



UFRJ

Cynthia Augusto Gonçalves da Silva

**Modelagem Matemática de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da
Bacia Sedimentar de Resende – RJ, software MODFLOW.**

**Trabalho de Conclusão de Curso
(Bacharelado em Geologia)**

**UFRJ
Rio de Janeiro
2009**



UFRJ

Cynthia Augusto Gonçalves da Silva

**Modelagem Matemática de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da
Bacia Sedimentar de Resende – RJ, software MODFLOW.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Gerson Cardoso da Silva Junior

Rio de Janeiro

Julho de 2009

SILVA, Cynthia A. G.

Modelagem Matemática de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende – RJ, software MODFLOW / Cynthia Augusto Gonçalves da Silva -- Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2009.

xi,45p.: il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2009.

Orientador: Gerson Cardoso da Silva Jr.

1. Geologia. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Gerson Cardoso da Silva Jr. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Modelagem Matemática do Sistema Hidrogeológico da Bacia de Resende.

Cynthia Augusto Gonçalves da Silva

MODELAGEM MATEMÁTICA DE FLUXO DO SISTEMA HIDROGEOLÓGICO DA
BACIA SEDIMENTAR DE RESENDE – RJ, SOFTWARE MODFLOW.

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Gerson Cardoso da Silva Junior

Aprovada em:

Por:

Orientador: Gerson Cardoso da Silva Junior – IGEO - UFRJ

Raquel Velloso - PUC-RJ

Nelson Ferreira Fernandes – IGEO - UFRJ

UFRJ
Rio de Janeiro
2009

Dedico esse trabalho a meus pais, que estão para mim, muito acima da vida e da morte, sendo hoje e sempre a bússola que me guia nas horas mais difíceis de minha vida.

Agradecimentos

Ao professor Gerson Cardoso da Silva Jr. pela orientação e conhecimento transmitido, e por todas as oportunidades oferecidas.

Aos meus parceiros de pesquisa do Laboratório de Hidrogeologia da UFRJ, onde por mais de dois anos compartilham comigo seus conhecimentos e experiências, profissionais e pessoais.

À SWS e meus antigos companheiros de trabalho, pelas portas que me abriram e pelo treinamento que me propiciaram.

Aos demais professores e funcionários da UFRJ, por me auxiliarem nessa longa jornada em busca, não apenas de um diploma, mas do conhecimento de ao menos uma pequena parcela de tudo que envolve o misterioso e incrível mundo da geologia.

A toda a turma de geologia 2004, com a qual convivi por mais tempo do que com minha própria família durante esses anos, tornando-se conseqüentemente parte dela.

Aos meus grandes amigos Lorenenses, Cariocas, Paulistanos e de tantas outras localidades que foram, são e continuaram sendo parte indispensável da minha vida.

Ao Daniel Ferraz, pela presença constante em todos os momentos bons e ruins pelos quais tive que passar durante esse curso, pela parceria perfeita em todos os campos, pelo apoio nas provas, pelas conversas nas aulas, pela companhia nas festas, pelos almoços, pelos filmes, enfim, por esses cinco anos de convivência.

Às minhas irmãs, pela nossa união, força e amizade além de qualquer explicação.

À minha mãe, pelo seu suporte, pela sua dedicação, pela sua tranquilidade, pela sua força, pelo seu amor, ou simplesmente, pela sua existência.

Ao meu pai, por plantar em mim a semente do desejo de saber, do desejo de crescer!

Resumo

SILVA, C. A. G. Modelagem Matemática de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende – RJ, software MODFLOW. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A elaboração de um modelo matemático hidrogeológico para o sistema aquífero da Bacia Sedimentar de Resende, como ferramenta para identificação do potencial de utilização da água subterrânea na região, foi o objetivo principal deste trabalho. O intuito foi o de criar de uma metodologia que permitisse avaliar a situação atual e subsidiar adequadamente a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região. Para a conclusão do trabalho foram necessários estudos dos conceitos e fundamentos da modelagem matemática, aplicados aos recursos hídricos através de revisões bibliográficas. Complementarmente, foi realizada uma ampla discussão sobre a questão da Gestão de Recursos Hídricos no Brasil e no Mundo, sobre os resultados já alcançados e os desafios a serem vencidos.

Simulações envolvendo o balanço hídrico e padrões de fluxo na bacia, mapas potenciométricos e seções hidroestratigráficas foram obtidos como resultado da modelagem e são apresentadas no capítulo correspondente da monografia. O exercício da modelagem representa uma ferramenta formidável para o ganho de conhecimento hidrogeológico sobre uma determinada área, fazendo o modelista “pensar” o aquífero de um modo profundo e detalhado. O ajuste dos dados disponíveis obtidos em campo com os resultados do modelo não é muito bom, mas isso põe em relevo as deficiências na base de dados antes que problemas na modelagem.

O presente trabalho foi realizado utilizando dados de um amplo projeto de pesquisa, o Projeto MODESTHI – Modelagem Estratigráfica de Reservatórios Terrígenos, realizado na Bacia Sedimentar de Resende, localizada no extremo oeste do Estado do Rio de Janeiro, cujo crescimento econômico tem levado a uma exploração sem um controle adequado dos recursos hídricos subterrâneos da bacia.

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

Abstract

SILVA, C. A. G. **Mathematical Modeling of Groundwater Flow of the Hydrogeological System of the Resende Sedimentary Basin – RJ, software MODFLOW**. 2009. xi, 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The work aimed at the development of a mathematical model of Resende Sedimentary Basin Hydrogeological System as a tool for identification of potential exploitation of groundwater in the region. The intent was to create a methodology that would allow the assessment of the aquifer system current situation and adequately support its management in the region. To develop the study, concepts and fundamentals about the mathematical modeling, applied to water resources were learned through literature reviews. In addition, a broad discussion on the issue of Water Resources Management in Brazil and in the world was undertaken, about the results already achieved and challenges to be overcome in the future.

Simulations involving the water balance and flow patterns in the basin, potentiometric maps and hydrostratigraphic sections were obtained as a result of modeling. The modeling exercise represents a remarkable tool gain insight about hydrogeological functioning of a system in an área. The modeler has to “think” the system in such a deep and detailed way, hard to achieve otherwise. Field and model adjust was quite poor in some aspects, which stresses data deficiencies rather than modeling flaws.

This work was carried out using data from a large research project, the “Project MODESTHI - Stratigraphic Modeling of Terrigenous Reservoirs” held in Resende Sedimentary Basin, in the extreme west of Rio de Janeiro state, whose economic growth has led to an uncontrolled exploitation of groundwater resources of the basin.

Key-Words: Hydrogeologic Modeling; Resende sedimentary basin; Groundwater Management

Lista de figuras

Figura 01: Etapas para construção de um modelo matemático computacional. (Modificado de Guiguer, 2008).....	6
Figura 02: Mapa de Localização da Bacia Sedimentar de Resende (PIZANI, 2003).....	17
Figura 03: Mapa de unidades hidrogeológicas da bacia de Resende (modificado de Castro, 2000).	24
Figura 04: Mapa de contorno do embasamento da Bacia Sedimentar de Resende.....	29
Figura 05: Visualização em planta do aquífero livre (layer 01).....	30
Figura 06: Mapa de condutividade hidráulica do aquífero multicamadas, Bacia de Resende.....	31
Figura 07: Visualização em planta do aquífero multicamada (layers 2 a 5).....	31
Figura 08: Seção W-E do cenário estratigráfico regional (exagero vertical 10x).....	32
Figura 09: Zonas de recarga do modelo.....	33
Figura 10: Gráfico de balanço de massa de água de recarga (recharge), carga especificada (constant head), do rio (river leakage) e dos poços (wells).....	34
Figura 11: Gráfico de calibre das cargas hidráulicas. calculadas versus as observadas....	35
Figura 12: Mapa potenciométrico mostrando a direção de fluxo do regional.....	36
Figura 13: Mapa de direção do fluxo com direção da seção da figura 16 demarcada	37
Figura 14: <i>Seção hidroestratigráfica S-N mostrando o nível d'água e a direção de fluxo influenciada pelo rio</i> (exagero vertical de 10x).....	38
Figura 15: <i>Seção hidroestratigráfica S-N mostrando o nível d'água e a direção de fluxo do cenário sob interferência do poço de bombeamento BR_79</i> (exagero vertical de 10x).....	38
Figura 16: <i>Seção hidroestratigráfica S-N mostrando a direção de fluxo do cenário sob interferência do poço de bombeamento BR_79</i> (exagero vertical de 10x).....	39

Lista de tabelas

Tabela 01: Zonas de condutividade hidráulica.....	29
--	----

Sumário

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de figuras	ix
Sumário.....	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	4
3 MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA.....	5
3.1. Construção do Modelo Matemático Hidrogeológico.....	6
4 METODOLOGIA	14
4.1 Revisão bibliográfica e Construção do Modelo Conceitual	14
4.2 Construção do modelo de fluxo da água subterrânea.....	14
4.3 Avaliação do fluxo da água subterrânea a partir da modelagem matemática..	15
4.3.1 Modelagem Matemática do Fluxo da Água Subterrânea com Ferramenta Numérica.....	15
4.4 Comparação dos resultados	16
5 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA	17
5.1 Localização	17
5.2 Aspectos Fisiográficos	18
5.2.1 Clima e Hidrografia	18
5.2.2 Geomorfologia	18
5.3 Geologia	19
5.3.1 Embasamento Cristalino	20
5.3.2 Rochas Mesozóicas e Terciárias.....	20
5.3.3 Sucessões Paleógenas	20
5.3.4 Depósitos Quaternários.....	22
5.4 Tectônica	22
6 RESULTADOS.....	24

6.1 Desenvolvimento do Modelo Conceitual	24
6.2 Entrada de Dados.....	28
6.3 Execução e Calibração do modelo	33
6.4 Saída de Dados	36
7 CONCLUSÃO	40
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Anexo A – Mapa Geológico da Bacia Sedimentar de Resende

Anexo B – Mapa de Lineamentos da Bacia Sedimentar de Resende

Anexo C – Tabela de Poços Cadastrados na Bacia Sedimentar de Resende

Anexo D – Cálculo da condutividade hidráulica nos poços inventariados na Bacia Sedimentar de Resende.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea insere-se cada vez mais no cenário nacional e mundial como uma das alternativas apropriadas para o fornecimento de água, compartilhando com outras soluções de gestão de recursos hídricos o propósito de atender plenamente à sociedade naquilo que se considera ser o bem mais precioso do Terceiro Milênio.

Tem-se observado nos últimos anos que o crescimento populacional, além de aumentar a demanda por recursos hídricos, responde pelo aumento da poluição ambiental, incluída aí a contaminação de aquíferos, tornando imprescindível a formulação e aplicação de legislações específicas que garantam seu uso seguro e otimizado.

Dentro do contexto nacional, observa-se que o uso racional da água subterrânea depende não apenas do apoio de leis que garantam sua sustentabilidade, mas também de estudos direcionados à avaliação dos fatores que podem afetar o equilíbrio do meio físico, prejudicando o aproveitamento deste recurso. Estes estudos envolvem a caracterização física, química e quantitativa, o monitoramento da qualidade das águas e determinação do modo de funcionamento dos aquíferos, consistindo em ferramenta valiosa para o aproveitamento coerente das águas subterrâneas.

Com o intuito de aplicar uma metodologia que permitisse avaliar a situação atual e subsidiar adequadamente a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região da Bacia Sedimentar de Resende, realizou-se um estudo hidrogeológico e modelagem numérica daquele sistema aquífero, com o uso do software *Visual Modflow*[®] 4.2. Os municípios abrangidos pelo estudo, Resende, Itatiaia, Porto Real e Quatis, atualmente vivenciando um expressivo desenvolvimento econômico, vêm utilizando frequentemente as águas subterrâneas da bacia em seu abastecimento, sem, no entanto, haver um controle técnico sistemático dos aquíferos da bacia, pondo em risco esse valioso recurso.

No gerenciamento de sistemas aquíferos, considerando a sua proteção e remediação, nos quais decisões devem ser tomadas levando em conta tanto a qualidade quanto a quantidade de água, o modelo numérico, usado em conjunto com a experiência e dados de campo, é uma ferramenta importante para fornecer informações a respeito da resposta futura do sistema (BEAR *et al.*, 1992). Isso se deve ao seu grande potencial e versatilidade em integrar e sintetizar nosso conhecimento sobre sistemas hidrogeológicos e fornecer uma versão simplificada de um fenômeno (BREDEHOEFT, 2003). Modelar deve ser considerado como uma atividade contínua na qual suposições são reexaminadas, adicionadas, excluídas e modificadas com a investigação contínua. A aplicação matemática e computacional não está tão propensa a erros, mas o conhecimento geológico e hidrológico da região é que corre o risco de imprecisão ou má interpretação. Portanto, a preparação de um modelo conceitual válido e completo é essencial para uma boa modelagem (CABRAL & DEMÉTRIO, 2000). O desafio da modelagem de água subterrânea está em combinar o julgamento humano com poder dos computadores (ANDERSON & WOESSNER, 1992).

A aplicação da técnica da modelagem e a interpretação dos resultados qualitativos e quantitativos em estudos de prevenção de possíveis impactos ambientais vêm ganhando destaque na literatura (BONGANHA, 2005). A aplicação da técnica de modelagem matemática para diferentes fins tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio da solução de diferentes problemas, inclusive de águas subterrâneas, sendo usada com frequência em projetos de gestão de recursos hídricos.

O estudo aqui apresentado foi desenvolvido utilizando dados de um amplo projeto de pesquisa, o Projeto MODESTHI - Modelagem Estratigráfica de Reservatórios Terrígenos: Aplicação à Avaliação do Potencial Hídrico da Bacia de Resende (RJ), financiado pelo Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico Tecnológico –

PADCT (FINEP), já encerrado. Também teve o apoio do projeto “Aqüíferos Sedimentares da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (estado do Rio de Janeiro) – Caracterização Estratigráfica Aplicada à Avaliação do Potencial Hídrico” da FAPERJ, em andamento, que permitiu a ampliação e atualização da base de dados iniciada no Projeto MODESTHI.

O estudo ora apresentado visa, portanto, discutir conceitos e fundamentos da modelagem matemática como ferramenta para a gestão de recursos hídricos, bem como, apresentar sua aplicação em uma simulação matemática do Sistema Aqüífero da Bacia Sedimentar de Resende, com base nas características hidrogeológicas da área e com ênfase na modelagem de fluxo.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo consistiu na elaboração de um modelo matemático hidrogeológico para a região, como ferramenta para identificação das áreas mais favoráveis à exploração de água subterrânea, servindo de base para a obtenção de importantes parâmetros de planejamento urbano e regional, tendo em vista sua proteção e seu uso otimizado. Podem ser enumerados os seguintes objetivos adicionais do trabalho:

- I – Caracterização e avaliação do Sistema Aquífero da Bacia de Resende, cujas águas têm sido utilizadas sem um controle técnico sistemático;
- II – atualização da base de dados (inventário de pontos de água), da bacia de Resende, com base em novos dados aportados nos últimos anos e adicionados ao modelo;
- III – simulações envolvendo o balanço hídrico e padrões de fluxo na bacia, com base em cenários plausíveis de exploração e consumo.

