

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO AMBIENTAL

USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NA CONSTRUÇÃO DE
MODELOS ESTOCÁSTICOS DE FLUXO E DELIMITAÇÃO DE
PERÍMETRO DE PROTEÇÃO DE POÇOS

INGO WOTTRICH

ORIENTADOR: DR. NELSON O. LUNA CAICEDO

CO-ORIENTADOR: RICARDO G. MARQUEZAN

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Porto Alegre
MARÇO/2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS - IPH

**FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NA CONSTRUÇÃO DE MODELOS
ESTOCÁSTICOS DE FLUXO E DELIMITAÇÃO DE PERÍMETRO DE
PROTEÇÃO DE POÇOS**

INGO WOTTRICH

Dissertação submetida ao Programa de Pós- Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: DR. NELSON O. LUNA CAICEDO

CO-ORIENTADOR: RICARDO G. MARQUEZAN

BANCA EXAMINADORA:

DR. JOSÉ ANTONIO LOUZADA

UFRGS

DR. JOSÉ LUIZ SILVÉRIO DA SILVA

UFSC

DR. PEDRO ANTONIO ROEHE REGINATO

UFRGS

Porto Alegre
MARÇO/2012

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais e meus irmãos pelo ótimo convívio durante o período da elaboração da dissertação.

Agradeço a toda comunidade do IPH, aos colegas, amigos, professores e funcionários e em especial aos amigos Mino, Paulo, Rosane e Tirzah.

Agradeço ao Prof. Dr. Ari Roisenberg, do Departamento de Geociências, por me auxiliar no que estivesse ao seu alcance e ceder espaço neste departamento quando me foi necessário.

Agradeço ao Prof. Dr. João Felipe, do Departamento de Engenharia de Minas, pelos conselhos profissionais, pessoais e as aulas ministradas que foram fundamentais no meu crescimento acadêmico.

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Nelson Oswaldo Luna Caicedo, por toda compreensão e paciência nas dificuldades que tive e pela oportunidade de realizar meu mestrado no IPH.

Agradeço ao meu co-orientador Ricardo Marquezan, por ter sido não somente um co-orientador, mas um grande amigo que me ajudou e incentivou nos momentos de maior dificuldade.

A todos os amigos que tornaram possível terminar este trabalho.

RESUMO

O uso racional dos recursos hídricos tem ganhado cada vez maior importância frente aos diversos setores da sociedade. A utilização destes recursos sem um planejamento de gestão tem levado a sua deterioração do ponto de vista qualitativo e também quantitativo. As águas subterrâneas surgem como uma fonte de recursos hídricos por estarem menos expostas a contaminações derivadas do uso antrópico e por existirem em maior quantidade em relação às águas superficiais. Para que possam ser preservadas e se elabore um plano de uso, o entendimento de sua ocorrência é fundamental. Esta pesquisa explorou o uso de ferramentas computacionais na construção de modelos hidrogeológicos de fluxo e transporte, mais especificamente o método de simulação de Monte Carlo (MC). O estudo de caso é o Sistema Aquífero Guarani na região de Santana do Livramento, Estado do Rio Grande do Sul, fronteira do Brasil com o Uruguai. Foi analisada, através das simulações, a influência do parâmetro de condutividade hidráulica (K) nos modelos construídos, representando a situação *in situ*, e projetando cenários futuros. Foram utilizadas informações do banco de dados do SIAGAS (CPRM) e dos trabalhos realizados no “Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani”. Os modelos estocásticos gerados através das simulações foram comparados a modelos determinísticos, geralmente mais utilizados. Os modelos estocásticos se mostraram ferramentas essenciais na construção de modelos de fluxo, sendo atualmente a melhor alternativa para que se obtenha o conhecimento da dimensão da incerteza em relação ao meio físico estudado. Na construção de perímetros de proteção de poços, as simulações realizadas comprovaram que o Bairro do Cerro do Registro é um local apropriado para a locação de poços de abastecimento de água, como consta no plano diretor da cidade de Santana do Livramento, estando mais protegidos de fontes de contaminação que os poços situados no centro urbano.

Palavras-chave: Condutividade hidráulica, Perímetro de proteção de poços, Sistema Aquífero Guarani, Simulação estocástica de fluxo e transporte, Santana do Livramento.

