

## MODELAGEM DA INTRUSÃO SALINA EM AQUÍFERO COSTEIRO

*Aryane Mota de Oliveira*<sup>1\*</sup>; *Pedro Henrique de Omena Toledo*<sup>2</sup>; *Cleuda Custódio Freire*<sup>3</sup>

**Resumo** – A qualidade da água subterrânea sempre foi considerada excelente, porém a crescente perfuração de poços sem os devidos cuidados tem causado danos aos aquíferos. Os aquíferos costeiros possuem maior fragilidade ambiental devido à proximidade com a água do mar. Neste trabalho foi aplicado o código computacional SEAWAT para avaliar o comportamento da cunha salina em sistema aquífero costeiro, tendo como estudo de caso o sistema Barreira/Marituba na costa de Parte da Região Metropolitana de Maceió-AL. A calibração do modelo foi realizada em duas vertentes, fluxo subterrâneo e concentração de salinidade. Foi estabelecido um cenário para verificar o efeito da exploração na cunha salina para o ano de 2025 considerando a exploração existente até 2015. O resultado apontou para o avanço da cunha salina em duas áreas do domínio e recuo em terceira região, além da formação de cones com ascensão vertical da água do mar.

**Palavras-Chave** – Sistema Aquífero Barreira/Marituba, SEAWAT, Impactos Ambientais.

## MODELING OF THE SALINE INTRUSION IN AQUÍFERO COSTEIRO

**Abstract** – The quality of the groundwater has always been considered excellent, but the increasing drilling of wells without proper care has caused damages to the aquifers. Coastal aquifers have greater environmental fragility due to their proximity to sea water. In this work the SEAWAT computational code was applied to evaluate the behavior of the salt wedge in a coastal aquifer system, having as a case study the Barreira / Marituba system on the coast of Part of the Maceió-AL Metropolitan Region. The calibration of the model was performed in two slopes, underground flow and salinity concentration. A scenario was established to verify the effect of the exploitation in the salt wedge for the year 2025 considering the existing exploitation until 2015. The result pointed to the advance of the salt wedge in two areas of the domain and retreat in the third region, besides the formation of cones With vertical rise of sea water.

**Keywords** – Barreira/Marituba Aquifer System, SEAWAT, Environmental Impacts.

## INTRODUÇÃO

A região costeira é reconhecida como área de maior densidade populacional no mundo (CUSTODIO, 1987) e quando a água superficial não atende as necessidades, faz-se uso das águas subterrâneas. Aquíferos costeiros estão vulneráveis ao avanço da cunha salina, pois além da localização, podem sofrer superexploração e uma das possíveis causas é a falta de gestão. Segundo Bouderbala (2014) a salinização em aquíferos costeiros é muito preocupante e causa perdas econômicas substanciais, o que provoca a redução da qualidade de aquíferos de água doce.

Os sistemas aquíferos Barreiras e Marituba, alvo do trabalho, isolados ou em conjunto, são considerados como de média potencialidade. Eles representam os principais aquíferos de Maceió, e vêm sendo exaustivamente explorados para abastecimento público, privado e industrial. Isto causa constante alteração no sentido original do fluxo subterrâneo, criando centros de fluxos radiais; além

<sup>1</sup> Doutoranda da Universidade Federal de Pernambuco, aryry\_mota@hotmail.com.

<sup>2</sup> Doutorando da Universidade Federal de Pernambuco, ph\_mcz@hotmail.com.

<sup>3</sup> Docente da Universidade Federal de Alagoas, ccf@ctec.ufal.br.

disso, o rebaixamento excessivo da superfície potenciométrica, em alguns bairros, está acarretando depleção das reservas permanentes e salinização pelo desequilíbrio da zona de mescla (ROCHA, 2005).

Uma forma mais abrangente de perceber o avanço da cunha salina no aquífero é a modelagem do sistema. Neste sentido, o SEAWAT é um código que foi desenvolvido pela combinação do MODFLOW e MT3DMS para simular em três dimensões o fluxo subterrâneo com densidade variável utilizando a concentração de salinidade para estimar a densidade dos fluidos e assim determinar a intrusão da cunha salina no aquífero. A salinidade é representada pelos sólidos totais dissolvidos, por possuírem valores muito próximos (GUO e LANGEVIN, 2002). Além disso, o SEAWAT está sendo utilizado e fornece bons resultados (DING et al., 2014; COBANER et al., 2012).

