



SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DAS POTENCIAIS FONTES CONTAMINANTES DE AQUIFERO URBANO POR NITRATO

Maurício de Gois Gomes

Brunna Mariane Neri Donato Moura

mauricioggomes95@gmail.com

brunnaneri@hotmail.com

Universidade Federal de Alagoas

Alagoas, Brasil

Luciano Lopes Lima

lucianoll_@hotmail.com

Secretaria do Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos

Alagoas, Brasil

Cleuda Custódio Freire

ccf@ctec.ufal.br

Universidade Federal de Alagoas

Alagoas, Brasil

Resumo. Nas águas subterrâneas espera-se valores de NO_3^- entre 0,1 e 5 mg/L, podendo ocorrer com valores acima de 10 mg/L, tendo como exemplo de fonte de contaminação esgoto sanitário, cemitérios e setores industriais. O NO_3^- apresenta características de alta mobilidade e persistência em águas subterrâneas e sua ingestão está associada a efeitos adversos à saúde. Com isso este trabalho objetiva simular a percolação do nitrato de acordo com o fluxo da água subterrânea utilizando o software Visual MODFLOW e verificar as potenciais fontes contaminantes. No trabalho, desenvolvido no município de Maceió, calibrou-se o modelo computacional para que a simulação de fluxo das águas subterrâneas, e consequentemente do contaminante, represente bem a situação real, exigindo-se conhecimentos físicos da área de estudo. Após isso, adicionou-se partículas no modelo calibrado, para se ter conhecimento da possível fonte de contaminação dos poços através do fluxo simulado. Diante disso, observou-se que tais fontes são os esgotos sanitários residenciais e que 20 poços estavam localizados na direção do fluxo a jusante de cemitérios e indústrias, dos quais 10 estavam com concentrações de nitrato ≥ 5 mg/L e < 10 mg/L e cinco superiores a 10 mg/L, constatando-se a possível relação entre as fontes e os poços contaminados.

Palavras-chave: *Maceió; Modelagem computacional; Visual MODFLOW; Atividades Antrópicas.*

Abstract. *In the groundwater, values of NO_3^- between 0.1 and 5 mg / L are expected, with values above 10 mg / L, taking as an example contamination source sanitary sewage, cemeteries and industrial sectors. Nitrate presents characteristics of high mobility and persistence in groundwater and its ingestion is associated with adverse health effects. With this objective work to simulate nitrate percolation according to groundwater flow, use Visual MODFLOW software and check as potential contaminant sources. In the work, developed in the municipality of Maceió, the computational model was calibrated for the simulation of groundwater flow, and consequently of the contaminant, represents a real situation, requiring physical knowledge of the study area. After this, particles with no calibrated model were added, since the source of contamination of the wells was known through the simulated flow. As a result, it has been observed that such sources are residential sanitary sewage and that 20 wells at destination within the capital and industry flow, of which 10 with all concentrations of nitrate ≥ 5 mg / L and <10 mg / L and five higher than 10 mg / L, showing the possible relationship between sources and contaminated wells.*

Keywords: *Maceió; Computational Model; Visual MODFLOW; Anthropic Activities*

1. INTRODUÇÃO

Devido a alta taxa de perfuração de poços tubulares e em paralelo a de contaminação dos aquíferos por atividade antrópicas, no Brasil, se faz necessária a análise e verificação da qualidade da água subterrânea para melhor gerenciar o recurso hídrico do país (ZOBY, 2008). Com a falta de destinação adequada de esgoto doméstico e industrial, os aquíferos urbanos estão mais propensos à contaminação, sendo o nitrato o contaminante com maior frequência em aquíferos no mundo (Reynolds-Vargas et al. 2006).

