

MODELAGEM MATEMÁTICA DE FLUXO EM REGIME TRANSIENTE DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DA BACIA SEDIMENTAR DE RESENDE – RJ.

Felipe Abrahão Monteiro ¹; Thayla Almeida Teixeira Vieira ²; Cynthia Augusto Gonçalves Silva ³;
Gerson Cardoso da Silva Júnior ⁴;

Resumo – A região da Bacia Sedimentar de Resende, na região do Vale do Paraíba do Sul Fluminense, sofre um desenvolvimento econômico e populacional acelerado, com aumento da demanda pelo abastecimento de água. Isso leva à necessidade de estudar os recursos hídricos subterrâneos, para avaliar o seu potencial e permitir uma melhor gestão dos aquíferos. O objetivo deste trabalho consistiu na atualização e ampliação de um modelo hidrogeológico para o sistema aquífero da Bacia Sedimentar de Resende. A metodologia do trabalho envolveu uma revisão bibliográfica e construção de um modelo conceitual, seguida da construção de um modelo numérico de fluxo da água subterrânea com o *software* Visual MODFLOW versão 4.2.0.151. Como resultado do processo de modelagem, observou-se que os poços de captação apresentaram uma contribuição significativa para o balanço de massa. No cenário estudado evidenciou-se a característica efluente do rio Paraíba do Sul, responsável por praticamente toda a drenagem da água do aquífero no resultado do modelo. Ao final do período de simulação transiente, para um cenário de duplicação do consumo ao cabo de dez anos a partir de 2009 – considerado realista para a região – verificou-se que começa a haver uma depleção considerável dos volumes armazenados no aquífero.

Palavras-chave: Modelagem Hidrogeológica; Resende - RJ; Gestão de Aquíferos.

Abstract - The Sedimentary Basin of Resende, Paraíba do Sul River Valley, is having an increasing demand for water supply. This leads to the need to study the groundwater resources, to assess their potential and enable better management of aquifers. The objective of this work consisted in updating and improving a hydrogeological model for the Resende Basin aquifer system. Method included a literature review and elaboration of a conceptual model, followed by the construction of a

¹ UFRJ IGEO Departamento de Geologia Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental. Av. Athos da Silvera Ramos, 274 CEP:21949 916 ,Tel: 55 21 25699481 ramal 7; famont@globo.com

² UFRJ IGEO Departamento de Geologia Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental. Av. Athos da Silvera Ramos, 274 CEP:21949 916 ,Tel: 55 21 25699481 ramal 7; thayl Almeida@gmail.com

³ Schlumberger Water Services; csilva23@slb.com

⁴ UFRJ IGEO Departamento de Geologia Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental. Av. Athos da Silvera Ramos, 274 CEP:21949 916 ,Tel: 55 21 25699481 ramal 7; gerson@acd.ufrj.br

groundwater flow numerical model with *Visual MODFLOW* version 4.2.0.151. As a result of the modeling process, it was observed that the pumping wells show a significant contribution to the mass balance. The scenario studied revealed a characteristic effluent behavior of Paraíba do Sul River, which accounts for virtually all the water drained from the aquifer in the model output. At the end of the transient simulation period for the considered scenario, water consumption increasing twice after ten years as from 2009 - considered realistic for the region - a significant depletion of the volumes stored in the aquifer.

Keywords: Hydrogeologic Modeling; Resende Sedimentary Basin; Groundwater Management

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Visando aplicar uma metodologia que permitisse avaliar a situação atual e futura, ademais de subsidiar adequadamente a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região da Bacia Sedimentar de Resende, no estado do Rio de Janeiro, realizou-se um estudo hidrogeológico e modelagem numérica daquele sistema aquífero com o uso do *software Visual Modflow*[®] 4.2. A Bacia Sedimentar de Resende tem cerca de 50 km de comprimento, alongada no sentido ENE-WSW, possuindo largura que varia entre 0,5 a 8,0 km, totalizando 220 km² de área (Figura 01). A espessura máxima do pacote sedimentar é de 550 m. Os municípios abrangidos pelo estudo (Itatiaia, Resende, Porto Real e Quatis) vivenciam um expressivo desenvolvimento econômico acarretando na utilização das águas subterrâneas da bacia em seu abastecimento e a inexistência de um controle técnico sistemático dos aquíferos da bacia coloca em risco o recurso.

O modelo numérico, utilizado em conjunto com a experiência e dados de campo, é uma ferramenta importante para fornecer informações a respeito da resposta do sistema em função de diversos cenários possíveis (Bear *et al.*, 1992). Deve-se ao fato o seu grande potencial e versatilidade em integrar e sintetizar nosso conhecimento sobre sistemas hidrogeológicos e fornecer uma versão simplificada de um fenômeno (Bredehoeft, 2003).

O estudo foi desenvolvido utilizando dados de projetos de pesquisa já finalizados, o Projeto MODESTHI - Modelagem Estratigráfica de Reservatórios Terrígenos: Aplicação à Avaliação do Potencial Hídrico da Bacia de Resende (RJ) – PADCT (FINEP). E do projeto Prioridade Rio “Aquíferos Sedimentares da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (RJ) – Caracterização Estratigráfica Aplicada à Avaliação do Potencial Hídrico” da FAPERJ.

O estudo tem como objetivos discutir conceitos e fundamentos da modelagem matemática como ferramenta para a gestão de recursos hídricos, bem como detalhar e aperfeiçoar o modelo

matemático hidrogeológico do Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar de Resende, elaborado previamente por Silva (2009), com base nas características hidrogeológicas da área e com ênfase na modelagem de fluxo.

Como foco principal, foi analisado o comportamento do sistema aquífero em regime transiente sendo possível identificar as áreas mais atingidas pela exploração de água subterrânea. Tal metodologia permite prover bases para o planejamento urbano e regional futuro, possibilitando, assim, a proteção e otimização de seus recursos (Monteiro, 2010).

