

FORMULAÇÃO DO MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DO SISTEMA AQUIFERO BARREIRAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PITIMBU-RN

Duany Fernandes Dias¹ & Antônio Marozzi Righetto^{2} & Wanderley de Carvalho Figueiredo³ & Francisco Rafael Sousa Freitas⁴*

Resumo – Estudos anteriores associaram o processo de ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) a uma série de efeitos negativos à água e ao ecossistema, provocados principalmente pela precariedade do sistema de saneamento e pelo aumento da densidade da ocupação. Este trabalho faz parte de uma sequência de estudos sobre a hidrologia e hidrogeologia da BHRP com o objetivo de melhorar o nível do conhecimento sobre os processos de degradação dos recursos hídricos e do ambiente fluvial na bacia, associados ao uso e ocupação do solo e práticas não sustentáveis do ponto de vista ambiental. A modelagem hidrogeológica em desenvolvimento, será executada através da calibração e simulação em uma porção a nordeste da bacia com a perfuração e instalação de 4 poços de monitoramento. Pretende-se também corrigir a condutividade hidráulica da zona não saturada nessa área, através de ensaios de permeabilidade realizados *in situ*.

Palavras-Chave – Rio Pitimbu; modelagem hidrogeológica; aquífero Barreiras.

FORMULATION OF THE CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL AQUIFER SYSTEM BARRIERS IN PITIMBU RIVER BASIN-RN/BRAZIL

Abstract – Previous studies have associated land use process of Pitimbu River Catchment Area (BHRP) to a series of negative effects to water and ecosystem caused mainly by the precarious sanitation system associated with increasing density of occupation. This work is part of a sequence of studies about the hydrology and hydrogeology of BHRP with the objective of improving the level of knowledge about the processes of degradation of water resources and the riverine environment in the basin, associated with the use and occupation of the land and non-sustainable practices from the environmental point of view. The present work presents hydrogeological consideration for modeling BHRP. The hydrogeological modeling in developing will be executed through the calibration and simulation in a portion of the northeastern basin with the drilling and installation of 4 monitoring wells. It is also intended to correct the hydraulic conductivity of unsaturated zone in this area, through trials of permeability carried out *in situ*.

Keywords – Pitimbu river; hydrogeological modeling; Barreiras aquifer.

^{1,3,4} UFRN / CT / LARHISA – Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental;

² Professor Titular do Departamento de Engenharia Civil – UFRN (e-mail: righetto@ct.ufrn.br);

INTRODUÇÃO

Na região metropolitana de Natal, a Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (BHRP) assume importância estratégica. A água captada diretamente na calha do rio abastece cerca de 30% da população, com vazão de 2600 m³/h. No entanto, essa importância contrasta com a realidade local no que se refere ao uso e ocupação do solo, potencializando os riscos de degradação da qualidade do ecossistema e da água (Righetto e Rocha, 2005). A Concessionária de Águas e Esgotos local vem utilizando, desde os anos 70, uma extensa rede de poços profundos para o abastecimento local. Nos últimos anos, a contaminação da água bombeada por nitrato gerou um aumento na demanda pela água superficial proveniente do rio Pitimbu, com o objetivo de melhorar o nível de potabilidade da água de consumo (Righetto, 2004).

Estudos anteriores associaram o processo de ocupação do solo na BHRP a uma série de efeitos negativos à água e ao ecossistema, provocados principalmente pela precariedade do sistema de saneamento e pelo aumento da densidade da ocupação. Este trabalho faz parte de uma sequência de estudos sobre a hidrologia e hidrogeologia da BHRP com o objetivo de melhorar o nível do conhecimento sobre os processos de degradação dos recursos hídricos e do ambiente fluvial na bacia, associados ao uso e ocupação do solo e práticas não sustentáveis do ponto de vista ambiental.

ÁREA DE ESTUDO

A BHRP é uma das três sub-bacias pertencentes à Bacia Hidrográfica do Rio Pirangi e está entre as coordenadas (235379, 9354444) e (261045, 9354444) ao Norte e (235379, 9339510) e (261045, 9339510) ao Sul, DATUM SAD 1969 (Figura 1). Conforme a distribuição territorial das sub-bacias, com base em seus divisores topográficos, a BHRP apresenta uma superfície de 107,24 km² formada por parcelas dos municípios de Macaíba, Natal e Parnamirim, integrantes da Região Metropolitana de Natal/RN, cujo rio em sua extensão, percorre 33 km e deságua no rio Taborda. O Rio Pitimbu em seus 13 km iniciais pertence à área rural, totalmente inserido no município de Macaíba. Na parcela que pertence ao município de Parnamirim, apresenta uma maior ocupação em direção às margens, por indústrias e urbanização e, no trecho que compreende a cidade do Natal apresenta zona de proteção ambiental em sua margem esquerda (Borges, 2002).

