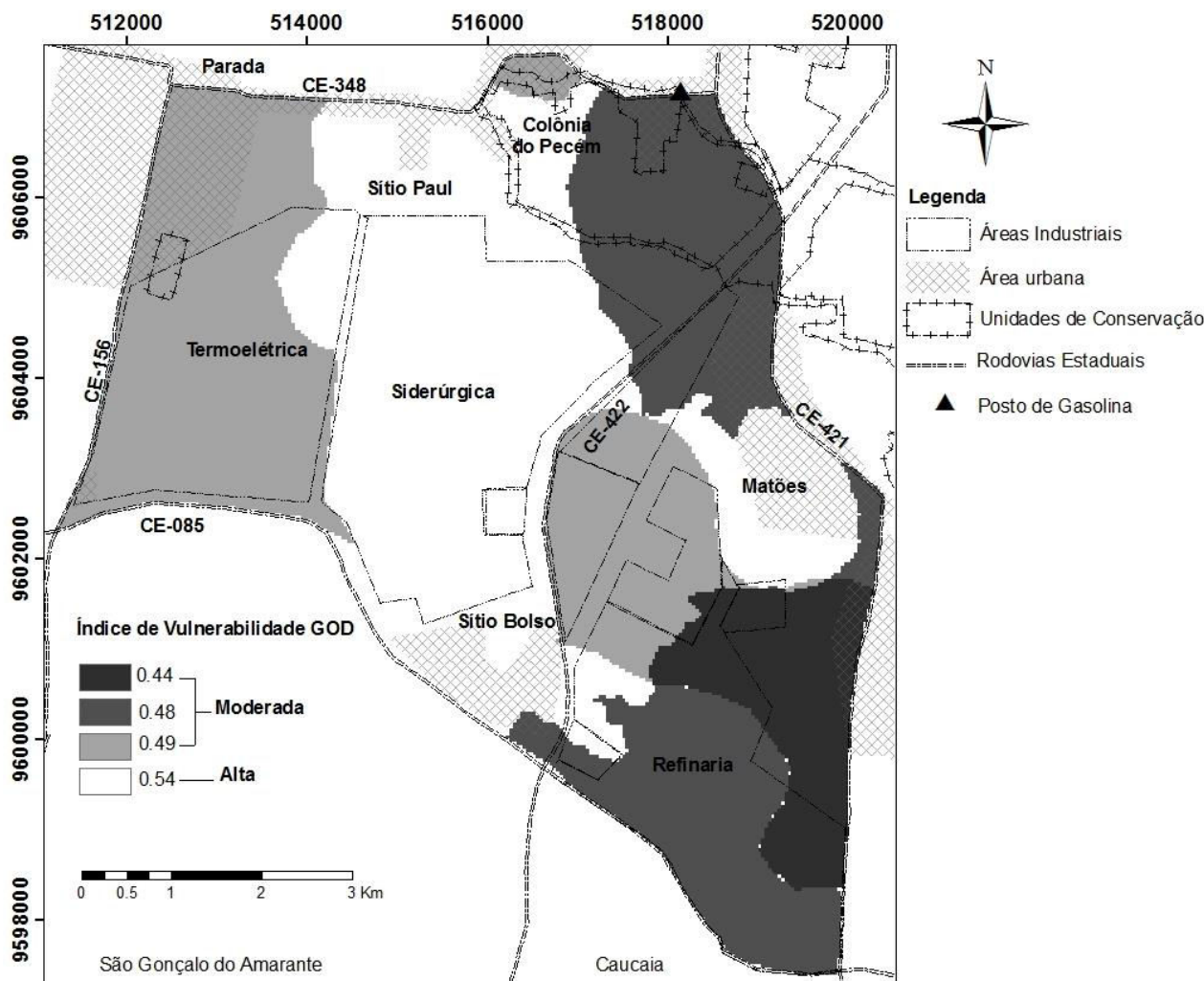
As áreas leste e oeste de vulnerabilidade moderada estão associadas a afloramentos da formação Barreiras. Na região sudeste, a vulnerabilidade moderada ocorre em função de níveis estáticos mais profundos (>5m). No setor nordeste níveis estáticos maiores que 5m proporcionam valores moderados de vulnerabilidade, apesar do predomínio de areias eólicas. Este índice abrange o terreno destinado às termelétricas, a maior parte do terreno da refinaria, além de áreas residenciais (Parada,

Colônia do Pecém, e parte dos Matões), Figura 8.

