



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE ÍNTRINSECA À CONTAMINAÇÃO POR MEIO DO MÉTODO GOD NO MUNICÍPIO DE SALVADOR, ESTADO DA BAHIA

Nathali Lorena de Santana Rego^(a), Lucas de Queiroz Salles^(b), Danilo Heitor
Caires Tinoco Bisneto Melo^(c)

^(a) Departamento de Geografia/Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,
nathali.santana@gmail.com

^(b) Departamento de Geologia/Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,
lucassalles2008@gmail.com

^(c) Departamento de Geologia/Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia,
danilohmelo@gmail.com

Eixo: Geotecnologias e modelagem aplicada aos estudos ambientais

Resumo

O objetivo deste trabalho é elaborar um mapa temático de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos no município de Salvador, o qual constitui o primeiro passo para a avaliação do perigo de contaminação e proteção da qualidade da água subterrânea. Para tanto, foi utilizada a metodologia GOD. No município de Salvador foi encontrado quatro padrões de vulnerabilidade: desprezível, baixa; moderada e alta. O método GOD mostrou claramente a vulnerabilidade natural à contaminação, porém, o mesmo envolve simplificações nas informações hidrogeológicas, o que requer atenção no momento da reclassificação e tratamento dos dados e interpretação dos resultados.

Palavras chave: GOD; Vulnerabilidade; Aquífero; Salvador



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

1. Introdução

Os aquíferos estão sofrendo grande ameaça de poluição devido ao desenvolvimento industrial, urbanização e atividades agropecuárias. Tucci (2003) aponta o crescente aumento da população urbana como um agravo para a contaminação dos aquíferos, principalmente através de fossas sépticas, postos de gasolina e destinação final dos resíduos. Concomitante a estas adversidades, surgiu uma linha de pesquisa relacionada a implantação de atividades socioeconômicas que avalia a probabilidade de ocorrência de um impacto (positivo ou negativo, social ou natural), com alterações e inter-relações espaciais e temporais, denominada de vulnerabilidade (CHRISTOFOLETTI, 2002, DAUPHINE; PROVITOLLO, 2013; EGLER, 1996; ZWAHLEN, 2003).

Em hidrogeologia, esta linha de pesquisa pauta, principalmente sobre a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, com destaque para as investigações pioneiras de Albinet (1963, 1970), LeGrand (1964), Margat e Albinet (1965), Margat; Monition; Ricour (1967; 1968) e Margat (1968). Estes trabalhos estabelecem os conceitos básicos da avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, considerando-o como uma ferramenta preventiva, que permite determinar, a priori, a capacidade de proteção natural dos aquíferos e distinguir quais áreas necessitam de medidas mitigatórias e/ou reducionistas ao perigo de contaminação diante da intervenção antrópica. Para tanto, estes autores focam os perigos e ameaças de contaminação, contextualizando o meio ambiente.

O objetivo deste trabalho é elaborar o mapa temático de vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos no município de Salvador através do método GOD. Para Foster *et al.*, 2003, um mapa de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos é o primeiro passo para a avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e proteção de sua qualidade, além disso, pode criar mecanismos para a gestão e controle dos recursos hídricos, porém, o grau confiabilidade irá depender da escala de elaboração do trabalho. GOD foi escolhido devido aos simples parâmetros envolvidos na utilização deste método. Com isso, pretende-se que o mesmo permita



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

conhecer a susceptibilidade a contaminação dos aquíferos na medida em que demonstra os diferentes graus de vulnerabilidade, levando, portanto, a uma definição de padrões.

1.1. Caracterização da área de estudo

Salvador é um município brasileiro localizado na zona litorânea do estado da Bahia, dividido entre o setor continental e o insular, sendo este, detentor das ilhas de Maré, Frades e Bom Jesus dos Passos (figura 1.2.1). Segundo dados estimados pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2017, Salvador possuía uma população total de 2.953.986 habitantes distribuídos numa área de 692.818 km².