De acordo com Barbosa (2005), o nitrato ocorre naturalmente em águas subterrâneas, mas a sua presença em concentrações elevadas usualmente é resultante de atividades humanas. Segundo a USEPA (2000) isso ocorre porque essa substância não é encontrada em rochas da crosta terrestre e representa o estágio final de degradação da matéria orgânica. Dentre tais atividades ele se origina, principalmente, de quatro fontes (BAIRD; CANN, 2011):

- Aplicação de fertilizantes com nitrogênio, bem como inorgânicos e de esterco animal, em plantações;
- Cultivo do solo;
- Esgoto humano depositado em sistemas sépticos;
- Deposição atmosférica.

No estado de São Paulo, Cagnon & Hirata (2004, *apud* VARNIER, 2010) verificaram uma relação direta entre a urbanização e a contaminação das águas subterrâneas por nitrato devido ao uso de fossas, para os municípios de Urânia. Nos Estados Unidos, no Estado de Montana, Drake & Brauder (2005) verificaram o aumento nas concentrações de nitrato devido ao crescimento populacional associado ao aumento do uso de sistemas sépticos. Já no estado do Arizona, XU *et. al.* (2007) constatou uma redução de concentração de nitrato em áreas que eram utilizadas para agricultura e se tornaram urbanizadas. No entanto, observou o aumento em áreas que antes não eram ocupadas e foram urbanizadas. Verificando assim a influência do tipo de uso do solo na sua contaminação.

Além dessas, existem também as fontes de contaminação pontual por nitrato destacando-se os cemitérios (Campos, 2007), e determinados setores industriais. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2008), indústrias farmacêuticas também geram efluentes com presença de compostos nitrogenados.

A ingestão de água com presença do nitrato está associada a dois efeitos adversos à saúde: a formação potencial de nitrosaminas e nitrosamidas carcinogênicas e a indução à metemoglobinemia, composto que diminui a capacidade do sangue de transportar oxigênio. (Alaburda et al., 1998). Sendo assim, de acordo com a Portaria MS Nº 2914/2011 e o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) a partir da resolução nº 396/2008 é estabelecido que o valor máximo permitido (VMP) de nitrato para águas potáveis é de 10 mg/L. Porém, estudos mostram que o nitrato ocorre em águas subterrâneas em concentrações que variam de 0,1 a 5 mg/L. Logo, valores de concentrações acima de 5mg/L devem ser investigados e valores superiores a 10 mg/L indicam de contaminação antrópica (IGAM, 2013).

O nitrato apresenta características de alta mobilidade (muito solúvel) e persistência em águas subterrâneas, podendo então contaminar extensas áreas (Varnier, 2010). Esse fator é preocupante diante do crescimento populacional e urbano da Região Metropolitana de Maceió, onde, segundo a CASAL (2017), o sistema de coleta de esgotos sanitários atende apenas cerca de 35% da população, sendo o principal sistema utilizado as fossas sépticas e sumidouros. Somado a isso, a principal fonte de abastecimento de água são os aquíferos, respondendo por

cerca de 68% da vazão produzida na capital (CASAL, 2017), podendo então a água subterrânea captada estar contaminada por nitrato devido às possíveis contaminações das fossas sépticas.

Para a modelagem matemática representar o comportamento físico real da água subterrânea através da solução de equações numéricas é necessário o levantamento e interpretação de dados e observações da situação real. A alimentação do modelo com essas informações em condições adequadas e suficientes possibilitam a calibração do modelo matemático a fim de aproximar a representação simplificada pelo próprio modelo e o sistema real (WANG & ANDERSON, 1982). Neste sentido, a utilização desses modelos auxilia às decisões de planejamento e gestão, podendo-se prever, por meio de simulações, os potenciais efeitos ambientais de um empreendimento, como também as consequências de uma determinada ação proposta (ANDERSON & WOESSNER, 1992; PELUSO, 2006).

De acordo com Pollock (1994), o MODPATH é um modelo utilizado para o rastreamento de partículas imaginárias, de tamanho infinitamente pequeno, adicionadas no fluxo simulado pelo MODFLOW, por meio da interpolação linear e uma solução semi-analítica para movimentar as partículas. O caminhar das partículas apresenta o percurso percorrido, em função do processo de advecção, e o tempo de deslocamento até a superfície de carga ou até o término do tempo estabelecido na simulação. Essa identificação da trajetória das partículas inseridas no modelo permitem a determinação das direções preferenciais de evolução de pluma de contaminação (BERNICE, 2010).