3 MODELAGEM NUMÉRICA HIDROGEOLÓGICA

Os modelos matemáticos computacionais tiveram um avanço considerável nas últimas décadas, inclusive no campo da hidrogeologia, estando cada vez mais acessíveis, graças ao desenvolvimento da informática. São hoje ferramentas fundamentais para o planejamento e previsões de situações reais, sendo representações simplificadas de uma situação real, e como tal, tem suas limitações.

Modelos matemáticos representam o comportamento de um sistema físico real através da resolução das equações matemáticas que regem os processos atuantes, no caso da hidrogeologia, são utilizadas as equações que regem o fluxo subterrâneo. São ferramentas extremamente úteis para realização de análises complexas dos aquíferos e para a expansão da capacidade do hidrogeólogo de entender e gerenciar os recursos hídricos subterrâneos. A sua utilização ajuda a sistematizar as informações de campo e identificar áreas onde maiores informações são necessárias. Além disso, pode alertar sobre detalhes não considerados previamente e oferecem uma das melhores maneiras de fazer previsões sobre as conseqüências das ações que serão realizadas sobre os recursos hídricos subterrâneos (CABRAL & DEMÉTRIO, 2000).

Para uma utilização adequada dessa ferramenta, é necessário que os objetivos pretendidos com o seu uso sejam bem definidos. Segundo Cabral & Demétrio (2000), os modelos podem ter objetivo de previsão ou de interpretação de cenários. No primeiro caso o modelo é usado para prever a resposta do aquífero a determinadas ações. No segundo caso procura-se entender o funcionamento do aquífero e sistematizar as informações.

Os modelos matemáticos hidrogeológicos podem ser Modelos de Fluxo, que fazem simulações do escoamento da água levando em conta os fluxos naturais dos aquíferos,

suas recargas e os bombeamentos a que está submetido, ou Modelos de Transporte de Massa, aplicados em análises de transporte e do espalhamento de uma substância poluente que atingiu o aquífero.

3.1 Construção do Modelo Matemático Hidrogeológico

A modelagem de aquífero envolve diversas etapas em que simulação computacional é apenas um dos passos. A construção de um modelo matemático hidrogeológico deve ser realizada de acordo com uma sequência envolvendo desde a definição dos objetivos, coleta de dados, identificação das condições de contorno do modelo, elaboração do modelo conceitual, seleção do programa adequado, tradução do modelo conceitual para a linguagem computacional, calibração do modelo, análise da sensibilidade e obtenção dos resultados objetivados (figura 01).

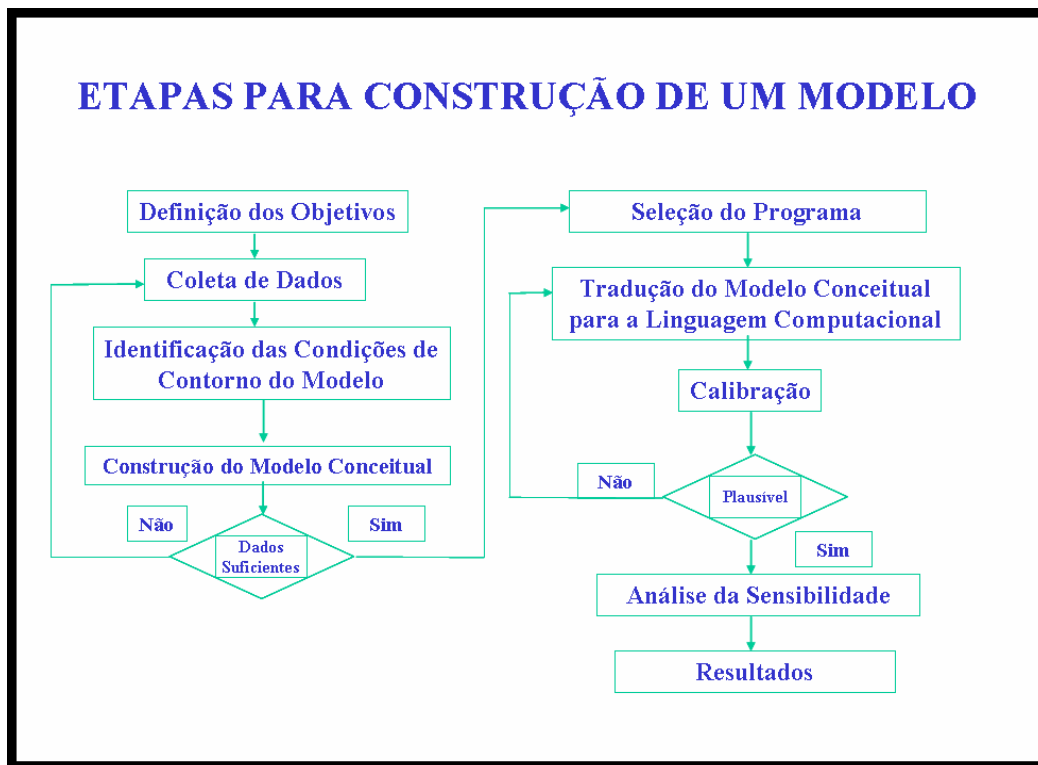


Figura 01: Etapas para construção de um modelo matemático computacional. (Modificado de Guiguer, 2008)

DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

Guiguer (2008) enfoca a importância da definição dos objetivos no processo de modelagem, e como essa etapa frequentemente não recebe a devida atenção. Os objetivos da modelagem são tipicamente pragmáticos e utilizam simulações do fluxo subterrâneo natural e/ou de processos de transporte de contaminantes na determinação de futuros impactos das condições atuais, predição das linhas de fluxo e do tempo de transporte das águas subterrâneas, delimitação das áreas de proteção dos poços, previsão da migração da pluma de contaminação e/ou atenuação natural, com possibilidade de imposição de novas condições ao sistema natural para prever uma resposta, entre outras possibilidades.

COLETA DE DADOS

A coleta de dados deve abranger as características geológicas principais do sistema aquífero, incluindo a caracterização da superfície com dados de topografia e águas superficiais e a caracterização de subsuperfície com as propriedades do solo, dados de condutividade hidráulica, armazenamento específico, porosidade eficaz, porosidade, densidade, dispersividade, fração orgânica, química, distribuição de cargas hidráulicas e composição química das águas subterrâneas. A densidade de dados aumenta o desafio de calibrar o modelo.

CONDIÇÕES DE CONTORNO

Modelos numéricos requerem condições de contorno, de forma que a carga ou o fluxo devem ser especificados ao longo das condições de contorno do sistema, segundo Anderson e Woessener (1992). Sempre que possível os contornos hidrogeológicos naturais do sistema devem ser utilizados como os contornos do modelo. Contudo, para

alguns problemas pode ser necessário restringir o domínio do problema a áreas menores que os contornos naturais do aquífero.

Bielschowsky (2008) explica que as condições de contorno podem ser do tipo físico ou hidráulico:

I – Contorno físico: é devido à presença física de características que influenciam o escoamento. Por exemplo, rochas impermeáveis, falhas geológicas e corpos de água superficiais;

II – Contorno hidráulico: é formado devido às condições do escoamento. Os mais comuns são divisores de água e linhas de fluxo. Em ambos os casos considera-se que o fluxo na direção perpendicular é nulo.

Do ponto de vista matemático as condições de contorno podem ser de três tipos:

I – Carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet): neste caso a carga hidráulica é especificada. Por exemplo, se o aquífero tem conexão com um lago, a carga é conhecida, e pode ser também uma função conhecida de variação da carga hidráulica;

II – Fluxo especificado (condição de Neumann): o fluxo é especificado, podendo ser nulo ou não. É considerado nulo num contorno impermeável, numa linha de simetria, ou numa linha de fluxo. Não é nulo quando, através do conhecimento do gradiente hidráulico, têm-se condições de avaliar o fluxo. Se ao longo de todo contorno a condição é do tipo Neumann, o problema fica indeterminado e é necessário pelo menos especificar um ponto com potencial conhecido;

III – Fluxo dependendo da carga hidráulica (condições mistas ou condições de Robin ou de Cauchy) – uma combinação das duas anteriores. Ocorrem em contorno semipermeável e obtém-se uma expressão que é função linear da carga hidráulica e do fluxo.

MODELO CONCEITUAL

O modelo conceitual consiste em compreender o sistema hidrogeológico em questão com base na interpretação e análise semiquantitativa dos dados (WALTON, 1992), de forma a identificar as unidades hidroestratigráficas e suas características hidráulicas e o sistema de fluxo da água subterrânea. Este modelo conceitual norteará a definição do domínio do modelo, do tipo de aquífero a ser modelado, das condições iniciais e de contorno, e das fontes e sumidouros de água no sistema.

É importante que o modelo conceitual seja uma representação válida das condições hidrogeológicas mais importantes; as falhas ocorridas nos modelos numéricos para se fazer previsões, na maioria dos casos, podem ser atribuídas a erros no modelo conceitual.

Segundo Anderson & Woessner (1992), existem três etapas na construção do modelo conceitual hidrogeológico:

I – Definição das unidades hidroestratigráficas: As informações geológicas, que incluem mapas e seções geológicas, perfis estratigráficos e construtivos dos poços, são combinadas com as informações das propriedades hidrogeológicas para definir as unidades hidroestratigráficas do modelo conceitual.

II – Preparação do balanço de massa da água: As fontes de água do sistema assim como a esperada direção do fluxo e os pontos de saída de água devem fazer parte do modelo conceitual. Um balanço de massa de água deve ser preparado pelos dados de campo para sumarizar as magnitudes destes fluxos e as mudanças no armazenamento. As entradas de água devem incluir a recarga da água subterrânea provinda da precipitação, fluxos superficiais, ou recarga de corpos de água superficiais. As saídas devem incluir surgências, fluxo de base dos rios, evapotranspiração e bombeamento. O fluxo de base pode ser tanto de entrada como de saída.

Durante a calibração do modelo, a estimativa de campo do balanço de massa deve ser comparada com o balanço de massa computado pelo modelo.

III – Definição do sistema de fluxo: A hidroestratigrafia forma a estrutura do modelo conceitual. A informação hidrogeológica é utilizada para conceitualizar o movimento da água subterrânea através de um sistema. Informações hidrológicas de precipitação, evaporação e escoamento superficial, assim como os dados de carga e informações geoquímicas são utilizadas nesta análise. Medidas de nível de água são utilizadas para estimar a direção geral do fluxo da água subterrânea, a localização de áreas de recarga e descarga e a conexão entre os aquíferos e os sistemas de água superficiais.

SELEÇÃO DO PROGRAMA

A seleção do aplicativo matemático a ser empregado depende segundo Bonganha *et al.* (2007), de vários fatores, tais como: objetivo do trabalho, problema a ser resolvido com o modelo matemático, complexidade do modelo conceitual, tempo e recursos disponíveis.

Estes fatores determinarão a decisão das opções entre um modelo analítico ou numérico, bi ou tridimensional, diferenças finitas ou elementos finitos, fluxo de água subterrânea ou transporte de massa. (Iritani, 1998)

Anderson e Woessner (1992) aconselham optar por um aplicativo que seja amplamente utilizado em cenários compatíveis, com manual detalhado, com documentação completa e suporte técnico ao usuário. Além disso, o programa deve calcular o balanço de água, pois, como as equações se baseiam em conservação de massa, valores semelhantes entre os volumes de água que entram ou saem do sistema indicam que o programa calculou corretamente as equações que compõem o modelo matemático.

Atualmente, estão disponíveis modelos computacionais e pacotes gráficos avançados para simulação do fluxo da água subterrânea e transporte de contaminantes dissolvidos nas águas subterrâneas, dentre os quais se destacam:

I – MODFLOW: desenvolvido por Michael McDonald e Arlen Harbaugh (McDonald e Harbaugh, 1988) e frequentemente atualizado pelo United States Geological Survey (USGS), trata-se de um modelo que resolve numericamente a equação de fluxo em três dimensões, por meio da técnica de diferenças finitas, em malha de elementos retangulares, para simulação do escoamento em regimes de estado permanente ou transiente. Dentre os modelos de diferenças finitas é o mais utilizado, pois, é capaz de simular uma grande variedade de sistemas aquíferos, tem facilidade de integração com modelos de transporte e apresenta extensa divulgação e documentação.

II – Visual MODFLOW: integra as versões mais atualizadas dos processadores numéricos MODFLOW, MODPATH, MT3D e RT3D. A interface gráfica é dividida em Módulo de Entrada de Dados (permite que o usuário utilize graficamente todos os parâmetros necessários de entrada para a construção do modelo), Módulo de Execução (este módulo permite que o usuário modifique os parâmetros e as opções específicas dos processadores) e Módulo de Saída de Dados (nesta seção é possível visualizar os resultados da modelagem e da calibração). (Bielschowsky, 2008)

TRADUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Para a construção do modelo matemático é necessário traduzir o modelo conceitual da área, definido com base nos dados hidrogeológicos e hidrológicos, para a linguagem do programa escolhido. Assim, a discretização da malha, a delimitação das condições de contorno e das condições iniciais devem ser adequadamente introduzidas de modo que o aplicativo matemático, escolhido para a construção do modelo matemático, represente as

condições reais do sistema hidrogeológico (Bonganha *et al*, 2007). Os elementos para a definição do modelo matemático incluem a discretização da grade do modelo; delimitação das condições de contorno externas e internas; definição dos poços de injeção / extração e de observação e definição das condições

CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração consiste no ajuste do modelo matemático simulado ao sistema hidrogeológico estudado. Neste processo, os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno são ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo matemático sejam semelhantes às observadas no sistema real. O processo de calibração mais comumente utilizado é o de “tentativa e erro”, no qual os parâmetros são ajustados manualmente por simulações sucessivas e comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas (Anderson e Woessner, 1992). Quando a diferença entre a carga hidráulica calculada e observada atingir um valor aceitável, previamente definido, o modelo será considerado calibrado. Este valor é também chamado de “critério de calibração” e a diferença entre as cargas hidráulicas é tratada como “resíduo”. Com o software *Visual MODFLOW Pro 4.2* (Guiguer e Franz, 2006), a calibração pode ser feita automaticamente pelo aplicativo *WinPEST*, o que possibilita uma redução no tempo despendido normalmente nas calibrações manuais do modelo.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Bielschowsky (2008) explica que o propósito da análise de sensibilidade é quantificar as incertezas no modelo calibrado, causadas pelas incertezas na estimativa dos parâmetros do aquífero, do bombeamento e das condições de contorno.

Durante a análise de sensibilidade, os valores calibrados de condutividade hidráulica, os parâmetros de armazenamento, a recarga, as condições de contorno são

sistematicamente mudadas dentro de um intervalo plausível previamente estabelecido. A magnitude de mudança nas cargas para a solução calibrada é a medida da sensibilidade da solução para determinado parâmetro.

A análise de sensibilidade é tipicamente realizada pela mudança de um parâmetro por vez. Os efeitos da mudança de dois ou mais parâmetros também deve examinada para determinar o maior intervalo das soluções plausíveis. Por exemplo, as taxas de condutividade hidráulica e recarga devem mudadas juntas, onde baixos valores de condutividade hidráulica sejam utilizados com altas taxas de recarga e vice-versa.