ABSTRACT

The rational use of water resources has gained increasing importance in several sectors of the Brazilian society. The use of such resources without a management plan has led to its deterioration both from qualitative and quantitative points of view. Groundwater arises as a possible source of hydric resources for being less exposed to anthropic contamination and by existing in greater quantity in relation to surface water. In order to preserve groundwater and elaborate a proper land use plan it is essential to understand its occurrence. This research explored the use of computational tools in the construction of hydro-geological models of flow and transport, more specifically the simulation method of Monte Carlo (MC). The case study is the Guarani Aquifer System in the region of Santana do Livramento, Rio Grande do Sul State, Brazil's border with Uruguay. The influence of the parameter of hydraulic conductivity (K) in the models constructed, representing the situation *in situ* and designing future scenarios, was analyzed through simulations. Information from the database of SIAGAS (CPRM) and of a study carried out in the "Project of Environmental Protection and Sustainable Development of the Guarani Aquifer System" were used. Stochastic models generated through the simulations were compared to deterministic models which are usually more frequently used. Stochastic models were essential tools in the construction of workflow models. Currently, they are the best alternative to know the size of uncertainty about the physical medium studied. In building the perimeters of wellhead protection areas, the simulations which were carried out have shown that Cerro do Registro neighborhood is an appropriate location for the leasing of water supply wells as stated in the strategic plan of the city of Santana do Livramento, being more protected from sources of contamination than the wells located in the urban area.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Well Protection Perimeter, Guarani Aquifer System, Stochastic Simulation of Flow and Transport, Santana do Livramento.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Hipótese de trabalho.....	12
1.2 Justificativa.....	12
1.3 Objetivo.....	14
1.4 Objetivos gerais.....	14
1.5 Metodologia.....	14
1.6 Estrutura da dissertação.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Importância das águas subterrâneas.....	17
2.2 Introdução ao modelo hidrogeológico e a incorporação das incertezas (modelos determinísticos e estocásticos).....	19
2.3 Análise das incertezas e da variabilidade dos modelos de fluxo e transporte.....	22
2.4 Modelo de fluxo em meio poroso-saturado.....	24
2.4.1 Contextualização histórica.....	24
2.4.2 Uso do modelo.....	24
2.4.3 Formulação matemática do fluxo em meio poroso saturado.....	25
2.4.4 Código numérico.....	29
2.5 Modelos de transporte em meio poroso saturado.....	32
2.5.1 Contextualização histórica e formulação matemática do transporte em meio poroso saturado.....	32
2.5.2 Solução numérica do problema de transporte em meio poroso saturado.....	34
2.5.3 Avaliação da migração de contaminante em água subterrânea.....	36
2.6 Campos aleatórios de condutividade hidráulica.....	37
2.6.1 Funções aleatórias.....	37
2.7 Simulação estocástica.....	39
2.7.1 Método de Monte Carlo (MC).....	41

2.8 Modelo estocástico de trajetória advectiva de partículas	44
2.9 Perímetro de proteção de poços.....	44
2.10 Introdução à legislação e gestão de recursos hídricos.....	46
2.11 Aquífero Guarani	51
2.12 Hidrogeologia – SAG regional	53
3 ESTUDO DE CASO	55
3.1 Caracterização da área	55
3.1.1 Relevo e Geomorfologia.....	57
3.1.2 Clima.....	59
3.1.3 Solos.....	60
3.1.4 Geologia regional	61
3.1.5 Geologia local	65
3.1.6 Bacias hidrográficas e Hidrogeológicas.....	65
3.1.7 Hidrogeologia.....	66
3.1.8 Características sócio-econômicas	67
3.2 METODOLOGIA.....	71
3.2.1 Discretização do modelo	71
3.2.2 Parâmetros do modelo	81
3.2.3 Condições de contorno	83
3.2.4 Modelo de fluxo estocástico – Cenário atual	86
3.2.5 Modelo estocástico advectivo de trajetória de partículas – Cenário do Bairro do Registro	88
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS.....	89
4.1 Calibração do modelo de fluxo determinístico – Cenário atual.....	89
4.2 Modelo estocástico de fluxo – Cenário atual.....	94
4.2.1 Validação das simulações estocásticas– Cenário atual.....	99
4.3 Comparação com modelos anteriores – Cenário atual	100
4.4 Perímetro de proteção de poços – Cenário Bairro do Registro modelo determinístico	103
4.5 Modelo estocástico de fluxo - Cenário Bairro do Registro.....	106