A velocidade de fluxo simulado, calculado a partir das cargas hidráulicas contidas no modelo computacional, resulta na movimentação das partículas inseridas, permitindo a determinação das linhas de trajetórias. As partículas podem se movimentar para trás ou para frente a partir da sua origem. Com isso, é possível conhecer o ponto de partida ou destino das partículas inseridas no modelo, e assim identificar áreas de capturas de poços ou direções das trajetórias de plumas de contaminação (IRITANI, 1998).

Os modelos de fluxo e transporte são ferramentas importantes para a tomada de decisões em relação ao gerenciamento de recursos hídricos. A sua integração com os modelos de risco de saúde espacial nos ambientes GIS permite não apenas ter ferramentas prospectivas para analisar os potenciais efeitos ambientais de um empreendimento, como no caso estudado, mas também contextualizar esses estudos no quadro do planejamento urbano.

No estudo de Banejad *et. al.* (2014), o modelo computacional MODPATH foi utilizado para calcular os tempos e distâncias dos percursos das partículas inseridas no fluxo de águas subterrâneas, como também para uma análise reversa no intuito de observar a potencial origem dos contaminantes que são captados nos poços. Dessa forma, o conhecimento da fonte de poluentes e sua trajetória permitem que as contaminações previstas sejam evitadas. Já Shamsuddin *et. al.* (2014) utilizou o modelo MODPATH para estimar o tempo de viagem e construir as linhas de caminho da água do rio que infiltra no aquífero e são capturadas pelo bombeamento de um poço.

Desse modo, este trabalho tem como objetivo simular a trajetória do nitrato de acordo com o fluxo da água subterrânea utilizando a modelagem computacional através do *software Visual MODFLOW* e verificar as potenciais fontes contaminantes.

2. METODOLOGIA

No trabalho, desenvolvido no município de Maceió em uma área de 229 km², efetuou-se um novo ajuste do modelo computacional calibrado antes por Menezes (2011) no *software visual MODFLOW* para que a simulação de fluxo das águas subterrâneas, e consequentemente

do contaminante, represente bem a situação real. Para isso exigiu-se conhecimentos da área de estudo como: topografia; recargas hidráulicas; tipos e profundidades dos aquíferos; constantes hidráulicas; carga piezométrica dos corpos hídricos superficiais; níveis estáticos e profundidades dos poços tubulares distribuídos na área de estudo, dentre outras informações.

Para a estimativa das recargas hidráulicas, utilizaram-se informações das recargas naturais e artificiais. A primeira é proveniente do balanço hídrico entre o volume precipitado e evapotranspirado nas regiões densas e 10% da precipitação em áreas urbanizadas (NOBRE, 2006). Já as segundas provêm de perdas na rede de distribuição de água, que para área de estudo a concessionária responsável pela rede estima em 40% de perdas para os 6 milhões de m³ produzidos mensalmente (CASAL, 2017).

Obtiveram-se dados de níveis estáticos de aproximadamente 650 poços tubulares distribuídos na área de estudo, para o período de 1970 a 2016. Os dados foram obtidos pelo Projeto ASUB-AL, desenvolvido pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), e pelos estudos hidrogeológicos exigidos pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH) para a outorga das captações.