Não foram constatados estudos de modelagem que representem a salinização de sistema aquífero na área de interesse. A vulnerabilidade do aquífero na região urbana de Maceió/AL, bem como a constatação de salinização de alguns poços de captação de água subterrânea já foram alvos de estudo (SILVA, 2013; ROCHA, 2005). No entanto, ainda se percebe a carência de estudos que subsidiem a gestão dos mananciais subterrâneos no que diz respeito à intrusão salina.

Neste contexto, o seguinte trabalho teve por objetivo modelar a salinização do sistema aquífero Barreira/Marituba em parte de parte da Região Metropolitana de Maceió - RMM. Para tanto, um cenário foi simulado considerando as explorações existentes até o ano de 2015 utilizando o código computacional SEAWAT, visando verificar o avanço da cunha salina para o ano de 2025 considerando apenas os poços existentes até o ano de 2015.

## **ÁREA DE ESTUDO**

O presente estudo será realizado na Região Metropolitana de Maceió – RMM, contemplando parte dos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte, localizados no Estado de Alagoas; tal região situa-se em bacia sedimentar e limita-se ao norte com a Região Hidrográfica do Pratagy, ao sul com a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú e o Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba - CELMM, a oeste pela linha da falha principal no contato com o cristalino e a leste pelo oceano Atlântico (MENEZES JR, 2011), como pode ser observado na Figura 1, e possui cerca de 292 km<sup>2</sup> (NOBRE, 2006). Esta mesma delimitação foi utilizada pelo Projeto ASUB (2011), o qual realizou alguns estudos voltados à água subterrânea.