4.5.1 Validação da simulação – Cenário Bairro do Registro.....	110
4.6 Modelo estocástico advectivo de trajetória de partículas – Cenário Bairro do Registro.....	115
5 CONCLUSÕES.....	118
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Etapas do gerenciamento de um aquífero.....	18
Figura 2: Resultado de um processo determinístico e um processo estocástico	20
Figura 3: Aquífero hipotético simplificado.....	30
Figura 4: Mapa SAG.	53
Figura 5: Localização da área de estudo.....	55
Figura 6: Mapa de localização da área estudo.	57
Figura 7: Relevo (SRTM) da área do modelo (em metros).	58
Figura 8 - Unidades geomorfológicas do Rio Grande do Sul.....	59
Figura 9: Solos.....	61
Figura 10: Geologia regional.	62
Figura 11: Seção transversal.	64
Figura 12: Mapa geológico local da área de estudo.	65
Figura 13: Bairro Registro	68
Figura 14: Células de Fluxo e Não Fluxo.	72
Figura 15: Camada 1 c Superfície topográfica do modelo (em metros).....	73
Figura 16 : Modelo geológico de camadas aflorantes.	75
Figura 17: Perfis transversais.....	76
Figura 18: Mergulho das camadas – Visualização em perspectiva.	77
Figura 19: Camada 1 – Formação Serra Geral – <i>grid</i>	78
Figura 20: Camadas 2, 3, 4 e 5 – <i>grid</i>	80
Figura 21: Parâmetro: Condutividade hidráulica.....	81
Figura 22: Condutividades Hidráulicas horizontais– Camadas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).	82
Figura 23: Condições de contorno – Camada 2.	84
Figura 24: Condições de contorno – Camada 3.	85
Figura 25: Histograma dados k.	86
Figura 26: Histograma log-K.	87
Figura 27: Camadas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e).....	90
Figura 28: Valores observados VS calculados de carga hidráulica.	91
Figura 29: Soma dos quadrados dos resíduos entre valores observados e calculados pelo modelo acumulado.	92
Figura 30: Valores observados VS resíduos.	92
Figura 31: Balanço de massa.....	94
Figura 32: Balanço de massa.....	94

Figura 33: Média e desvio padrão camada 1(a) e (b), camada 2 (c) e (d), camada 3 (e) e (f), camada 4 (g) e (h), camada 5 (i) e (j) : 100 simulações.	96
Figura 34: camada 2 - Realização 1 (a), 28 (b), 69 (c) e 99 (d).	97
Figura 35: camada 5 - Realização 1(a), 28 (b), 69 (c) e 99 (d).	98
Figura 36: Média dos resíduos (erro) das simulações.	99
Figura 37: Média dos resíduos (erro) acumulado.	100
Figura 38: Distribuições de cargas hidráulicas modelo Botucatu (a) Charlesworth et al., (2008), (b) modelo determinístico calibrado.	101
Figura 39: Cargas hidráulicas correspondentes a média das 100 simulações de fluxo (a)realização 28 (b) e 99 (c), respectivamente.	102
Figura 40: Camada 1(a), 2(b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) – poços Bairro Registro.....	105
Figura 41: Média e desvio padrão das 100 simulações poços no Bairro Registro	108
Figura 42: Distribuição das cargas hidráulicas da realização 1 (a) e 77(b).....	109
Figura 43: Distribuição das cargas hidráulicas da realização 24 (c) e 77 (d).	109
Figura 44: Média dos resíduos das cargas hidráulicas (calculada – observada).	111
Figura 45: Média dos resíduos de carga hidráulica acumulada.	112
Figura 46: Desvio padrão das simulações (variabilidade entre as simulações).	113
Figura 47: Desvio padrão acumulado das realizações (variabilidade acumulada entre simulações).....	113
Figura 48: Soma dos quadrados dos resíduos das realizações de distribuição de cargas hidráulicas.....	114
Figura 49: Soma dos quadrados acumulada das realizações.	115
Figura 50: Probabilidade captura partículas t=20 anos.....	116
Figura 51: Probabilidade captura partículas t=270 anos.....	117
Figura 52: Poços de bombeamento	132

1 INTRODUÇÃO

Os problemas relatados mais comuns relacionados à utilização de águas subterrâneas são a superexploração, a impermeabilização do solo e a poluição. A superexploração ocorre quando o volume de extração de água ultrapassa o volume de recarga do aquífero. Entre os diversos malefícios da superexploração, pode-se destacar a exaustão do aquífero, que compromete o uso da água para as futuras gerações. A respeito da contaminação, apesar de serem menos vulneráveis que as águas superficiais, uma vez contaminadas, as águas subterrâneas são de difícil remediação e recuperação, podendo ter custos muito altos e até mesmo inviáveis. A impermeabilização altera, sobretudo, o ciclo hidrológico, pois não permite a infiltração de água nas zonas impermeabilizadas, causando aumento de escoamento superficial e conseqüentemente aumento do risco de enchentes, assoreamento dos cursos de água, erosão do solo, além da redução do volume de água nas zonas de recarga dos aquíferos.

Para os dois primeiros problemas relacionados ao uso de águas subterrâneas, a superexploração e a contaminação, a ferramenta mais moderna no meio científico e que com freqüência faz-se uso na prática na resolução de variados problemas de campo, é a construção de modelos hidrogeológicos de fluxo e transporte. O objetivo da construção de modelos é a representação e o entendimento do fenômeno observado em campo, a previsão e projeção de cenários futuros.

A estimativa das incertezas dos modelos hidrogeológicos (ou qualquer modelo simplificado de um fenômeno natural mais complexo) é fundamental, e poucas vezes considerada. A incorporação das incertezas de forma eficaz, tanto do meio físico como da própria construção do modelo, exige o uso de ferramentas computacionais. Para a realização do estudo, escolheu-se uma área de trabalho em que já foram realizados modelos de fluxo (Gómez, 2007; Charlesworth et al. 2008), para avaliar como a não incorporação das incertezas, mais especificamente, em relação ao parâmetro de condutividade hidráulica (fundamental na aplicação de modelos de fluxo e transporte), pode influenciar nos resultados do modelo e conseqüentemente em um possível planejamento de gestão.