Após a simulação do fluxo verificou-se o coeficiente de correlação (R) entre os níveis piezométricos observados e os níveis calculados pelo modelo, sendo o primeiro os níveis estáticos observados nos poços tubulares e não os níveis dinâmicos, pois estes últimos sofrem interferências de bombeamentos, o que causam rebaixamentos do lençol freático em torno do poço perfurado, modificando assim a condição natural. Neste trabalho considerou-se que para $R \geq 0.7$ o modelo está representando satisfatoriamente as condições reais de fluxo e distribuição das águas superficiais nos aquíferos da área de estudo. Após isso, adicionou-se partículas no modelo calibrado, para se ter conhecimento da possível fonte de contaminação dos poços através do fluxo simulado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a inserção no modelo das informações conhecidas referentes à área de estudo (figura 1-a) para a calibração, obteve-se a simulação dos níveis piezométricos e fluxo das águas subterrâneas (figura 1-b) da área de estudo. Com a simulação do fluxo verificou-se o coeficiente de correlação (R) igual a 0.711 para o período analisado.

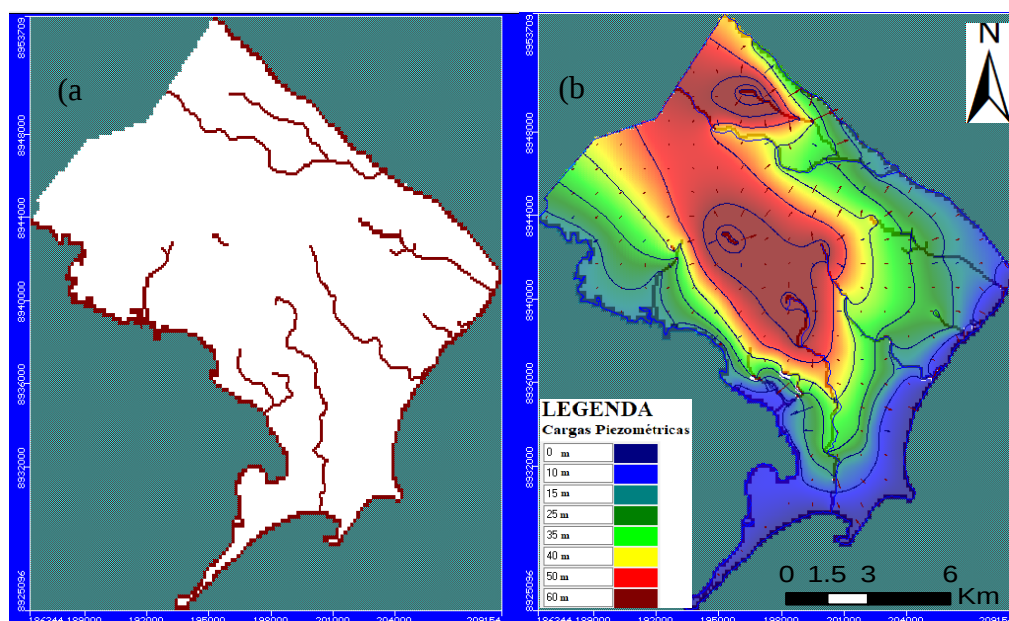


Figura 1- a- Cargas piezométricas constantes em corpos hídricos; b- Simulação dos níveis piezométricos e fluxos da água subterrânea.

Na figura 2 pode-se observar o fluxo no modelo calibrado das partículas inseridas nos locais que são considerados possíveis fontes de contaminação dos poços por nitrato, sendo esses uma indústria farmacêutica (LF1), duas de fertilizantes (F1 e F2) e sete cemitérios (C).

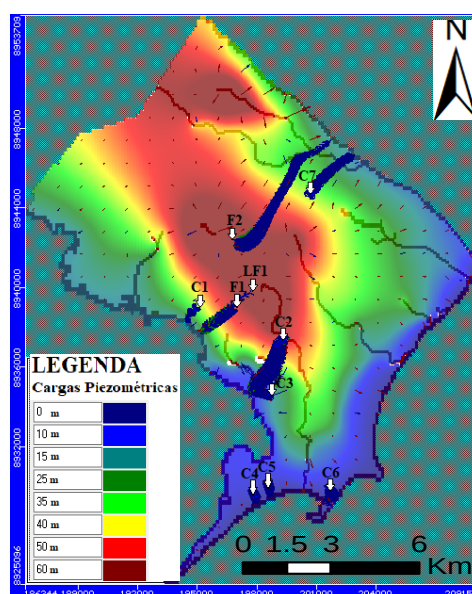


Figura 2 – Simulação de fluxo com inserção de partículas.