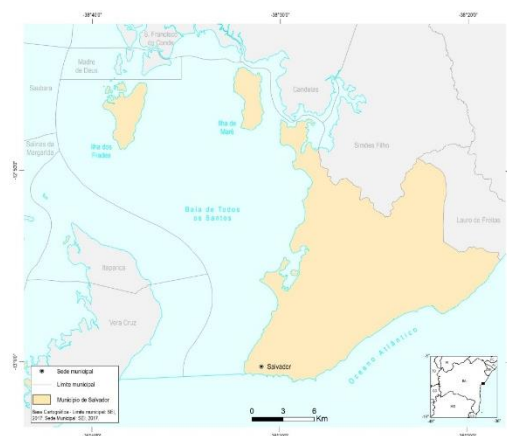


Figura 1.2.1 Localização do município de Salvador

De acordo com a classificação climática de Köppen (1948), em Salvador o clima é Tropical Chuvoso de Floresta (Af) e em conformidade com a classificação de Thornthwaite (1948) é úmido (B2rÁá). Dados climatológicos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) registraram pluviometria média em torno de 1873,3 mm/ano com maior concentração de chuvas entre abril e julho, num período que corresponde aos anos 1975 a 1979, 1987, e entre 1992 a 2015. A temperatura média anual no período citado foi de 25,5° C, com máximas entre janeiro e março e mínimas em julho e agosto. A figura 1.2.2 mostra o balanço hídrico calculado a partir dos dados da Estação de Salvador (período 2006- 2017), pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). Nela observa-se que há um déficit hídrico nos meses de outubro a março, quando a precipitação média é inferior à média obtida para a



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

evapotranspiração. A reposição hídrica ocorre no mês de abril. Já os excedentes hídricos se concentram entre os meses de abril a agosto, alcançado um pico no mês de maio.

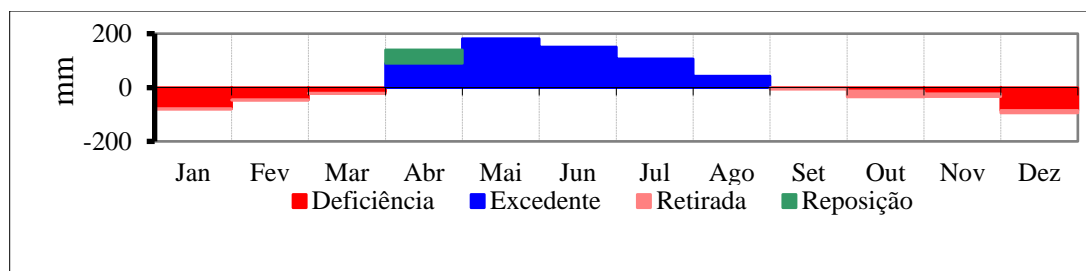


Figura 1.2.2 Balanço hídrico para a Estação Salvador, no período de 2006 a 2017, evidenciando os períodos de deficiência, excedente, retirada e reposição hídrica ao longo do ano.

Conforme Barbosa e Nascimento (2010), o município de Salvador possui embasamento formado por rochas metamorfasadas do Complexo Salvador-Esplanada contendo enclaves ultramáficos e diques máficos. Sobre tal embasamento há ocorrência de rochas e coberturas sedimentares derivadas dos Grupos Ilhas, Barreiras e areias quartzosas.

Os solos resultantes da interação entre clima úmido, rochas metamórficas e sedimentares são Latossolos e Argissolos com textura argilosa, ao passo em que se aproxima da costa ocorrem solos arenoquartzosos profundos.

Estas características físicas para Barbosa e Nascimento (2010) proporcionaram dois sistemas de aquíferos diferentes entre si. O primeiro é representado pelos aquíferos porosos dos Sistemas Barreiras, Ilhas e Litorâneo Nordeste-Sudeste. Tais sistemas funcionam como coberturas e contribuem para o armazenamento temporário da água devido a sua variabilidade intergranular e porosidade. O segundo é formado pelo embasamento cristalino, que receberá água na zona fraturada, sendo esta proveniente da região das coberturas, e, portanto, constitui o Sistema Aquífero Fraturado Centro-Sul.