A análise de sensibilidade também deve testar os efeitos das mudanças em outros parâmetros além da carga. Segundo Freeze *et al.* (1990), não existem somente incertezas aos valores dos parâmetros necessários para o desenvolvimento das equações, também existem incertezas sobre a geometria do sistema analisado. As incertezas da litologia, estratigrafia e estrutura introduzem um nível de complexidade a análise geotécnica e hidrogeológica que é totalmente desconhecida em outras disciplinas de engenharia.

APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Com o modelo finalizado eles tornam-se ferramentas idéias na previsão de cenários como a otimização de poços de produção, avaliação de impactos ao fluxo subterrâneo causado por escavações, atenuação natural de contaminantes, remoção de fontes de contaminação, contenção hidráulica e física de plumas, entre outros cenários do sistema aquífero.

4 METODOLOGIA

A metodologia descrita a seguir teve como objetivo final avaliar o fluxo da água subterrânea na Bacia Sedimentar de Resende utilizando a modelagem matemática como ferramenta.

4.1 Revisão bibliográfica e Construção do Modelo Conceitual

Nesta etapa, procurou-se reunir os trabalhos gerados principalmente pelas equipes de pesquisadores pertencentes ao projeto MODESTHI, desenvolvendo um modelo conceitual dos fatores relevantes à hidrogeologia da bacia.

Os dados obtidos nas pesquisas hidrogeológicas foram armazenados em planilhas Excel sendo processados através da confecção de mapas e diagramas. Com auxílio do software *Surfer 7.0* foram gerados mapas que auxiliaram no desenvolvimento do modelo conceitual e matemático da bacia Sedimentar de Resende.

Com base na interpretação dos dados obtidos, foram apontadas as principais características dos aquíferos identificados, como áreas de recarga, direções de fluxo e armazenamento, dando subsídio para o entendimento da dinâmica de funcionamento destes aquíferos.

4.2 Construção do modelo de fluxo da água subterrânea

I – DEFINIÇÃO DO DOMÍNIO DE ANÁLISE E DA MALHA

Foi definido um cenário regional cujo domínio foi estabelecido para englobar as condições de contorno físicas como o rio Paraíba do Sul, que corta a bacia na direção W-E e as represas localizadas na extremidade SW da bacia. A malha desse cenário foi construída com 116 linhas, 250 colunas e 6 camadas, representando um total de 174.000 células.

II – CONSTRUÇÃO DO CENÁRIO ESTRATIGRÁFICO

O cenário estratigráfico selecionado como representativo foi elaborado com base nas informações obtidas nos relatórios do projeto MODESTHI, sendo a estratigrafia representativa

selecionada com base nas diferentes hidrofácies observadas na região caracterizadas com base nas condutividades hidráulicas obtidas nos poços de captação de água inventariados na área.

III – CONDIÇÕES DE CONTORNO

Os valores das condições de contorno utilizados no modelo foram ajustados dentro de uma faixa que se considera realista para o sistema hidrogeológico para se obter o melhor calibragem das cargas hidráulicas.

4.3 Avaliação do fluxo da água subterrânea a partir da modelagem matemática

Com a determinação do cenário hidrogeológico foi utilizada a modelagem matemática hidrogeológica como ferramenta, para a visualização do comportamento do fluxo da água subterrânea na bacia.

O *software* selecionado para o desenvolvimento do modelo numérico de fluxo subterrâneo foi o Visual MODFLOW versão 4.2.0.151. A escolha desta ferramenta se deve a sua capacidade de incluir os processos relevantes descritos no modelo conceitual hidrogeológico. Além disso, o Visual MODFLOW é atualmente o *software* mais usado na modelagem de fluxo tendo ampla aceitação internacional.

4.3.1 Modelagem Matemática do Fluxo da Água Subterrânea com Ferramenta Numérica

I – CALIBRAÇÃO DAS CARGAS HIDRÁULICAS

O processo de calibração do modelo de fluxo de águas subterrâneas em regime permanente da área foi baseado nas recomendações do guia-padrão da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para calibração de modelos de fluxo de águas subterrâneas (ASTM, 2002). Para se considerar o resultado de uma simulação como realmente satisfatório os valores dos parâmetros estatísticos obtidos a partir dos gráficos de calibração devem estar em um intervalo

estabelecido. O coeficiente de correlação deve estar superior a 0.8 e o RMS normalizado em valores inferiores a 10%.

II – BALANÇO DE MASSA DE ÁGUA

O balanço de massa de água determina a taxa (em m³/dia) de entrada e saída de água pelas condições de contorno do sistema. Através de um gráfico correspondente é possível verificar qual a magnitude de contribuição dos contornos, como a recarga, os poços de bombeamento, as cargas especificadas ou o rio para o sistema de fluxo da água subterrânea. (Bielschowsky, 2008)

O gráfico de balanço de massa de água foi utilizado visando à comparação do efeito ocasionado pela recarga, pelos poços de bombeamento e pelo rio no fluxo subterrâneo.

III – MAPA POTENCIOMÉTRICO E DE DIREÇÃO DE FLUXO

Foram elaborados mapas potenciométricos e mapas de direção de fluxo subterrâneo para o aquífero multicamadas visando à comparação do efeito ocasionado pela recarga, pelos poços de bombeamento e pelo rio no fluxo subterrâneo.

IV – SEÇÕES HIDROESTRATIGRÁFICAS

Foram geradas seções hidroestratigráficas W-E e N-S, buscando uma avaliação do sentido do fluxo da água subterrânea. Assim como os mapas potenciométricos, avaliou-se a contribuição dos poços de bombeamento e do rio para o fluxo da água subterrânea.

4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Como resultados da modelagem foram gerados gráficos de balanço de massas, mapas potenciométricos, mapas de fluxo, seções estratigráficas e hidroestratigráficas do sistema aquífero.

5 CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA

5.1 Localização

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.

Situa-se entre dois parques nacionais, o de Itatiaia e o da Bocaina, em um vale limitado pelas Serras do Mar e da Mantiqueira, e no eixo rodoviário entre os dois maiores centros urbanos e industriais do País (Rio de Janeiro e São Paulo), tendo como principal via de acesso à área a Rodovia Presidente Dutra (BR - 116), que atravessa toda a bacia na direção E-W, ao longo do seu eixo (figura 02).

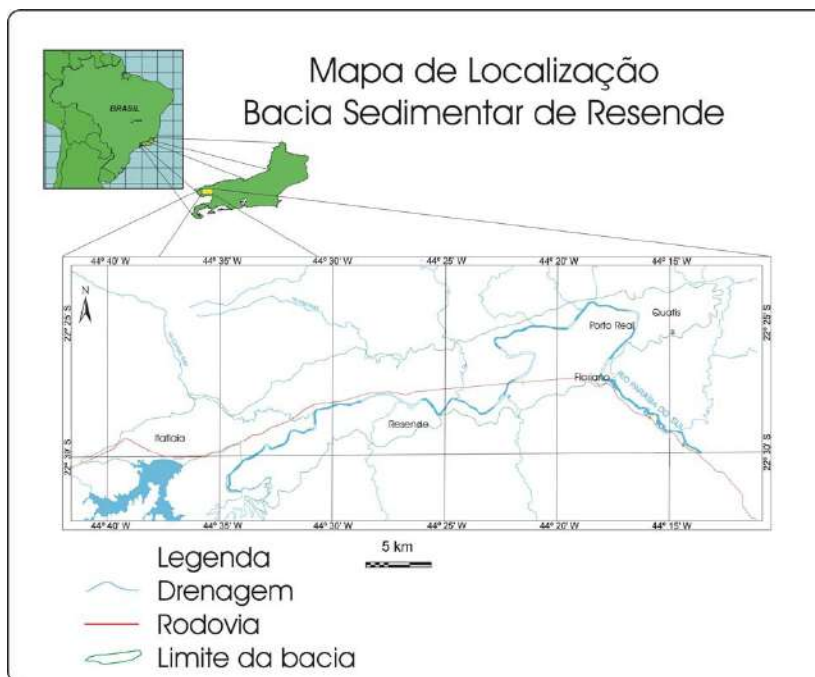


Figura 02: Mapa de Localização da Bacia Sedimentar de Resende (PIZANI, 2003).

5.2 Aspectos Fisiográficos

5.2.1 Clima e Hidrografia

O clima na região é úmido, com pouca deficiência de água, caracterizado por temperaturas 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 (dados obtidos no INMET- Instituto Nacional de Meteorologia). Esta variação no regime pluviométrico acompanha a variação na temperatura, sendo a maior concentração de chuvas nos meses de dezembro a janeiro.

Em termos hidrográficos, a Bacia de Resende encontra-se totalmente inserida nos limites da bacia do rio Paraíba do Sul. Este rio, que nasce no Estado de São Paulo, atravessa todo o Estado do Rio de Janeiro, desaguando no Oceano Atlântico, no município de São João da Barra. A área de drenagem deste rio, dentro dos limites da Bacia de Resende é da ordem de 1400 km² (FEEMA, 1990).

Devido à declividade média no trecho da bacia de Resende, da ordem de 0,15 m/km e às abundantes chuvas, são freqüentes as enchentes nesta região.

5.2.2 Geomorfologia

Geomorfologicamente, a bacia de Resende, localiza-se no domínio morfo-estrutural do Vale do Paraíba do Sul, mais precisamente no médio Vale do rio Paraíba do Sul, em uma depressão tectônica preenchida por sedimentos terciários e quaternários, situada entre as serras da Mantiqueira e do Mar. Nesta região, podem ser distinguidas três unidades geomorfológicas distintas:

I – Unidade onde está inserida a bacia e onde foram desenvolvidos os estudos. É a mais baixa da região, localizada ao longo do rio Paraíba do Sul, abrangendo as planícies aluviais e as colinas circundantes, com cotas que variam entre 380 e 560 metros;

II – unidade que contorna a primeira em um nível topográfico mais elevado sendo formada por elevações cristalinas de formas arredondadas e vertentes íngremes (“mar de morros”), com aprofundamento de vales entre 40 e 130 metros e com densidade de drenagem fina, correspondendo ao reverso da Serra do Mar; e

III – unidade correspondente às escarpas da Serra da Mantiqueira, onde as altitudes são superiores a 2.500 m.

5.3 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. Com cerca de 47 km de comprimento, alongada no sentido ENE-WSW, possui largura variando entre 0,5 a 8 km e 220 km² de área e espessura máxima do pacote sedimentar de 550 m (Escobar, 1999).

A geologia regional da área onde se insere a bacia de Resende destacada no mapa geológico apresentado no Anexo A, pode ser resumida em uma sequência que compreende o embasamento cristalino, rochas mesozóicas, sucessões paleógenas e depósitos quaternários, cuja composição, litologias e aspectos estruturais serão detalhados a seguir, adotando a revisão estratigráfica das sucessões paleógenas da Bacia de Resende proposta por Ramos *et al.* (2003), por representarem os mais recentes estudos deste caráter na região.

5.3.1 Embasamento Cristalino

Geologicamente, a área onde se insere a Bacia de Resende compreende um embasamento cristalino correspondente ao Cinturão Móvel Ribeira, segundo Machado Filho *et al.*(1983), constituído por rochas gnáissico-migmatíticas de médio a alto grau metamórfico, de idade arqueana a proterozóica, pertencentes ao Complexo Paraíba do Sul.

5.3.2 Rochas Mesozóicas e Terciárias

Associados à evolução das bacias de Resende e Volta Redonda são encontrados corpos de rochas magmáticas de idade mesozóica até terciária que incluem, segundo Melo *et al.* (1983, *apud* RAMOS, 1997), intrusões de diabásio na forma de soleiras e diques no embasamento da bacia. Cortando o embasamento da Bacia de Resende, encontram-se intrusões de rochas alcalinas de idade neocretácea e eoterciárias, que correspondem aos maciços de Itatiaia, Morro Redondo e Passa Quatro.

5.3.3 Sucessões Paleógenas

5.3.3.1 Formação Ribeirão dos Quatis

Representam a unidade cenozóica mais antiga da região da Bacia de Resende. A área de ocorrência desta unidade na bacia é pequena e sua espessura foi estimada em 25-30 m na área de sua seção-tipo. Constitui o registro de um antigo sistema fluvial de tipo entrelaçado implantado sobre embasamento arrasado, anterior e/ou contemporâneo às primeiras manifestações da reativação do sistema de falhas ENE-WSW que gerou o hemigráben no início do Eoceno. Os conglomerados basais desta unidade estão em inconformidade sobre o embasamento proterozóico e seu contato superior com a Formação Resende não é visualizado em campo.

5.3.3.2 Formação Resende

Corresponde à maior parte dos depósitos paleogênicos da bacia. Entretanto, para algumas partes desta sucessão cujas características litológicas, composicionais e faciológicas são distinguíveis, formalizaram-se dois membros, Membro Itatiaia e Membro Acácias.

I – Membro Itatiaia

Propõe-se a denominação Membro Itatiaia para os depósitos de leques aluviais adjacentes aos maciços do Itatiaia e do Morro Redondo e suas partes distais, onde há o predomínio de sedimentos depositados através de fluxos trativos. Estes são distinguíveis dos depósitos da Formação Resende *stricto sensu* pela composição marcadamente rica em detritos derivados da erosão dos maciços alcalinos, o que confere a estes sedimentos cores cinzentas ou esbranquiçadas.

Os depósitos desse membro estão em posição estratigráfica lateral e contato gradacional e/ou interdigitado com os depósitos típicos da Formação Resende.

II – Membro Acácias

Depósitos de características eminentemente fluviais, que ocorrem principalmente a leste do alto estrutural de Resende. Acredita-se que este sistema fluvial tenha se tornado mais importante quando a depressão tectônica adquiriu largura suficiente para conter uma planície fluvial que estivesse suficientemente distante das bordas da bacia, de modo que não recebesse os fluxos gravitacionais, ou que a paleodrenagem tivesse a capacidade de retrabalhar integralmente estes depósitos. Estima-se para esta associação uma espessura da ordem de 30 a 40 m.

5.3.3.3 Formação Floriano

Sucessão de arenitos e pelitos, interpretada como o registro de um sistema fluvial meandrante que colmatou a bacia. Esta sucessão, cuja espessura não ultrapassa os 20 m, ocorre tanto sobre

os depósitos da Formação Resende, incluindo seu Membro Acácias, como sobre o embasamento proterozóico no alto estrutural de Resende e na borda sul bacia.

5.3.4 Depósitos Quaternários

Sedimentos quaternários são encontrados por toda a Bacia de Resende, distribuídos de forma ampla. São observados depósitos de fanglomerados dispostos tanto sobre o embasamento, como sobre as sucessões terciárias, associados a reativações de falhas; depósitos sedimentares arenosos e argilosos, inconsolidados, associados à implantação de um sistema de leques aluviais (MELLO *et al.*, 1991 e MELLO, 1992), próximos à borda leste da bacia; depósitos sedimentares de origem fluvial, compostos por camadas arenosas decimétricas e siltes micáceos fracamente laminados com intercalações de argilas e areias finas; depósitos conglomeráticos associados a antigos leitos do rio Paraíba do Sul; níveis de terraços junto às planícies do Rio Paraíba do Sul, identificados por Melo *et al.* (1983), com topos de até 25 m acima do canal atual do rio.