Com a introdução de poços próximos às fontes pontuais de contaminação por nitrato analisou-se uma possível relação entre as concentrações de NO_3^- observadas nesses poços e a direção do fluxo da água subterrânea. Na figura 3a e 3b são observadas áreas com poços localizados na direção do fluxo a jusante de tais fontes.

Na figura 3a estão presentes uma indústria de fertilizantes, uma farmacêutica, três cemitérios e 15 poços, dos quais nove estavam com concentrações de nitrato maior ou igual a 5 mg/L e menor que 10 mg/L e quatro com concentrações superiores a 10 mg/L. Já na figura 4, tem-se uma indústria de fertilizantes e sete poços, dentre estes apenas um teve valor de nitrato

superior a 10 mg/L. A tabela 1 apresenta dados de concentrações observadas nos poços citados, localizados a jusante ou próximos das fontes.

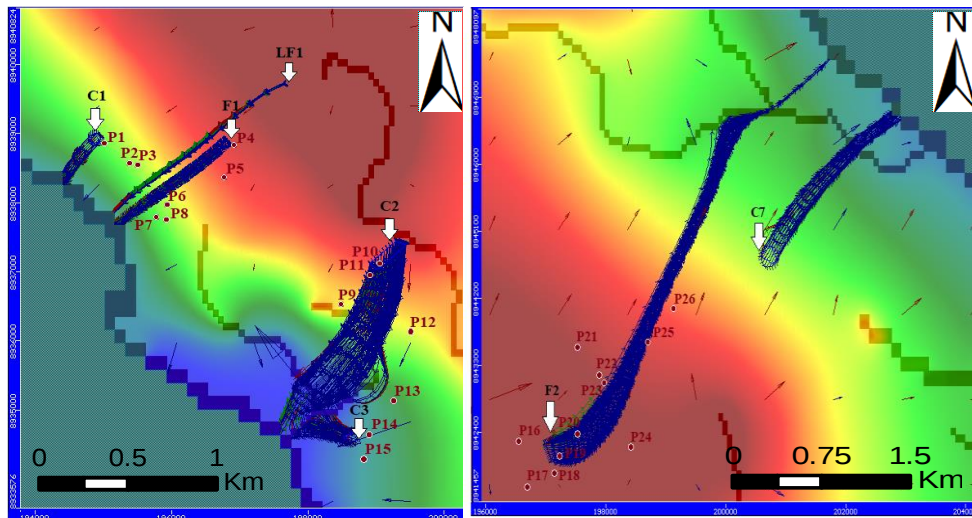


Figura 3 – Poços localizados a jusante do fluxo de fontes pontuais de nitrato.

Tabela 1 – Concentração de nitrato nos poços.

Poço	NO ₃ (mg/L)	Poço	NO ₃ (mg/L)
P1	15,8	P14	7,84
P2	6,38	P15	8,83
P3	17,36	P16	0,86
P4	8,58	P17	2,1
P5	9,71	P18	8,18
P6	18,89	P19	35,1
P7	12,63	P20	7,93
P8	9,49	P21	1,34
P9	2,73	P22	3,54
P10	6,96	P23	8,66
P11	7,2	P24	1,87
P12	8,29	P25	3,11
P13	3,67	P26	3,68

A figura 4, apresenta além da trajetória da água subterrânea até chegar a poços específicos da região os quais apresentam elevadas concentrações de nitrato, a localização desses poços através do Google Earth. Com isso, indícios das possíveis fontes de contaminação desses poços são percebidos, pois os mesmos estão localizados em bairros com alta ocupação do solo, e não contemplados com a rede coletora de esgotos, cujo sistema para destinação final de esgoto é Fossa Séptica e Sumidouro, também considerado como um potencial contaminante da água subterrânea por nitrato.