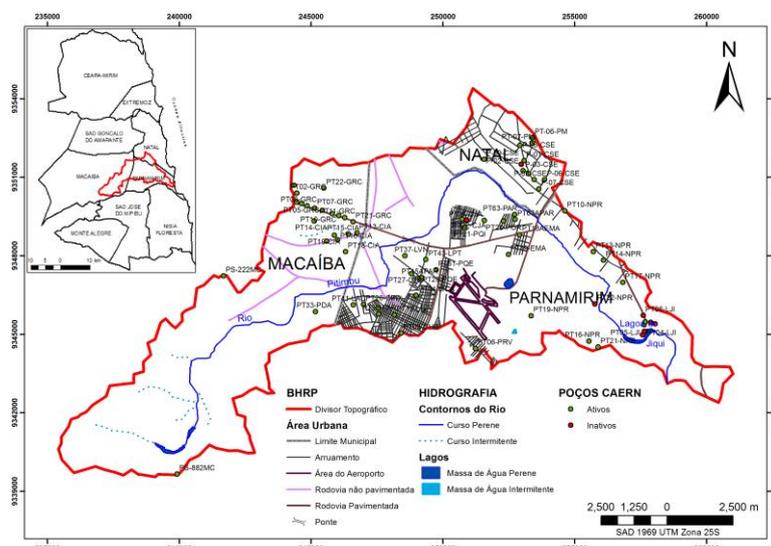


Figura 1- Localização da área de estudo. Adaptado da base cartográfica digital da SUDENE.

GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

A geologia da BHRP apresenta uma estratigrafia da base para o topo constituída por rochas cristalinas pré-cambrianas sobrepostas por sedimentos areníticos do Cretáceo, seguindo da Formação Barreiras, Dunas e Aluviões. Na direção noroeste-sudeste, acompanhando o Graben-Parnamirim, ocorrem dunas fixas localizadas à margem esquerda do Rio Pitimbu e Tabuleiros Costeiros, sendo estes predominantes nos municípios de Macaíba e Parnamirim. Estas feições caracterizam as unidades morfológicas da BHRP (SERHID, 2006).

Após análise da BHRP dois domínios geoambientais com características individuais distintas são identificados: domínio das planícies sedimentares; e domínio litorâneo-eólico (Costa e Salim, 1972 citado por Borges, 2002).

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS

O Sistema Aquífero Barreiras (SAB) comporta-se em geral como livre, todavia, localmente desenvolve condições de semiconfinamento. Segundo Melo e Figueiredo (1990), a espessura do SAB atinge 90 m e 40 m de espessura saturada média efetiva. Em mesmo estudo foi obtido os seguintes parâmetros para o sistema na porção sul de Natal: condutividade hidráulica (K) variando de 7,34 m/dia a 11,23 m/dia, transmissividade (T) de 267,84 m²/dia a 1036,80 m²/dia e porosidade efetiva (η_e) de 10%.

A principal zona de recarga do SAB localizada nas proximidades da BHRP é a região na altura da cidade de Parnamirim. Esta zona inclui o “binômio” Rio Pitimbu–Taborda/Pirangi, a lagoa do Jiquí e a região do Baixo Pitimbu.

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO SAB NA BHRP

Mousinho (2012) desenvolveu um modelo de caráter preliminar com a informação de apenas 19 poços na caracterização hidrogeológica. Isso se deu por conta da demanda de tempo necessário para caracterizar o SAB da BHRP com as informações que ainda precisavam ser interpretadas. Foi preciso realizar a interpretação da litologia e dos testes de produção e testes de aquíferos de todos os poços que continham informações disponíveis para melhor caracterizar a hidrogeologia da BHRP. Neste trabalho utilizou-se a mesma base cartográfica e topográfica de Mousinho (2012) obtidas através da extração de pontos cotados das imagens SRTM corrigidas da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). A partir da base topográfica e a interpretação da litologia dos poços foi definida as cotas para gerar por interpolação as camadas para o modelo numérico. Foi utilizado o software Visual MODFLOW de Guiguer e Franz (1998) no auxílio da modelagem conceitual do SAB na BHRP.