2. Materiais e Métodos



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

O método paramétrico GOD foi desenvolvido por Foster (1987) e aprimorado para atender as condições dos países Latino Americanos por Foster e Hirata (1988). Este método baseia-se na análise das três variáveis que o compõem, sendo atribuídos valores de 0,0 a 1,0 para cada parâmetro analisado. Quanto mais próximo de 0, menos vulnerável se encontra, e quanto mais próximo de 1 maior a sua chance de contaminação. As variáveis são:

- A. O confinamento hidráulico (*Groundwater occurrence*): identificação do tipo de confinamento do aquífero, refletindo o seu nível de contato a superfície terrestre, sendo classificados como livre, livre (coberto), confinado, semi – confinado ou jorrante. Com indexação num intervalo de 0,0 a 1,0. Utilizaram-se poços já georreferenciados e com as informações sobre o tipo de confinamento fornecidos pela CERB (Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia), a partir daí, interpolaram-se os mesmos utilizando o algoritmo IDW (*Inverse Distance Weighting*) a fim de buscar uma realidade aproximada em relação a representatividade do confinamento. A justificativa para a utilização do IDW é que o mesmo “implementa explicitamente o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes” (JAKOB e YOUNG, 2006);
- B. Características do estrato de cobertura (*Overall aquifer class*): indexação dos estratos de cobertura, situado acima da zona de saturação do aquífero, incide sobre o grau de consolidação e do tipo de litologia, com valores entre 0,4 a 1,0. Este estrato condiciona o tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de sua atenuação. Para tanto, utilizaram-se dados de geologia fornecidos pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Estudos Minerais) fazendo uma reclassificação a partir do algoritmo *reclassify* dos estratos de cobertura;
- C. Profundidade do aquífero (*Depth to groundwater*): estimativa da profundidade do lençol freático, com valores entre 0,6 e 1,0. Este parâmetro corresponde à distância que o contaminante terá de percorrer para atingir a zona saturada do aquífero. Importante destacar que para as rochas carbonáticas seu valor é constante e igual a 1,0. Os dados de



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

profundidade também foram adquiridos junto a CERB e para a representatividade dela foi utilizado também o algoritmo IDW.

A figura 2.1 representa o diagrama para quantificar cada uma das variáveis (FOSTER et al., 2002.). O índice final integral da vulnerabilidade à contaminação do aquífero é o produto da multiplicação dos três índices, dada pela equação:

$$\text{Índice: } G * O * D$$

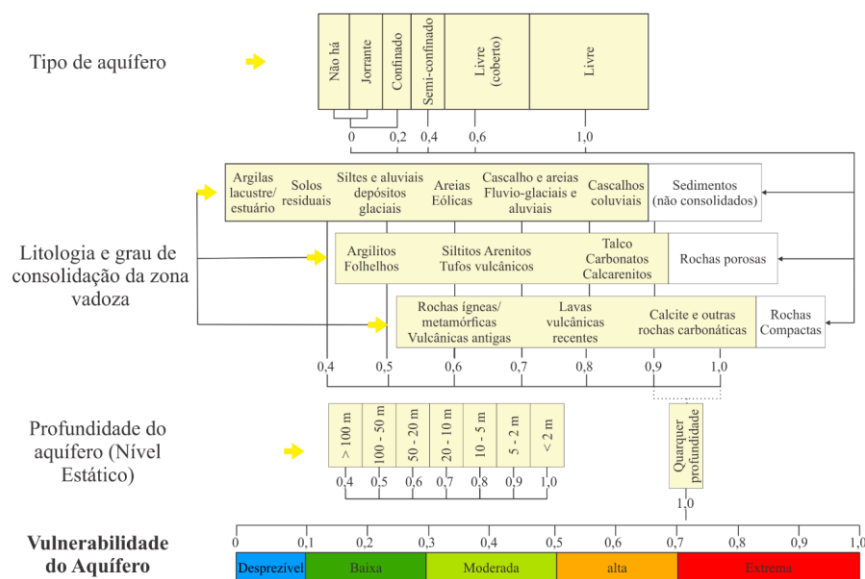


Figura 2.1 Diagrama do método GOD

Fonte: Adaptada de Foster et al., (2002).

3. Resultados

No município de Salvador, próximo a costa, foram encontradas áreas onde o aquífero é jorrante e confinado. Isto decorre da pressão e da impermeabilidade das camadas limítrofes inferiores e superiores. Ainda na costa e na porção litorânea, ocorrem áreas onde o aquífero é semi-confinado, possuindo uma camada limítrofe semipermeável no topo ou na base. A maior parte do município é constituída por áreas de aquíferos livres, onde o limite superior é a superfície de aeração (figura 3.1).