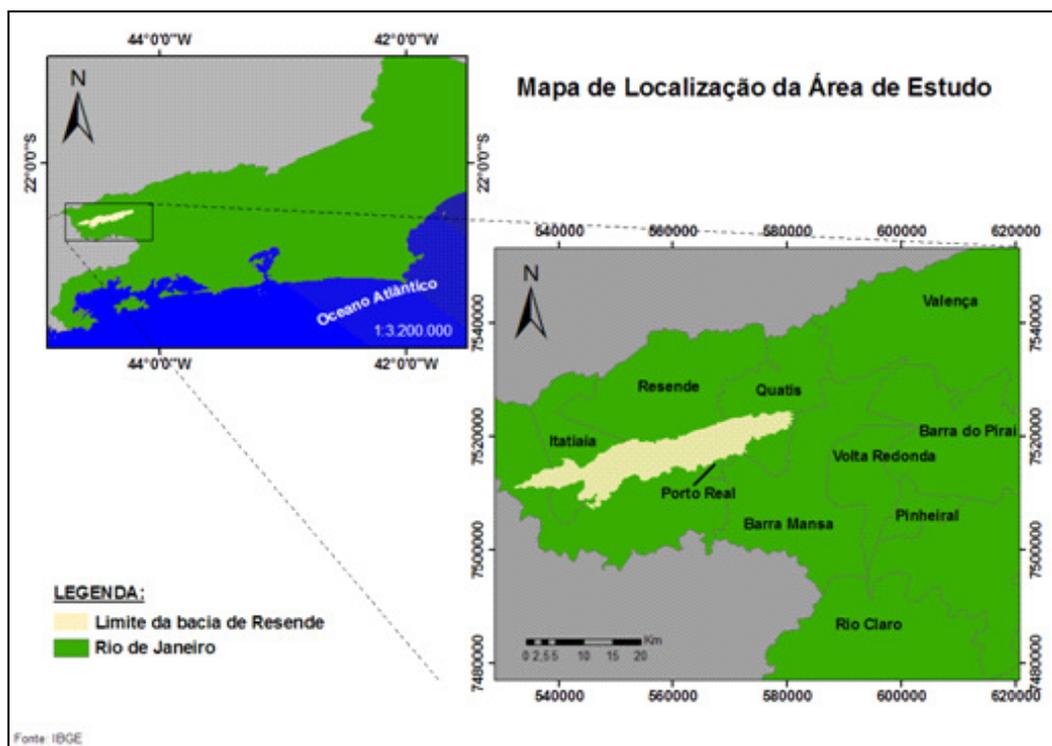


Figura 01: Mapa de localização da Bacia de Resende (Gelli et al., 2008).

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA

A Bacia Sedimentar de Resende está localizada no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro, compreende parte da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul e abrange os municípios de Barra Mansa (Distrito de Floriano), Quatis, Porto Real, Resende e Itatiaia.

O clima na região é úmido, com pouca deficiência de água, caracterizado por temperaturas médias amenas, variando entre 20° a 25°C. O regime pluviométrico da região é controlado por sua localização geográfica entre serras, sendo caracterizado por uma forte precipitação nos meses de outubro a março, alcançando média anual de 1500 mm, segundo dados obtidos no INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. Em termos hidrográficos, a Bacia de Resende encontra-se totalmente inserida nos limites da bacia do rio Paraíba do Sul (FEEMA, 1990).

Geomorfologicamente, a Bacia de Resende localiza-se no domínio morfoestrutural do Vale do Paraíba do Sul, mais precisamente no médio Vale do rio Paraíba do Sul, em uma depressão tectônica preenchida por sedimentos paleogênicos e neogênicos, situada entre as serras da Mantiqueira e do Mar.

Geologia

A origem e a evolução da Bacia Sedimentar de Resende estão associadas à abertura do “Rift Continental do Sudeste do Brasil” (Riccomini, 1989), a partir da reativação de falhas transcorrentes de idades neo-proterozóicas, estando implantada sobre a Faixa Móvel Ribeira (Escobar, 1999).

A geologia da área onde se insere a bacia de Resende compreende uma sequência que engloba o embasamento cristalino, rochas mesozóicas, sucessões paleógenas e depósitos neogênicos (Ramos *et al.*, 2003), representando, assim, os mais recentes estudos deste caráter na região.

O conhecimento da tectônica da Bacia de Resende é indispensável para qualquer estudo estratigráfico e hidrogeológico desta bacia. Ramos (1997) verificou que esses falhamentos não só influenciaram no desenvolvimento da bacia e do seu preenchimento sedimentar, como suas reativações implicaram na configuração de sua superfície atual, bem como na distribuição lateral e vertical das sucessões paleógenas e neógenas, influenciando diretamente a dinâmica das águas subterrâneas entre estas unidades. Segundo Albuquerque (2001), pode ser identificado três conjuntos principais de lineamentos ao longo da Bacia Sedimentar de Resende, NE-SW, ENE-WSW e NW-SE, sendo os dois primeiros padrões mais comuns em áreas próximas à borda da bacia e o último, NW-SE, mais limitado na porção central da bacia.

METODOLOGIA

Revisão Bibliográfica e Construção do Modelo Conceitual

Procurou-se agrupar os trabalhos gerados pelas equipes de pesquisadores integrantes do projeto MODESTHI, desenvolvendo um modelo conceitual dos fatores importantes à hidrogeologia da bacia. Os dados obtidos nas pesquisas hidrogeológicas foram armazenados em planilhas do *Microsoft Excel* sendo processados através da confecção de mapas e diagramas. Com auxílio do *software Surfer 7.0* foram elaborados mapas que auxiliaram no desenvolvimento do modelo conceitual e matemático da Bacia Sedimentar de Resende. Com base na interpretação dos dados obtidos, foram assinaladas as principais características dos aquíferos identificados, como áreas de recarga, direções de fluxo e armazenamento, provendo subsídio para o entendimento da dinâmica de funcionamento destes aquíferos.

Construção do Modelo Numérico de Fluxo da Água Subterrânea

Para a elaboração do modelo matemático de fluxo em regime transiente do Sistema Hidrogeológico da Bacia de Resende utilizou-se a base lógica da modelagem proposta por Silva (2009) em regime permanente. O modelo atual foi aperfeiçoado visando analisar o regime em estado transiente. A entrada de dados constou das seguintes etapas:

I - *Geração e importação do relevo*: O modelo conceitual da área foi traduzido para a linguagem do programa selecionado. A malha para o cenário do modelo matemático da bacia foi discretizada de modo uniforme, sendo constituída por 116 linhas, 250 colunas e 6 camadas, totalizando 174.000 células. A delimitação das características do terreno, de superfície e do embasamento foi realizada através da criação de mapas de contorno utilizando o *software Surfer 7*, com os dados dos poços levantados na área. O mapa de contorno do embasamento (figura 02) destaca características peculiares da base da bacia, como os depocentros Porto Real e Penedo, e o Alto de Resende que os separa.