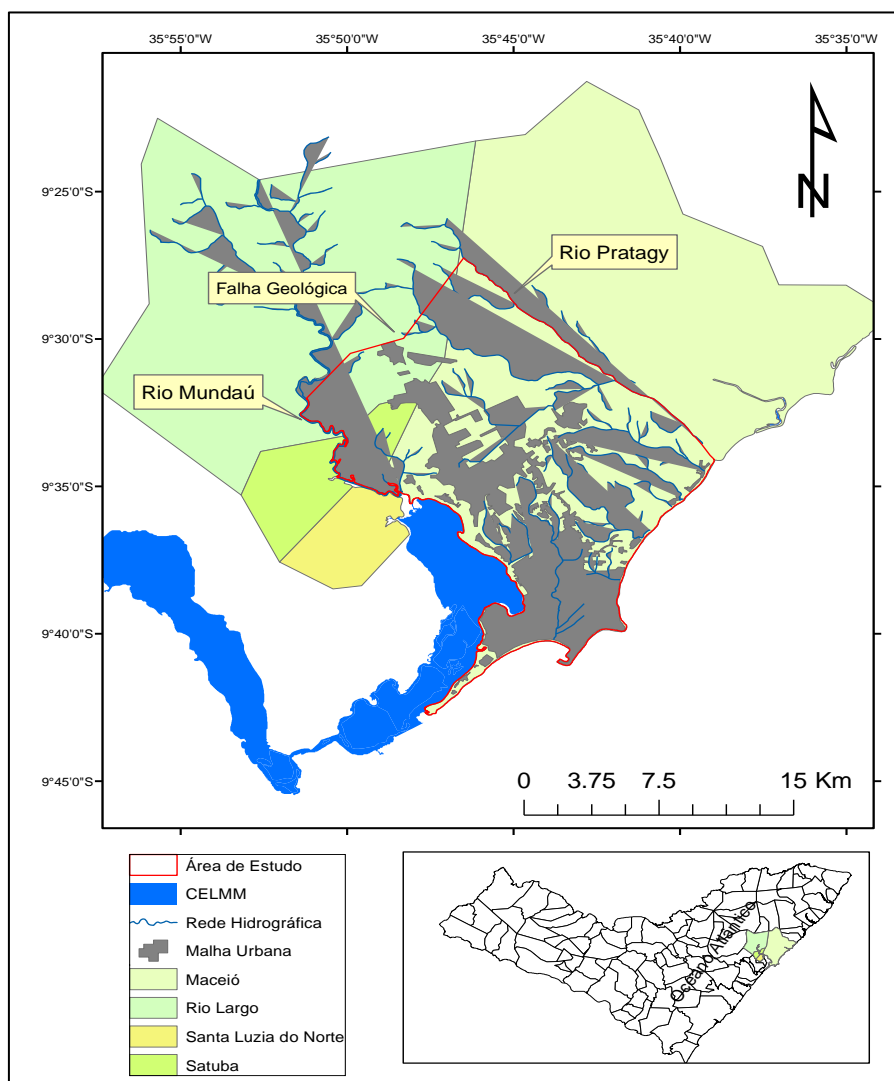


Figura 1- Área de Estudo, parte da Região Metropolitana de Maceió

## METODOLOGIA

### Calibração do Modelo Computacional

O objetivo da calibração consiste em preparar o modelo matemático SEAWAT para que ele possa representar o fenômeno natural o mais próximo possível da realidade. A calibração realizada por Menezes Jr. (2011), a qual representa o fluxo subterrâneo sem qualquer contaminação ou bombeamento, foi realizada na mesma área de estudo do presente trabalho; portanto foram extraídas algumas entradas deste modelo para adaptar a calibração ao atual modelo, dando ênfase a região costeira.

As condições de contorno da área de estudo são bem definidas por contornos físicos; são eles: Lagoa e Rio Mundaú, Rio Pratagy, Oceano Atlântico e uma Falha Geológica. Sendo a Lagoa e o Rio Mundaú, o Oceano Atlântico, o Rio Pratagy, o Rio Messias, o Rio Jacarecica e o Rio Reginaldo as cargas fixas, que representam o afloramento da água subterrânea na superfície.

O eixo foi rotacionado, de forma a melhorar o refinamento na região costeira do Oceano Atlântico e desta forma, também, diminuir o tempo para gerar resultados pelo SEAWAT. As cargas hidráulicas fixas foram inseridas e direcionadas ao *layer* apropriado.

As topografias de superfície, formação Barreiras e formação Marituba foram exportadas do modelo de Menezes Jr. (2011) e importadas para o SEAWAT, essas duas camadas foram divididas em doze *layers* cada.

O tempo para convergência do modelo foi um fator que impossibilitou o refinamento maior das camadas do domínio. A inserção de novos poços de nível estativo - NE também teve relação direta com a melhoria da calibração do modelo de fluxo. Foram inseridos 55 poços de NE além daqueles que foram utilizados por Menezes Jr. (2011). Os poços de observação não são envolvidos no cálculo do fluxo, funcionam apenas para calibrar o modelo.

Além disso, algumas variáveis para calibração do modelo de fluxo subterrâneo foram exportadas do modelo de fluxo realizado por Menezes Jr. (2011) e importadas para o SEAWAT, assim como foram realizadas algumas modificações e inserção de novas informações.

A porosidade efetiva foi fixada em 0.15 e a porosidade total em 0.3 para todas as camadas do modelo (MENEZES JR., 2011).

A condutividade foi exportada do modelo de Menezes Jr. (2011) e importada para o atual modelo, e os valores interpolados foram multiplicados por 10 e se mantiveram na faixa de valor adequada, numa faixa de variação entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ , alguns perfis de sondagem realizados na cidade de Maceió evidenciaram a presença de areia argilosa e areia siltosa, além de outras areias de diferentes granulometrias (Marques e Marques, 2005). Desta forma, encontram-se dentro da faixa de condutividade hidráulica específica para o tipo de solo.

O armazenamento específico para a formação Barreira e Marituba foi fixado em  $1.10^{-5} m^{-1}$  (MENEZES JR., 2011).

A recarga foi fixada em 300 mm/ano para toda região, valor médio dentro da interpolação anteriormente utilizada.

Após a calibração do fluxo subterrâneo foi dado início a inserção das variáveis para calibração da concentração de salinidade no aquífero, são eles:

- Concentração Inicial e Concentração Constante: esses dois parâmetros permitem a inserção do valor de concentração de sal no domínio. O parâmetro de salinidade é muito próximo ao valor de concentração dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (GUO e LANGEVIN, 2002; SEFELNASR e SHERIF, 2014). A água subterrânea foi considerada com uma concentração inicial de sal variável espacialmente, de acordo com interpolação de dados observados, utilizando o software ArcGis. A interpolação contou com dados de concentração de Sólidos Totais Dissolvidos entre dos anos de 2014 e 2015, para isso os valores de Condutividade Elétrica foram convertidos, Cobaner et al. (2012) utilizou o valor de 0.64 como conversor, por considerar um valor médio de conversão, o mesmo foi feito para o presente trabalho. A união dos dados de vazões outorgadas e a concentração inicial trouxe o modelo para o ano de 2015. Manualmente, foram inseridas as regiões com os valores de STD para o domínio e o valor de 35.000 mg/L STD para a linha da costa, para a variável de concentração inicial. A variável de concentração constante representa a fonte de contaminação do aquífero, portanto foi definida apenas na linha costa do Oceano Atlântico.