A região estudada é o município de Santana do Livramento, na fronteira do Estado do Rio Grande do Sul com o Uruguai. Na maior parte da região a água subterrânea utilizada é originada do Sistema Aquífero Guarani, que se encontra aflorante

na maior parte da região, em forma de aquífero livre. O uso da água do Aquífero Guarani na região é realizado faz várias décadas e inúmeras residências possuem poços para extração de água deste aquífero. Cada vez mais poços são instalados na região, mesmo com o pequeno decréscimo da população na cidade evidenciada nos últimos anos (censo do IBGE 2010), principalmente devido ao aumento da zona industrial.

Desta forma, pode-se formular o seguinte problema:

Problema : de que forma a não incorporação das incertezas nos modelos hidrogeológicos pode influenciar nas tomadas de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos? Ou mais especificamente em relação à área de estudo, de que forma a não incorporação das incertezas nos modelos hidrogeológicos do Aquífero Guarani em Santana do Livramento – Rio Grande do Sul pode influenciar nas tomadas de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos na região?

1.1 Hipótese de trabalho

Do ponto de vista da quantidade e qualidade da água:

A não incorporação das incertezas do meio físico prejudica a análise de modelos de gestão.

1.2 Justificativa

Neste capítulo são descritos e citados alguns dos tópicos e artigos que motivaram a pesquisa.

Os materiais porosos subsuperficiais tipicamente exibem um alto grau de variabilidade natural em termos do seu tipo e distribuição espacial.

Diversos autores referiram à condutividade hidráulica como o parâmetro mais sensível na construção de um modelo de fluxo.

Gomes (2008), motivado pelo problema, descreveu uma importante revisão bibliográfica sobre o assunto, na qual, entre outros, cita o trabalho de Smith e Schwartz (1980, 1981a e 1981b), aonde identificaram a condutividade hidráulica como o parâmetro mais importante no controle do fluxo e do transporte em meio poroso e mostraram que o transporte de contaminantes é altamente sensível à heterogeneidade do meio poroso.

Rehfeldt et al (1992) destacam ser do conhecimento geral que a heterogeneidade do campo de condutividade hidráulica de um aquífero controla o fluxo e a dispersão de contaminantes dissolvidos nas águas subterrâneas. Na prática, sabe-se que a condutividade hidráulica e as condições de contorno regem o fluxo de água subterrânea nos modelos hidrogeológicos. Para a construção do modelo deste trabalho, as incertezas na escolha das condições de contorno podem ser consideradas pequenas, visto a exaustão de trabalhos na região, dando ainda mais importância ao parâmetro da condutividade hidráulica no resultado do modelo.

Nesta pesquisa, a incorporação das incertezas em relação ao meio físico não leva em conta a heterogeneidade do meio físico, considerando-o homogêneo, sendo necessária uma maior quantidade de dados e estudo local para a consideração de dois aspectos fundamentais na construção de modelos hidrogeológicos, que são tão frequentemente negligenciados na construção destes tipos de modelos: a variabilidade espacial (heterogeneidade) e a incerteza.

Desta forma, este trabalho analisa como a utilização de vários valores diferentes de condutividade hidráulica (em oposição à prática comum de considerar apenas um único valor), gerados aleatoriamente por um processo de simulação, influencia nos modelos gerados, sem levar em conta, no entanto, como essa condutividade hidráulica varia ao longo do espaço, ou seja, sua heterogeneidade natural, transportando para o modelo a incerteza em relação à magnitude dos valores de condutividade hidráulica, porém sem levar em conta sua distribuição espacial (e a incerteza vinculada a ela).

A variação da condutividade hidráulica ao longo do tempo, que nos meios porosos varia conforme o arranjo dos grãos, é desprezível, visto este se tratar de um processo geológico cuja variabilidade se dá em uma escala muito grande de tempo.

Realizada a justificativa de introduzir a condutividade hidráulica como parâmetro a ter sua magnitude de incerteza medida, espera-se que os resultados dos diversos modelos hidrogeológicos gerados, para diferentes campos de condutividade hidráulica, tragam mudanças nos resultados finais dos modelos.

De forma prática, este trabalho analisa a confiabilidade dos modelos hidrogeológicos, em específico, na região de Santana no Livramento-RS.

1.3 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é analisar a utilização de metodologias computacionais modernas como ferramenta na avaliação efetiva do gerenciamento de recursos hídricos. Pretende-se avaliar como a abordagem estocástica pode ser empregada no planejamento de gestão e influenciar nas tomadas de decisão de utilização e proteção de aquíferos. É apresentado o estudo de caso do Aquífero Guarani na região de Santana do Livramento, Estado do Rio Grande do Sul, fazendo uma comparação da metodologia de modelos estocásticos (incorporam as incertezas) com modelos determinísticos de fluxo e utilização das simulações de forma prática na delimitação de perímetro de proteção de poços.