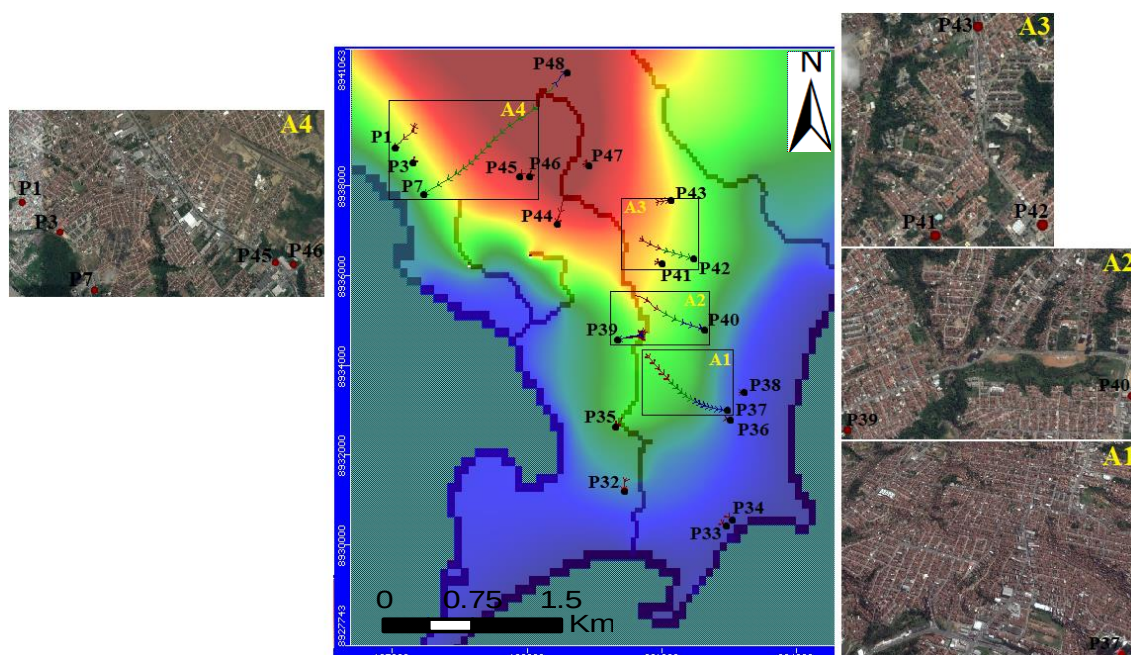


Figura 4 – Trajetória da água subterrânea até os poços e a localização destes.

Tabela 2 – Concentração de nitrato nos poços.

Poço	NO ₃ (mg/L)
P32	16.46
P33	11.19
P34	15.46
P35	23.55
P36	15.34
P37	29.45
P38	13.49
P39	25.31
P40	23.12
P41	11.41
P42	20.91
P43	14.92
P44	12.83

4. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados constatou-se uma possível relação entre as fontes de contaminação pontuais citadas e os poços com concentrações de nitrato acima do esperado, indicando que estas estejam contribuindo para a contaminação da água subterrânea da na área de estudo. Observando os dados de concentração de nitrato dos poços localizados na direção do fluxo da água subterrânea a jusante de tais fontes, verificou-se que cerca de 19% deles apresentam valores acima de 10mg/L, valor máximo permitido para potabilidade, e 42% estão entre 5 e 10 mg/L de concentração de nitrato em suas águas, indicando contaminação antrópica.

Analisando as trajetórias das partículas inseridas no modelo, notou-se também que poços contaminados, ou seja, com concentração de nitrato acima de 10 mg/L, estão situados em uma

área não atendida pela rede de coleta de esgotos sanitários, tendo-se como principal sistema para destinação final de esgoto a fossa séptica e sumidouro, indicando ser este um agente contaminante.