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

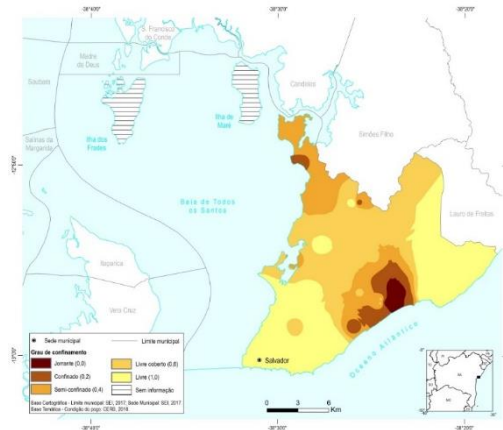


Figura 3.1 Grau de confinamento. Diferentes graus de confinamento para os aquíferos de Salvador decorrente da variada geologia que os compõem.

Em Salvador, grande parte da zona vadosa é formada por solos residuais provenientes da degradação e decomposição das rochas cristalinas do Neoarqueano (2,6 a 2,5 Ga) que compõem o Complexo Salvador-Esplanada. Na porção insular e no litoral leste do município é possível encontrar materiais argilosos, siltosos e arenosos (finos), sedimentados durante o Cretáceo (145 a 66 Ma), na fase *rifte* da Baía de Todos os Santos. Na costa, verifica-se a presença de materiais com textura mais cascalhenta e arenosa, datadas do Cenozoico (66 a 0,0117 Ma). Tais informações podem ser visualizadas na figura 3.2.

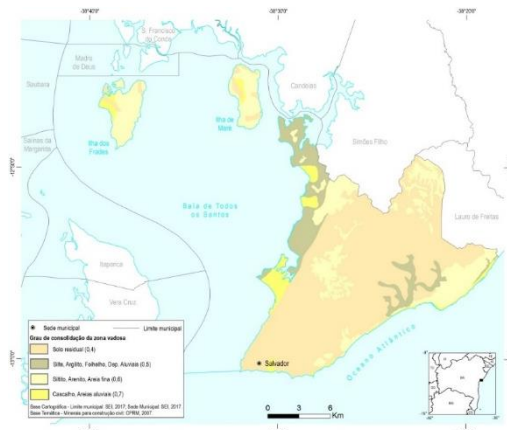


Figura 3.2 Grau de consolidação da zona vadosa. A maior parte do município é formada por solos residuais. Materiais arenosos e argilosos constituem depósitos marinhos na costa.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

Nas áreas costeiras e litorâneas identificaram-se níveis estáticos pouco profundos, contudo, na porção central do município, foi possível verificar a presença de níveis estáticos mais profundos.

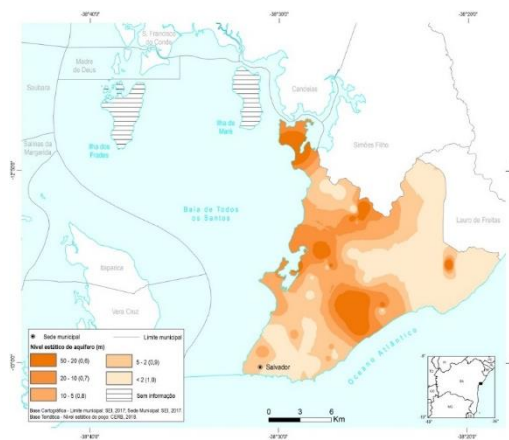


Figura 3.3 Profundidade do nível estático. Os níveis estáticos são menos profundos próximo a costa leste, mais profundos na porção central e na costa oeste.

A vulnerabilidade natural do aquífero foi encontrada a partir da multiplicação dos parâmetros que compõem o método GOD e obteve como resultado quatro padrões: vulnerabilidade desprezível, baixa, moderada e alta.

A área do aquífero que indica vulnerabilidade desprezível ocorre onde o nível estático encontra-se entre 5 a 50 metros e o material que o constitui é argiloso. Isto se dá em decorrência da permeabilidade da zona de aeração, ou seja, uma zona de aeração pouco permeável é um obstáculo à penetração de poluentes no aquífero assim como também a profundidade do nível estático, que permitirá um maior tempo para o deslocamento dos poluentes possibilitando a oxidação dos mesmos.

A vulnerabilidade baixa ocorre em áreas do aquífero que também possuem zona de aeração pouco permeável, no entanto, os níveis estáticos são menores, em torno de 2 a 20 metros, facilitando dessa forma a chegada do poluente à zona saturada.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

Intercorre a vulnerabilidade moderada em áreas de aquífero livre e livre coberto que tenha textura areno-argilosa, com níveis estáticos variando entre 1 a 4 metros, que neste caso, contribuirá para um menor tempo de deslocamento dos poluentes.