1.4 Objetivos gerais

- Discutir os resultados obtidos através da abordagem estocástica e comparar estes resultados com os resultados obtidos utilizando uma abordagem determinística, mais amplamente utilizada na solução de problemas práticos nesta área do conhecimento.

- Realizar levantamento do uso das águas subterrâneas na região, contemplando a realocação de poços na cidade de Santana do Livramento e delimitar perímetro de proteção para estes novos poços.

1.5 Metodologia

A metodologia empregada na construção da dissertação pode ser resumida da seguinte maneira:

ETAPA 01: revisão bibliográfica: Esta etapa tem como objetivo explicitar aonde se insere esta pesquisa no processo de gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Faz-se uma breve revisão sobre a importância das águas subterrâneas, seguidamente inserem-se conceitos de uso e construção de modelos de fluxo e transporte, análise e incorporação das incertezas aos resultados nos modelos hidrogeológicos obtidos, seu uso prático na construção de perímetro de proteção de poços, conceitos de funções aleatórias e simulação estocástica e como esta técnica pode ser utilizada para associar as incertezas do parâmetro da condutividade hidráulica aos resultados dos modelos de fluxo e transporte. Finalizando, uma breve revisão sobre legislação de recursos hídricos subterrâneos e os conflitos que englobam o uso da água na região de estudo e o Aquífero Guarani.

ETAPA 02: definição do modelo conceitual: caracterização da área de estudo.

ETAPA 03: transformar o modelo conceitual em modelos de fluxo e transporte (advectivo) em meio poroso saturado através de abordagem determinística; Selecionou-se o “software” *GroundwaterVistas* version 5, desenvolvido pela ESI (*Environmental Simulations Incorporated*), como interface gráfica para o estudo, que permite fácil manuseio de dados e geração de resultados rapidamente. Como suporte ao *GroundwaterVistas* foi utilizado o “software” *PMwin* versão 5.3, por ser de caráter livre e bastante eficiente, possuindo compatibilidade com o *GroundwaterVistas*.

ETAPA 04: utilização de ferramentas computacionais na geração de campos aleatórios de condutividade hidráulica para a área em estudo; a abordagem estocástica gera uma distribuição de probabilidades para a solução, fornecendo valores entre 0 (zero) e 1 (um), que podem ser relacionados ao conceito de risco.

ETAPA 05: solução do problema de fluxo em meio poroso saturado através de abordagem estocástica; este item tem como objetivo apresentar qualitativamente e quantitativamente conceitos a respeito da incerteza e variabilidade espacial da condutividade hidráulica e sua importância nos modelos de fluxo e transporte.

ETAPA 06: comparação dos resultados obtidos também com modelos determinísticos já construídos na área por outros autores: neste item serão tratadas técnicas de simulações univariadas (diz respeito somente aos valores da variável), independente de sua localização.

ETAPA 07: uso da abordagem estocástica na construção de modelos de transporte (advectivo) para a construção de perímetro de proteção de poços na área de estudo. Neste trabalho será utilizada a mais moderna ferramenta utilizada, que é a simulação estocástica dos modelos de fluxo e transporte, aonde são atribuídas probabilidades das partículas serem captadas pelos poços no decorrer do tempo.

1.6 Estrutura da dissertação

A presente dissertação foi estruturada por capítulos, de forma a inserir os assuntos necessários para o entendimento do trabalho em ordem cronológica, para o melhor entendimento do leitor. Os capítulos foram organizados como segue:

CAPÍTULO 01: introdução ao assunto da dissertação, hipótese de trabalho, justificativas, objetivos, metodologia e estrutura da tese;

CAPÍTULO 02: revisão bibliográfica;

CAPÍTULO 03: estudo de caso: breve apresentação da área de estudo com as mais relevantes informações para o entendimento e localização do leitor no trabalho realizado;

CAPÍTULO 04: metodologia. descrição dos passos na construção dos modelos: modelo conceitual, escolha dos parâmetros, condições de contorno, base e topo das camadas geológicas, calibração do modelo determinístico de fluxo. Parâmetros na construção dos modelos estocásticos de fluxo e transporte (advectivo);

CAPÍTULO 05: discussão e resultados de todos os trabalhos desenvolvidos: modelo determinístico de fluxo; comparação de modelos estocásticos de fluxo com determinísticos; avaliação dos modelos estocásticos de transporte (advectivo) de partículas na construção de perímetro de proteção de poços: validação das simulações;

CAPÍTULO 06: apresentação das conclusões e recomendações para trabalhos futuros, baseando-se nos resultados obtidos;

CAPÍTULO 07: referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância das águas subterrâneas

As *águas subterrâneas* são geralmente compreendidas como significando a água que ocupa todos os vazios de um estrato geológico (Tood, 1959). Um *aquífero* é uma formação ou grupo de formações geológicas que pode armazenar água subterrânea.