- Poços de Bombeamento: para realizar a calibração do modelo para a concentração foram inseridos poços de bombeamento, perfurados desde 1979 até 2015, totalizando 342 unidades, neste caso, foram considerados apenas os poços com vazão outorgada. É certo que essa quantidade de poços não é exatamente a quantia de poços perfurados, porém foi a quantidade com dados disponíveis para esse período, pois além das falhas existentes nos próprios dados oficiais, ainda existem perfurações de poços clandestinos, assim como pode ter ocorrido a desativação de algum poço.

- Poços de Observação de Concentração: os valores de Condutividade Elétrica foram convertidos em STD e inseridos no modelo (Cobaner et al., 2012). Para tanto, foram consideradas as análises realizadas nos anos de 2014 e 2015. Os poços de observação não influenciam nas resoluções das equações do modelo, apenas funcionam para calibrar o mesmo.

### **Simulação do Cenário**

O objetivo do cenário foi perceber o avanço da cunha salina após 10 anos com atual exploração, ou seja, utilizando apenas os poços outorgados até o ano de 2015, desta forma, foi verificada a influência da exploração no avanço da cunha salina após 10 anos, ou seja, para o ano de 2025, considerando que não houvesse mais perfuração de poços neste período.

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **Modelagem do Fluxo Subterrâneo**

Uma análise sistemática realizada por Al-Maktoum et al. (2007) afirma que o código SEAWAT é sensível a escolha de dimensão da rede, passo de tempo e esquema numérico para problemas de fluxo instáveis. E sugere o tamanho da grade de 0,38 e 0,60% do total do comprimento e profundidade do domínio, respectivamente, para gerar resultados com exatidão aceitáveis.

Devido ao gasto computacional, neste trabalho a discretização das camadas foi de aproximadamente 3% da profundidade do domínio, salvo variações devido à topografia. Os aquíferos Barreira e Marituba foram divididos em um total de 24 camadas.

O modelo calibrado obteve coeficiente de correlação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas de 0,764. Devido aos erros na superfície topográfica do modelo, na qual é derivada de modelo digital de elevação com resolução de 90 m, que pode influenciar no nível de água do aquífero gerado pelo modelo, o resultado da calibração foi considerado satisfatório.

### **SEAWAT**

O modelo para representar as condições de sal no aquífero foi calibrado para o ano de 2015 e contendo 342 poços de bombeamento além das condições hidrogeológicas da área. Como referência de condição inicial de sal no aquífero foi gerada em ambiente GIS (Geographic Information System) por meio de interpolação uma superfície de sal para toda a região utilizando valores pontuais amostrados. O resultado da calibração apresentou um coeficiente de correlação entre as concentrações calculadas e observadas de 0,682. A figura 2 mostra o resultado das condições de salinidade e fluxo do sistema aquífero após calibração. Neste sentido, foi obtida a situação da superfície e perfil de concentração salina para o ano de 2015.



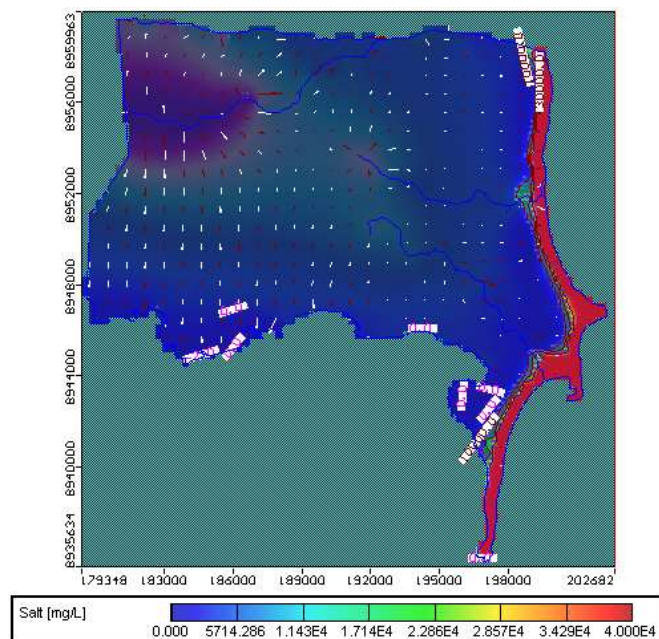


Figura 2 - Superfície de Concentração de sal para o ano de 2015

### Cenário de Simulação

A simulação do cenário mostra que há avanço da cunha salina principalmente em duas regiões, nas proximidades da foz do Rio Jacarecica e na região B, como está destacado na Figura 3. Percebe-se também uma mudança na interface entre a água doce e a água do mar na região A, onde ocorre recuo da água do mar. Estes locais são mais sensíveis a novas perfurações devido apresentarem modificação na zona de mescla.