### Comparação entre os resultados dos métodos DRASTIC e GOD

No método DRASTIC a zona vadosa e recarga foram os parâmetros mais significativos na classificação de cenários. Apresenta-se mais apropriado para estudos que objetivem cenários mais detalhados, como a aplicação em EIA/RIMAS e Planos Diretores Municipais. Também se mostra mais restritivo quanto ao uso e ocupação do solo, pela maior porcentagem de áreas com índice de vulnerabilidade mais elevado em comparação ao método GOD (Tabela 4).

No método GOD a profundidade do nível estático foi preponderante para a simulação dos cenários, principalmente na classificação das áreas mais susceptíveis. Possui um conjunto menor de parâmetros e descrições generalizadas na classificação da zona vadosa, demonstrando maior aplicabilidade em regiões com escassez de informações hidrogeológicas, o que amplia sua utilização, como inicialmente proposto por Foster & Hirata (1988).



**Figura 8.** Resultados da vulnerabilidade natural dos aquíferos utilizando-se o método GOD.

Apresenta-se mais apropriado para estudos regionais, como por exemplo, a ser aplicado em programas de zoneamentos territoriais Federais ou Estaduais, como Zoneamentos Ecológico-Econômicos, onde os resultados poderiam ser utilizados como norteador do planejamento de uso e ocupação territorial. Este método também se mostra adequado para ser aplicado nos critérios das distribuições de outorgas para águas subterrâneas propostos por Costa *et al.* (2011), onde em áreas de alta vulnerabilidade a outorga requerida seria mais restritiva do que em áreas de baixa vulnerabilidade.

Os métodos apresentam resultados semelhantes em termos de vulnerabilidade, sendo os maiores índices (alto e muito alto) obtidos em locais onde predominam terrenos quaternários (Tabela 4). Este cenário torna a instalação do CIPP preocupante, uma vez que estes terrenos recobrem cerca de 50% da área e apresentam as maiores taxas de recarga da região (144mm/ano), colocando em risco a qualidade das águas subterrâneas que são utilizadas pela população local, dado as baixas taxas de abastecimento de água (38%).

**Tabela 4.** Relação percentual dos intervalos de vulnerabilidade pelos índices DRASTIC e GOD.

Sistema Aquífero	DRASTIC				GOD		
	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta	Moderada	Alta
Dunas	-	-	-	25,1%	24,7%	12,5%	36,5%
Barreiras	-	23,0%	13,7%	-	-	36,7%	0,4%
Fissural	12,7%	0,8%	-	-	-	9,8%	4,1%
<b>Total</b>	<b>12,7%</b>	<b>23,8%</b>	<b>13,7%</b>	<b>25,1%</b>	<b>24,7%</b>	<b>59%</b>	<b>41%</b>

Os índices de vulnerabilidade baixos e moderados ocorrem principalmente, associados aos aquíferos Barreiras e Fissural (Tabela 4). Contudo, esses aquíferos não estão isentos de possíveis contaminações, sobretudo se considerarmos o potencial de contaminação industrial e as baixas taxas de esgotamento sanitário (31%).

A apreciação simultânea e comparativa destas duas ferramentas amplia o conhecimento destas metodologias e suas diferenças, servindo para melhor respaldar e orientar a tomada de decisões por parte dos gestores em todas as instâncias do poder.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dois métodos apontam o aquífero Dunas como o mais vulnerável da região, o que serve de alerta para as políticas públicas locais, a fim de garantir a qualidade das águas subterrâneas muito utilizadas para abastecimento da população, além de sua função hidroambiental, responsável pela manutenção da cunha salina distante da costa. Sua gestão, com monitoramento contínuo e comparação da evolução dos níveis estáticos e da qualidade da água subterrânea, deve ser prática de manejo constante e cuidadoso.

Os métodos de vulnerabilidade devem ser utilizados apenas como indicador das ações de planejamento ambiental. A proteção dos aquíferos deve vir acompanhada do mapeamento das áreas de maior perigo de contaminação e da implantação do perímetro de proteção de poços, como proposto por Foster *et*

*al.* (2002), além da fiscalização das obras de captação e do estabelecimento e fiscalização das outorgas. No caso desta área de estudo, o aumento da infraestrutura de saneamento básico é fundamental para esta proteção.