Bear (1979) aponta como principais funções dos aquíferos:

- Produção: fornecem água em quantidade e qualidade para diversos usos;
- Armazenamento: armazenam água em período de chuva e fornecem água em períodos de estiagem;
- Filtragem: atuam como filtros naturais, minimizando os custos de tratamento da água para consumo humano;
- Transporte: conduzem água de uma área de recarga até o local onde será utilizada (bombeada);
- Ambiental: fornece água para a manutenção dos ecossistemas e da biodiversidade.

O interesse no estudo das águas subterrâneas se justifica, sobretudo, pela sua maior abundância em relação às águas superficiais. Estima-se que cerca de 96% da água doce disponível no planeta esta sob a forma de água subterrânea (MMA,2007). Existem, no entanto, outras vantagens para a utilização de águas subterrâneas (MMA,2007):

- O custo de captação normalmente é menor que de águas superficiais, pois requer menos estruturas;
- É mais fácil de ser explorada, podendo ser popularizada até mesmo em regiões afastadas de cursos d'água;
- Menor impacto ambiental, desde que os poços sejam construídos conforme as exigências técnicas;
- Geralmente é de boa qualidade para consumo humano;
- Estão mais protegidas que as águas superficiais de agentes poluidores.

Os problemas vinculados a utilização desses recursos podem ser basicamente referentes a critérios de qualidade e quantidade. Se por um lado é necessário manter a qualidade da água para uso humano e manutenção de ecossistemas e biodiversidade, por outro, para o uso racional das águas subterrâneas, a exploração não deve ultrapassar o

volume de recarga natural do aquífero, pois acarretaria no esgotamento do recurso ao longo do tempo.

O estudo de águas subterrâneas compreende, portanto, a hidrologia das águas em subsuperfície, que estuda o entendimento da ocorrência, distribuição e movimento (fluxo) das águas (Todd, 1959), o transporte de solutos (contaminantes), assim como aspectos legais, políticos e econômicos que enquadram os processos de tomada de decisão no gerenciamento destes recursos.

Segundo Bear (1987), o gerenciamento de um aquífero geralmente significa a determinação de valores numéricos de *variáveis de decisão* de maneira a maximizar ou minimizar uma determinada *função objetivo*, modificando as *variáveis de estado*, que estão sujeitas a determinadas *restrições*. A figura 1 exemplifica os conceitos aplicados por Bear (1987):