5.4 Tectônica

O conhecimento, ainda que básico, dos falhamentos da bacia de Resende é imprescindível para qualquer estudo estratigráfico desta bacia e com os grandes avanços no campo da hidrogeologia, tornou-se ferramenta de grande relevância na compreensão do funcionamento hidrogeológico da mesma. De acordo com Ramos (1997), esses falhamentos não só influenciaram na formação da bacia e do seu preenchimento sedimentar, como suas reativações condicionaram a configuração de sua superfície atual, bem como a distribuição lateral e vertical das sucessões terciárias e quaternárias tendo influência direta na dinâmica das águas subterrâneas através destas unidades.

Segundo Albuquerque (2001), podem ser destacados 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 frequentes em áreas próximas à borda da bacia e o último, NW-SE, mais concentrado na porção central da bacia. No Anexo B é possível observar a distribuição dos lineamentos na bacia.

6 RESULTADOS

6.1 Desenvolvimento do Modelo Conceitual

O desenvolvimento do modelo conceitual da Bacia de Resende consistiu na caracterização hidrogeológica da bacia de Resende, elaborada a partir da avaliação das informações reunidas ao longo do desenvolvimento do projeto MODESTH, que integrou informações das unidades geológicas presentes na área, com informações hidrogeológicas obtidas através de visitas técnicas aos pontos de captação de água subterrânea e em relatórios técnicos de perfuração de poços tubulares.

Foram identificadas três unidades hidrogeológicas para a área da bacia de Resende conforme é representado no mapa hidrogeológico abaixo:

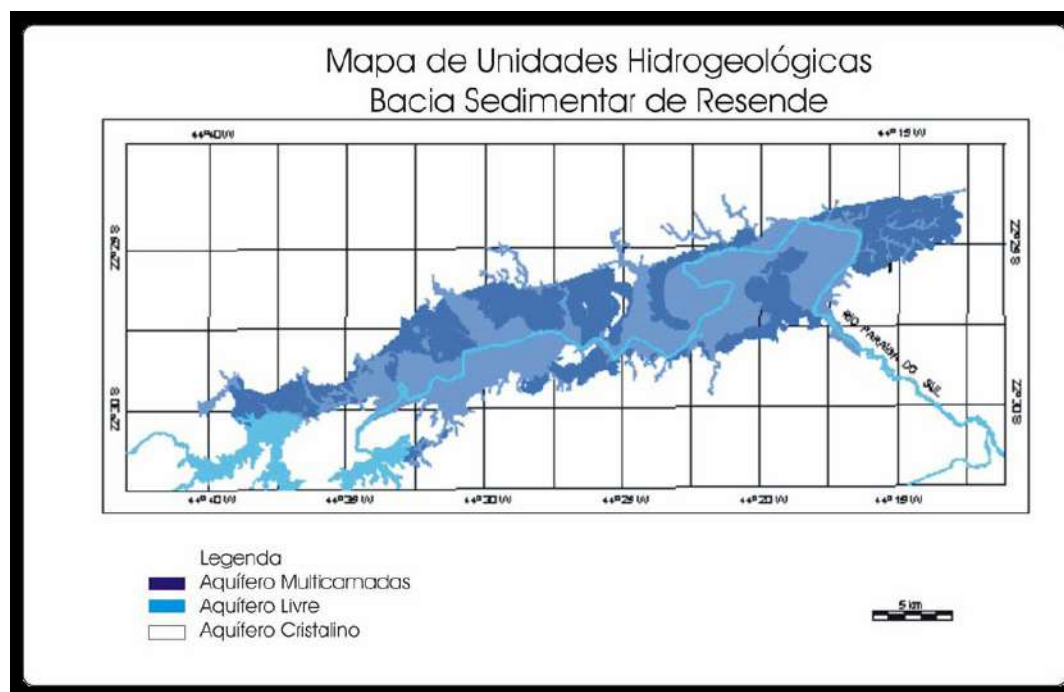


Figura 03: Mapa de unidades hidrogeológicas da bacia de Resende (modificado de Castro, 2000).

AQUÍFERO LIVRE

Este tipo de aquífero foi identificado em toda a área da bacia, principalmente na parte leste e central. Geologicamente estes aquíferos compreendem os depósitos sedimentares quaternários, representados pelos terraços aluvionares e pelo aluvião.

As captações nesse aquífero são rasas em geral, captando água em níveis inferiores a 20 metros de profundidade.

A dinâmica da água subterrânea nesse aquífero é bem simples. A recarga se dá diretamente pela chuva e funciona em geral como área de recarga para o aquífero sedimentar subjacente. Localmente, quando sobrepostos aos sedimentos argilosos da Formação Resende ou diretamente sobre o embasamento cristalino, assumem a característica de aquíferos suspensos.

O nível da água nestes poços pode variar 0,4 m a 6 m de profundidade. Pelo fato de esta variação não superar a profundidade de 6 m, foi possível caracterizar a contribuição das águas destes aquíferos para o rio Paraíba do Sul, que se encontra de 6 a 8 m abaixo dos depósitos quaternários nesta região. Este fato foi comprovado através da presença de várias nascentes de água ao longo do canal deste rio, nos cortes de seus terraços.

A vazão média dos poços que captam água no aquífero sedimentar livre é da ordem de 3 m³/h e a condutividade hidráulica para este aquífero foi estimada em $K = 1,00 \times 10^{-5}$ m/s a partir de consultas bibliográficas para areias siltosas e areias finas (FETTER, 1988, *apud* FEITOSA e FILHO, 2000).

AQUÍFERO MULTICAMADAS

Este aquífero é o mais importante da bacia, pelo fato de ser o mais explorado, o que se deve tanto às suas características aquíferas, como à sua abrangência espacial dentro da bacia.

O aquífero sedimentar multicamadas é representado pelas Formações Resende e Floriano, sendo geologicamente caracterizado por uma forte intercalação entre camadas de sedimentos

pelíticos e arenosos, cuja variação da porosidade confere às camadas aquíferas uma extensão lateral limitada, compreendendo camadas lenticulares a tabulares pouco extensas dispostas lado a lado e que também se apresentam fortemente afetadas por falhas e fraturas.

As camadas sedimentares com presença de água são encontradas neste aquífero em profundidades que variam de 8 a 500 m, em poços que alcançaram até 240 m de profundidade.

O nível da água neste aquífero é extremamente variável, em função da marcante intercalação vertical e lateral que afeta as unidades sedimentares que compreendem este aquífero pode conferir localmente a característica de semi-confinamento ou confinamento da água subterrânea. Nestes casos, a água pode atingir vários metros acima do nível onde se encontra armazenada.

Também as vazões neste aquífero apresentam valores bastante diversificados, variando de 0,8 a 52 m³/h. Uma avaliação superficial da distribuição destas vazões na área da bacia permitiu caracterizar a ocorrência das maiores vazões nas áreas caracterizadas como de maior espessura do pacote sedimentar. Verificou-se também uma tendência das maiores vazões ocorrerem alinhadas na direção NE no setor leste da bacia, principal direção das estruturas que afetam a bacia. Neste caso, as maiores conectividade hidráulicas estariam associadas às fraturas que afetam o aquífero multicamadas.

Castro (2000) estipulou a condutividade hidráulica dos sedimentos da formação Resende de um teste de bombeamento em $K = 1,72 \times 10^{-3}$ cm/s.

Com base na realização do balanço hídrico, nas investigações de campo e no mapa potenciométrico elaborado para o aquífero multicamadas, foi possível verificar que as principais fontes de recarga deste aquífero são: a infiltração direta pelas águas da chuva, que devido à morfologia das superfícies aflorantes deste aquífero (áreas de topografia irregular) deve ser reduzida; a infiltração a partir do aquífero livre; e a contribuição do rio Paraíba do

Sul. Neste caso, também é possível considerar a contribuição das rochas cristalinas que, através de suas fraturas, recarregam o aquífero multicamadas com água captada fora da bacia.

AQUÍFERO CRISTALINO

O aquífero cristalino é caracterizado pelos gnaisses pré-cambrianos que representam o embasamento da bacia e as rochas alcalinas. As captações exclusivas neste aquífero estão localizadas na porção oeste da bacia, próximos ao município de Itatiaia. Também existem captações do aquífero cristalino no município de Resende, porém estes também utilizam o aquífero sedimentar como alternativa para aumentar as vazões dos poços e são denominados neste trabalho como aquíferos mistos.

Em poços levantados nessas rochas verificou-se que as fraturas com entrada de água podem variar de 23 a 133 m de profundidade. As vazões dos poços que captam água neste aquífero de 1,5 a 28 m³/h, sendo as maiores encontradas nos poços que captam água entre 40 e 80 m de profundidade. Estes poços também podem ser considerados como artesianos, uma vez que suas cargas hidráulicas atingem níveis superiores aos das fraturas que produzem água. No extremo oeste da bacia foram calculados através de teste de bombeamento com valores de transmissividade de $4,18 \times 10^{-2}$ m²/min e permeabilidade de $4,43 \times 10^{-4}$ m/min.

A recarga deste aquífero pode ser proveniente das precipitações nas cabeceiras da bacia, onde afloram as rochas do embasamento e por infiltração direta pelos aquíferos sedimentares.

BALANÇO HÍDRICO SUBTERRÂNEO

O balanço hídrico calculado através do programa BALAN por Bettini *et al.*(2004), considerou dados no período de janeiro de 1991 a dezembro de 1996. O nível estático inicial utilizado foi 384 m, a precipitação média anual é de aproximadamente 1500 mm, considerando uma área de 220 km². Como resultado da simulação, dos 1500 mm de precipitação anual, obtiveram valores

de 898.86 mm para evapotranspiração, 353.77 para o escoamento superficial e 247.36 como água precipitada que recarrega o aquífero.

6.2 Entrada de dados

Para a elaboração do Modelo Matemático de Fluxo do Sistema Hidrogeológico da Bacia de Resende, foi escolhida a ferramenta Visual MODFLOW versão 4.2.0.151. pela sua a sua capacidade de incluir os processos relevantes descritos no modelo conceitual hidrogeológico. Foi simulado um modelo para a bacia considerado apenas o regime em estado estacionário.

GERAÇÃO E IMPORTAÇÃO DO RELEVO

Para a construção do modelo matemático foi necessário traduzir o modelo conceitual da área para a linguagem do programa escolhido.

A malha para o cenário do modelo matemático da bacia foi discretizada de maneira uniforme, sendo construída com 116 linhas, 250 colunas e 6 camadas, representando um total de 174.000 células.

A delimitação das características do terreno, de superfície e do embasamento foi possível através de mapas de contorno elaborados utilizando o software *Surfer 7*, com as dados dos poços inventariados na área. O mapa de contorno do embasamento (figura 06) torna possível a observação de características marcantes da base da bacia, como os depocentros Porto Real e Penedo, e o Alto de Resende que os separa.

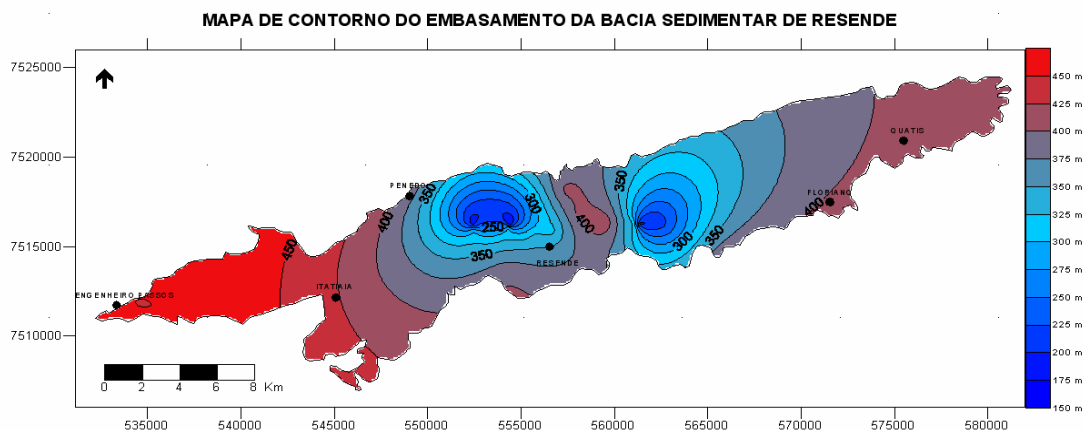


Figura 04: Mapa de contorno do embasamento da Bacia Sedimentar de Resende.

ZONAS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Hidrogeologicamente a bacia divide-se em três unidades; aquífero livre, aquífero multicamadas e aquífero cristalino. No modelo foram demarcadas quatro zonas de condutividade hidráulica diferentes (tabela 01), cujos valores resultaram da média das condutividades calculadas nos poços cuja captação d'água restringe-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 encontra-se representado pelo layer 1 (figura 07), caracterizado pela zona 1 de condutividade. Mesmo sendo o aquífero multicamadas o foco da modelagem, o aquífero livre

torna-se importante ao modelo por representar a principal fonte de recarga para o aquífero subjacente.

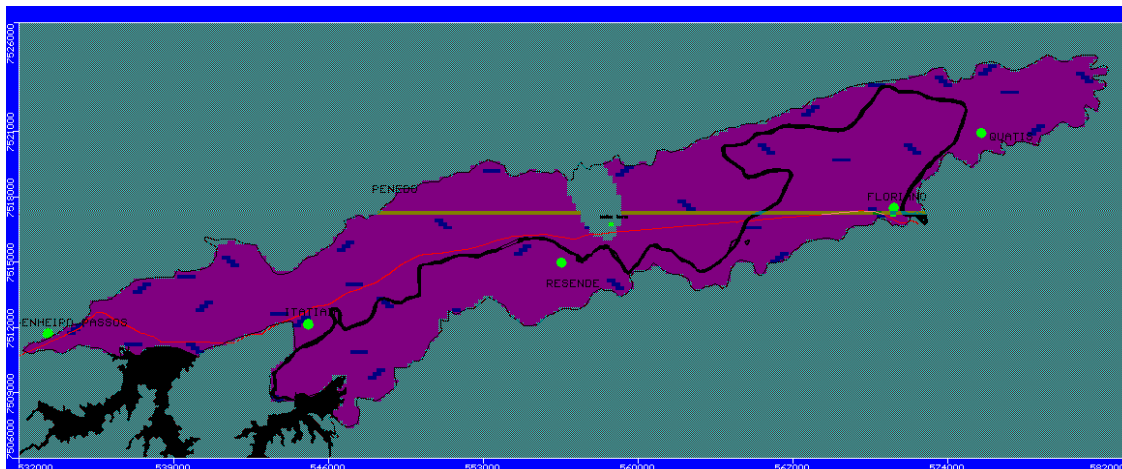


Figura 05: Visualização em planta do aquífero livre (layer 01).

O Aquífero Multicamadas é o principal aquífero da bacia tanto pelo seu potencial exploratório como pela sua abrangência espacial. Encontra-se representado no modelo pelos layers 2 a 5 (figura 09), onde se distingue duas zonas de condutividade hidráulica observadas no mapa de contorno (figura 08), zonas 2 e 3. O mapa em questão foi elaborado para as condutividades hidráulicas calculadas nos sedimentos do aquífero multicamadas ao ser observada uma significativa variação nos valores.