Definição das camadas para o modelo hidrogeológico

Dos 70 poços, cujos relatórios foram cedidos pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN, 2008), apenas 63 possuíam informações sobre o perfil litológico e 44 poços continuam anexados em seus relatórios as planilhas com os tempos de rebaixamento e recuperação do nível freático. Dos 63 poços citados, 7 estão inativos (Figura 1).

Na interpretação da litologia foram geradas 5 camadas para o modelo conceitual (Figura 2) a partir da interpolação das cotas litológicas (Righetto *et al.*, 2005) dos poços através do método de

interpolação Nearest Simple Point (vizinho mais próximo), ficando a sistema aquífero em estudo caracterizado da seguinte forma:

- **Primeira camada.** É composta por areias da Formação Dunas (área leste), arenito fino a médio, silte e siltitos no sentido Leste-Oeste, ocorrendo aforamento de compostos argilosos com finas lentes de cascalho no centro e no sul da bacia e também próximo à lagoa do Jiqui, oriundos da segunda camada.
- **Segunda camada.** Está em conformidade com o modelo conceitual elaborado pela Agência Nacional das Águas (ANA, 2012) e por trabalhos anteriores onde foi realizada uma caracterização hidrogeológica da formação barreiras sob a Região Metropolitana de Natal (RMN), principalmente na zona sul. Na BHRP, com base nos poços utilizados na interpretação da litologia, a segunda camada é composta arenitos e siltes argilosos. Ocorrem argilas plásticas e compactas na porção central e leste da bacia, representando a camada semiconfinante do SAB.
- **Terceira camada.** É composta por arenitos que vão de médio a grosso intercalados com finas lentes de cascalho. Todavia, o arenito fino é predominante em toda a extensão dessa camada. Ocorre descontinuidade dessa camada em alguns pontos e nesses mesmos pontos a quarta camada toca a segunda.
- **Quarta camada.** Devido à presença de contínuas lentes de argila e compostos argilosos entre a camada semiconfinante e a base do SAB, foi estimada uma quarta camada de pequena espessura que se conecta com a segunda camada em alguns pontos fazendo com que haja descontinuidade da terceira camada nesses pontos. Essa interpretação se deu com base nos poços em que nesses pontos a litologia apresentava argila e compostos argilosos apenas na posição da segunda camada na interpolação das cotas da litologia. Sabendo que o aplicativo MODFLOW não aceita camadas descontínuas em um único grid de diferenças finitas, foi definida uma espessura mínima de 2 cm onde ocorrem descontinuidades das camadas na modelagem conceitual. Nesses pontos o cálculo numérico dos parâmetros a eles atribuídos serão os mesmos das vizinhanças, por exemplo, se uma camada apresenta descontinuidade tocando a camada superior, o intervalo de 2 cm nesse ponto terá as mesmas características da camada subjacente.
- **Quinta camada.** Apresenta características semelhantes a da terceira camada, trata-se de uma continuação da mesma, visto que em alguns poços, principalmente da porção oeste bacia não apresentam argilas em seus perfis lito-estratigráficos. Vale a pena ressaltar que as zonas semiconfinadas são predominantes na porção sul, leste, nordeste e sudeste da bacia. Nos demais pontos o SAB foi caracterizado como livre na descrição dos relatórios dos poços da CAERN. Isso é evidenciado com a inserção dos parâmetros hidrogeológicos às camadas geradas para o sistema aquífero em estudo.

