



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 6, nº 2 (2020)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n2ID21095>



VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFERO EM ÁREA URBANA – AQUÍFERO GUARATIBA, RJ

Glaucio Silva de Carvalho¹; Cristiane Nunes
Francisco²

¹Mestre em Engenharia de Biossistemas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biossistemas, Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói/RJ, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5950-6220>

Email: glaucioscarvalho@gmail.com

²Doutora em Geociências, Departamento de Análise Geoambiental, Universidade Federal Fluminense (UFF), Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8688-9810>

Email: crisgeouff@gmail.com

Resumo

O método DRASTIC é um método amplamente aplicado para avaliar a vulnerabilidade intrínseca de um aquífero com base nos parâmetros: profundidade, recarga, tipo de aquífero, topografia, impacto da zona vadosa, solo e condutividade hidráulica. Porém estudos indicam que esses parâmetros são insuficientes para caracterizar aquíferos inserido em área urbana, assim, o método DRASTICA foi desenvolvido com a adição do parâmetro de impacto antropogênico. Este trabalho apresenta o estudo da vulnerabilidade do aquífero Guaratiba na cidade do Rio de Janeiro, com base no DRASTIC e sua adaptação DRASTICA com a utilização de amostras de concentração de nitrato nos poços indicando a qualidade da água subterrânea. O mapa de vulnerabilidade DRASTIC mostrou três classes, com predominância das classes baixa e média enquanto 0,8% da área de estudo apresentaram alto índice de vulnerabilidades. O mapa DRASTICA mostra a predominância da influência das atividades antrópicas, uma vez que a classe de alta vulnerabilidade possui 5% da área de estudo. No DRASTICA, observa-se a presença de alta vulnerabilidade nas maiores concentrações de nitrato e, além disso, as amostras com a menor concentração de nitrato estão ausentes nessa classe. Portanto, conclui-se que, para estudos de vulnerabilidade do aquífero em áreas urbanas, é indicado o método DRASTICA.

Palavras-chave: Vulnerabilidade; Área urbana; Método DRASTICA.

GROUNDWATER VULNERABILITY TO
CONTAMINATION IN URBAN AREA – GUARATIBA
AQUIFER, RJ

Abstract

The DRASTIC method a widely applied method for assessing the intrinsic vulnerability of an aquifer based on the parameters: depth, recharge, aquifer type, topography, impact on vadose zone, soil and hydraulic conductivity. However, studies indicate that these parameters alone are insufficient to characterize an aquifer inserted in an urban area. Thus, DRASTICA method was developed with the addition of the anthropogenic impact parameter. This research work presents the study of vulnerability of the Guaratiba aquifer, Rio de Janeiro city, based on the DRASTIC method and its adaptation DRASTICA. The DRASTIC vulnerability map showed three classes, with a predominance of the lower and middle classes with 0.8% of study area high potential vulnerabilities. The DRASTICA vulnerability map shows the influence of anthropic activities, since the high vulnerability class with 5% of the research area. Thus, in the DRASTICA method, it is observed that the presence of high vulnerability in the highest concentrations of nitrate ions and, moreover, lowest nitrate concentration are not present in this respective class. Therefore, it is concluded that for studies of aquifer vulnerability in urban areas, the DRASTICA method is indicated.

Keywords: Vulnerability; Urban area; DRASTICA method.

VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS EM ÁREA URBANA - AQUÍFERO
GUARATIBA, RJ

Resumen

El método DRASTIC es un método ampliamente aplicado para evaluar la vulnerabilidad de un acuífero basado en los parámetros: profundidad, recarga, tipo de acuífero, topografía, impacto de la zona vadosa, suelo y conductividad hidráulica. Sin embargo, los estudios indican que estos parámetros son insuficientes para caracterizar los acuíferos insertados en un área urbana. Por lo tanto, el método DRASTICA se desarrolló con la adición del parámetro de impacto antropogénico. Este trabajo presenta el estudio de la vulnerabilidad del acuífero Guaratiba en el ciudad de Río de Janeiro, basada en DRASTIC y su adaptación

DRASTICA con el uso de muestras de concentración de nitrato en pozos que indican la calidad del agua. El mapa de vulnerabilidad DRASTIC mostró tres clases, con predominio de las clases bajas y medias, mientras que el 0,8% del área de estudio tenía una alta tasa de vulnerabilidades. El mapa DRASTICA muestra el predominio de la influencia de las actividades antrópicas, ya que la clase de alta vulnerabilidad tiene el 5% del área de estudio. En el DRASTICA, la presencia de alta vulnerabilidad se observa en las concentraciones más altas de nitrato y, además, las muestras con la concentración más baja de nitrato están ausentes en esta clase. Por lo tanto, se concluye que, para estudios de vulnerabilidad de acuíferos en áreas urbanas, se indica el método DRASTICA.

Palabras-clave: Vulnerabilidad; Área urbana; Método DRASTICA.

1. INTRODUÇÃO

A urbanização e o crescimento desordenado da população são dois dos maiores desafios à gestão dos recursos hídricos, especialmente em cidades localizadas em países em desenvolvimento (BAIER et al., 2014), ao mesmo tempo, apresenta um papel estratégico e relevante quanto à sobrevivência e sustentabilidade da vida (REBOUÇAS, 2002). Tendo em vista isso, a água subterrânea se apresenta como uma importante alternativa.

A água subterrânea pode ser captada no aquífero confinado ou livre, este está situado próximo à superfície e está, portanto, mais suscetível à contaminação. Em função do baixo custo e facilidade de perfuração, a captação de água do aquífero livre, embora mais vulnerável à contaminação, é frequentemente utilizada no Brasil (FOSTER, 1993; ASSIS DA SILVA, 1999).

O mapa de vulnerabilidade de aquíferos é considerado uma das ferramentas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos. O termo vulnerabilidade na hidrogeologia começou a ser aplicado intuitivamente na década de 1970 na França (ALBINET; MARGAT, 1970) e mais amplamente usado nos anos 1980 (HAERTLE, 1983; ALLER, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988).