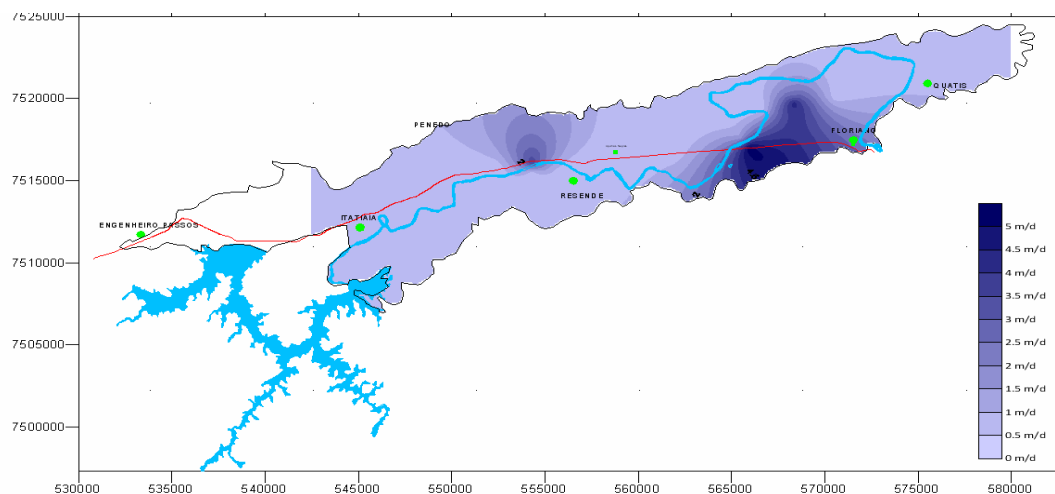


Figura 06: Mapa de condutividade hidráulica do aquífero multicamadas, Bacia de Resende.

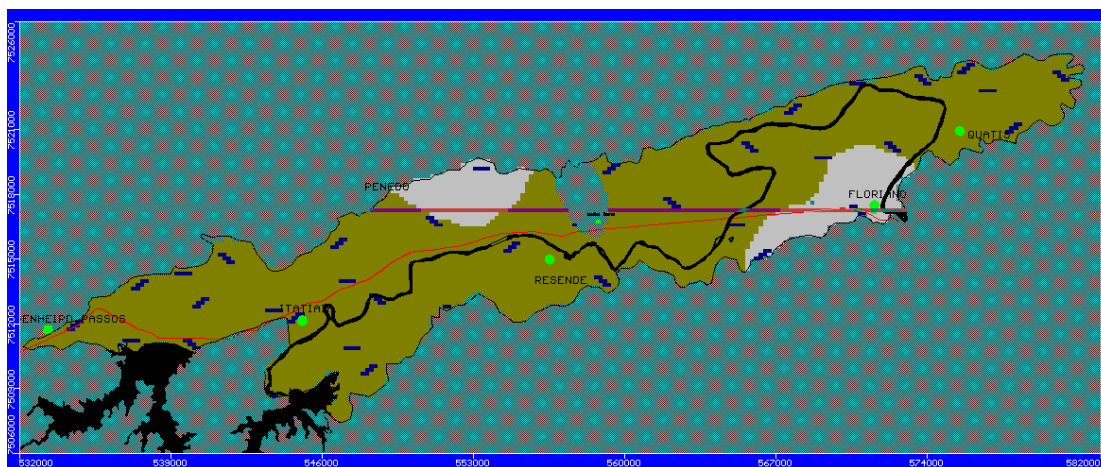


Figura 07: Visualização em planta do aquífero multicamada (layers 2 a 5).

Todo o cristalino do modelo foi inativado desconsiderando as pequenas contribuições do aquífero fraturado ao sistema. Com a definição das características básicas do modelo como o embasamento, a topografia e as zonas de condutividade hidráulica, foi possível gerar seções hidroestratigráficas da Bacia (figura 10).

As falhas inseridas no modelo encontram-se representadas pela zona de condutividade 4, distribuídas no modelo segundo o mapa de lineamentos da Bacia Sedimentar de Resende (Anexo B).

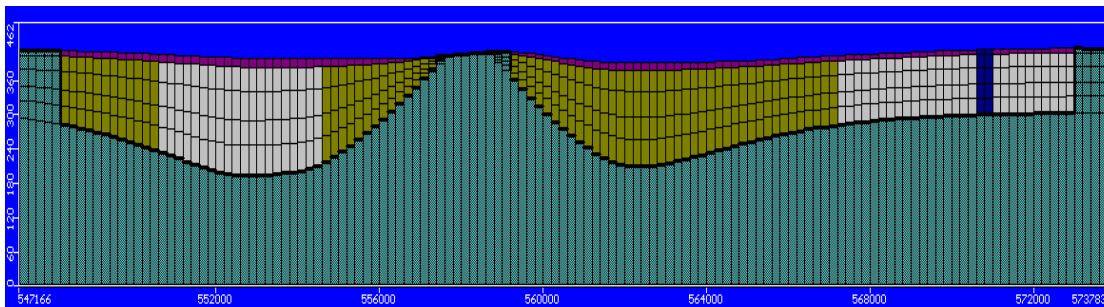


Figura 08: Seção W-E do cenário estratigráfico regional (exagero vertical 10x).

ZONAS DE RECARGA

A definição das zonas de recarga do modelo (figura 11) teve como base o balanço hídrico definido por Bettini *et al* (2004), sendo desconsideradas possíveis contribuições proveniente de fora da bacia através do aquífero cristalino.

Considerando a precipitação média anual de 1.500 mm na bacia, calculou-se que cerca de 250 mm/ano recarrega homogeneamente o sistema, chegando ao aquífero multicamadas através do aquífero livre. Entretanto uma segunda zona de recarga foi definida para o modelo, considerando o intenso escoamento proveniente da área da região do Maciço Itatiaia, ao extremo norte da bacia, onde segundo dados do INMET, os índices pluviométricos são até duas vezes superiores aos índices do restante da bacia, tendo sido calculado um valor de 500 mm/ano.

Para fins de calibração foi feito um ajuste nos valores de recarga, atribuindo valores de recarga de 170 mm/ano e 340 mm/ano para essas zonas respectivamente.

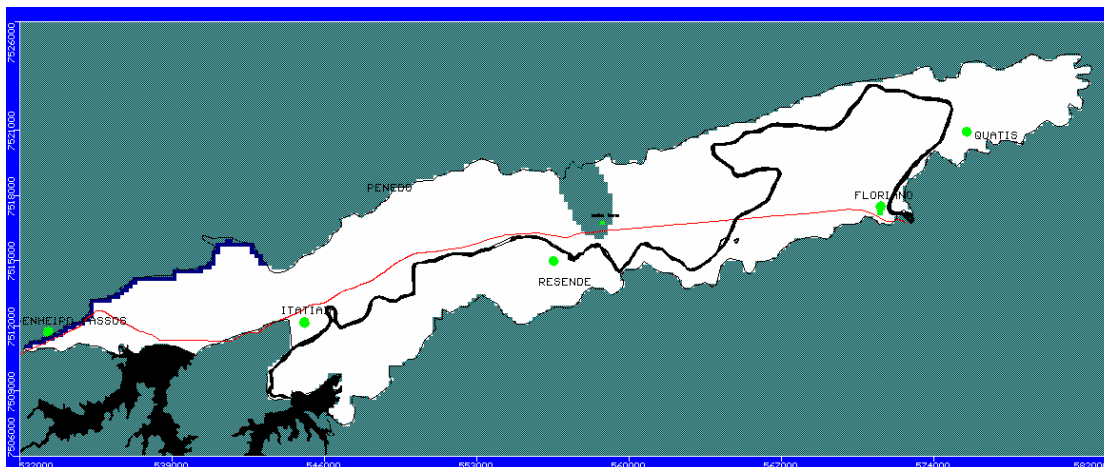


Figura 09: Zonas de recarga do modelo.

CONDIÇÃO DE CONTORNO

O rio Paraíba do Sul foi utilizado como condição de contorno da bacia, por ser uma característica física de máxima importância dentro da mesma. O rio, que corta a bacia sentido W-E, possui largura média de 100m, profundidade de 20 m e uma declividade na área na bacia calculada em 0,15 m/Km. (Castro, 2000) A cota inicial do rio adicionado ao modelo foi de 389 m e a final de 379 m, considerando a condutividade hidráulica vertical do fundo do rio de 0.00002 m/d.

Por fim, foram adicionados os poços inventariados na área, entre eles 45 pontos de observação e 54 poços de bombeamento. Foram considerados 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 8 horas diárias de exploração.

6.3 Execução e Calibração do modelo

O processo de calibração do modelo utilizado foi o de “tentativa e erro”. Os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno foram ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo matemático fossem semelhantes às aquelas observadas no sistema real.

Ao final da convergência foi possível avaliar através do gráfico de balanço hídrico e do gráfico das cargas hidráulicas calculadas versus as observadas a representatividade do modelo.

O resultado do balanço hídrico calculado através do *ZoneBudget* é apresentado na figura 12, sendo considerado um resultado positivo, por representar bem o regime estacionário proposto ao modelo. As taxas totais de água de entrada e saída no sistema se anulam, sendo o resultado da ação dos poços de bombeamento, do rio e da recarga.

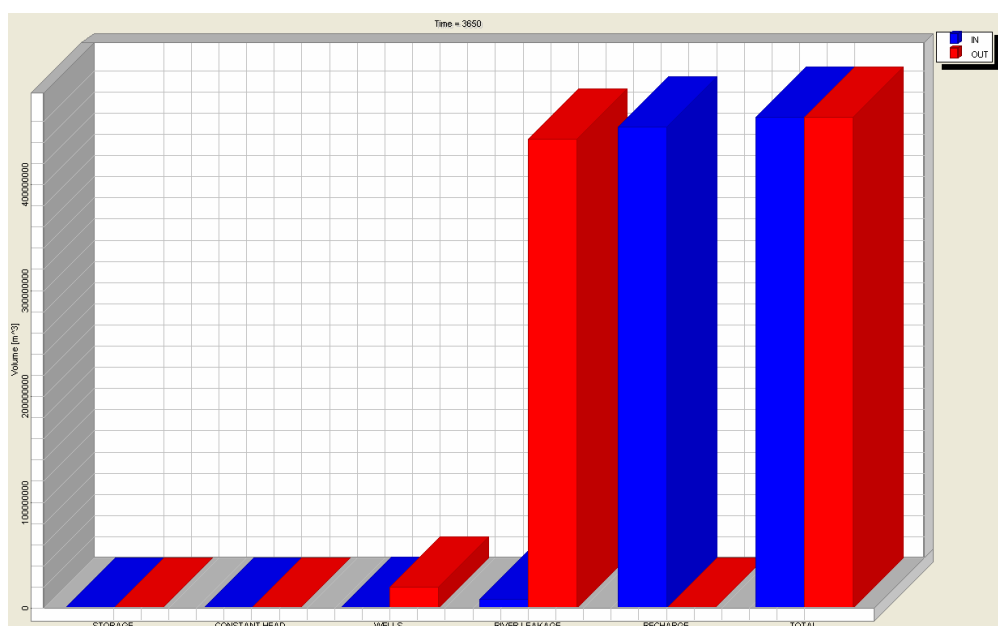


Figura 10: Gráfico de balanço de massa de água de recarga, carga especificada, do rio e dos poços.

O resultado do gráfico das cargas hidráulicas calculadas versus as observadas (figura 13), não obteve os índices ideais recomendados pelo guia-padrão da *American Society for Testing and Materials* (ASTM). O coeficiente de correlação apresentou valores próximos de 0.61 enquanto que o RMS normalizado atingiu 21.5%.

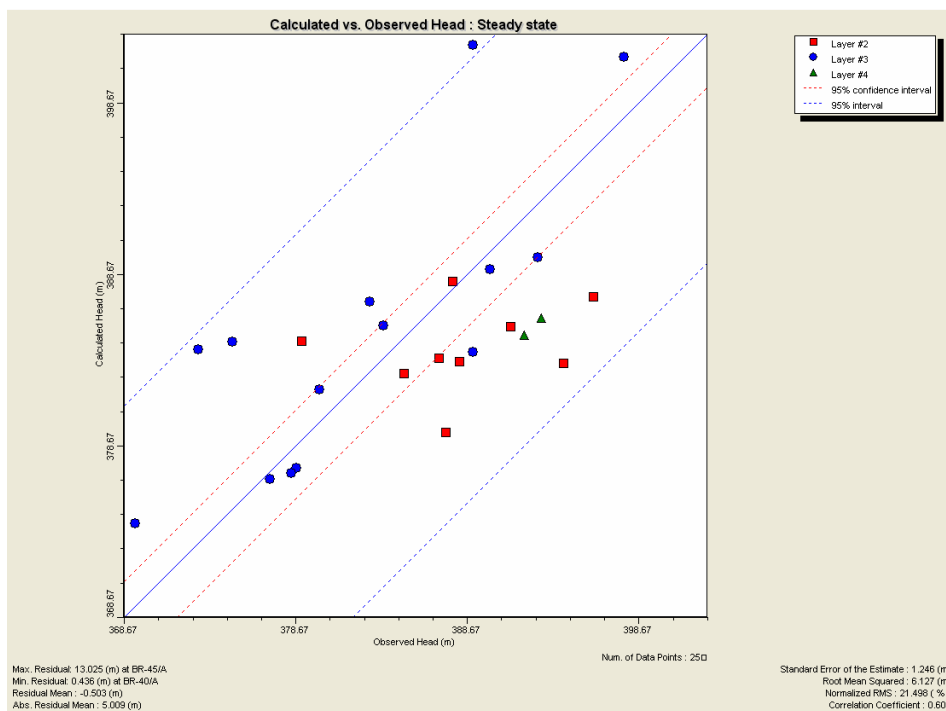


Figura 11: Gráfico de calibre das cargas hidráulicas, calculadas versus as observadas.

Embora os dados não tenham atingido os índices recomendados, o resultado foi considerado satisfatório devido às características singulares do sistema aquífero modelado.

O aquífero multicamadas constitui-se de uma sucessão de camadas aquíferas e sedimentos pelíticos de extensão lateral limitada, mas foi modelado como um aquífero único com o objetivo de simplificação do modelo. Essa característica pode explicar as variações nos valores de carga medidos e a conseqüente calibração pouco refinada do modelo, pois indica que as medições certamente foram realizadas em camadas aquíferas diferentes. Outra justificativa plausível trata das incertezas nos dados utilizados, indicando prováveis casos de medições de níveis supostamente estáticos em poços ainda em processo de rebaixamento.

6.4 Saída de dados

A partir do modelo concluído foram gerados mapas e seções que permitiram uma melhor visualização e compreensão do sistema aquífero multicamadas da Bacia Sedimentar de Resende.

Os resultados da modelagem de fluxo da água subterrânea são apresentados a seguir pelo mapa potenciométrico do aquífero multicamadas, pelo mapa de direção de fluxo e pelas seções hidroestratigráficas N-S analisando o fluxo e a suas interações com o rio e os poços de bombeamento.

MAPA POTENCIOMÉTRICO

Através do mapa potenciométrico (figura 14) é possível observar a influência dos poços de bombeamento, mais concentrados na parte central da bacia, na deformação da curva potenciométrica, indicando um intenso bombeamento na região.