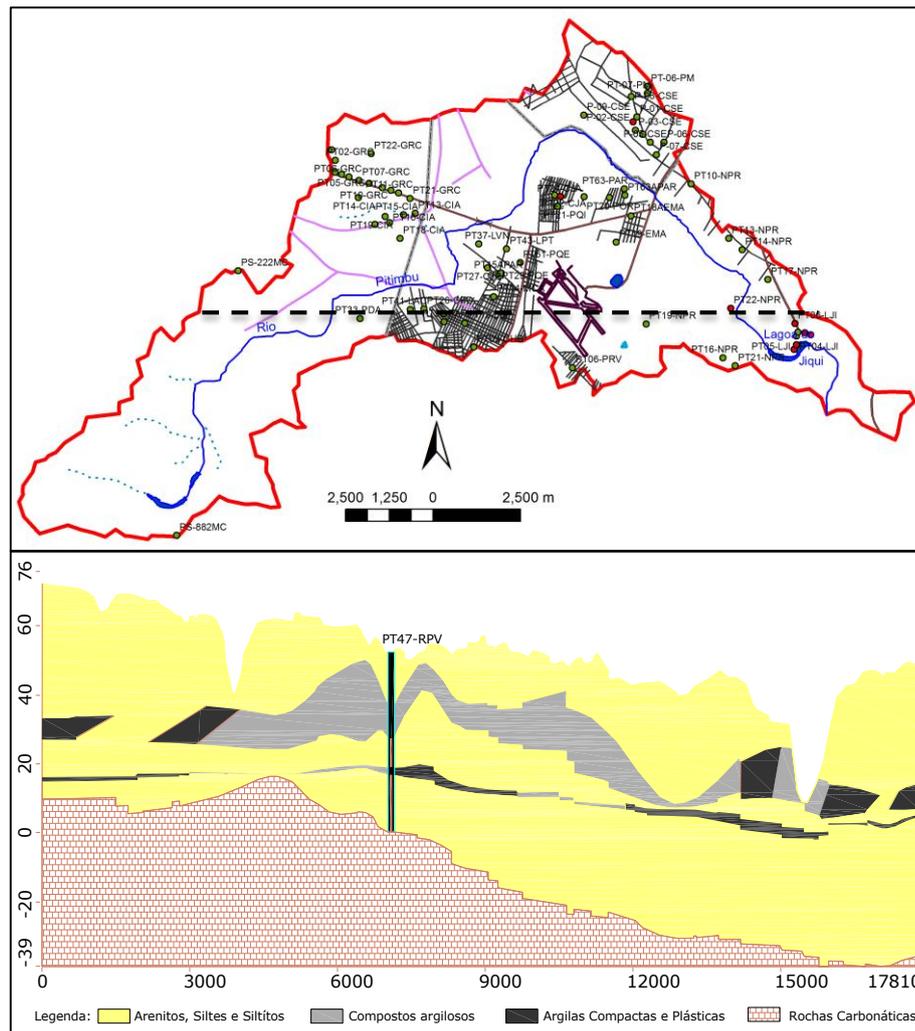


Figura 2 - Modelo conceitual: a. Mapa em planta mostrando os poços da BHRP; b. Perfil do SAB da BHRP (tracejado do mapa a) baseado na interpretação da litologia de 63 poços da CAERN.

Estimativa dos parâmetros hidrogeológicos

Para realizar uma simulação numérica do fluxo hídrico subterrâneo é necessária a obtenção do maior número possível de dados de campo para que o modelo conceitual possa representar de forma aceitável o sistema aquífero em estudo (Feitosa e Filho, 1997). Devido à dificuldade na obtenção de alguns parâmetros, os mesmos geralmente são estimados para um modelo numérico. São eles: a Condutividade Hidráulica (K), O Coeficiente de Armazenamento Específico (S_s), o Rendimento Específico (S_y), a Porosidade Efetiva (η_e) e a Porosidade Total (η_t). Para aquíferos livres S_y será igual a η_e e pode ser calculado com precisão através do método de Neuman (1945) citado por Bear (1979) desde que no teste de aquífero exista um poço de observação do rebaixamento do nível freático a uma distância r de um poço bombeando. A Porosidade Total é obtida a partir da análise granulométrica do material litológico e seus valores médios estão disponíveis em várias literaturas das áreas relacionadas.

Os parâmetros K e S_s são quocientes da divisão da T e do Coeficiente de Armazenamento (S) respectivamente pela espessura do aquífero quando confinado ou pela espessura saturada quando livre e totalmente penetrante, ou pela espessura da seção filtrante quando o poço é parcialmente penetrante.

O parâmetro T pode ser estimado aplicando o método aproximativo de Cooper e Jacob (1946) citado por Fetter (1994), na interpretação dos gráficos de rebaixamento e recuperação dos poços em bombeamento, onde a distância r considerada é raio de perfuração do poço.

Foi utilizado o método de Neuman em poços cujo aquífero onde foram perfurados foram caracterizados como livres, onde foi possível obter valores de T e S com a superposição do gráfico bilog do rebaixamento ao gráfico bilog da função de Neuman⁴ às curvas tipo A. Em quatro poços de observação do rebaixamento da carga hidráulica foi possível obter os parâmetros T , S e a condutividade hidráulica vertical (K_v). O valor de S_y pôde ser encontrado com a superposição das curvas de rebaixamento as curvas tipo B do gráfico da função de Neuman. Como nos demais poços em cujas perfurações o aquífero foi caracterizado com semiconfinado e não havia poços de observação para o teste de aquífero, foi utilizado o método aproximativo de Cooper-Jacob, obtendo assim somente o parâmetro T .