O DRASTIC, criado pela Agência Americana de Proteção do Meio Ambiente (US Environmental Protection Agency - EPA), é método desenvolvido para avaliação da vulnerabilidade de aquífero baseado na sobreposição de mapas, amplamente aplicado e o mais utilizado em todo o mundo (ALLER, 1987; ZWAHLEN, 2003). O seu desenvolvimento teve o intuito de analisar os fatores hidrogeológicos, por meio de parâmetros que afetam o movimento de uma carga de contaminante até alcançar o corpo hídrico em profundidade (ALLER, 1987). No entanto, estudos recentes comprovam que a vulnerabilidade do aquífero é influenciada pela ocupação urbana, devido a grande propensão para contaminar (ALAM et al., 2012).

No estudo aplicado na região de Sharon em Israel, região essencialmente agrícola, foi inserido o parâmetro "uso do solo". No entanto, posteriormente, a adaptação passou a ser aplicada em regiões com manchas urbanas como na Região de Lucknow, Índia (SINGH et al., 2015) na qual foi inserido o parâmetro impacto antropogênico (A) e avaliado o padrão uso do solo.

O presente trabalho tem como finalidade avaliar a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos em área urbana,

utilizando o método convencional DRASTIC e sua variação, DRASTICA, que inclui o parâmetro impacto antropogênico, com a utilização de dados censitários acrescentado ao mapa de uso e ocupação do solo.

O estudo visa a elaboração e comparação dos mapas de vulnerabilidade dos dois métodos DRASTIC e DRASTICA, avaliando a exatidão através da comparação entre os diferentes níveis de concentrações de nitrato, presentes nas diferentes classes de vulnerabilidade geradas pela soma de seus respectivos parâmetros.

2. ÁREA DE ESTUDO

O aquífero Guaratiba está situado no município do Rio de Janeiro, em sua grande parte inserida nas Regiões Administrativas (R.A.) XVIII e XXVI, entre a latitude 23°4'32,19"S e 22°52'45,22"S e longitude 43°39'1,54"O e 43°28'3,61"O como podemos ver na figura 1 (Instituto Pereira Passos- IPP 2016).

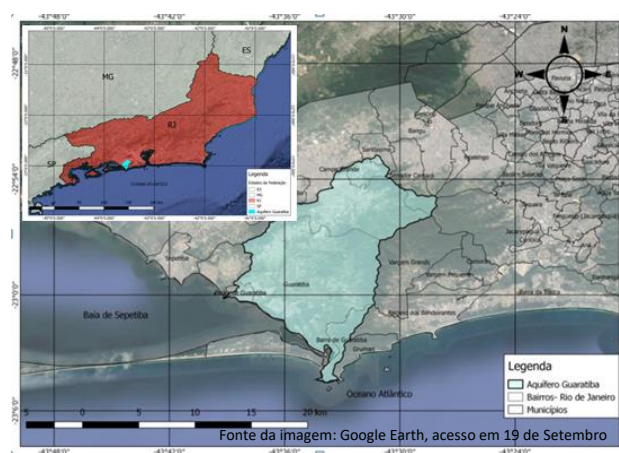


Figura 1 - Localização da área de estudo Aquífero Guaratiba, Rio de Janeiro. Fonte: IPP (2016).

2.1. Aspectos Físicos

Neste capítulo buscou-se levantar as características relevantes para conhecimento da área para o referido estudo, foram considerados os seguintes aspectos: clima, geologia, hidrogeologia.

2.1.1. Clima

No estado do Rio de Janeiro a predominância do clima tropical semiúmido ocorre nas áreas de baixas altitudes, com destaque a região metropolitana do Rio de Janeiro. Essa área do Estado do Rio de Janeiro apresenta uma temperatura média anual em torno de 24° C e com chuvas abundantes no verão e invernos secos (BASTOS & NAPOLEÃO, 2011). Na área em estudo, foram identificadas duas zonas pluviométricas distintas, devido ao contraste topográfico entre a baixada e as encostas que a envolvem: a baixada, com verão úmido e inverno seco, enquanto que as encostas, que a circunda, apresentam pluviosidade mais elevada sem uma estação seca definida (CAMPOS, 1996).

Contudo Lucena (2010) identificou nas cidades um caso especial onde o clima se espacializa a um nível perceptivo em função da ação de equilíbrio ou desequilíbrio no “sistema ambiental urbano”, haja vista que a cidade é lócus ativo-passivo dos fenômenos atmosféricos, chamado Sistema Clima Urbano, que age na zona oeste da cidade.

2.1.2. Mapa Geológico

A área de estudo apresentou 6 litotipos distintos. No que diz respeito às regiões de serra, encontra-se em predominância o maciço granítico da Pedra Branca (granito e granodiorito). Subordinadamente, presente principalmente a noroeste da área de estudo, as rochas do pré-cambriano, denominadas Unidade Rio Negro.

Nos trechos de baixada principalmente na porção central e norte do mapa predominam os aluviões, constituídos de depósitos fluviais formado de material bastante heterogêneo. Ao Sul da área de estudo, próximo a baía de Sepetiba, a unidade é composta por argila orgânica, sobrepostas a camadas argilo-siltosas, que podem conter fragmentos de conchas, o que evidencia a presença do mar durante as várias transgressões e regressões ocorridas na região (CAMPOS, 1996).

2.1.3. Hidrogeologia

Vicente (2009) identificou na área de estudo dois tipos de sistemas aquíferos distintos: o sistema aquífero fissural e o sistema aquífero intergranular. O primeiro é composto por rochas cristalinas pré-cambrianas a terciárias, de origem metamórfica e ígnea, com descontinuidades que se conectam, conferindo ao sistema a capacidade de armazenar e transmitir as águas. O segundo, sistema aquífero intergranular, se inicia na base das cadeias montanhosas que ocorrem nas R.A. de Campo Grande e Guaratiba e se estende até a região litorânea.