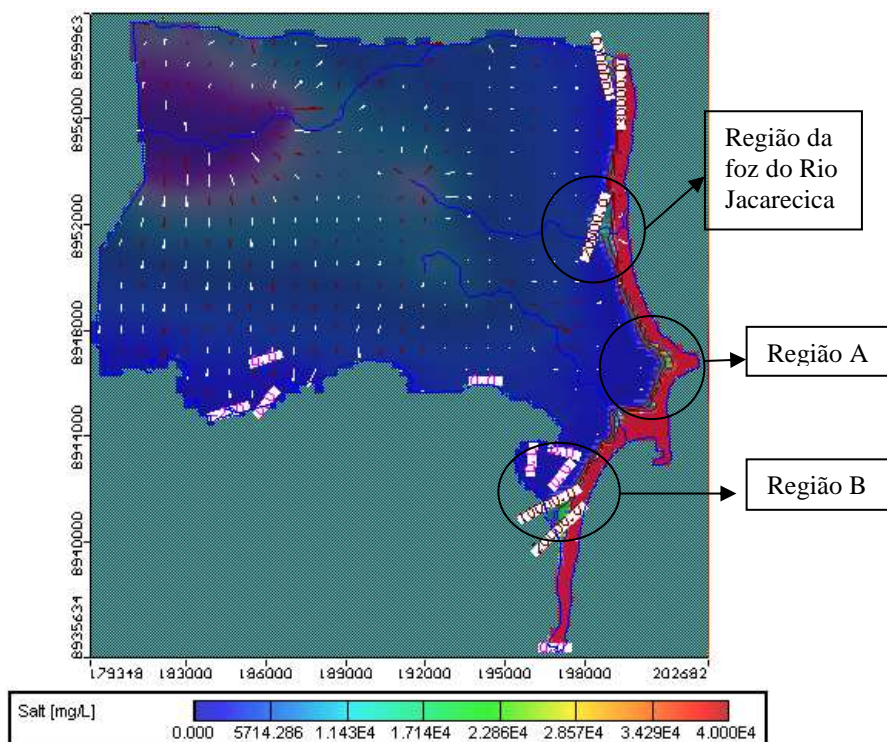


Figura 3 - superfície salina e identificação das zonas

Através da comparação de perfil do domínio no ano de 2015 para o perfil no ano de 2025, é possível perceber que há avanço na isolinha de concentração de salinidade. O mesmo ponto apresentou valores de concentração de 444,611 e 3.011,87 mg/L STD para os anos de 2015 e 2025, respectivamente, Figuras 4 e 5.