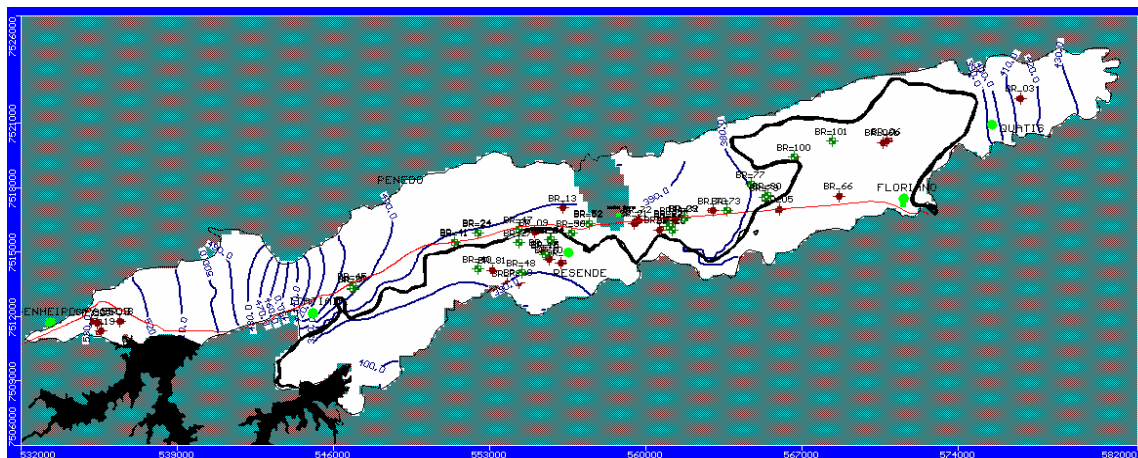


Figura 12: Mapa potenciométrico mostrando a direção de fluxo do regional.

DIREÇÃO DE FLUXO

O mapa de direção de fluxo (figura 15) permitiu a compreensão da interação sistema aquífero versus rio Paraíba do Sul, tornando evidente a atuação do último como um rio de característica efluente, para onde converge praticamente toda a água do sistema.

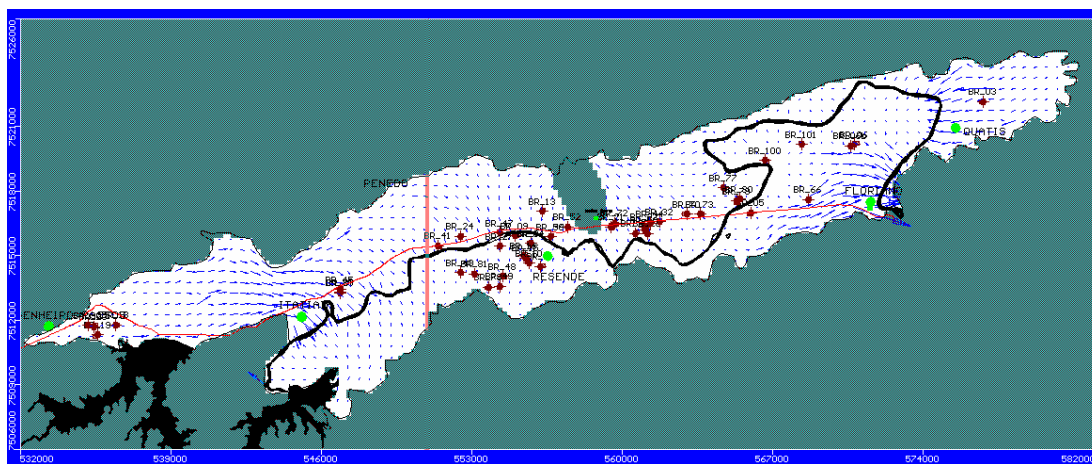


Figura 13: Mapa de direção do fluxo com direção da seção da figura 16 demarcada.

A partir desses mapas foram geradas seções que permitirão uma visualização mais detalhada da interferência causada pelos poços de bombeamento e pelo rio no sistema aquífero da região.

É possível observar um fluxo mais intenso na bacia próximo ao Maciço Itatiaia, e na saída do rio da bacia. A seção S-N apresentada na figura 16, foi selecionada para demonstrar a característica fortemente efluente do rio Paraíba do Sul, mostrando o nível d'água e a direção do fluxo na área.

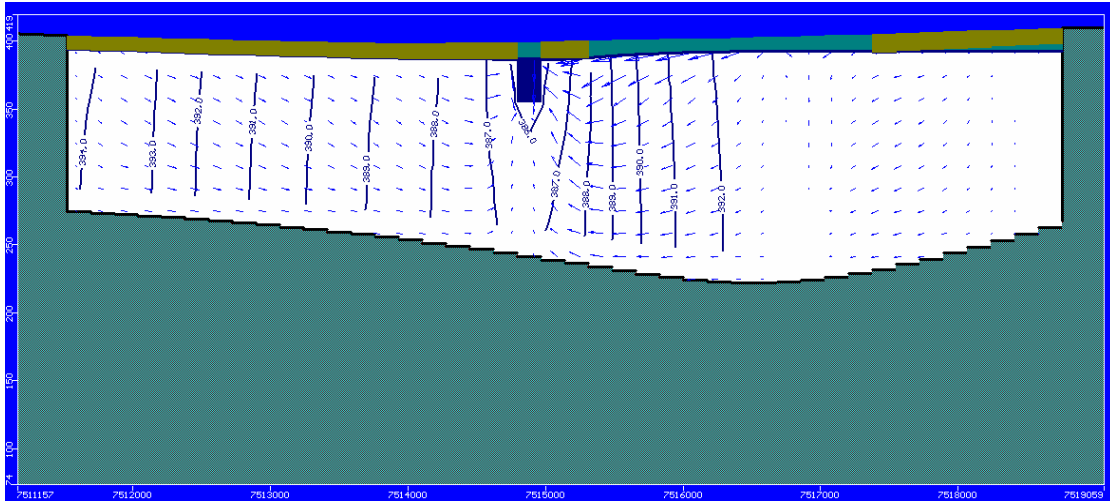


Figura 14: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando o nível d'água e a direção de fluxo influenciada pelo rio (exagero vertical de 10x).

A seção hidroestratigráfica S-N apresentada na figura 17, demonstra a interferência provocada pelo poço BR_79 nas curvas potenciométricas mais próximas, respondendo ao cenário de 8 horas de bombeamento diários.

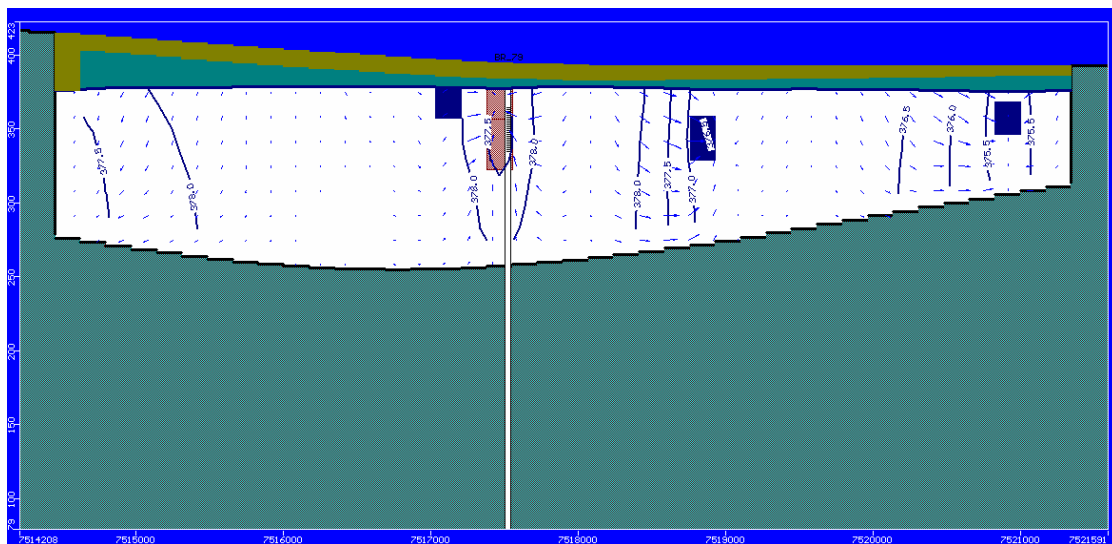


Figura 15: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando o nível d'água e a direção de fluxo do cenário sob interferência do poço de bombeamento BR_79(exagero vertical de 10x).

ANÁLISE DE CENÁRIO

Visando compreender a resposta do modelo a uma maior exploração do sistema aquífero foi simulado um cenário onde o poço BR_79 bombearia por 16 horas diárias. Como resultado da simulação, foi gerada uma nova seção S-N, abrangendo o poço BR-79 (figura 18).

Na avaliação do novo cenário, notou-se um importante aumento da influência do poço no fluxo subterrâneo da área afetando localmente o fluxo de água que fluiria para o rio.

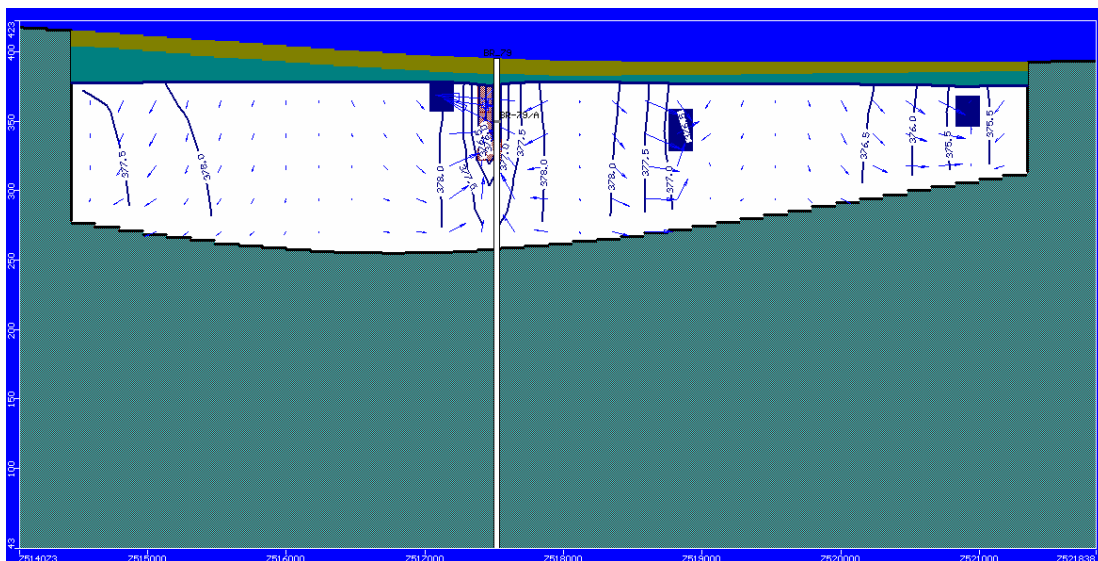


Figura 16: Seção hidroestratigráfica S-N mostrando a direção de fluxo do cenário sob interferência do poço de bombeamento BR_79(exagero vertical de 10x).

9 CONCLUSÃO

O estudo ora apresentado visou à discussão dos conceitos e fundamentos da modelagem matemática como ferramenta para a gestão de recursos hídricos, bem como, apresentar sua aplicação em uma simulação matemática do Sistema Aquífero da Bacia Sedimentar de Resende, com base nas características hidrogeológicas da área e com ênfase na modelagem de fluxo, com o uso do software *Visual Modflow*[®] 4.2.

A aplicação da modelagem matemática como ferramenta à gestão dos recursos hídricos tem sido uma importante fonte de informações sobre sistemas aquíferos, se destacando pela capacidade de previsão de diferentes cenários. A Bacia Sedimentar de Resende destaca-se por possuir extensos trabalhos científicos na área, caracterizando-a geológica e hidrogeologicamente, o que permitiu a concepção de um modelo matemático de fluxo. A modelagem do Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar não encontrou dificuldades quanto às fontes de informação, embora tenha sido preciso alguma manipulação dos dados de entrada para melhor se ajustarem à calibração, devido a possíveis questões relacionadas à própria bacia ou problemas durante a coleta de dados.

Não foi possível reproduzir parâmetros estatísticos satisfatórios na calibração das cargas hidráulicas considerando-se todos os poços de observação, provavelmente devido à incapacidade de o modelo numérico reproduzir diferentes valores de carga próximos.

Quanto ao balanço de massa de água do sistema, o maior contribuinte para a entrada de água foi à recarga, enquanto que para a saída de água o maior contribuinte foi o rio. Os poços de bombeamento, cujo cálculo considerou um bombeamento de 8 horas diárias apresentaram pouca contribuição para o balanço de massa.

No cenário mapeado foram gerados mapas potenciométricos e mapas de direções de fluxo na área, onde se observa a característica efluente do rio Paraíba do Sul, responsável por praticamente toda a

captação da água do aquífero. A influência dos poços de bombeamento também pode ser observada, principalmente nas seções no sentido S-N.

Um cenário extra foi simulado, considerando explorações de 16 horas diárias. Nas seções S-N geradas foi possível observar um aumento na área de captação do poço.

Para uma melhor compreensão do Sistema Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de Resende, sugere-se uma continuação do processo de modelagem, incluindo uma constante atualização dos dados de entrada, elaboração de simulações em regime transientes e de cenários preditivos para uma melhor avaliação do potencial exploratório da área, possibilitando a gestão desses recursos.

10 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.

ANA. **Editais e Licitações**. Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em 20 fev. 2009.

ANDERSON, M.P., W.W.WOESSNER. **Applied groundwater modeling simulation of flow and advective transport**. San Diego: Academic Press 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard guide for calibrating a ground-water flow model application**. ASTM D5981-96, Philadelphia, PA. 2002.

BARBOZA; A. C. L. **Integração de análises sedimentares e hidrogeológicas como base para caracterização da Formação Resende (Bacia de Resende, RJ) como reservatório**. 87 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009

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. *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

BONGANHA, C. A. **A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara – SP**. Dissertação de Mestrado – Centro Universitário de Araraquara – UNIARA, Araraquara, 124p. 2005.

BONGANHA, C. A. *et al.*; **Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos**. Revista Analytica • Agosto/Setembro 2007 • Nº30.

BORSOI, Z.M.F.; TORRES, S. D. A. **A política de recursos hídricos no Brasil**. Disponível em <<http://www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/rev806.pdf>> 15p. Acesso em: 27 de abril de 2009, publicação dezembro de 1997.

BRASIL. **Lei 9.433, de 08. jan. 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, Cria o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da CF, e altera o artigo 1 da Lei 8.001 de 13.03.1990 que modificou a Lei 7.990, de 28.12.1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 09. jan.1997. Disponível em: <[http:// www.mma.gov.br/](http://www.mma.gov.br/)> Acesso em: 12. jun.2006.

_____. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n° 396 de 03 de abril de 2008.** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 07 abril. 2008. Disponível em: <[http:// www.mma.gov.br/](http://www.mma.gov.br/)> Acesso em: 27. abril. 2009.

_____. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução n° 15 de 11 de janeiro de 2001.** Diário Oficial da república Federativa do Brasil, Brasília DF, 22 jan. 2001. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em 27. abril. 2009.

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.

CABRAL, J., DEMETRIO, J. G. A. Aplicação de modelos em hidrogeologia. In: FEITOSA, Fernando Antonio Carneiro; MANOEL FILHO, João (coord.). **Hidrogeologia - conceitos e aplicações.** Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE. Cap. 15, p. 369-391. 2000.