Pires (2016) definiu que nos aquíferos fissurais, os poços localizados junto aos lineamentos de direção noroeste possuem boas características hidráulicas, porém os lineamentos, na direção nordeste, foram identificados como as fraturas principais, possuindo melhores características hidráulicas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta etapa são descritas as etapas para levantamentos de dados a partir de fontes bibliográficas e cartográficas que serviram como base para a geração de conjunto de mapas que, sobrepostos, deram origem ao mapa de vulnerabilidade DRASTIC e sua adaptação aplicada em área urbana, DRASTICA.

3.1. Levantamento e tratamento dos dados DRASTIC

Para o mapeamento da vulnerabilidade, é necessário fazer o levantamento dos dados que compõe os parâmetros do índice DRASTIC. Para cada parâmetro é atribuído um peso, variando de 1 a 5, de acordo com a sua importância (Tabela 1). Cada classe do parâmetro é avaliada e classificada com valores de carga entre 1 e 10 definido por Aller et al. (1987).

Tabela 1 - Peso dos parâmetros do método DRASTIC. Fonte: Aller et al. (1987).

Parâmetros	Acrônimo	Pesos
Profundidade do Aquífero	D	5
Recarga	R	4
Tipo de Aquífero	A	3
Solo	S	2
Topografia	T	1
Impacto da zona não vadosa	I	5
Condutividade do Aquífero	C	3

Para a obtenção do Índice DRASTIC é necessário quantificar a vulnerabilidade através da soma das cargas dos sete parâmetros hidrogeológicos ponderados (Equação 1) (ALLER, 1987).

$$DI_i = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c \quad (1)$$

Onde:

DI_i = Índice DRASTIC;

D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p, C_p - parâmetros com seus pesos correspondentes;

e D_c, R_c, A_c, S_c, T_i, I_i, C_c - parâmetros com suas cargas das variáveis correspondentes, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método.

A primeira parte desta pesquisa, então, consistiu na coleta dos dados geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos e climáticos utilizados no método DRASTIC (Quadro 1).

Quadro 1 - Base de dados utilizada na geração do mapa de vulnerabilidade DRASTIC e DRASTICA do Aquífero Guaratiba. Fonte: Autor.

Parâmetro DRASTIC	Fonte/Autor/Formato	Escala/Resolução
Depth	1- INEA (2017) 2- Estudo Hidrogeológico do Rio Cabuçu, Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro- Campos (1996) -Vetor	1: 25.000
Recharge	1-Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (2002/2017) - 2- Instituto de Meteorologia (INMET (2002/2017) 3 Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro- EMBRAPA (2016) - 4- IBGE (2010) - Vetor	3 -1:75.000
Aquifer	Estudo Hidrogeológico do Rio Cabuçu, Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro-Campos (1996) -Vetor	1: 25.000
Soil	Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro - EMBRAPA (2016) -Vetor	1:75.000
Topography	MDE (Modelo Digital de Elevação)- Prefeitura do Rio de Janeiro (SMAC, 2016) - Raster	1 m de resolução espacial

Impact	Estudo Hidrogeológico do Rio Cabuçu, Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro - Campos(1996) -Vetor	1: 25.000
Conductibility	1- Estudo Hidrogeológico do Rio Cabuçu, Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro-Campos (1996). 2-Análise Geométrica dos Lineamentos e sua Relações com Águas Subterrâneas Associadas ao Aquífero Guaratiba- RJ Pires (2016) - Vetor	1- 1: 25.000
Impacto Antrópico	1- Mapa de Cobertura Vegetal e Uso do Solo do município do Rio de Janeiro- SMAC (2016) 2- Censo Demográfico-IBGE (2010) – Vetor	1:2.000
NO ₃	Poços Profundos na RA de Campo Grande Guaratiba- INEA (2017) - Vetor	

Na avaliação do parâmetro profundidade do lençol freático (D), foi usado o mapeamento da Bacia do rio Cabuçu, realizado por Campos (1996) com base na medição, em quatro diferentes períodos do ano, dos poços e cacimbas instalados na área de estudo. Também foram coletados dados de profundidade de poços do Instituto de Estudos Ambientais - INEA somando-se 15 poços que variaram de 0,9 a 6m de profundidade (Tabela 2).

Tabela 2 - Índices DRASTIC do parâmetro profundidade do lençol freático (D). Fonte: Aller et al. (1987).

Níveis Freáticos (m)	Peso	Valor	DRASTIC
< 1,5	5	10	50
1,5 – 4,6		9	45
4,6 – 9,1		7	35
9,1 – 15,2		5	25

O mapa de recarga (R), foi gerado com base nos dados obtidos pelo método Thornthwaite - Mather (T-M) aplicados aos tipos de solos. Para obtenção do índice DRASTIC, a recarga foi classificada por valores que variam de 1 a 9, de peso 4 (Tabela 3).

Tabela 3 - Índices DRASTIC do parâmetro recarga do aquífero (R). Fonte: Adaptado Aller (1987).

Recarga (mm)	Peso	Valor	DRASTIC
0 - 51	4	1	4
51,1 - 102		3	12
102,1 - 178		6	24
178,1 - 254		8	32
254,1 - 508		9	36
>508		10	40

Para o cálculo do balanço pelo método T-M, foi utilizado o total anual pluviométrico de três estações do Alerta-Rio - Campo Grande, Guaratiba e Grota Funda. Os dados de temperatura foram obtidos na estação Praça Mauá (83743) INMET, localizada da cidade do Rio de Janeiro com latitude -22,88° e longitude -43,18°, que operou entre os anos de 2002 e 2017.

A área de estudo, também, foi classificada em seis tipos distintos de solo, de acordo com granulometria que varia de

argiloso, franco argiloso, siltoso, franco arenoso, franco e arenoso (Tabela 4).

Tabela 4 - Índices DRASTIC do parâmetro recarga (R) para o Aquífero Guaratiba, calculada pelo método T-M. Fonte: Autor.