A vulnerabilidade alta é verificada em áreas onde o aquífero é livre, ou seja, onde a camada imediatamente superior ao aquífero é formada por uma zona de aeração com textura predominantemente arenosa, que possui como objetivo armazenar água temporariamente. Nestes aquíferos também ocorrem níveis estáticos que não ultrapassam 4 metros.

Por fim, o resultado proveniente da metodologia GOD que mostra a vulnerabilidade dos aquíferos, pode ser analisado na figura 3.4.

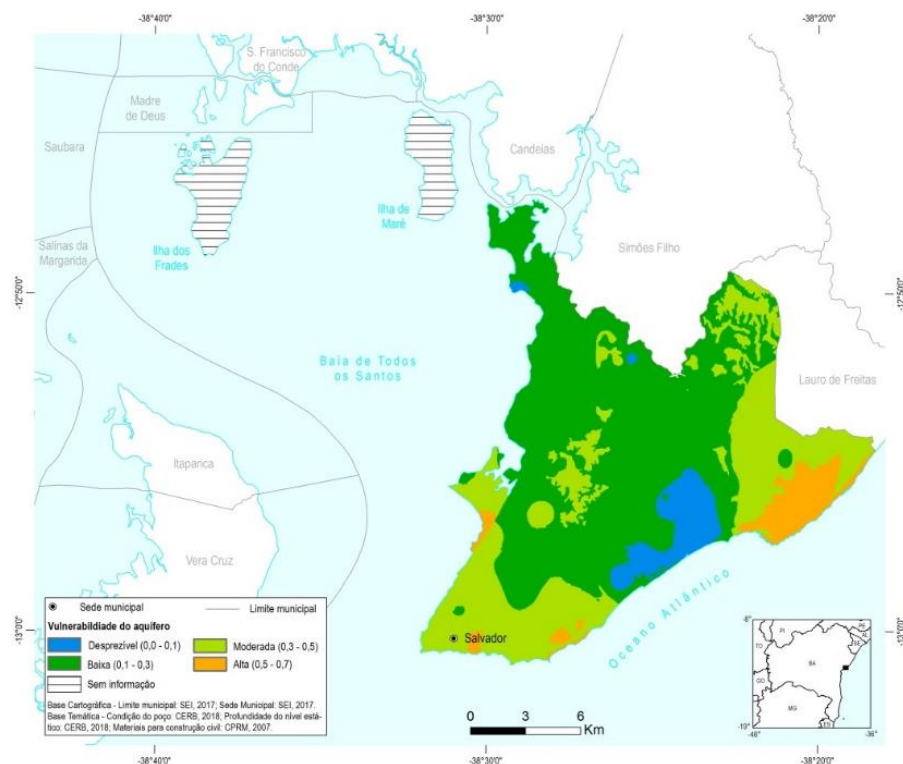


Figura 3.4 Vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos do município de Salvador. A vulnerabilidade foi adquirida através da multiplicação do grau de confinamento, grau de consolidação da zona vadosa e da profundidade no nível estático.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

4. Considerações finais

O método GOD mostrou claramente a vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero no município de Salvador, cuja mesma, está intrinsecamente associada à litologia e as dimensões porosas distintas dos substratos que o compõe, conseqüentemente diferenciando o comportamento hidrodinâmico do aquífero.

Como este método envolve simplificações nas informações hidrogeológicas e geológicas é necessário ter atenção no momento da reclassificação e do tratamento dos dados e na interpretação dos resultados. Ademais, dados de profundidade da água foram utilizados para a elaboração do mapa e como estes variam no tempo e no espaço, é necessário a atualização destas informações assim como também do mapa de vulnerabilidade.

A escolha de uma determinada metodologia depende da quantidade de informações disponíveis e esta técnica utiliza-se de dados relativamente fáceis de adquirir, sendo assim, a mesma pode ser utilizada para prognósticos iniciais como um apoio à gestão ambiental e é voltada para estudos regionais, pois, não considera as atividades antrópicas e contaminantes como um fator que pode vir a potencializar a vulnerabilidade.

Referências Bibliográficas

ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Águas subterrâneas**. Disponível em: <http://www.abas.org.br/index.php?PG=aguas_subterraneas&SPG=aguas_subterraneas_as>. Acesso em: 26 de Novembro de 2018.