CAMPOS, J.C.V. 1996. **Estudo hidrogeológico da bacia do rio Cabuçu – zona oeste do município do Rio de Janeiro – RJ.** Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia. IGEO/UFRJ. 100p. 1996.

CARVALHO, R. S. **Água: um bem que precisa ser cuidado.** In: Arminda Saconi Messias, Marcos Roberto Nunes Costa. (Org.). Água Fonte de Vida. 01 ed. Recife: Universidade Católica de Recife, v. 01, p. 07-241. 2005.

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.

DOMINGUES, A. F.; SANTOS, J. L. Planejamento de recursos hídricos e uso do solo: o desafio brasileiro. In: FREITAS, Marcos A. V. (org.). **Estado das águas no Brasil, 2001-2002.** Brasília: ANA, 514 p. 2003.

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.

FEITOSA, F.A.C. & FILHO, J.M. **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações – 2 ed.,** CPRM/REFO, LABHID-UFPE. 391p il. 2000.

- FREEZE, R.A., MASSMANN, J., SMITH, L., SPERLING, T., JAMES, B. **Hydrogeological decision analysis: 1. A framework**. *Ground Water* 28, no. 5:738-66. 1990.
- GUIGUER, N. **Apostila do Curso Groundwater Flow e Solute Transport Modeling**. Rio de Janeiro, Set. de 2008.
- GUIGUER, N. e FRANZ, T. **Visual MODFLOW. User's Manual**. Waterloo Hydrogeologic Inc.. Waterloo, Canadá. 231 p. 1996.
- IRITANI, M.A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. Tese (Doutorado). USP, São Paulo, 200 p. 1998.
- MANOEL FILHO, J. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (coord.). **Hidrogeologia – conceitos e aplicações**. 2a ed Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, cap. 6, p.109-132, 2000.
- MACHADO FILHO, L. *et al.* **Geologia Sn: Ministério das minas e Energia**. Projeto RadamBrasil, Levantamento de Recursos Minerais, folhas SF. 23/24, Rio de Janeiro/Vitória. Vol. 32, p 27-304, 1983.
- MELLO, C.L. **Fácies sedimentares, arquitetura deposicional e relações morfoestratigráficas em um sistema de leques aluviais holocênicos: Aloformação Manso – médio vale do rio Paraíba do Sul (SP/RJ)**. Rio de Janeiro, 188 p. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia – IGEO/UFRJ). 1992.
- MELLO, Cláudio Limeira; CARMO, I.O.; MOURA, J.R.S. 1991. **Estudo faciológico de depósitos sedimentares holocênicos com base na arquitetura deposicional – médio vale do rio Paraíba do Sul**. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, São Paulo. Atlas, p. 19-26. 1991.
- MELO, M.S. *et al.* **Estudos geológico-tectônicos na bacia de Resende (RJ) e sedimentos terciários de Volta Redonda (RJ) e bacia de Taubaté (área de Cruzeiro, SP)**. Relatório 17.737, 2 v., IPT/DMGA, São Paulo, 124 p. 1983.
- McDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations Book 6, Chapter A1, 586 p., 1988.
- NEVES, Marco J. M.; CORDEIRO NETTO, Oscar M. **Efetividade dos Planos de Recursos Hídricos**. Brasília: 2003.
- OLIVEIRA, F. R. **A questão da água em um país com dimensões continentais**. *Revista Águas Subterrâneas*, nº9: 29-31. 2009.
- PIZANI, Tiago Carvalho. **Análise da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos e modelagem geoestatística de dados hidrogeológicos da bacia sedimentar de Resende – RJ**. **Dissertação de Mestrado**, Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

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.

SETTI, Arnaldo A. et all. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos.** 3. Ed. Brasília: ANEEL/ANA. 328p. 2001

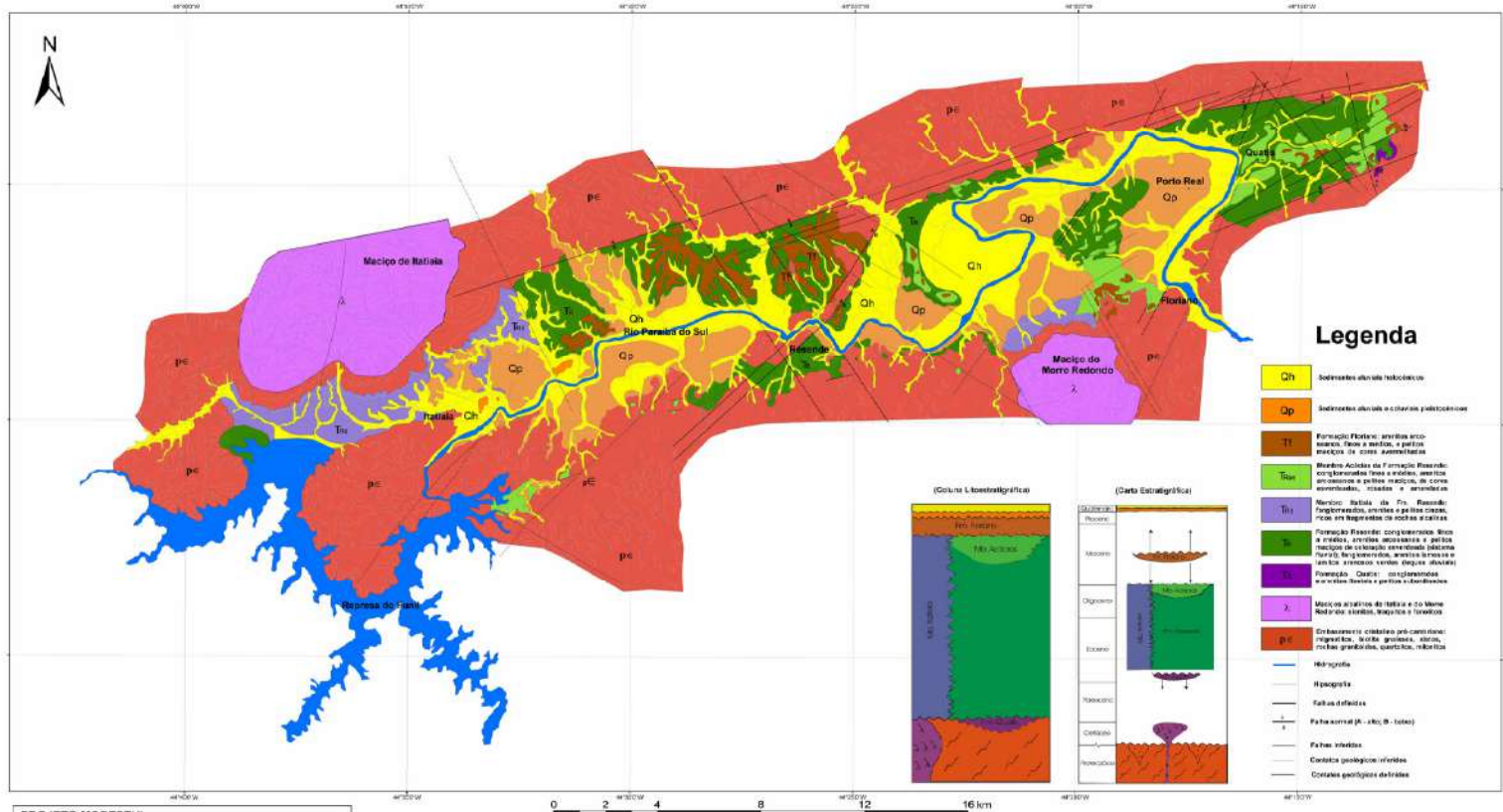
TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O.M.C. **Gestão da água no Brasil.** Brasília: UNESCO, 189p. 2001.

WALTON, W.C. **Groundwater Modeling utilities.** Lewis Publishies, Inc, EUA. 640 p. 1992

ANEXO A

Mapa geológico da Bacia Sedimentar de Resende (Ramos, 2003).

Mapa Geológico da Bacia de Resende

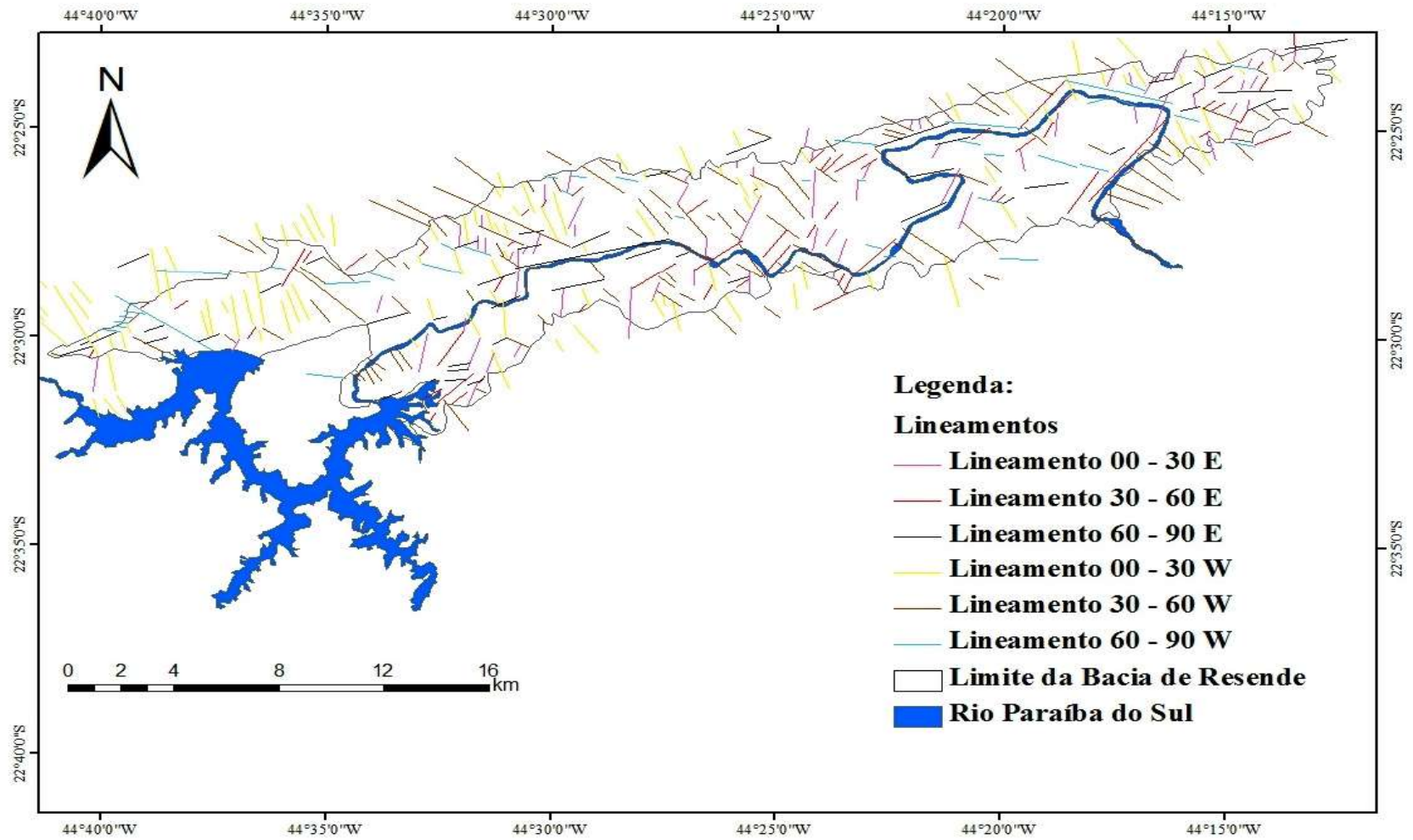


PROJETO MODESTHI
 MODELAGEM ESTRATIGRÁFICA DE RESERVATÓRIOS TERRÍGENOS: APLICAÇÃO À AVALIAÇÃO DO POTENCIAL HÍDRICO DA BACIA DE RESENDE (RJ).
 Realizado com recursos financeiros da FINEP-PADCT-III
 Executores: UFRJ, ON, CPRM
 Coordenador: Cláudio Bettini (UFRJ)
 Coordenador da Atividade: Claudio Limeira Mallo (UFRJ)
 Autor do Mapa: Renato Rodriguez Cabral Ramos (UFRJ)
 Rio de Janeiro, Novembro de 2003.



ANEXO B

Mapa de Lineamentos da Bacia Sedimentar de Resende (Modificado de
Bettini *et al.* 2004)



ANEXO C

Tabela de Poços Inventariados na Bacia Sedimentar de Resende

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE (m)	ND(m)	VAZÃO (m³/h)	TIPO DE AQUIFERO
BR-01	XEROX I	546861	7513285	405.82	150.65	78.6		22.69	cristalino
BR-02	XEROX II	546861	7513285	405.82		25	107.05	21.4	sedimentar
BR-03	PREF. QUATIS	576768	7522153	399.9	139.5	9.7	116.56	9.2	sedimentar
BR-04	PARQUE AQUÁTICO BOLDRIM	555768	7515571	393.8	84	2.63	58.99	23.99	sedimentar
BR-05	Posto e churrascaria Art	565960	7516976		80	14.5	26.92	29.33	sedimentar
BR-06	GUARDIAN DO BRASIL	570805	7520165	412.6	190	26.62	86	31.6	sedimentar
BR-06b	GUARDIAN DO BRASIL	570628	7520098	412.6	193	28.48	110.81	25.5	sedimentar
BR-06c	GUARDIAN DO BRASIL	570934	7520294	412.6					sedimentar
BR-07	MATINHA	554633	7514791		120				sedimentar
BR-08	TOBOGÁ	554894	7514791		120				cristalino
BR-09	NOVA LIBERDADE (ESAMUR)	555026	7515907	397.64	126	2.14		7	sedimentar e cristalino
BR-10	GAL. AFONSECA	555674	7514647		126			8	cristalino
BR-11	TANGARÁ	556213	7514493		116			8	sedimentar
BR-12	D. Maria	556255	7514928		220				sedimentar
BR-13	Pq.Embaixador	556264	7517046		124			8	cristalino
BR-14	POSTO BOLDRIM	555770	7515571	393.8	66	1.83		18	sedimentar
BR-15	JOSÉ DE MACEDO OLIVEIRA	555511	7514887	395	47.8	12	22	18	sedimentar
BR-16	SUPERMERCADOS ROYAL CENTER	555411	7515002	395	73			15	sedimentar
BR-17	ZÉ MARIA	554918	7514369		48	6			
BR-18	NUCLEBRÁS	536447	7511790	478.61	152	15	75	6	cristalino
BR-19	NUCLEBRÁS	535589	7511331	470	150	3	80	3.5	cristalino
BR-20	NUCLEBRÁS	535447	7511700	467	95	5	25	28.8	cristalino
BR-21	POSTO BOM TEMPO	559466	7516331	420	60	13	40	12	sedimentar e cristalino
BR-22	DNER - Posto de Pesagem	561038	7516325	390	150	17	69	0.8	sedimentar e cristalino
BR-23	INAPLA LTDA	560608	7516019	390	149	57	116	1.5	sedimentar e cristalino
BR-24	SAN-CO - Prod. Alimentícios LTDA	552462	7515895	393	139	3	52	16	sedimentar
BR-25	Serv. Aut. De Água e Esgoto de Resende				131	18	49	8.8	sedimentar e cristalino
BR-26	GRANJA MINAS GERAIS S/A	561180	7516017	390	60	5	38	2.5	sedimentar
BR-27	ELY LILLY E Co. OF BRASIL INC.	554318	7515427	390	100	6.2	26	0.8	sedimentar e cristalino
BR-28	ELY LILLY E Co. OF BRASIL INC.	554318	7515427	390	16	5.8	8	6	sedimentar
BR-29	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	15	60	2.2	sedimentar
BR-30	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	7	60	0.8	sedimentar
BR-31	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	3	55	4.2	sedimentar
BR-32	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	77.5	11	72	4.5	sedimentar
BR-33	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	77	19	68	4.7	sedimentar
BR-34	CORONEL ALI KALEVI	548331	7520213	460	100	5	45	12	cristalino
BR-35	CONDOMÍNIO DAS MANGUEIRAS	549183	7518212		150			seco	cristalino
BR-36	COOP. AGROP. DO MUN. DE RESENDE	556658	7515875	390	120	1	64	6	sedimentar e cristalino