Granulometria	Solo (DRASTIC)	CAD (mm)	Recarga (mm/ano)	DRASTIC
Argilosa	Argiloso	41,25	116,64	24
Muito Argilosa	Argiloso			
Média ou argilosa	Argiloso Siltoso	82,5	116,00	
Média ou argilosa/ muito argilosa	Franco Argiloso	84	120,27	
Média argilosa				
Arenosa/argilosa	Franco Arenoso	94,5	123,23	
Solo indiscriminado	Franco	117	122,69	
Areia	Arenoso	112,5	140,68	

No entanto, para a área urbana, foi calculada a recarga hídrica artificial involuntária potencial baseada na contribuição de água proveniente de vazamentos dos efluentes domésticos e rede de abastecimento de água. Neste trabalho, a recarga potencial por efluentes domésticos foi baseada em Von Sperling (2009) conforme demonstrado na Equação 2.

$$Q_{d(m)} = \text{Pop} \cdot Q_{pc} \cdot R \quad (2)$$

Onde:

$Q_{d(m)}$ - Vazão média de esgoto doméstico (m³/dia);

Pop - número de habitantes;

Q_{pc} - Quota per capita de consumo (m³hab/dia); e

R - Coeficiente de retorno de esgoto/água.

Considerando a disponibilidade de dados e as condições sanitárias da área de estudo, propôs-se a adaptação do cálculo da recarga artificial de efluentes domésticos de Von Sperling (2009) conforme demonstrado na Equação 3. Foram, assim, utilizados os dados agregados por setores censitários do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010) referentes às condições de abastecimento de água e esgotamento sanitário, para o mapeamento da recarga artificial na área de estudo.

$$Q_{d(m)A} = \text{Pops} \cdot Q_{pc} \quad (3)$$

Onde:

$Q_{d(m)A}$ - Vazão média de esgoto doméstico (m³/dia); e

Pops - número de habitantes com esgotamento sanitário servido por fossa séptica e fossa rústica, e lançado em valas, ou sem esgotamento (IBGE, 2010); e

Q_{pc} - Quota per capita de consumo (m³.hab/dia).

A recarga artificial proveniente de vazamentos na rede geral de abastecimento de água foi estimada de acordo com a Equação 4 definida por Von Sperling (2009).

$$RHAIP_{(ab)} = (Pop_{.ab} \cdot Q_{pc}) I_p \quad (4)$$

Onde:

RHAIP_(ab) - recarga hídrica artificial involuntária potencial proveniente de vazamentos na rede de abastecimento (m³T);

Pop_{.ab} - número de habitantes com abastecimento de água via rede geral, IBGE (2010); e

I_p - Índice de perdas, aqui adotado o valor de 28,49% do volume de água produzido de acordo com SNIS (2013).

Como os valores de recarga artificial, soma da recarga hídrica artificial proveniente de vazamentos na rede de abastecimento e dos efluentes domésticos, superaram os valores de recarga natural propostos por Aller (1987).

O tipo de aquífero (A) teve como base o Mapa Geológico do Estado da Guanabara - DNPM na escala 1:50.000 (Folha Santa Cruz, 1965). Campos (1996) aplicou-o para estudo do aquífero, diferenciando dois tipos de aquíferos sedimentares: Q₁ correspondendo à matriz com conteúdo maior de argila e Q₂ à matriz mais arenosa. Para geração do mapa DRASTIC, foram atribuídos valores que variaram 4 a 9 de acordo com a metodologia proposta Aller (1987), multiplicada pelo peso 3, referente ao parâmetro tipo de aquífero, conforme mostra a Tabela 5.

Foi atribuído o maior valor DRASTIC (9) para os sedimentos arenosos originados da sedimentação do Rio Cabuçu devido a sua maior permeabilidade. O valor intermediário 6 foi atribuído aos sedimentos com característica de materiais argilosos pela menor influência da sedimentação fluvial. O menor valor 4 foi referente às rochas ígneas e metamórficas contidas na área de estudo.

O parâmetro solo (S) teve como base o mapeamento disponibilizado pela EMBRAPA (2014) na escala de 1:75.000. Para a área de estudo, há um total de doze tipos de solo e que, agregados, originaram nove classes às quais foram atribuídos valores que variaram de 1 a 10, de peso 2, correspondente ao peso do parâmetro S (Tabela 6).

Para o parâmetro S foram consideradas as características químicas, em especial, a diferença entre as argilas expansiva (Ta) e argila não expansiva (Tb). Assim, considera-se que as argilas expansíveis possuem maior permeabilidade em certos períodos e, conseqüentemente, maior vulnerabilidade à contaminação (LIMAS, 2008).

Como pode ser verificado na Tabela 6, os valores variaram de 1 até 10. No entanto, como na área urbana foram consideradas as características físicas que conferem a impermeabilização do solo, atribuiu-se valores baixos de permeabilidade.

Tabela 5 - Índices DRASTIC do parâmetro tipo de aquífero (A) para o Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Adaptado de Aller (1987).

Litologia	Peso	Intervalo	Valor	DRASTIC
Rocha ígnea ou metamórfica intemperizada	3	3 - 5	4	12
Arenito acamadado, calcário e folhelho sequencial		5 - 9	6	18
Lentes arenosas (Rio Cabuçu)		9	9	27

Tabela 6 - Índices DRASTIC do parâmetro solo (S) para o Aquífero Guaratiba. Fonte: Adaptado Aller (1987)

Solos DRASTIC	Valor	Peso	DRASTIC
Tb	1	2	2
ausente			6
Arenoso + Tb	3		8
Tb + Ta + Arenoso	4		10
Ta + silte	5		14
Arenoso + Ta			16
Ta	7		18
Arenoso + silte + Ta	8		
Arenoso	9		

O parâmetro topografia (T) apresenta peso 1 no DRASTIC e foi obtido a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 1 m (SMAC, 2016). A partir do processamento deste modelo, foi gerado o mapa de declividade classificado em cinco classes, que receberam valores entre 1 e 10 (Tabela 7).