ALBINET, M. **La pollution des eaux souterraines**. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 63 A 127, oct. 1963. 127 p.

_____. **Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution**. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 70 SGN 325 HYD, aug. 1970. 31 p.

COSTA, M. H. **Balanco hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1995**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. Engenharia na Agricultura, Caderno didático 19. 22 p. 1994.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

DAUPHINÉ, A.; PROVITOLLO, D. **Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer.** 2^a ed. Paris: Armand Colin, 2013.

EGLER, C. A. G. Risco ambiental como critério de gestão do território: uma aplicação à zona costeira brasileira. **Revista Território.** Rio de Janeiro, v. 1, n.1. p.31 - 41, jul./dez., 1996.

FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. 2008. (orgs.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3^a ed. ver. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, p. 179-207.

FOSTER, S. **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy.** In: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: proceedings and information** n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.

_____, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data.** Peru: WHO/PAHO/EHP, 1988.

_____, S.; et al. **A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies.** Washington: The World Bank, 2002.

IBGE. **Cidades.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ba/salvador/panorama>. Acesso em: 30 de Maio de 2018.

INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.** Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em 03 de Novembro de 2017.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas.** Disponível em: <http://www.nepo.unicamp.br/vulnerabilidade/admin/uploads/producoes/M%C3%A9todosInterpola%C3%A7%C3%A3o.PDF>> Acesso em: 06 de Dezembro de 2018.

KÖPPEN, W. 1948. **Climatologia: com un estudio de los climas de la Tierra.** F. de Cultura. México. 478pp.

LEGRAND, H. E. System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. **Journal American Water Works Association,** Denver, v. 56, n. 8, p. 959-974, aug. 1964.

MANFRON, S., THOMÉ, A. **Métodos para avaliar a qualidade das águas subterrâneas.** Passo Fundo: Poá Comunicação, 2012. 80 p.

MARGAT, J.; ALBINET, M. **La pollution des eaux souterraines par les eaux de surface.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 65 A 96, nov. 1965. 21 p.

MARGAT, J.; MONITION, L.; RICOUR, J. **Eaux souterraines et pollutions radio-actives.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 67 A 132, oct. 1967. 7 p.

_____. **Emploi des eaux souterraines en cas de protection radioactive superficielle.** Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 68 SGL 153 HYD, oct. 1968. 13 p.



XVIII
SBGFA

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA

GEOGRAFIA FÍSICA E AS MUDANÇAS GLOBAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ • FORTALEZA - CE • 11 A 15 DE JUNHO DE 2019

MARGAT, J. Vulnerabilité des nappes d'eausouterraine á la pollution: bases de la cartographie. **Bureau de recherchesgeologiquesetminieres**, Orléans, 68 SGL 198 HYD, nov. 1968. 12 p.

NASCIMENTO, S. A. M; BARBOSA, J. S. F. **Aspectos Hidrológicos do Alto Cristalino de Salvador Bahia**. Disponível em:< <http://www.nehma.ufba.br/wp-content/uploads/2016/03/Revista-Plurais.pdf>> Acesso em: 31 de Outubro de 2017.

PEREIRA, R. A. **Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather**. Disponível em:< <http://www.scielo.br/pdf/brag/v64n2/a19v64n2.pdf>> Acesso em: 20 de Dezembro de 2018.

SALVADOR. **Lei nº 9278 de 20 de Setembro de 2017. Dispõe sobre a delimitação e denominação dos bairros do Município de Salvador**. Disponível em:< <https://leismunicipais.com.br/a2/ba/s/salvador/lei-ordinaria/2017/928/9278/lei-ordinária-n-9278-2017-dispoe-sobre-a-delimitacao-e-denominacao-dos-bairros-do-município-de-salvador-capital-do-estado-da-bahia-na-forma-que-indica-e-da-outras-providencias?q=bairro>> Acesso em: 31 de Outubro de 2017.

THORNTHWAITE, C.W. 1948. **An approach toward & a rational classification of climate**. *Geographical Review*, 38 (1): 55-94.

TUCCI, C. E. M. **Qualidade da água subterrânea**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. *International Association of Hydrogeologist*. Hanover, v 16, 131 p. 1994.

ZWAHLEN, F. (Ed.) **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers: scope, goals results**. Luxembourg: Europeancommission, 2003.