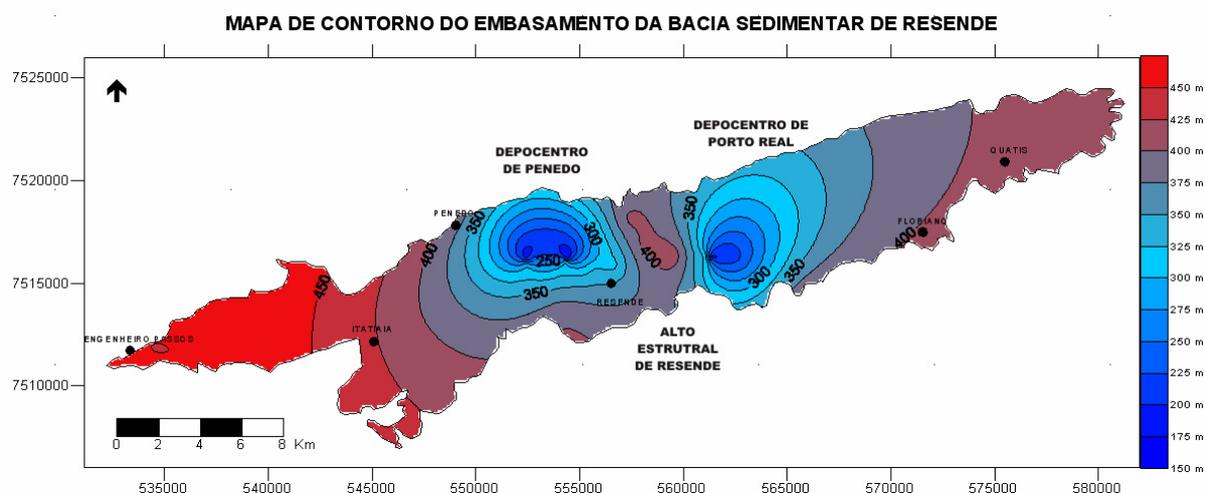


Figura 02: Mapa de contorno do embasamento da Bacia Sedimentar de Resende. (Modificado de Silva, 2009).

II – *Definição das zonas de condutividade hidráulica*: Hidrogeologicamente, a bacia é composta por três unidades: aquífero livre, aquífero multicamadas e aquífero cristalino. No modelo foram definidas quatro zonas de condutividade hidráulica distintas (tabela 01), cujos valores derivam da média das condutividades calculadas nos poços cuja captação de água limita-se ao mesmo aquífero.

Tabela 01: Zonas de condutividade hidráulica.

ZONAS	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
ZONA 1	1.00E-04	1.00E-04	1.00E-05
ZONA 2	2.00E-05	2.00E-05	2E-06
ZONA 3	4.00E-04	4.00E-04	4.00E-05
ZONA 4	0.1	0.1	0.1

O aquífero livre está representado pelo layer 1 (figura 03), caracterizado pela zona 1 de condutividade. Apesar de a modelagem focar o aquífero multicamadas, torna-se fundamental o aquífero livre ao modelo, pois este representa uma importante fonte de recarga para o aquífero subjacente.

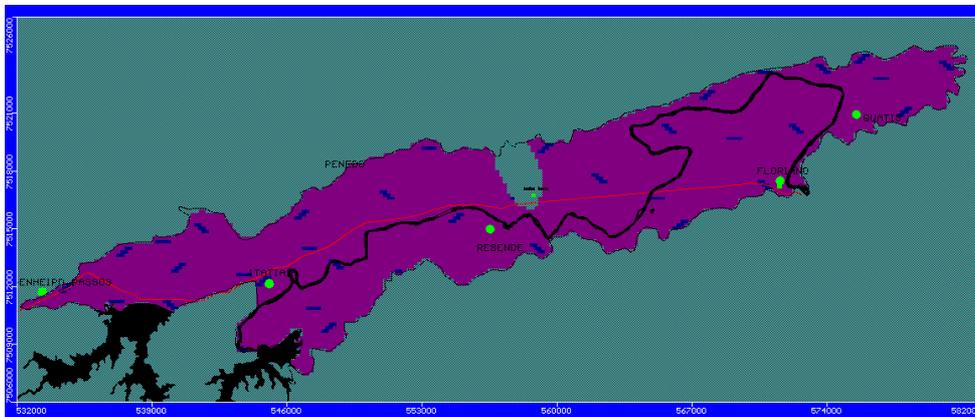


Figura 03: Visualização em planta do aquífero livre (layer 01).

O aquífero multicamadas, por ser o principal aquífero da bacia e conseqüentemente o mais complexo, encontra-se representado no modelo pelos *layers* 2 a 5 (figura 04), onde se destacam duas zonas de condutividade hidráulica no mapa de contorno (figura 05), zonas 2 e 3. O mapa em questão foi elaborado por Silva (2009) com o intuito de demonstrar a expressiva variação nos valores.



Figura 04: Visualização em planta do aquífero multicamadas (layers 2 a 5).

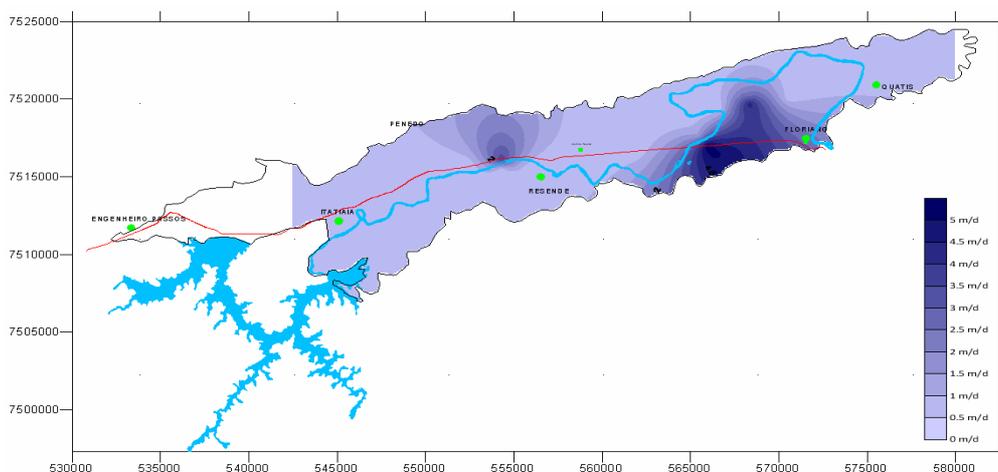


Figura 05: Mapa de condutividade hidráulica do aquífero multicamadas, Bacia de Resende. (Silva 2009)

Em relação à tectônica, as falhas inseridas no modelo encontram-se representadas pela zona de condutividade 4 e estão presentes em todos os *layers* (1 ao 5), sendo distribuídas no modelo de acordo com o mapa de lineamentos da Bacia Sedimentar de Resende.

A fim de ilustrar o cenário estratigráfico regional, foi gerada uma seção hidroestratigráfica da bacia (figura 06).