O impacto da zona não saturada, parâmetro I, a partir do mapa geológico de Campos (1996), foram atribuídos valores que variaram de 4 a 9 (Tabela 8).

Tabela 7 - Índices DRASTIC do parâmetro topografia (T). Fonte: Aller (1987).

Declividade (%)	Peso	Valor	DRASTIC
0 - 2	1	10	10
2 - 6		9	9
6 - 12		5	5
12 - 18		3	3
> 18		1	1

Tabela 8 - Índices DRASTIC do parâmetro com o impacto da zona vadosa (I) para o Aquífero Guaratiba. Fonte: Adaptado de Aller (1987).

Zona Vadosa	Intervalo	Valor	Peso	DRASTIC
pCgr	2 a 8	4	5	20
pCIrn				
pCgd				
A- areia e cascalho com argila e silte	2 a 6	6		30
Areia e cascalho intercalados	4 a 8			
Q - Rio Cabuçu - lentes arenosas	9		9	45

O parâmetro condutividade hidráulica (C), relativo ao aquífero livre, foi desenvolvido através das características obtidas pelo mapa de unidade litológica e levantamentos na região em estudo em ensaio de permeabilidade realizado por Campos (1996). Enquanto a condutividade hidráulica referente às rochas ígneas e metamórficas foi determinada pela densidade de lineamentos na porção do aquífero fissural, determinados de acordo com os valores representativos da condutividade hidráulica existentes na literatura, como podemos ver na tabela 9 (DOMENICO; SCHWARTZ,1990).

Tabela 9 - Índices DRASTIC do parâmetro condutividade (C) para rochas fraturadas. Fonte: Domenico e Schwartz (1990)

Litologia	Densidade de lineamentos (km/km ²)	Condutividade Hidráulica (m/d)	Valor	Peso	DRASTIC
Rocha Ígnea Fraturada	0-8	8,64x10 ⁻³	1	3	3
	9-16	8,64x10 ⁻²			
	17-24	8,64x10 ⁻¹	2		6
	25-32	8,64x10 ⁰			
Rocha Metamórfica Fraturada	0-8	8,64x10 ⁻²	1	3	3
	9-16				
	17-24	8,64x10 ⁻¹	2		6
	25-32				

Já os depósitos sedimentares, na atribuição dos valores de condutividade, foram consideradas a granulometria. Os valores variaram de 1 a 8 com peso 3, conforme metodologia proposta, o que gerou índices DRASTIC expostos no Tabela 10.

Tabela 10 - Índices DRASTIC de acordo com a condutividade hidráulica nos sedimentos para o Aquífero Guaratiba. Fonte: Adaptado de Aller (1987).

Classe Litológica	Condutividade (m/dia)		Peso	Valor	DRASTIC
	Intervalo	Valores adotados			
Sedimentos Q1 (Sedimentos Arenosos com conteúdo de Argila)	4,1 - 12,2	7,3	3	2	6
Sedimentos Q2 (Sedimentos Arenosos Intercalados com Cascalho e Silte)	12,2 - 28,5	17		4	12
Sedimentos-Lentes Arenosas (Rio Cabuçu)	40,7 - 81,5	43		8	24

Por fim, para aplicação do método DRASTICA, foi incluído o parâmetro referente à ação antrópica (A) obtido no mapa de cobertura vegetal e uso do solo do município do Rio de Janeiro (SMAC, 2016) na escala 1:2.000, combinado aos setores censitários do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010) para o cálculo da densidade demográfica da área urbana. Os setores censitários foram hierarquizados, de acordo com IBGE (2017), em cinco classes de densidade demográfica (Tabela 11). Para as áreas menos expostas à influência humana foram atribuídos os valores menores 1, enquanto, para as áreas com maior densidade, alcançaram o valor 10, que foram multiplicados pelo peso 5 (Tabela 12).

Tabela 11 - Classes de densidade demográfica. Fonte: IBGE (2017).

Densidade	Taxa (hab./km ²)
Muito Alta	>500
Alta	100 a 500
Média	25 a 100
Baixa	1 a 25
Dispersão	<1

Tabela 12 - Índices DRASTICA do parâmetro ação antrópica (A) para o Aquífero Guaratiba. Fonte: Adaptado de Singh et al. (2015).

Uso do Solo	Peso	Valor	DRASTICA
Corpo Hídrico	5	1	5
Área desocupada			
Área arbustiva		2	10
Floresta			
Agricultura		5	25
Área urbana - densidade dispersa			
Área urbana - densidade baixa		7	35
Área urbana - densidade média			
Área urbana - densidade alta		9	45
Área urbana - densidade muito alta			
		10	50

3.2. Aplicação do Método DRASTIC

Como o valor de DI_i é a soma de valores de acordo com o grau de importância, não possui uma unidade, portanto deve ser avaliado quando comparado a outros trabalhos cujos parâmetros e pesos foram aplicados de modo similar. O índice final DRASTIC de vulnerabilidade de índices entre 26 e 226 (ALLER, 1987). Mello Junior (2008) sugere que os valores de vulnerabilidade sejam divididos em quatro classes de vulnerabilidade: baixa, média, alta e muito alta (Quadro 2).

O parâmetro impacto antropogênico do método DRASTICA é incorporado aos restantes dos parâmetros contidos no método DRASTIC, conforme demonstrado na Equação 4.

$$DI - A_i = DI_i + A_i A_p \quad (4)$$

Onde:

A_i e A_p - representam o índice e o peso correspondente ao parâmetro impacto antropogênico.

Para o método DRASTICA, as classes são similares ao índice DRASTIC, porém com a reescalonamento dos intervalos, pois a inclusão do oitavo parâmetro elevou os índices DRASTIC (Quadro 2).

Quadro 2 - Escala de Vulnerabilidade do Método DRASTICA. Fonte: Adaptado de Mello Junior (2008).