Com base nos testes de aquífero e em relatórios da ANA (2012), foram estimados valores médios de S_s , S_y , η_e e η_t ao SAB da BHRP (Tabela 1). O valor de η_t foi considerado com o maior valor de η_e que também confere com o valor adotado no modelo aplicado ao SAB da RMN pela ANA (2012). Somente a média do valor de S_s para o modelo aplicado a SAB da BHRP foi maior que o adotado ao SAB da RMN.

Tabela 1- Valores médios adotados ao modelo numérico do SAB na BHRP.

Coefficiente de Armazenamento Específico (S_s)	3,31E-04 m ⁻¹
Rendimento Específico (S_y)	0,125
Porosidade Efetiva (η_e)	0,125
Porosidade Total (η_t)	0.22

O parâmetro K para o SAB na BHRP foi estimada a partir da transmissividade (T) obtida na interpretação de testes de aquífero analisando os gráficos de rebaixamento e recuperação do nível potenciométrico em 44 poços da CAERN. Para tal, como a maioria dos poços atravessam toda a formação barreiras alcançando o calcífero (rochas carbonáticas), foi efetuada a divisão de T pela espessura saturada da formação obtendo assim uma média da condutividade hidráulica de toda a espessura saturada, exceto o poço PT 21-PQI, no qual foi utilizada a espessura da formação geológica pela razão da espessura saturada está com 15 metros na época do teste de bombeamento. Nesse ponto a espessura da formação chega a mais de 40 m e a estimativa da condutividade pela espessura saturada levaria e perda de informação das camadas superiores. O valor de K para o poço PS-222MC foi retirado do relatório da ANA (2012).

Embora se tenha obtido o valor das condutividades verticais (K_v) no gráfico de rebaixamento dos 4 poços de observação, cujos valores são 1% da condutividade horizontal (K), eles estão em Macaíba dentro de um raio de aproximadamente 1 km e os valores de K_v não podem ser extrapolados para toda a BHRP.

Na interpretação da litologia foi possível constatar a existência de uma anisotropia vertical nas camadas. Como normalmente é feito em modelagem de sistemas aquíferos, admitiu-se que segundo a sugestão de Anderson e Woessner (1992), as condutividades hidráulicas verticais têm magnitude igual a 10% do valor da condutividade horizontal. Vale ressaltar que os parâmetros hidrogeológicos nunca são determinados com total precisão e que os mesmos aqui definidos representam de forma aproximada a distribuição real no sistema.

⁴ Gráficos obtidos partir de planilhas de testes de aquíferos disponíveis gratuitamente no site: https://sites.google.com/a/hidrogeocol.com.co/carlos_molano/Home. Acesso em 15 de abril de 2013.

Determinação das condutividades hidráulicas para as camadas do modelo numérico

Conforme supracitado a maioria dos poços atravessam o SAB e atingem o calcífero. Assim, o parâmetro K foi obtido na divisão da transmissividade (T) pela espessura saturada do SAB. Isso significa que o valor de K por definição é a condutividade hidráulica média de todas as condutividades das camadas saturadas do SAB:

$$\bar{K} = \frac{T}{h_0} \quad (1)$$

Onde, \bar{K} é a condutividade média da espessura saturada, h_0 é a espessura saturada do aquífero e, $h_0 = h_1 + h_2 + h_3 + h_n \dots$, onde n é o número de camadas do perfil saturado. Então:

$$\bar{K} = \frac{T}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (2)$$

Assumindo que a viscosidade e a compressibilidade da água são desprezíveis as condutividades hidráulicas para as n camadas podem ser estimadas considerando a porosidade efetiva (η_e) como fator de ponderação através da equação 3:

$$K_i = \frac{h_i \eta_{e_i}}{\sum_{i=1}^n h_i \eta_{e_i}} \bar{K} \quad (3)$$

Para todos os perfis litológicos dos poços analisados foram estimadas porosidades efetivas médias com base em quadro disponível em Feitosa e Filho (1997) e comparados com os resultados dos testes de aquífero e com relatórios da ANA (2012). Os valores estimados, conforme mostra a Tabela 2, foram utilizados na obtenção de K para cada camada gerada para o modelo, aplicando-se o SAB da BHRP.