Apesar dos muitos trabalhos ambientais realizados na área para viabilizar a implantação do CIPP junto aos órgãos competentes, nenhum destes trabalhos e relatórios técnicos tratou de maneira mais refinada os aspectos hidroambientais de reconhecimento de vulnerabilidade, no sentido de orientar o poder público da necessidade de preservação, acompanhamento e gestão das águas subterrâneas locais. Neste sentido, o presente trabalho possibilita a definição de uma política de proteção destes recursos tão fundamentais para a região.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e a Daniel Rodrigues do Nascimento Jr. pelo auxílio no desenvolvimento das atividades de campo.

## REFERÊNCIAS

1. AGUIAR, R.B.; SANTIAGO, M.M.F. & VASCONCELOS, S.M.S. Potabilidade das Águas Subterrâneas no Litoral do Município de Caucaia/Ceará. 1º CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUA SUBTERRÂNEAS. 11º ABAS. 5º ALHSUD/IAH. Trabalho 160, Fortaleza, 12 p. (em CD-ROM), 2000.
2. ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. & PETTY, R.J. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Using Hydrogeologic Settings. **U.S. Environmental Protection Agency Report**, EPA/600/2-87/035, EUA, 163p., 1987.
3. AUGÉ, M. Vulnerabilidade de Aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**. Curitiba, n.º. 4, 2004, pp.85-103.
4. BELTRÃO, A.E.A. & MANOEL FILHO, J. Abastecimento de água da Área Metropolitana da Cidade de Fortaleza/CE, SUDENE, Divisão de Documentos, Série Hidrogeologia (44), Recife, 296 p., 1973.
5. BIANCHI, L.; PADILHA M.W.M. & TEIXEIRA, J.E.M. Recursos de Água Subterrânea na Região Metropolitana de Fortaleza. Fatores Condicionantes. *In*: Plano de Aproveitamento dos Recursos Hídricos na RMF, Fase I Fortaleza. SEPLAN/AUMEF, vol. 1, 139 p., 1984.
6. BRANDÃO, R.L. (a). Sistema de Informação para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza. Projeto SINFOR: **Mapa Geológico da Região Metropolitana de Fortaleza**. Texto Explicativo: CPRM. 34 p., 1995.
7. BRANDÃO, R.L. (b). Sistema de Informação para Gestão e Administração Territorial da Região Metropolitana de Fortaleza. Projeto SINFOR: **Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza**. CPRM. 88 p., 1995.
8. COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ (CAGECE). Captação de Abreulândia. Relatório Final de Construção dos Poços e Definição das Condições de Exploração. Relatório Interno. Fortaleza, 245p., 1978.

9. COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ (CAGECE). Captação do Cocó. Relatório Final de Construção. Condições de Exploração dos Poços Perfurados. Relatório Interno. Fortaleza, 230p., 1977.
10. COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ (CAGECE). Exploração de Águas Subterrâneas na Área do Cocó (Fortaleza): Dimensionamento de um Sistema de Captação. Relatório Interno. Fortaleza, 26p., 1976.
11. COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ (CAGECE). Sondagens nas Dunas de Fortaleza. Área do Cocó, Cidade 2000 e Praia do Futuro: Relatório Conclusivo Interno. Fortaleza, 45p., 1976.
12. CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.P.; GOMES, F.E.M.; CAVALVANTE, S.N.; CAVALCANTE, J.E.; MELO, A.C.R.; DUARTE NETO, V.B. & BENEVIDES, H.C. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Brasil, 1 mapa colorido. Escala 1:500.000, 2003.
13. CAVALCANTE, I.N. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará**. 1998. 164 p. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
14. CAVALCANTE, I.N. Hidrogeologia de meios fissurados. **III Curso de Especialização em Hidrogeologia Aplicada**. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 25 p., 1997.
15. CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos/ Companhia de Gestao dos Recursos Hídricos. Avaliação Hidrogeológica Quali-Quantitativa do Campo de Dunas Pecém/Paracuru, no Estado do Ceará. Relatório Final. Fortaleza, 84p., 2011.
16. CEARÁ, CENTEC. Relatório de Impacto Ambiental do Complexo Industrial do Pecém. Secretaria de Infra-Estrutura (SEINFRA). Instituto Centro de Ensino Tecnológico. Fortaleza. Biblioteca da Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará, vol. 01, Tomo B1, Fortaleza, 2009.
17. COSTA, M.L.M.; RIBEIRO, M.R.M.; REGO, J.C. & ALBUQUERQUE, J.P.T. Proposição de Critérios de Outorga para as Águas Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, vol. 16, nº. 1, pp. 105-113., 2011.
18. CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. (a). 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**. Porto Alegre, vol. 15, nº. 2, pp. 127-142., 2010.
19. CUTRIM, A.O. & CAMPOS, J.E.G. (b). Avaliação da Vulnerabilidade e Perigo à Contaminação do Aquífero Furnas na Cidade de Rondonópolis com a Aplicação dos métodos GOD e POSH. **Geociências**. Rio Claro, vol. 29, nº. 3, pp. 401-411, 2010.
20. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS (EMBRAPA). Mapas de Solos do Brasil. Rio de Janeiro, 2006. Escala 1: 5.000.000.
21. FOSTER, S.; HIRATA, R.C.A.; GOMES, D. D'ELIA, M. & PARIS, M. Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies. Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE). The World Bank, Washington, D.C, 101p., 2002.
22. FOSTER, S. & HIRATA, R.C.A. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. **CEPIS/PAHO/WHO**. Lima, 78 p., 1988.
23. FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME) Série Histórica do Posto São Gonçalo do Amarante. Disponível em <<http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/download-de-series-historicas>>. Acesso em 24 mai. 2013.
24. HIRATA, C.A.R. & FERREIRA, L.M.R. Os Aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: Disponibilidade Hídrica e Vulnerabilidade à Poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, Vol. 31, pp.43-50, 2001.
25. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). CENSO 2010. Departamento de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2010, 2010. Disponível em <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)> Acesso em 20 fev. 2013.
26. INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). Ceará em Mapas, Fortaleza, 2007.
27. INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS DO CEARÁ (IPECE). Base Cartográfica do Pólo Ceará Costa do Sol, Fortaleza, Escala 1: 20.000, 2009
28. MIRANDA, C.S., MIOTO, C.L.; LASTORIA; G., GABAS, S.G. & PARANHOS FILHO, A.C. Uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na Modelagem da Vulnerabilidade de Aquífero Livre: Comparação entre os métodos GOD e EKv na Bacia do Rio Coxim, São Gabriel do Oeste, MS, Brasil. **Geociências**, v.34, n. 2, p. 312-322, 2015.
29. NOGUEIRA, M.L. Caracterização Geoambiental e Hidrogeológica da Zona Portuária do Pecém. **Revista de Geologia**. Fortaleza, vol. 18, nº. 2, 2005, pp. 203-212.
30. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil**, 2003. Disponível em <[http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2003.aspx?indiceAccordi=1&li=li\\_Atlas2003](http://www.pnud.org.br/IDH/Atlas2003.aspx?indiceAccordi=1&li=li_Atlas2003)> Acessado em 01 mar. 2013.
31. REGINATO, P.A.R. & AHLERT S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, vol. 27, nº. 2, p. 32-46, 2013.
32. SABADIA, J.A.B. **Impacto del Vertedero de Jangurussu en los Recursos Hídricos de la Ciudad de Fortaleza (Ceará, Brasil)**. 2001. 292 p. Tese (Doutorado em Ciências Geológicas). Facultad de Geología. Universitat de Barcelona, Barcelona, 2001.
33. SABADIA, J.A.B.; CASAS, A.; MAIA L.P. & HIMI, M. Salinização dos Aquíferos da Praia do Pacheco, Município de Caucaia, Região Metropolitana de Fortaleza/Ceará. 1º CONGRESSO MUNDIAL INTEGRADO DE ÁGUA SUBTERRÂNEAS. 11º ABAS. 5º ALHSUD. IAH. 37º Sessão, 18 pp. (em CD-ROM). Fortaleza, 2000.
34. SANTOS, R.A.; CRUZ, M.J. & NASCIMENTO, S.A.M. Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos Cársticos: Subsídios para uma Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos. **Cadernos de Geociências**, nº 7, 2010.
35. XAVIER, J.M. & GAGLIARDI, S. VIDAL, H. & DA LUCENA, M.M.R.L. Evaluación de la Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero Mercedes en el Área Metropolitana de la Ciudad de Paysandú: Comparación de los Métodos GOD y DRASTIC. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**. Curitiba, nº 4, p.35-45, 2004.

*Manuscrito recebido em: 23 de Março de 2015  
Revisado e Aceito em: 23 de Setembro de 2015*