Escala de Vulnerabilidade	Índice DRASTIC	Índice DRASTICA
Muito Alta	180-226	220 - 280
Alta	126-180	156 - 220
Média	71-126	86 - 156
Baixa	26-71	31 - 86

3.3. Avaliação do mapeamento DRASTIC e DRASTICA

Para a calibração tanto do método DRASTIC quanto do método DRASTICA foi utilizada a concentração de nitrato de amostras de dez poços (Tabela 13) localizados na área de estudo. As amostras foram coletadas pelo INEA entre os anos de 2011 e 2017 e apresentaram boa distribuição espacial.

Foram criados *buffers* de raio 500 m no entorno de cada amostra e, com o objetivo de verificar a relação entre o índice de vulnerabilidade e a concentração de nitrato, foram calculadas as áreas das classes de vulnerabilidade com base na sobreposição com os mapas DRASTIC e DRASTICA.

Tabela 13 - Localização dos poços com as amostras de nitrato, Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: INEA (2017).

Poços		Coordenadas Geográficas	
No.	mg/L	Longitude	Latitude
1	0,58	O 43°33'21"	S 22° 54' 11"
2	0,196	O 43° 31' 59"	S 22° 53' 44"
3	2,53	O 43° 36' 23"	S 22° 57'
4	1	O 43° 36' 37"	S 22° 57' 27"
5	0,03	O 43° 32' 3"	S 22° 58' 53"
6	2,5	O 43° 36'	S 22° 57' 55"
7	0,75	O 43° 33' 32"	S 22° 55' 24"
8	0,01	O 43° 34' 9"	S 22° 59' 4"
9	7,65	O 43° 34' 32"	S 22° 53' 25"
10	0,1	O 43° 32'	S 22° 53' 36"
11	0,07	O 43° 32' 54"	S 22° 59' 39"

4. RESULTADOS

4.1. Parâmetros do DRASTIC

A profundidade do lençol freático na área de estudo variou entre 1,5 m e 9 m e apresentou índices elevados do parâmetro D, entre 35 e 50, devido ao peso 5 atribuído.

Os indicadores correspondentes à recarga artificial e natural, parâmetro R, apresentou valores entre 4 e 40, também elevados decorrente do peso 4 atribuído a este parâmetro. A recarga natural foi gerada com base na pluviometria e da granulometria. A área de maior vulnerabilidade ficou contida na mancha urbana e alcançou índice DRASTIC acima de 28, pois também englobou a recarga artificial.

O mapa do parâmetro A, referente ao tipo de aquífero, foi derivado da geologia e apresentou valores DRASTIC entre 12 e 27, considerados intermediários devido ao peso 3 atribuído a este parâmetro. As rochas ígneas e metamórficas apresentaram menor vulnerabilidade, enquanto a porção sedimentar do aquífero apresentou valor intermediário devido às suas características físicas. À porção de maior energia de sedimentação de origem fluvial foi atribuída maior vulnerabilidade.

O parâmetro S, referente ao tipo de solos, foi derivado do mapa de pedologia e classificado em valores de vulnerabilidade entre 2 e 18, considerados baixos devido ao peso 2 atribuído a este parâmetro.

O mapa do parâmetro T, referente a topografia, foi gerado com base na declividade e apresentou valores entre 1 e 5, valores

muito baixos, em decorrência do peso 1 atribuído a este parâmetro.

O mapa do parâmetro I, referente ao impacto da zona vadosa, foi derivado da mapa geológico apresentou índices de vulnerabilidade que variaram de 20 a 45, valores elevados devido ao peso 5 atribuído a este parâmetro.

O mapa do parâmetro C, condutividade do aquífero com peso 3, foi originário dos mapas geológico e os índices de vulnerabilidade, que variaram entre 3 e 24.

O mapa de Impacto Antrópico, parâmetro A, derivado do uso e cobertura do solo apresentou valores entre 5 e 50. Os menores foram atribuídos à classe de cobertura do solo com vegetação densa, enquanto à área urbana foram atribuídos os maiores valores, principalmente nos locais de maior densidade de ocupação.

4.2. Mapa de Vulnerabilidade de Aquíferos DRASTIC e DRASTICA

O mapa de vulnerabilidade DRASTIC de Aquífero Guaratiba apresentou valores que variaram entre 43 e 156 distinguidos em três classes de vulnerabilidade. A área de vulnerabilidade alta, correspondendo a 0,8 % (1,3 km²) da área de estudo foi originada pela influência da sedimentação de forte energia do canal principal da bacia do Rio Cabuçu (Tabela 14). A região apresenta sedimentos mais grossos, assim conferindo condutividade hidráulica elevada e maiores valores de recarga artificial.

No mapa de vulnerabilidade DRASTICA, o índice variou entre 53 e 208 sendo representado pelas três classes de vulnerabilidade (baixa, média e alta), com aumento da área da classe de alta vulnerabilidade em detrimento da baixa e média vulnerabilidade. A classe de alta vulnerabilidade cresceu em direção à área urbana.

Tabela 14 - Área das classes de vulnerabilidade DRASTIC e DRASTICA-A do Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Autor.

Classes	DRASTIC	Área		DRASTICA	Área	
		km ²	%		km ²	%
Alta	126 - 180	1,3	0,8	156-220	8,4	5,4
Média	71-126	70,3	45,5	86-156	72,9	47,1
Baixa	26 -71	83,0	53,7	31-86	73,3	47,4

4.3. Avaliação dos mapas de vulnerabilidade

As dez amostras de água dos poços com a concentração de nitrato, localizadas na área de estudo, e utilizadas para avaliação dos mapas de vulnerabilidade DRASTIC, não identificaram níveis elevados de NO₃. Como as amostras coletadas têm origem no aquífero fissural, mais profundo, são menos vulneráveis às contaminações originadas na superfície. Apesar do pequeno número de amostras, verifica-se a influência do Maciço da Pedra Branca na qualidade química da água, pois os poços próximos ao maciço rochoso apresentaram concentrações consideravelmente menor de nitrato em sua composição, correspondentes aos poços 5, 8 e 11 (VICENTE et al., 2010).