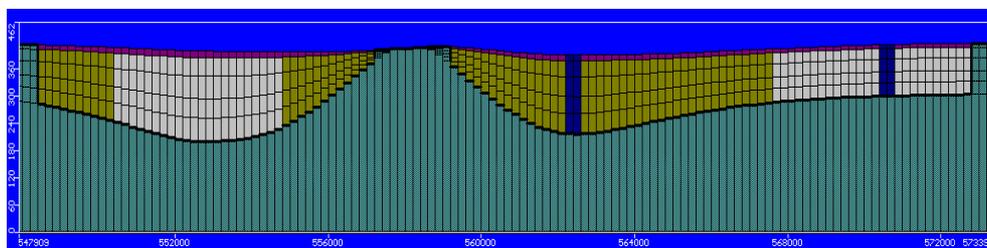


Figura 06: Seção W-E do cenário estratigráfico regional (exagero vertical 10x).

III – *Definição das zonas de recarga*: A determinação das zonas de recarga do modelo (figura 07) embasou-se no balanço hídrico definido por Bettini *et al.* (2004), sendo desconsideradas prováveis contribuições provenientes do aquífero cristalino.

Considerando a precipitação média anual de 1.500 mm na bacia, calculou-se que em torno de 250 mm/ano recarrega homogeneamente o sistema, alcançando o aquífero multicamadas através do aquífero livre. Todavia, uma segunda zona de recarga foi acrescentada ao modelo, considerando o forte escoamento oriundo de áreas próximas do Maciço Itatiaia, ao extremo noroeste da bacia, onde segundo dados do INMET, apresentam altas taxas pluviométricas, tendo sido calculado um valor de 500 mm/ano.

Para fins de calibração foram reajustados os valores de recarga, recebendo essas zonas valores de 170 mm/ano e 340 mm/ano, respectivamente.



Figura 07: Zonas de recarga do modelo.

IV - *Definição das condições de contorno*: Como condição de contorno da bacia foi utilizado o rio Paraíba do Sul, por ser uma característica física de grande expressão dentro da mesma. O rio, que atravessa a bacia no sentido W-E, apresenta largura média de 100m, profundidade de 20 m e uma declividade na área na bacia estimada em 0,15 m/km. (Castro, 2000) A cota inicial do rio incluída ao modelo foi de 389 m e a final de 379 m, considerando a condutividade hidráulica vertical do fundo do rio de $2,0 \times 10^{-5}$ m/d.

Por conseguinte, foram acrescentados os poços cadastrados na área, entre eles 45 pontos de observação e 54 poços de bombeamento. Foram utilizados dados de localização, cotas, profundidades, filtros, níveis estáticos e vazões bombeadas diariamente. Os poços de bombeamento da área tiveram suas vazões calculadas para um total de 16 horas diárias de funcionamento a fim de aproximar o modelo às tendências de crescimento demográfico regional.

Avaliação do Fluxo da Água Subterrânea a partir da Modelagem Matemática

Com o cenário hidrogeológico finalizado, foi empregada a modelagem matemática hidrogeológica para a visualização do comportamento do fluxo da água subterrânea na bacia. O *software* escolhido para o desenvolvimento e aperfeiçoamento do modelo numérico de fluxo

subterrâneo foi o *Visual MODFLOW versão 4.2.0.151*. A seleção deste programa se deve ao fato da sua capacidade de incluir os processos relevantes presentes no modelo conceitual hidrogeológico. Ademais, o *Visual MODFLOW* é considerado o *software* mais indicado na modelagem de fluxo possuindo ampla aceitação mundial (Bielschowsky, 2008).

Cenários Simulados e Comparação dos Resultados

Os cenários simulados foram basicamente o efeito da implantação e gradual aumento de vazão dos poços, com alguns poços (p.ex. poço BR_80) apresentando variação da taxa de bombeio desde o 6º ano dos 10 anos de simulação, a partir de 2009. Como resultados da modelagem foram criados gráficos de balanço de massas, mapas potenciométricos, mapas de fluxo, seções estratigráficas e hidroestratigráficas do sistema aquífero para comparação e discussão.

RESULTADOS

Desenvolvimento do Modelo Conceitual

O desenvolvimento do modelo conceitual da Bacia de Resende baseou-se na caracterização geológica e hidrogeológica da mesma, a partir de informações obtidas em projetos anteriores e em visitas técnicas aos locais de captação de água subterrânea e em relatórios técnicos de perfuração de poços tubulares.

Três unidades hidrogeológicas foram definidas para a região da Bacia de Resende conforme é ilustrado no mapa hidrogeológico da figura 08.

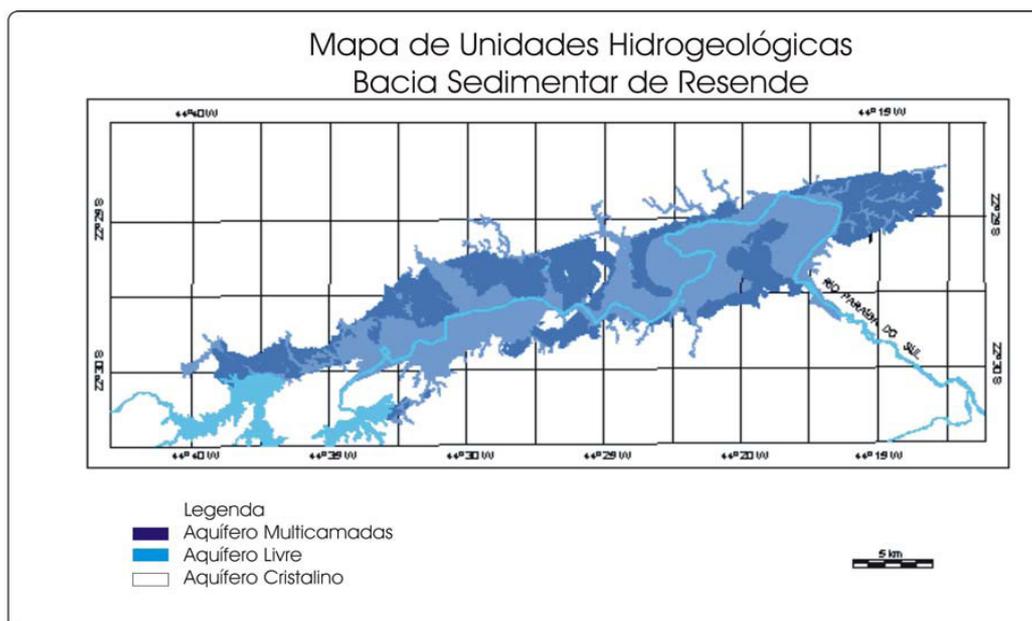


Figura 08: Mapa de unidades hidrogeológicas da Bacia de Resende (modificado de Castro, 2000).