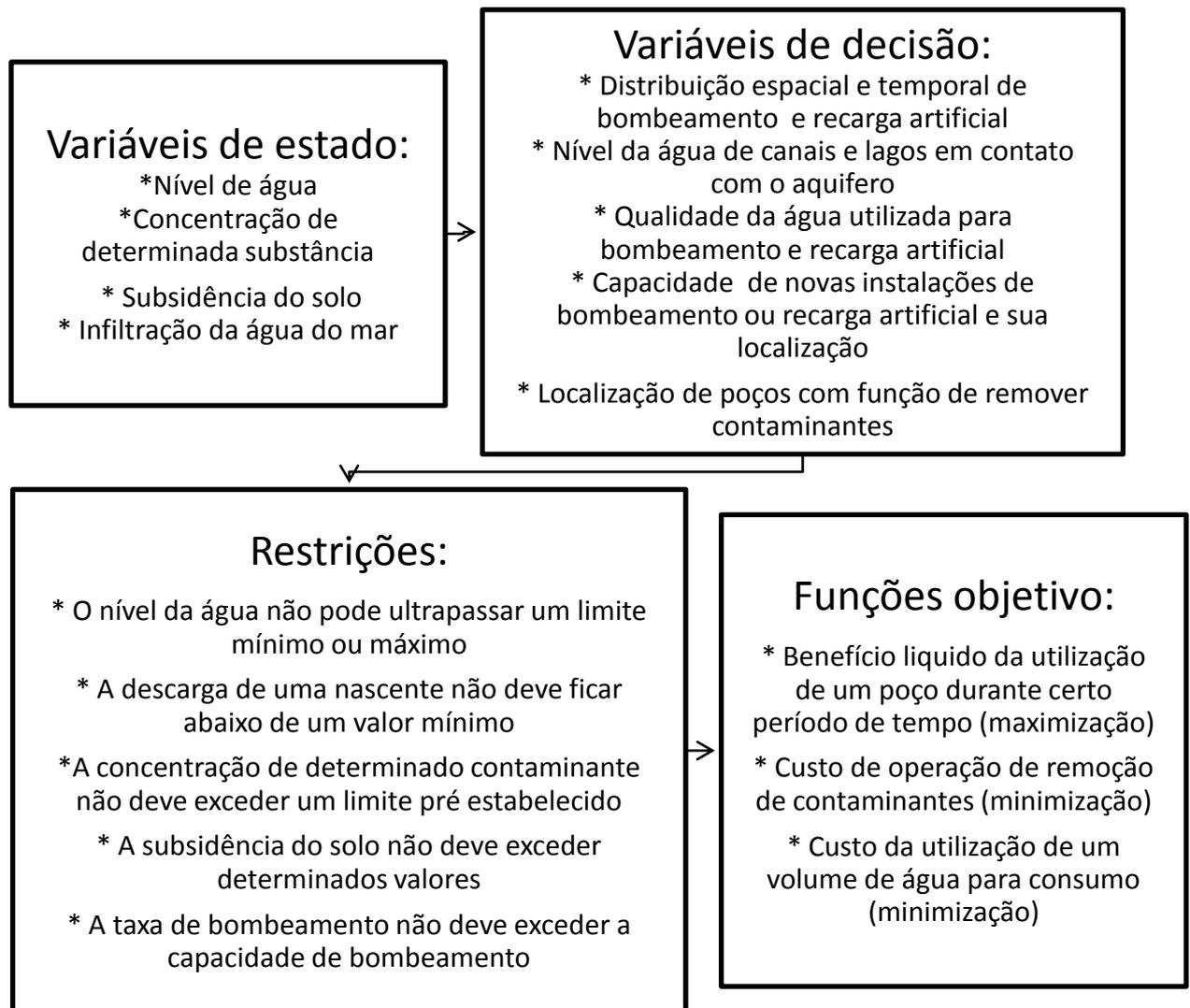


Figura 1: Etapas do gerenciamento de um aquífero.

Do ponto de vista de gerenciamento das águas subterrâneas, o comportamento esperado de um sistema aquífero é intrínseco ao procedimento de determinação do planejamento de gestão. Para tal, devem-se saber quais os futuros valores das *variáveis de estado* para programar uma série de possíveis decisões de forma que (a) avalie quando elas violam algumas *restrições* impostas e (b) analise o resultado final de uma determinada *função objetivo*.

2.2 Introdução ao modelo hidrogeológico e a incorporação das incertezas (modelos determinísticos e estocásticos)

Um modelo hidrogeológico é uma metodologia amplamente utilizada que representa aproximadamente a situação encontrada *in situ*. Um modelo deve ser utilizado como ferramenta auxiliar no processo de tomada de decisão frente à possível remediação de um sítio contaminado, ou imposição de limites para a exploração do aquífero, entre outros processos ligados ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Os modelos hidrogeológicos podem ser divididos, basicamente, em duas categorias: modelos de fluxo e modelos de transporte de solutos. Os modelos de fluxo determinam a distribuição das cargas hidráulicas ao longo do aquífero, enquanto os modelos de transporte de solutos determinam a concentração do soluto afetado pela advecção (movimento do soluto através do fluxo médio da água), dispersão (espalhamento e mistura do soluto), e outras reações que atuam no mecanismo de transporte. Um modelo de transporte consiste em duas partes: primeiramente são determinadas as cargas hidráulicas, através de um modelo de fluxo, para depois determinar as concentrações do soluto (Anderson et al.,1992). Assim, para tratar do problema de transporte de contaminantes, é necessária a construção de um modelo de fluxo de água subterrânea.

Existem duas abordagens distintas para a realização de modelos: determinística ou estocástica. Um modelo determinístico é utilizado quando se existe conhecimento suficiente do fenômeno tal que este possa ser determinado por uma equação que o represente de maneira a produzir uma única solução para o problema. Neste tipo de modelo, a incerteza a respeito dos parâmetros das equações pode ser considerada perante a metodologia de análise de sensibilidade, largamente utilizada, que basicamente analisa a variação do resultado em face de alterações nos parâmetros do modelo. Em um modelo estocástico, os dados de campo são compreendidos como resultados de um processo

aleatório, de tal forma que estes são gerados através de um mecanismo probabilístico. Deste modo, na abordagem estocástica faz-se uso de técnicas de simulação, que permitem a obtenção de várias soluções equiprováveis para o problema. Desta forma um modelo estocástico difere-se de um modelo determinístico por gerar uma função distribuição de probabilidades (FDP) da solução ao invés de um único valor, como ilustra a figura 2, onde $Z(n)$ é o valor procurado (solução):