Tabela 2 - Valores médios de η_e para a estimativa das condutividades para as camadas geradas para o SAB da BHRP.

Litologia	Porosidade Efetiva Média
Argilas	0,02
Compostos Argilosos	0,04
Arenitos	0,125

O valor do parâmetro K estimado para primeira seção saturada contando a partir da superfície foi extrapolado para a zona não saturada, definido assim um valor de K para a primeira camada do modelo. Estes e os demais valores de K foram interpolados com o objetivo de se criar zonas de condutividades hidráulicas e atribuí-las ao modelo numérico em suas respectivas camadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Seguindo os passos da modelagem hidrogeológica, a próxima etapa será a inserção dos parâmetros hidrogeológicos e das condições de contorno ao modelo numérico, em especial, a interação rio-aquífero que exigirá avaliação local da condutância.

Não será possível comparar os valores de carga hidráulica simulada com observadas em toda área para calibrar o modelo numérico devido à ausência de poços de observação dentro da bacia. Para tanto, será executada a calibração e simulação final em uma pequena porção a nordeste da bacia com a perfuração e instalação de 4 poços de monitoramento. Pretende-se também corrigir a condutividade hidráulica da zona não saturada nessa área, através de ensaios de permeabilidade que serão realizados *in situ*.

Com o modelo considerado calibrado, aspectos de contaminação por nitrato serão avaliados, com o desenvolvimento de campos de contaminação em função da densidade de ocupação da bacia, permitindo a avaliação e prognóstico de intensificação da contaminação ou redução através de intervenções de coletores de esgoto e remediações em áreas específicas.

REFERENCIAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press Inc., 381p., London.
- AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA (2012). Estudos hidrogeológicos para a orientação do manejo das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Natal (RMN). *Volume 4: Apêndices*. 2012.
- BEAR, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill International. Book Company, New York, 567p.
- BORGES, A. N. (2002). Implicações Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu (RN) decorrentes das diversas formas de uso e ocupação do solo. 175p. Tese (Mestrado em Engenharia Sanitária e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal. 2002.
- COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTOS DO RIO GRANDE DO NORTE- CAERN (2008). Relatórios técnicos dos poços ativos localizados na região metropolitana de Natal/RN. Abril/2008.
- FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. (1997). *Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações*. Coord.: Manoel Filho, J. & Feitosa, F. A. C., Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE.
- FETTER, C.W. (1994). *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 3^a ed., 691p.
- MELO Jr.; G. FIGUEREDO, E. M. (1990). Comportamento hidráulico e vulnerabilidade do sistema aquífero Dunas/Barreiras à poluição na área de Natal (RN). *Revista Águas Subterrâneas, ABAS*. N° 13, agosto de 1990: 97-110.
- MOUSINHO, D. S. (2012). Simulação numérica do fluxo hídrico subterrâneo na Bacia Hidrográfica do Rio Pitimbu – RN. 97p. Tese (Mestrado em Engenharia Sanitária e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal.
- RIGHETTO, A. M.; VILELA, A. M. C.; DANTAS, R. O. de O. (2005). Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Dunas/Barreiras em Natal, RN. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2005.
- RIGHETTO, A. M. (2004). Recarga, Contaminação e Exploração do Aquífero da Cidade de Natal, RN In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, 2004, São Pedro, SP, Brasil, *Anaisdo XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica*. Campinas, SP, UNICAMP SP, 2004. v.1. p.1 –10
- RIGHETTO A. M.; ROCHA M. (2005). Exploração Sustentada do Aquífero Dunas / Barreiras na Cidade de Natal, RN, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 10, No. 2: pp 27-38.
- SECRETÁRIA DE ESTADO DOS RECURSOS HÍDRICOS – SERHID/RN (2006). Cadastramento e nivelamento de poços do Aquífero Barreiras no Município de Natal/RN. Relatório final. Volume 01. 2006.
- SUPERINTENDENCIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE – SUDENE. *Divisão Hidrográfica do Estado do Rio Grande Norte*. Índices: 978 e 1055. Folhas: SB.25-V-C-V e SB.25-A-Y-II. Datum Córrego Alegre UTM zona 25S.
- GUIGUER, N.; FRANZ, T. (1998). WHI Visual MODFLOW, version 2.8.2. Waterloo Hydrogeologic Inc., 1998.