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE (m)	ND(m)	VAZÃO (m³/h)	TIPO DE AQUIFERO
BR-37	Dr. CARLOS DE CARVALHO	548612	7518675	420	65	4	42	2.4	cristalino
BR-38	XÉROX	546881	7513299	405.82	100	8	60	1.2	sedimentar
BR-39	XEROX DO BRASIL	546881	7513299	405.82	70	5	30	6.6	cristalino
BR-40	FAZ SANTA ISABEL	552456	7514204	393	52	5.2	15	18	sedimentar
BR-41	SANDOZ ANILINAS,PROD. QUÍM. E FARM.	551433	7515446	400	57	4	19	22	sedimentar
BR-42	CIA. AGRÍCOLA INDUSTRIAL COLOMBO	565996	7514046	423	100	10	60	0.3	cristalino
BR-43	CIA. AGRÍCOLA INDUSTRIAL COLOMBO	565996	7514046	423	70	7	50	0.4	cristalino
BR-44	LABORATÓRIO WANDER DO BRASIL	561324	7516477	390	81	9	45	14	sedimentar
BR-44b	LABORATÓRIO WANDER DO BRASIL	561324	7516477	390	102	30.3	80.6	12	sedimentar
BR-45	CITOR	546881	7513422	390	57	1	34	3.1	sedimentar
BR-46	CITOR	546881	7513422	390	122.6	2	60	3.7	sedimentar
BR-47	USINA TERMOELÉTRICA DE RESENDE	554320	7516042	395	120	0.7	13	18.75	sedimentar e cristalino
BR-48	PREFEITURA MUNICIPAL(ESAMUR)	554456	7514043	395	108	2.2	45	4.83	sedimentar e cristalino
BR-49	TÁCITO V. RODRIGUES	554312	7513582	395	46	6	30	12.5	cristalino
BR-50	SÍTIO MEU RINÇÃO	561037	7516171	390	45	1.8	16	5.83	sedimentar
BR-51	CLUBE AG. NEGRAS				35	3.45	18	0.32	sedimentar
BR-52	SVEND HVNEGAARD	557465	7516338	400	56.5	7	20	4.8	sedimentar
BR-53	S.O .P.-C. A .E. S.				95			seco	sedimentar e cristalino
BR-54	PREFEITURA DE RESENDE (ESAMUR)				100	3.5	30	4	cristalino
BR-55	GRANJA TRÊS PINHEIROS	573324	7515349	420	80.2	8	28	10	cristalino
BR-56	POSTO DE PESAGEM	529073	7465681		61	6	45	2.2	cristalino
BR-57	MINERAÇÃO E MOAGEM S. JOÃO BATISTA	524011	7507202		110	11.8	48.8	6.24	cristalino
BR-58	MINERAÇÃO E MOAGEM S. JOÃO BATISTA	524011	7507202		220	5		1.2	cristalino
BR-59	COOP. AGROP. DE RESENDE	556658	7515875	390	66	3	6	4	sedimentar e cristalino
BR-59b	COOP. AGROP. DE RESENDE	556658	7515875						sedimentar e cristalino
BR-60	GRANJA TRÊS PINHEIROS	573324	7515349	420	80	2	24	15	cristalino
BR-61	FAZENDA CAMPO BELO	571471	7518575	395		4.7			sedimentar
BR-62	BIQUINHA	576003	7521736	393.58					sedimentar
BR-63	FAZENDA PONTE BELA - curral	576130	7517665	398					sedimentar
BR-64	SÍTIO MEU CANTINHO-Sra. Marilu	564608	7515485	392	3				sedimentar
BR-65	SÍTIO DOS COQUEIROS	564433	7515457	392.18	8	1.75			sedimentar
BR-66	FAZENDA PONTE BELA	568663	7517604	398				2	sedimentar
BR-66b	FAZENDA PONTE BELA	568663	7517604	398.48		2.38			sedimentar
BR-67	SINTECORTE - Sr. MELLO	568002	7518870	399.85	12	3.18			sedimentar
BR-68	BAR DA D. ANA	567714	7519008	398.08		3.5			sedimentar
BR-69	SR. PAULO	568156	7519330	398.08	8	2.79			sedimentar
BR-70	POSTO EMBAIXADOR	562994	7516919	430	120			10	sedimentar
BR-71	SÍTIO DA D. GERALDA	562147	7516862		120				sedimentar

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE (m)	ND(m)	VAZÃO (m³/h)	TIPO DE AQUÍFERO
BR-72	ENGEMIX	559627	7516507					15	sedimentar
BR-73	KODAK 1	563640	7516913	392.29	85	12.25		48	sedimentar
BR-74	KODAK 2	564003	7516943	392.29	140	12.98			sedimentar
BR-75	BIOQUÍMICO	551685	7515487	395		4.5			sedimentar
BR-76	UNISTEIN 1	564772	7518689	392.49	8	3.39			sedimentar
BR-77	UNISTEIN 2	564724	7518142	391.69	16	4.28		10	sedimentar
BR-78	PARQUE DE EXPOSIÇÕES (ESAMUR)	553788	7513539	403.57	93	5.39		42	sedimentar
BR-79	SEAGRAM	565323	7517527	394.17	86	15.45		54.8	sedimentar
BR-80	SEAGRAM	565465	7517622	394.17	140	15.74	52.6	54.8	sedimentar
BR-81	SUPERMERCADOS ALEGRIA	553136	7514139		100			4.5	sedimentar
BR-82	GRANJA GUEDES	574125	7523157						sedimentar
BR-82b	GRANJA GUEDES	574125	7523157	402.08		0.93			sedimentar
BR-83	APPALOOSA	574920	7521353	400		18.03			sedimentar
BR-84	COOP. AGROP. QUATIS	576394	7521751		70				sedimentar
BR-85	VIAÇÃO FALCÃO	575684	7521465	398	8	6.28			sedimentar
BR-86	FONTE D.PEDRO	569556	7520977						sedimentar
BR-87	MERCEDES	559515	7516542						sedimentar
BR-88	CONCRETEIRA	566941	7519035						sedimentar
BR-89	POSTO MATE AMARGO	559375	7516443	414.14					sedimentar
BR-89b	POSTO MATE AMARGO	559375	7516443	414.14	10	8.15			sedimentar
BR-90	INB (J4)	535166	7511755	467.89		6	39.45	15.7	crystalino
BR-91	FAZ. ALIANÇA(PISCINA)	550219	7513375	403.21		2.69			sedimentar
BR-92	FAZ. ALIANÇA	550243	7513258	403.21	60				sedimentar
BR-92B	FAZ. ALIANÇA(fonte)	550243	7513258	403					sedimentar
BR-93	LATICÍNIO POUSO ALTO	551613	7511355						sedimentar
BR-94	LATICÍNIO POUSO ALTO (AÇUDE)	551214	7511117						sedimentar
BR-95	CLUBE NÁUTICO	546910	7509076	480	2.1	1.75			sedimentar
BR-96	ENGEMIX P.R.	571223	7521146	397.92	50	1.36		seco	sedimentar
BR-97	CLUBE PORTO REAL	571699	7517198	387.24		0.86			sedimentar
BR-98	OFICINA MECÂNICA P.R.	573232	7520339	388.03		3.6			sedimentar
BR-98b	OFICINA MECÂNICA P.R.(ao lado)	573232	7520339	391					sedimentar
BR-99	FAZENDA DA BARRA	562130	7517154	405.78		1.39			sedimentar
BR-100-1	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51	240	41.49	131.94	28.28	sedimentar
BR-100-2	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51	239.5	18.34			sedimentar
BR-100-3	VOLKSWAGEN	566622	7519410	395.51	239.5				sedimentar
BR-100-4	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51	197.22	18.47			sedimentar
BR-100-5	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51		24.3	78.31	41.4	sedimentar
BR-101	PEUGEOT	568324	7520155	393	260	23.68	52.11	70.77	sedimentar

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE (m)	ND(m)	VAZÃO (m³/h)	TIPO DE AQUIFERO
BR-102	CONDOMÍNIO DAS MANGUEIRAS	548952	7518393	426.1		1.71			sedimentar
BR-103	AUTOPOSTOQUATIS	574854	7521055						sedimentar
BR-104	RODOSHOP	557735	7516268	435					sedimentar
BR-105	D.LUÍZA	557341	7516646	425					sedimentar
BR-106	RIO P.SUL	573512	7519955	393					
BR-107	SÍTIO FAZENDINHA	569025	7520711	422					sedimentar
BR-108	REST.TOCOPRETO	568158	7520337	413	5.7				sedimentar
BR-109	REALMAT.CONST.	570993	7521192	415	10				sedimentar
BR-110	PREF. PENEDO	548837	7518116	468					sedimentar
BR-111	PREF. PENEDO	547531	7520576	515					
BR-112	PREF. PENEDO	547443	7520625	532					sedimentar
BR-113	GRANJA PENEDO	550961	7516305	448					
BR-114	PREF.ITATIAIA	544427	7513472	443					
BR-115	PREF.ITATIAIA	543624	7514035	474					
BR-116	PARQUE ITATIAIA	540697	7516110	764					sedimentar
BR-117	PREF.ITATIAIA	544648	7511579	436					
BR-118	POSTO OLÁ	565888	7517002	420					sedimentar
BR-119	FAZ.BUENOSAIRES	567789	7515967	434					sedimentar
BR-120	PREF.RESENDE	567337	7516023	423					sedimentar
BR-121	PREF.RESENDE	567336	7516057	420					sedimentar
BR-122	PREF.RESENDE	565996	7514046	423					sedimentar
BR-123	PREF.RESENDE	563937	7514537	431					sedimentar
BR-124	CASA LEDA	557803	7515648	418					
BR-125	PEUGEOT	568358	7519697	407	253	35.1	54	55	sedimentar
BR-126	CONDOMÍNIO TECNOPOLO I	567403	7520579		220	5.3	190	6	sedimentar

ANEXO D

Cálculo da condutividade hidráulica nos poços inventariados na Bacia
Sedimentar de Resende

PLANÍLHA DE CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA O AQUÍFERO LIVRE

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE	ND	VAZÃO (m³/h)	K (m/d)
BR-15	JOSÉ DE MACEDO OLIVEIRA	555511	7514887	395	47.8	12	22	18.0	5.00
BR-21	POSTO BOM TEMPO	559466	7516331	420	60	13	40	12.0	0.46
BR-26	GRANJA MINAS GERAIS S/A	561180	7516017	390	60	5	38	2.5	0.06
BR-40	FAZ SANTA ISABEL	552456	7514204	393	52	5.2	15	18.0	5.21
BR-41	SANDOZ ANILINAS, PROD. QUÍM. E FARM.	551433	7515446	400	57	4	19	22.0	2.72
BR-45	CITOR	546881	7513422	390	57	1	34	3.1	0.08
BR-50	SÍTIO MEU RINCÃO	561037	7516171	390	45	1.8	16	5.8	0.80
BR-52	SVEND HVNEGAARD	557465	7516338	400	56.5	7	20	4.8	0.79

PLANÍLHA DE CÁLCULO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA O AQUIFERO MULTICAMADAS

PONTO	PROPRIETÁRIO	UTM W	UTM S	COTA	Prof. (m)	NE	ND	VAZÃO	K (m/d)
BR-02	XEROX II	546861	7513285	405.82		25	107.1	21.4	0.09
BR-03	PREF. QUATIS	576768	7522153	399.9	139.5	9.7	116.6	9.2	0.02
BR-04	PARQUE AQUÁTICO BOLDRIM	555768	7515571	393.8	84	2.63	59.0	24.0	0.21
BR-05	Posto e churrascaria Art	565960	7516976		80	14.5	26.9	29.3	5.28
BR-06	GUARDIAN DO BRASIL	570805	7520165	412.6	190	26.62	86.0	31.6	0.25
BR-06b	GUARDIAN DO BRASIL	570628	7520098	412.6	193	28.48	110.8	25.5	0.10
BR-22	DNER - Posto de Pesagem	561038	7516325	390	150	17	69.0	0.8	0.01
BR-23	INAPLA LTDA	560608	7516019	390	149	57	116.0	1.5	0.01
BR-24	SAN-CO - Prod. Alimentícios LTDA	552462	7515895	393	139	3	52.0	16.0	0.19
BR-27	ELY LILLY E Co. OF BRASIL INC.	554318	7515427	390	100	6.2	26.0	0.8	0.06
BR-29	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	15	60.0	2.2	0.03
BR-30	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	7	60.0	0.8	0.01
BR-31	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	80	3	55.0	4.2	0.04
BR-32	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	77.5	11	72.0	4.5	0.01
BR-33	LAB. LEDERLE DO BRASIL S/A	561754	7516568	390	77	19	68.0	4.7	0.05
BR-36	COOP. AGROP. DO MUN. DE RESENDE	556658	7515875	390	120	1	64.0	6.0	0.04
BR-38	XÉROX	546881	7513299	405.82	100	8	60.0	1.2	0.01
BR-44	LABORATÓRIO WANDER DO BRASIL	561324	7516477	390	81	9	45.0	14.0	0.30
BR-44b	LABORATÓRIO WANDER DO BRASIL	561324	7516477	390	102	30.3	80.6	12.0	0.13
BR-46	CITOR	546881	7513422	390	122.6	2	60.0	3.7	0.03
BR-47	USINA TERMOELÉTRICA DE RESENDE	554320	7516042	395	120	0.7	13.0	18.8	3.44
BR-48	PREFEITURA MUNICIPAL(ESAMUR)	554456	7514043	395	108	2.2	45.0	4.8	0.07
BR-59	COOP. AGROP. DE RESENDE	556658	7515875	390	66	3	6.0	4.0	12.35
BR-80	SEAGRAM	565465	7517622	394.17	140	15.74	52.6	54.8	1.12
BR-100-1	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51	240	41.49	131.9	28.3	0.10
BR-100-5	VOLKSWAGEN	566618	7519410	395.51		24.3	78.3	41.4	0.39
BR-101	PEUGEOT	568324	7520155	393	260	23.68	52.1	70.8	2.43
BR-125	PEUGEOT	568358	7519697	407	253	35.1	54.0	55.0	4.28