I - *Aquífero livre*: Identificado em toda extensão da bacia, principalmente na parte leste e central, representado geologicamente por depósitos sedimentares neogênicos, tais como terraços aluvionares e aluviões. As captações neste aquífero são rasas e a recarga ocorre diretamente pela chuva. Este aquífero descarga diretamente ao rio Paraíba do Sul, cujo nível se encontra de 6,0 a 8,0 m abaixo dos depósitos neogênicos nesta área. A vazão média dos poços que captam água no aquífero livre é da ordem de 3 m³/h e a sua condutividade hidráulica foi estimada em $K = 1,0 \cdot 10^{-5}$ m/s.

II - *Aquífero sedimentar multicamadas*: É o aquífero mais importante e explotado da bacia, o que se deve tanto às suas características hidrogeológicas, como à sua abrangência espacial dentro da bacia. É constituído pelas Formações Resende e Floriano, sendo geologicamente marcado por uma forte intercalação entre camadas de rochas pelíticas e arenosas, compreendendo camadas lenticulares a tabulares dispostas lado a lado, fortemente afetadas por falhas e fraturas.

As camadas aquíferas são encontradas em profundidades que variam de 8 a 500 m. Os poços mais profundos têm cerca de 260 m de profundidade. Localmente há um semi-confinamento ou confinamento da água subterrânea. As vazões neste aquífero também são variáveis, com valores entre 0,8 a 52,0 m³/h. Aparentemente, as maiores vazões ocorrem nas áreas de maior espessura do pacote sedimentar e alinhadas na direção NE, no setor leste da bacia. Nesta situação, as maiores conectividades hidráulicas ocorreriam associadas às fraturas que afetam esse sistema aquífero. Castro (2000) estimou a condutividade hidráulica dos sedimentos da Formação Resende a partir de um teste de bombeamento em $K = 1,72 \times 10^{-3}$ cm/s. As principais fontes de recarga são: a infiltração direta pelas águas pluviais, a partir do aquífero livre e a contribuição do rio Paraíba do Sul. Também é preciso considerar a contribuição das rochas cristalinas que, através de suas fraturas, recarregam o aquífero multicamadas com águas provenientes de fora da bacia.

III - *Aquífero cristalino*: Constituído pelos gnaisses pré-cambrianos que compõem o embasamento da bacia e as rochas alcalinas. As captações exclusivas neste aquífero se concentram na porção oeste da bacia, próximos ao município de Itatiaia. Também há captações do aquífero cristalino no município de Resende, porém estes utilizam, na maioria das vezes, o aquífero sedimentar como um recurso para maximizar as vazões dos poços e são denominados neste trabalho como aquíferos mistos. No presente trabalho, na realização da modelagem, esta unidade foi considerada como o embasamento de baixa permeabilidade. Este aquífero foi desativado do modelo desconsiderando as mínimas contribuições deste ao sistema.

Balanço hídrico subterrâneo

O balanço hídrico foi realizado através do programa BALAN por Bettini *et al.* (2004), ponderando dados do período de janeiro de 1991 a dezembro de 1996. O nível estático inicial utilizado foi 384 m, a precipitação média anual é em torno de 1500 mm, considerando uma área de 220 km². Decorrente à simulação, dos 1500 mm de precipitação anual, obtiveram valores de 899 mm para evapotranspiração, 354 mm para o escoamento superficial e 247 mm como água precipitada que recarrega o aquífero. Esses dados foram empregados na calibração do modelo.

Execução e Calibração do Modelo

A técnica de calibração utilizada foi a de “tentativa e erro”. Os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno foram ajustados para que as cargas hidráulicas geradas pelo modelo matemático fossem análogas às presentes no sistema real. Ao completar a convergência foi possível analisar através do gráfico de balanço hídrico e do gráfico das cargas hidráulicas calculadas comparadas com as observadas a validade do modelo.

O balanço hídrico calculado pelo aplicativo *Zone Budget* (figura 09) resultou em um saldo positivo, por representar satisfatoriamente o regime transiente determinado para o modelo. O gráfico obtido indica que as taxas totais de água de entrada e saída no sistema se anulam, sendo decorrentes da ação dos poços de captação, do rio, do armazenamento e da recarga. A participação destes varia de acordo com o tempo, sendo interessante destacar que a recarga e o armazenamento são os principais contribuintes para a entrada de água no sistema ao passo que os poços de bombeamento e o rio atuam como captadores destas águas.

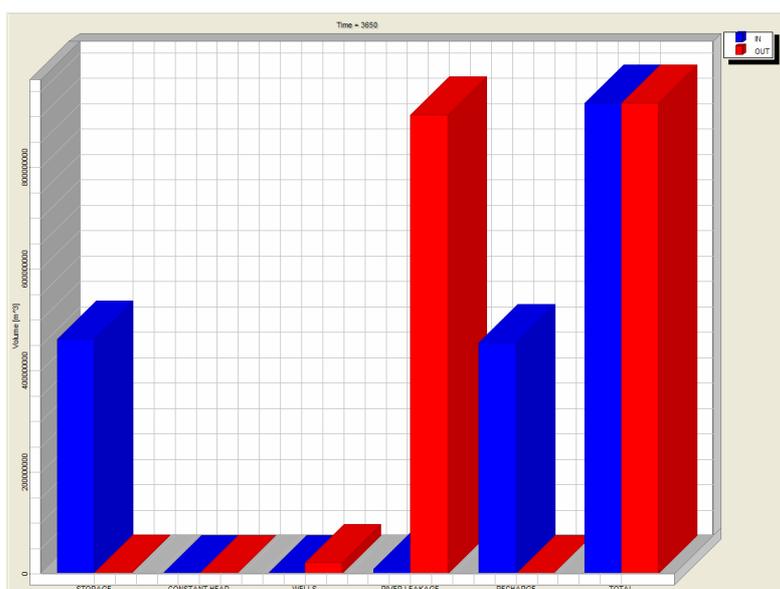


Figura 09: Gráfico de balanço de massa de água de recarga, armazenamento, carga especificada, do rio e dos poços (tempo = 10 anos).

O resultado dos gráficos das cargas hidráulicas calculadas e observadas (figura 10) não atingiu os padrões recomendados pelo manual da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Ao longo dos 10 anos é observada uma diminuição do valor do coeficiente de correlação ao mesmo tempo em que o RMS normalizando indica leve aumento. No último ano, o coeficiente de correlação apresentou valores próximos de 0.59 enquanto que o RMS normalizado alcançou 21.9%.