As três amostras, que estão localizadas a menos de 500 m da classe de alta vulnerabilidade, apresentam as maiores concentrações de nitrato, entre 2,5 e 0,58 mg/L, correspondentes

aos poços 6, 7 e 1, com exceção dos poços 3 e 4, que apresentam valores nesta faixa, no entanto estão localizados a mais de 500 m da classe de vulnerabilidade alta (Figura 2 e Tabela 15). As amostras de concentração de nitrato abaixo de 0,2 mg/L, a área de entorno localiza-se exclusivamente nas classes média e baixa de vulnerabilidade, inclusive a área de entorno das menores concentrações, poços 8 e 5, predomina na classe de baixa vulnerabilidade.

Em relação à avaliação do método DRASTICA, verifica-se que todas as amostras apresentam área de entorno inserida na classe de alta vulnerabilidade, com exceção dos poços 5, 8 e 11, que apresentam as menores concentrações de nitrato, até 0,07 mg/L (Figura 3 e Tabela 16), sendo que, nos dois primeiros, também há predominância da área de entorno na classe baixa vulnerabilidade. Por outro lado, as concentrações maiores, acima de 0,1 mg/L, apresentam menor área de entorno na classe de baixa vulnerabilidade. Destaque deve ser dado aos poços 4 e 3, pois passam a ter área de entorno localizada na classe alta vulnerabilidade e redução da área na classe baixa.

Tabela 15 - Área das classes DRASTIC no raio de 500m no entorno dos poços com amostras de água de concentração de nitrato, Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Autor

Poços		Classes – área em %		
No.	NO ₃ - mg/L	Baixa	Média	Alta
8	0,01	70	30	0
5	0,03	62	38	0
11	0,07	3	97	0
10	0,1	25	75	0
2	0,196	39	61	0
1	0,58	9	90	1
7	0,75	0	67	33
4	1	32	68	0
6	2,5	0	87	13
3	2,53	58	42	0

Tabela 16 - Área das classes DRASTICA no raio de 500m no entorno dos poços com amostras de água de concentração de nitrato, Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Autor

Poços		Classes – área em %		
No.	NO ₃ - mg/L	Baixa	Média	Alta
8	0,01	43	57	0,0
5	0,03	57	43	0,0
11	0,07	1	99	0,0
10	0,1	18	36	46
2	0,196	33	26	41
1	0,58	0	68	32
7	0,75	0	16	84
4	1	9	60	31
6	2,5	0	79	21
3	2,53	10	66	24

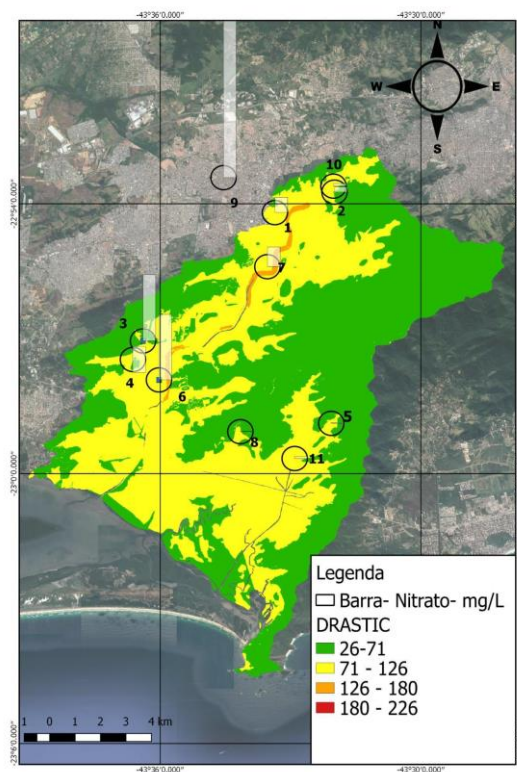


Figura 2 - Mapa de vulnerabilidade DRASTIC e os poços com amostras de água, Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Autor.

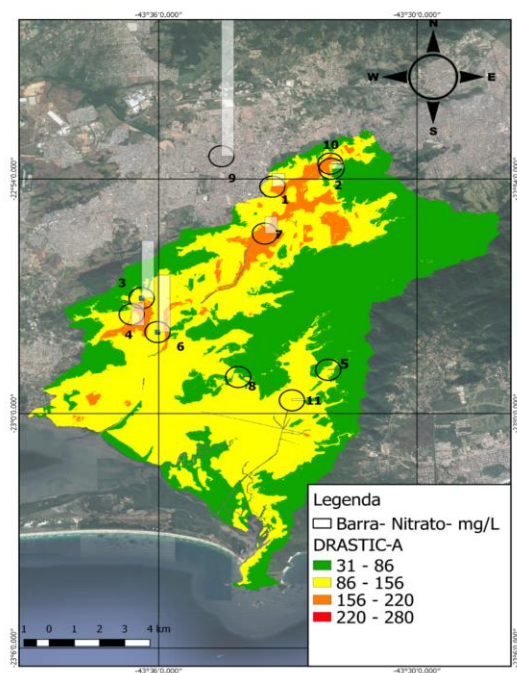


Figura 3 - Mapa de vulnerabilidade DRASTICA e os poços com amostras de água, Aquífero Guaratiba, RJ. Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados deste estudo, a adaptação para avaliação de vulnerabilidade DRASTICA aplicado em áreas urbanas é inovador e efetivo. Nele é incluído o parâmetro impacto antropogênico, que neste trabalho, foi caracterizado pelo mapa de uso e cobertura do solo juntamente a densidade demográfica, medida através dos setores censitários. O método DRASTICA apresentou avanços, pois de acordo com a avaliação feita com as amostras de água, as concentrações de nitrato dos poços apresentam padrão espacial de distribuição mais próximo às classes de vulnerabilidade do DRASTICA do que do DRASTIC.