REFERÊNCIAS

- ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em águas de poços. *Revista de Saúde Pública*, v. 32, n. 2, p. 160-165, 1998.
- ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press, 381 p. 1992
- BAIRD, C.; CANN, M. (2011). *Química Ambiental*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman.
- BARBOSA, C. F. Hidro geoquímica e a contaminação por nitrato em água subterrânea no bairro Piranema, Seropédica-RJ. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Geociências no Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Campinas – São Paulo. 2005.
- BANEJAD, H.; MOHEZADEH, H.; GHOBADI, M.; HEYDARI, M. (2014). Numerical simulation of groundwater flow and contamination transport in nahavand plain aquifer, west of Iran. *Journal Geological Society of India*, Vol. 83, pp. 83-92.
- BERNICE, A. M., *Evolução da Contaminação por Nitrato em Aquíferos Urbanos: Estudo de caso em Urânia(SP)*. Dissertação (Mestrado) - Curso Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.
- CAMPOS, A. P. S. Avaliação do potencial de poluição no solo e nas águas subterrâneas decorrente da atividade cemiterial. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Companhia de Saneamento de Alagoas - CASAL (2017). Disponível em: <http://casal.al.gov.br/capital/>. Acessado em 29/08/2017.
- Companhia de Saneamento de Alagoas - CASAL (2017). Disponível em: <http://casal.al.gov.br/atuacao/esgotamento-capital/>. Acessado em 29/08/2017.
- CONAMA 396. Conselho Nacional de Meio Ambiente (2008). Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Resolução nº 396 de 03 de abr. de 2008. Diário Oficial, Brasília, DF. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/CONAMA>>.
- DRAKE, V.M.; BAUDER, J.W. Groundwater nitrate-nitrogen trends in relation to urban development, Helena, Montana, 1971-2003. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 25(2): 118-130. 2005.
- Instituto Mineiro de Gestão de Águas - IGAM (2013). Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas de Minas Gerais: Guarani e Bambuí. Belo Horizonte, p. 62 – 155.
- Ministério do Meio Ambiente - MMA (2008). Lançamento de efluentes. Informação Técnica nº 175/08/CGASQ/DIQUA.
- NOBRE, R. Avaliação de risco para o uso e proteção de aquíferos – Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió. Setembro de 2006. Tese (Doutorado) – Doutorado em Ciências em Engenharia Civil no Programa de pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 2006.

- PELUSO, F. *et al.* (2006). Evaluación preventiva espacial del riesgo sanitario por la instalación de un cementerio parque. *GeoFocus (Informes y comentarios)*, nº 6, p. 1-14. ISSN: 1578-5157
- POLLOCK, D. W. Users guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, open file report 94-464, 1994.
- REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE-MERINO, J.; HIRATA, R. (2006). Trends in nitrate concentrations and determination of its origin using stable isotopes (^{18}O and ^{15}N) in groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 35(5), p.229-236.
- SHAMSUDDIN, M.; Suratman, S.; Zakaria, M.; Aris, A.; Sulaiman, W. (2014). Particle tracking analysis of river-aquifer interaction via bank infiltration techniques. *Environ Earth Sci* 72:3129–3142.
- DOI 10.1007/s12665-014-3217-6 U.S. Environmental Protection Agency – USEPA. (2000). Onsite Wastewater Treatment Systems Manual. EPA 625/R-00/-012. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water Programs, Washington, DC.
- VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; VIOTTI, M.; ODA, G.H.; FERREIRA, L.M.R. Nitrato nas águas subterrâneas do sistema aquífero bauru, área urbana do município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, v.31 (1/2), p.1-21, 2010.
- WANG, H. F., ANDERSON, M. P. Introduction to Groundwater Modelling: Finite Difference and Finite Element Methods. San Diego, California, USA: Academic Press Limited, 1995.246p.
- XU, Y.; BAKER, L.A.; JOHNSON, P.C. Trends in ground water nitrate contamination in the Phoenix, Arizona Region. *Groundwater Monitoring and Remediation*, 27(2): 49-56. 2007.
- ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, Natal, Supl. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.