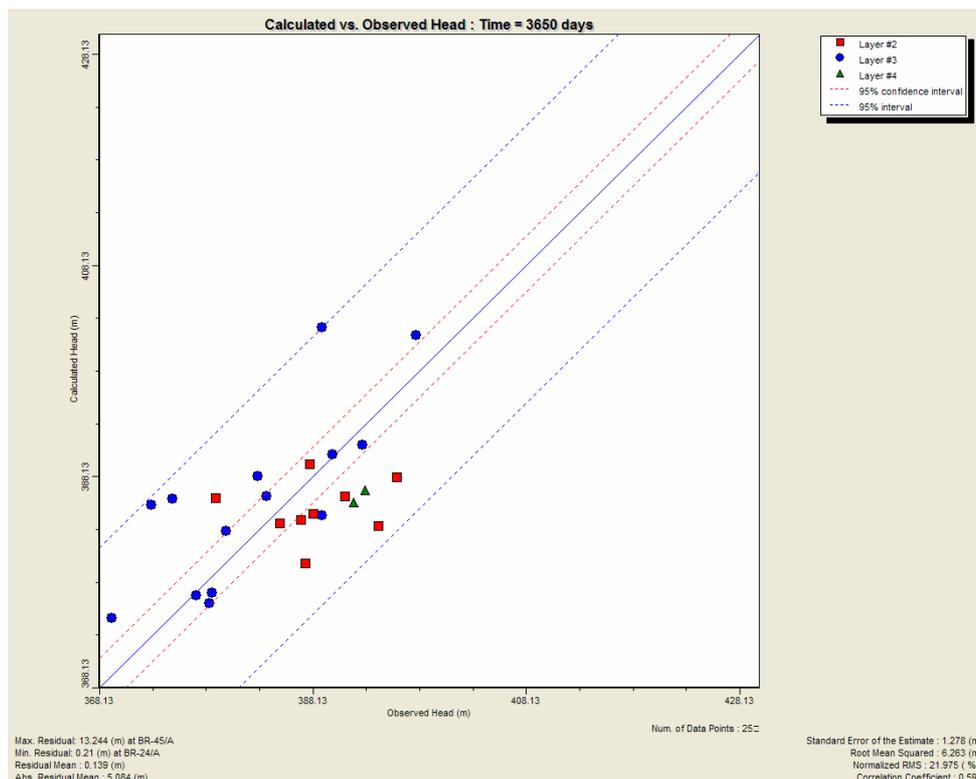


Figura 10: Gráfico de calibração das cargas hidráulicas calculadas e as observadas (tempo = 10 anos).

Apesar de não terem sido obtidos os índices ideais, o resultado foi considerado admissível devido às características ímpares do sistema aquífero modelado.

O aquífero multicamadas encerra uma sucessão de camadas aquíferas e rochas pelíticas de extensão lateral limitada, mas foi modelado como um aquífero único com o intuito de simplificação do modelo. Esta característica pode explicar as diferenças nos valores de carga medidos e a consequente calibração pouco refinada do modelo, pois evidencia que as medições certamente foram realizadas em camadas aquíferas distintas. Outra justificativa aceitável relaciona-se com as incertezas nos dados levantados, indicando possíveis casos de medições de níveis supostamente estáticos em poços ainda em processo de rebaixamento.

Saída de dados

Ao finalizar o modelo foram gerados mapas e seções que possibilitaram uma melhor visualização e entendimento do sistema aquífero multicamadas da Bacia Sedimentar de Resende.

Os resultados da modelagem da previsão de fluxo da água subterrânea são apresentados a seguir pelos mapas potenciométricos do aquífero multicamadas, pelos mapas de direção de fluxo e pelas seções hidroestratigráficas N-S avaliando o fluxo e as suas interações com o rio e os poços de bombeamento.

I - Mapa potenciométrico: Ao analisarmos os cenários gerados em regime transiente (figuras 11 a 13), observamos que as curvas potenciométricas se deformam, sugerindo um rebaixamento no nível de água no aquífero multicamadas. Desta forma, constata-se a influência dos poços de bombeamento, mais concentrados na parte central da bacia, indicando uma exploração de água acima do recomendado na periferia da cidade de Resende e na região do Pólo Industrial de Porto Real.

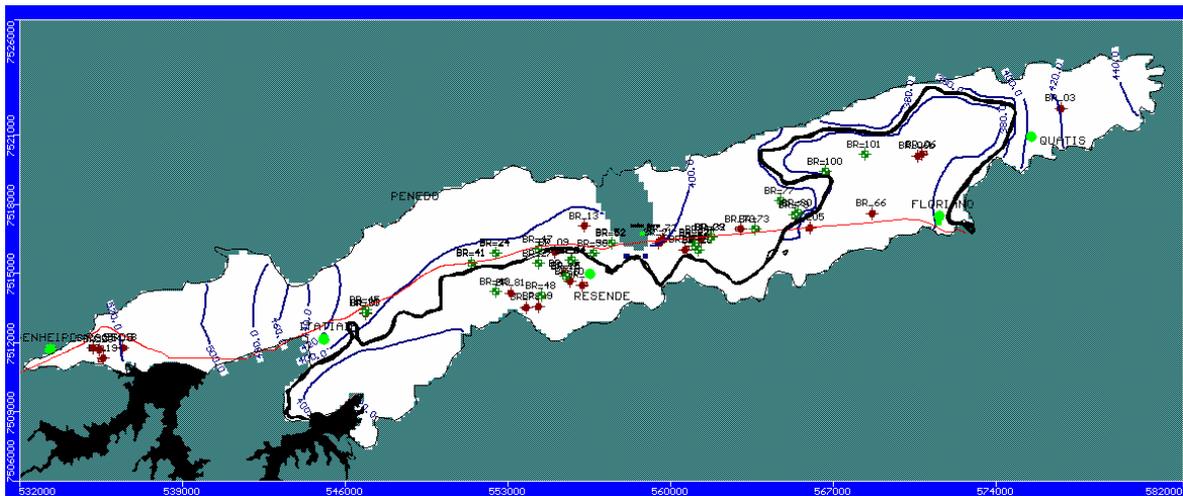


Figura 11: Mapa potenciométrico (tempo = 1 ano) mostrando a direção de fluxo regional.