O mapa DRASTIC revelou três classes de vulnerabilidade (baixa, média e alta) onde a influência do Rio Cabuçu, devido ao ambiente deposicional de alta energia de sedimentação, demarcou lentas arenosas ao longo do rio, que foram relevantes para formação da área de alta vulnerabilidade. No mapa DRASTICA, também foram mapeadas três classes de vulnerabilidade, no entanto a inclusão do parâmetro impacto antropogênico, especialmente setores censitários de maiores densidades de ocupação, foi responsável pelos maiores índices de vulnerabilidade. Além disso, a incorporação do oitavo parâmetro causou a expansão da área de classe de vulnerabilidade alta para a área urbana, aumentando em cinco vezes sua extensão.

A avaliação elaborada com base em amostras da concentração de nitrato, sugere que a área de entorno das amostras com as menores concentrações do íon na constituição da água subterrânea, prevalece nas regiões de baixa e média vulnerabilidade. Isto pode ser observado tanto no mapa gerado pelo método DRASTICA quanto no homólogo gerado pelo DRASTIC.

Porém, no método DRASTICA, observa-se a presença da alta vulnerabilidade no entorno das amostras com maiores concentrações de íons nitrato e, além disso, apenas as três amostras, com menor concentração de nitrato, não apresentam seu entorno na respectiva classe.

A análise de resultados sugere que estudos de vulnerabilidade de aquíferos em áreas urbanas, feitos mediante a aplicação do método DRASTICA são certamente indicados. A alteração das características naturais das águas subterrâneas, principalmente, por efluentes domésticos, possibilita a contaminação por nitrato e, desta forma, pode comprometer a qualidade da água subterrânea, apesar dos valores da área de estudo ainda se enquadrarem dentro dos padrões para consumo humano.

6. REFERÊNCIAS

- Alam, F. et al. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of Central Ganga plain, India. *Arabian Journal Geoscience*, 2012. 7p. p 927-937.
- Albinet, M.; Margat, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull BRGM 2me Series*, Paris, 1970. 9p, p.13-22.
- Aller, L. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological setting*. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory,

- Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Ohio, 1985. 622p.
- ASSIS DA SILVA, R. *Abrindo mão do direito ao consumo da água tratada*: Feira de Santana/BA. Bahia, 1999. 96p. (Monografia do curso de especialização em Direito Sanitário)- UEFS, Bahia, 1999.
- Baier, K. et al. Management tools for sustainable groundwater protection in mega urban areas-small scale land use and ground water vulnerability analyses in Guangzhou. *China International Journal of Environmental Research*, 2014. 13p, p.249-262.
- Bredden, H. Due. Grundribkarnten des Hydrogeologischen Kartenwekes der Wasserwistschafteverwattung von Norgrhein – Westfalen, 1963. *Geologische Mitteilungen*. v. 2, n.4, 1963. 23 p. 393-416.
- Campos, J. *Estudo Hidrogeológico da Bacia do Rio Cabuçu – Zona Oeste do Município do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro*, 1996. 100 p. Dissertação (Mestrado), Univ. Federal do Rio de Janeiro/Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rio de Janeiro, 1996.
- Foster, S; Hirata, R. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology based on available data*. CEPIS/PAHO Technical Report. Lima, Peru, 1988. 81p.
- Foster, S. et al. *Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies*; s.l. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Servmar - Serviços Técnicos Ambientais Ltda, Brasil, 2006.
- Foster, S. The Chalk aquifer - its vulnerability to pollution. In: DOWNING, R. A., PRICE, M. & JONES, G. P. (eds) *The Hydrogeology of the Chalk of North- West Europe*. Clarendon, Oxford, 1993. p 93-112.
- Haertle, A. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. In: *Groundwater in Water Resources Planning* (Proc. Koblenz Symp., August-September 1983), IAHS Publ. no 142. p.12 p.1073-1085.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Brasileiro de 2010. Rio de Janeiro*: IBGE, 2012.
- INSTITUTO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (INEA). *Poços de Campo Grande e Guaratiba. Rio de Janeiro*: INEA, 2017.
- Lucena, A. *O sistema clima urbano da Zona Oeste/RJ: uma contribuição ao monitoramento e análise em sistemas ambientais*. Geoambiente, Jataí/GO: n.15, jul/dez 2010.
- Melo Junior, H. *Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade*. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. São Paulo- Brasil, 2008.
- PIRES, C. *Análise Geométrica de Lineamentos e suas Relações com Águas Subterrâneas Associadas ao Aquífero Guaratiba - Região de Campo Grande e Guaratiba- RJ*. Seropédica, 2016. 39 p. Monografia (Especialização) - Curso de Geologia, Departamento de Geociências, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2016.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, SECRETARIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO E RECURSOS HÍDRICOS, FUNDAÇÃO INSTITUTO DAS ÁGUAS. *Drenagem e manejo de águas pluviais urbanas*. Dezembro. Rio de Janeiro. 2015.
- PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO, INSTITUTO PEREIRA PASSOS. 2016.
- Rebouças, Aldo da Cunha et al. *Águas doces no Brasil*. Escrituras Editora, São Paulo, 2002.
- Singh, A. et.al. *A modified-DRASTIC model (DRASTICA) for assessment of groundwater vulnerability to pollution in an urbanized environment in Lucknow, India*; Environ. Earth Sci.: 2015. 74 5475–5490.
- Suguio, K. *Geologia Sedimentar*. Edgard Blücher Ltda./EDUSP, São Paulo, SP, 2003, 400p.
- Thorntwaite, C.; MATHER, J. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. Publications in Climatology: v. VIII, n.1, 1955. 104 p.
- Tominaga, L. K., Santoro, J., Amaral, R. *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*. Instituto Geológico, São Paulo, 2009. 94p.
- Vicente, J.; Carvalho, Maria Geralda de; Barbosa, Gisele Ramalho. *Avaliação Hidrogeológica e da Qualidade das Águas Subterrâneas nas Regiões Administrativas de Campo Grande e Guaratiba – Município do Rio de Janeiro/ RJ- Águas Subterrâneas*, 2010.
- Zwahlen, F. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers*. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels: 2003. 297 p.

Recebido em: 27/05/2020

Aceito para publicação em: 09/09/2020