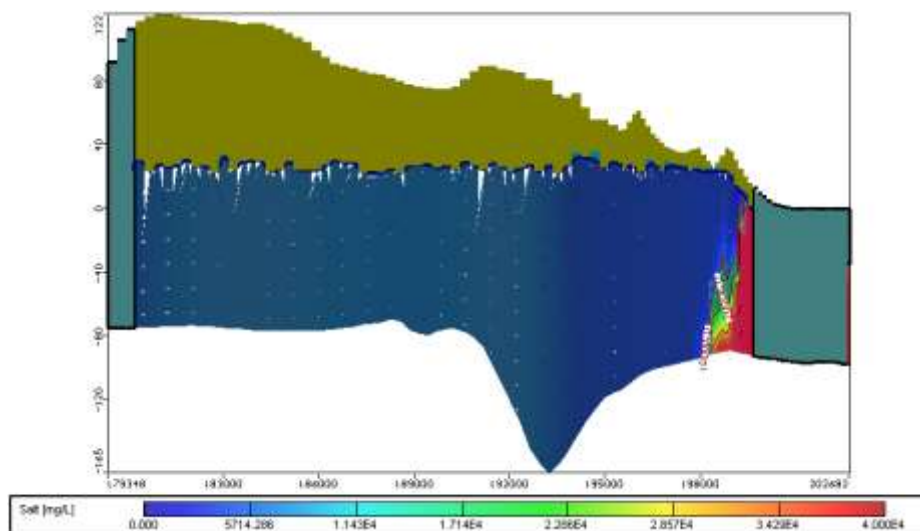


Figura 4 - Perfil do Domínio para o Ano de 2015

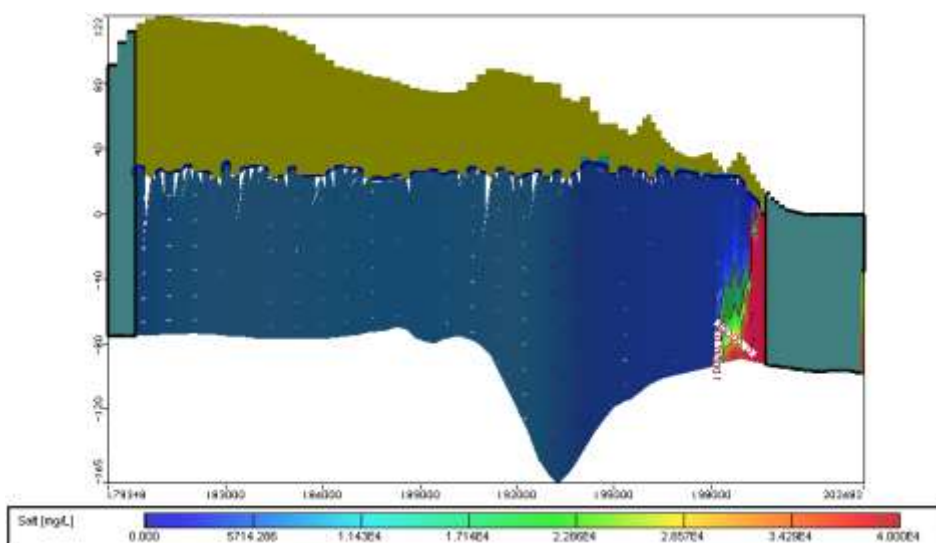


Figura 5 - Perfil do Domínio para o Ano de 2025

Além disso, percebe-se que o modelo do ano de 2015 (Figura 4) já apresenta a formação de cones salinos, o que é agravado para o ano de 2025 (Figura 5). Reafirmando o estudo de Rocha (2005), que constatou através do método de Sondagens Elétricas Verticais a ascensão vertical de cones salinos e desequilíbrio da zona de mescla em Maceió.

## CONCLUSÃO

Em virtude dos resultados apresentados, pode-se concluir que o modelo representou o aquífero na atualidade com formação de cones verticais salinos e mostrou a ascensão dos mesmos com o passar do tempo, sendo mantida a condição atual de exploração de água subterrânea.

## REFERÊNCIAS

Al-MAKTOUMI, A. et al. SEAWAT 2000: modelling unstable flow and sensitivity to discretization levels and numerical schemes. *Hydrogeology Journal* (2007) 15: 1119–1129.

- BOUDERBALA, A. Groundwater salinization in semi-aridzones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). *Environmental Earth Sciences*. (2014).
- COBANER, M. et al. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. *Journal of Hydrology*. 464-465 (2012) 262-280 p.
- COBANER, M. et al. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. *Journal of Hydrology*. 464-465 (2012) 262-280 p.
- CUSTODIO, E., 1987. Groundwater problems in coastal áreas. Capítulo 2, UNESCO, Belgica, ISBN: 92-3-102415-9.
- GUO, W., AND LANGEVIN, C.D.2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. Geological Survey. Tallahassee, Florida.
- GUO, W., AND LANGEVIN, C.D.2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. Geological Survey. Tallahassee, Florida.
- MARQUES, J. A. F.; MARQUES, A. G. Prática de Fundações no Estado de Alagoas. In: ABMS – Núcleo Nordeste. (Org.). *Geotecnia no Nordeste*. Recife: Universidade da UFPE, 2005, v. único, p. 247-264.
- MENEZES Jr. Calibração de um Modelo de Fluxo Subterrâneo para a Região Metropolitana de Maceió. Monografia – Engenharia Ambiental e Sanitária – UFAL. 2011.
- NOBRE, R. C. M. Avaliação de risco para uso e proteção de aquíferos. Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió – AL. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.
- ROCHA, W. J. S. Estudo da Salinização das Águas Subterrâneas na Região de Maceió a partir da Integração de Dados Hidrogeológicos, Hidrogeoquímicos e Geométricos. Tese - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). Relatório, 193p. 2005.
- SEFELNASR, A.; SHERIF, M. (2014). Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt. *Groundwater*. 52v. 264 – 276p.
- SILVA. W .F. Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos à Poluição na Região Metropolitana de Maceió. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 2013.