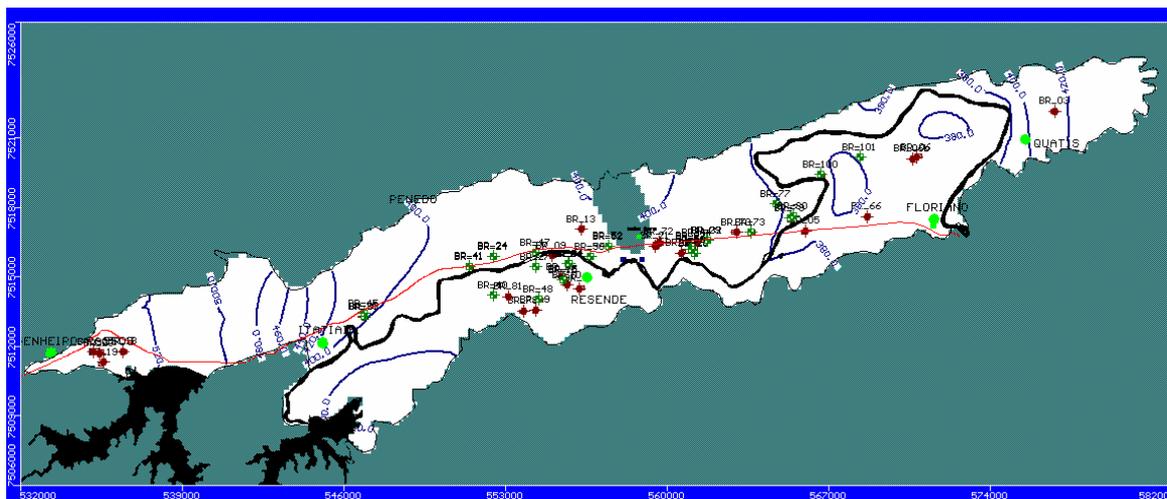


Figura 12: Mapa potenciométrico (tempo = 5 anos) mostrando a direção de fluxo regional.



Figura 13: Mapa potenciométrico (tempo = 10 anos) mostrando a direção de fluxo regional.

II - Direção de fluxo: Os mapas de previsão da direção de fluxo (figuras 14 a 16) possibilitaram o entendimento da interação sistema aquífero comparado ao rio Paraíba do Sul, tornando evidente a característica efluente deste rio, para onde converge praticamente toda a água do sistema. Ademais, indicam uma leve diminuição do fluxo de água no interior da bacia. Entretanto, reduções significativas se concentram, principalmente, nas áreas de entrada e saída do rio Paraíba do Sul na bacia.



Figura 14: Mapa de direção do fluxo (tempo = 1 ano).



Figura 15: Mapa de direção do fluxo (tempo = 5 anos).



Figura 16: Mapa de direção do fluxo (tempo = 10 anos).

III - Análise de cenário: Tendo como base os mapas anteriores, foram criadas seções hidroestratigráficas que permitiram uma visualização mais minuciosa da interferência causada pelos poços de bombeamento no sistema aquífero da região.

Visando compreender a resposta do modelo a constante exploração do sistema aquífero foram simulados três cenários onde o poço BR_80 bombearia por 16 horas diárias com aumento da vazão a partir do ano 6 de 10 anos de simulação. Como resultado da simulação, foram geradas seções S-N abrangendo o poço BR_80 (figuras 21 a 23).

Na avaliação destes cenários, constatou-se um relativo aumento da influência do poço no fluxo subterrâneo da área comprometendo localmente o fluxo de água que fluiria para o rio. Ao mesmo tempo evidencia a interferência provocada por esse poço nas curvas potenciométricas adjacentes.

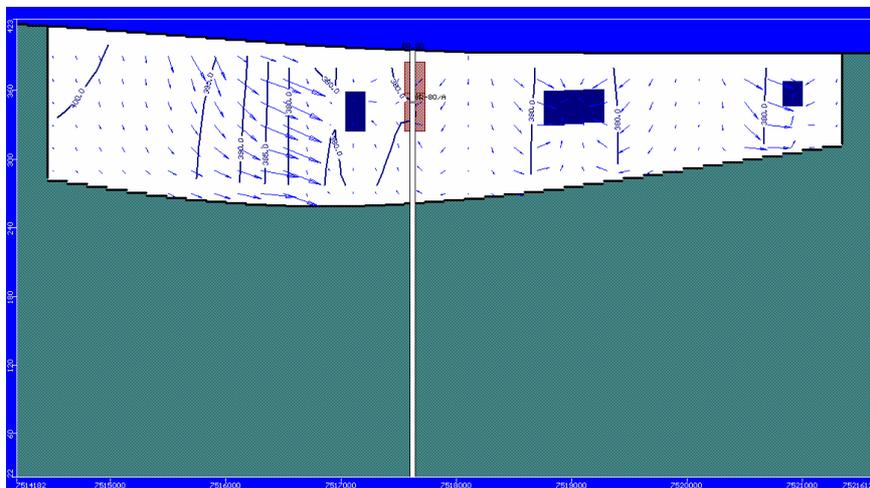


Figura 21: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando a direção de fluxo do cenário (tempo = 1 ano) sob interferência do poço de bombeamento BR_80 (exagero vertical de 10x).

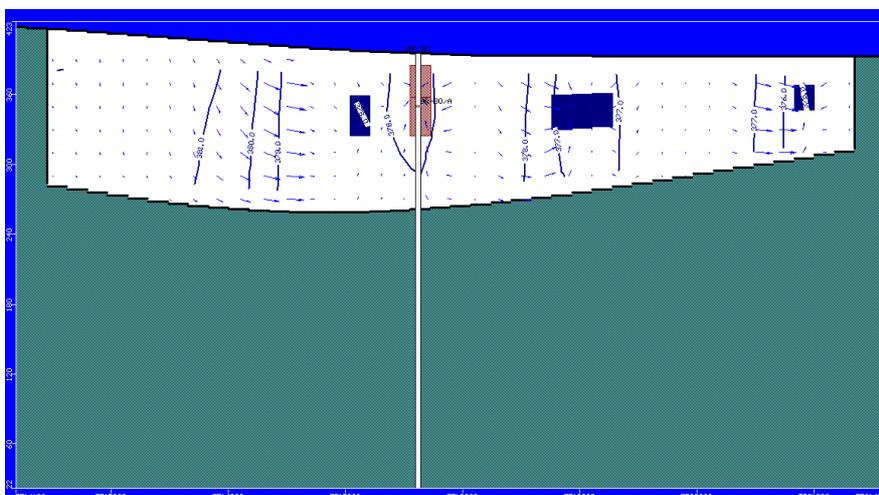


Figura 22: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando a direção de fluxo do cenário (tempo = 5 anos) sob interferência do poço de bombeamento BR_80 (exagero vertical de 10x).

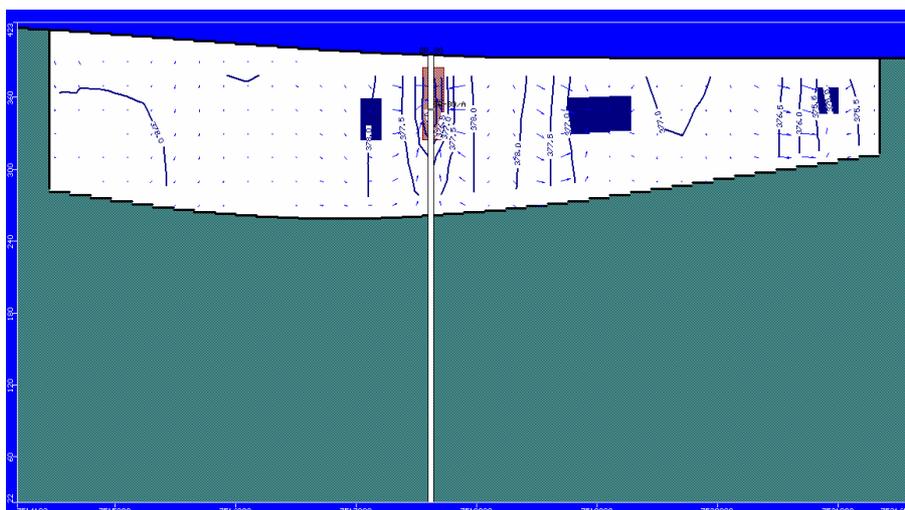


Figura 23: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando a direção de fluxo do cenário (tempo = 10 anos) sob interferência do poço de bombeamento BR_80 (exagero vertical de 10x).

CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou discorrer sobre os conceitos e fundamentos da modelagem matemática como ferramenta auxiliar para a gestão de recursos hídricos, assim como, abordar sua aplicação prática em uma simulação matemática do Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar de Resende, com base nas características hidrogeológicas da área e destacando a modelagem de fluxo, com o uso do *software Visual Modflow*[®] 4.2.

O emprego da modelagem matemática como ferramenta à gestão dos recursos hídricos tem se destacado pela capacidade preditiva de diferentes cenários em sistemas aquíferos, tornando-se uma valiosa fonte de informações. A Bacia Sedimentar de Resende apresenta inúmeros trabalhos científicos na área, caracterizando-a geológica e hidrogeologicamente, o que possibilitou a elaboração de um modelo matemático de fluxo e seu aperfeiçoamento. Não foram encontradas dificuldades quanto à obtenção de dados para a modelagem, embora tenha sido necessário manipulá-los para que a calibração fosse realizada com sucesso. Isto se deve, provavelmente, a questões relacionadas à própria bacia ou a limitações durante a coleta de dados.

Mesmo com o modelo atualizado ainda não foi possível reproduzir parâmetros estatísticos satisfatórios na calibração das cargas hidráulicas considerando-se todos os poços de observação, possivelmente relacionado à incapacidade de o modelo numérico traduzir diferentes valores de carga próximos.

Quanto ao balanço de massa de água do sistema, o maior contribuinte para a entrada de água foi a recarga da chuva, enquanto que para a saída de água, o rio. Os poços de captação, cujo cálculo

considerou um bombeamento de 16 horas diárias, apresentaram uma contribuição significativa para o balanço de massa aumentando notoriamente sua participação durante os anos.

No cenário estudado foram gerados mapas potenciométricos e mapas de direções de fluxo na área, onde se ressalta a característica efluente do rio Paraíba do Sul, responsável por praticamente toda a captação da água do aquífero. A interação dos poços de bombeamento com o sistema aquífero também pode ser observada, principalmente nas seções hidroestratigráficas de sentido S-N, sendo possível destacar um aumento sequencial na área de captação do poço.

A fim de aprofundar o conhecimento sobre o Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende, recomenda-se uma constante atualização dos dados de entrada, refinamento da calibração do modelo e elaboração de novas simulações em regime transiente com o escopo de melhor avaliar o potencial exploratório da área, possibilitando uma gestão mais racional desses recursos hídricos.

Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, A.P.B. Análise dos Padrões de Fraturamento Neotectônico e a sua Aplicação na Avaliação Hidrogeológica da Bacia Sedimentar de Resende-RJ – Monografia de Graduação – UFRJ. 2001.

BEAR, J., Beljin, M. S., Ross, R. R. Fundamentals of ground-water modeling. USEPA: ground water issue, 11p. 1992. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ada/download/issue/issue13.pdf>> Acesso em 12 jun. 2009.

BETTINI, C., MELLO, C.L., SILVA JR., G.C., BORGHI, L.F. *et al.* MODESTHI – Modelagem Estratigráfica de Reservatórios Terrígenos: Aplicação à avaliação do potencial hídrico da Bacia de Resende (RJ), 2004.

BIELSCHOWSKY, C. Avaliação de risco ambiental de sítios contaminados por hidrocarbonetos de petróleo. 2008. 315 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2008.

BREDEHOEFT, J. D. From models to performance assessment: the conceptualization problem (issue paper). Ground water, v. 41, n. 5, p. 571-577, sep-oct 2003.

CASTRO, Flávia Gonçalves de. Caracterização Hidrogeológica e Hidrogeoquímica da Bacia Sedimentar de Resende – RJ. Dissertação de Mestrado – Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

- ESCOBAR, I. Estudo regional da Bacia de Resende com base no método gravimétrico. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – MODESTHI, Relatório Final, 26 p., 1999.
- FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia e Meio Ambiente. Perfil Ambiental dos Municípios de Resende – Itatiaia. FEEMA, 81P. 1990.
- GELLI, R.B. BARBOZA, A.C.L., SILVA JR., G.C. Modelo Hidrogeológico da Bacia de Resende: Aspectos Físicos e Hidrodinâmicos. XLIV Cong. Bras. Geologia, Curitiba – PR. 2008.
- MONTEIRO, F. A. Modelagem Numérica de Fluxo Transiente no Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende – RJ. Monografia de Graduação – UFRJ. 2010.
- RAMOS, R.R.C. Sistemas aluviais terciários da Bacia de Resende, Estado do Rio de Janeiro, Brasil: análise de fácies e revisão estratigráfica. Rio de Janeiro, 221 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003.
- RAMOS, R.R.C. Estratigrafia da sucessão sedimentar terciária da Bacia de Resende, entre Resende e Quatis (RJ), com ênfase na caracterização das litofácies, ciclicidade e paleocorrentes. 209p. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, UFRJ. Rio de Janeiro. 1997.
- RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. São Paulo, 256 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, USP. 1989.
- SILVA, C.A.G. Modelagem Matemática de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende – RJ, software MODFLOW – Monografia de Graduação – UFRJ. 2009.