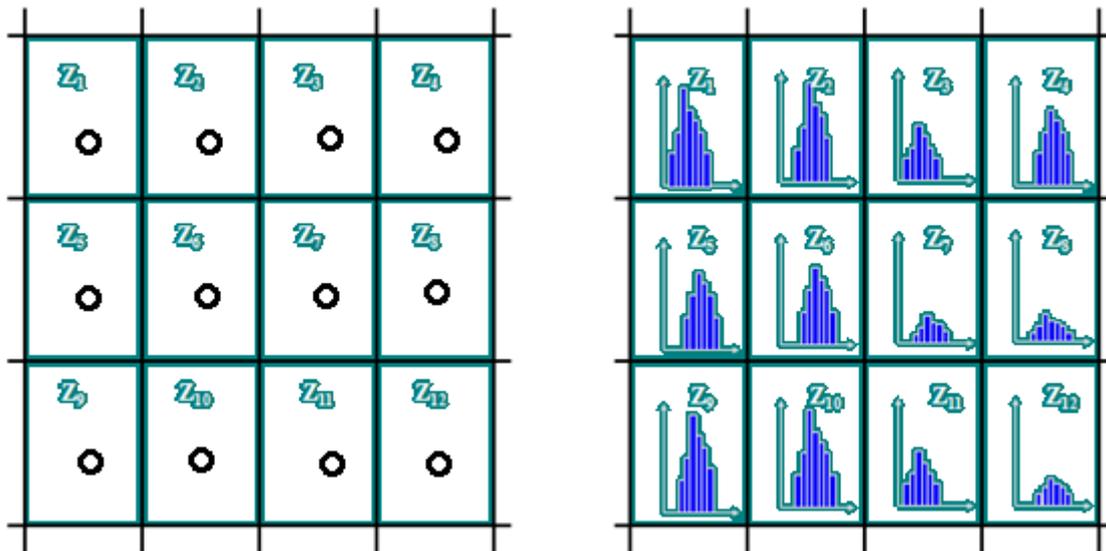


Figura 2: Resultado de um processo determinístico e um processo estocástico (Fonte: modificado de Coimbra, 2007).

Uma das mais importantes informações retiradas desta abordagem é o tamanho da incerteza de um fenômeno estudado, que pode ser determinado pelo desvio padrão do histograma da variável que está sendo estimada, aonde quanto maior o desvio padrão, maior a incerteza. Esta abordagem é aconselhada em casos nos quais não se tem conhecimento a respeito das características do fenômeno ou quando o número de incertezas em relação às variáveis que representam o fenômeno é grande.

Clarke (1973) promoveu uma análise da terminologia hidrológica que se tornou referência para este tipo de estudo. Um sistema é definido como um conjunto de processos físicos que converte uma variável de entrada em variável de saída. A variável é uma dada característica de um sistema, podendo ser medida e assumir diferentes valores com o tempo. Parâmetro é uma quantidade característica do sistema e não muda com o tempo. Os modelos hidrológicos tratam dos relacionamentos entre variáveis hidrológicas

que descrevem aqueles aspectos do comportamento do sistema que se está interessado em estudar.

A forma geral de um modelo hidrológico pode ser estabelecida como:

$$Y_t = f(X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots; a_1, a_2) + \epsilon_t \quad (1)$$

Onde o vetor variável $\{X_t\}$ ($t = \dots -1, 0, 1, 2, \dots$) é a variável de entrada e $\{Y_t\}$ ($t = \dots -1, 0, 1, 2, \dots$) é a variável de saída, (a_1, a_2) são os parâmetros do sistema. A função (f) define a natureza do modelo e ϵ_t é o erro que expressa a falta de ajuste com o mundo real.

A presença ou não de variáveis aleatórias no modelo determina se ele é estocástico ou determinístico. Se qualquer das variáveis (X_t) , (Y_t) , (ϵ_t) tem uma distribuição de probabilidade, então o modelo é estocástico.

Marquezan (2008) faz uma breve revisão sobre conceitos de modelos determinísticos e estocásticos aplicado a águas subterrâneas, aonde cita que “Na abordagem determinística clássica da modelagem do fluxo de águas subterrâneas, a função (f) é um problema de valor de contorno baseado nas equações diferenciais parciais do fluxo através do meio poroso. No caso de um fluxo transiente unidirecional na direção x pode-se limitar os subscritos da equação (1) a $(t= 0,1,2,3,4\dots)$ e identificar o vetor de saída (Y_t) com os valores da carga hidráulica $\phi(x)$ no tempo (t) . Assim, através da equação (1) pode-se identificar (Y_0) com as condições iniciais de $\phi(x)$ no tempo zero e os valores de (X_t) nas condições de contorno onde $X=0$ e $X=L$ no tempo (t) . Considerando o fluxo saturado, os parâmetros $(a_1, a_2\dots)$ podem ser a condutividade hidráulica, a porosidade. Em tal abordagem, nenhuma variável ou parâmetro foi definido probabilisticamente. Por outro lado, na abordagem estocástica o modelo de fluxo pode ser usado, por exemplo, através da simulação de Monte Carlo empregando os parâmetros e as condições de contorno obtidas a partir de uma distribuição de probabilidade”. Desta forma, as variáveis de saída (resposta) terão também uma distribuição probabilística que reflete as incertezas do meio que está sendo modelado (Freeze, 1975).”

De maneira formal, esta abordagem permite ainda fixar uma faixa de valores prováveis da variável, fixando uma banda de valores que podem ocorrer, alterando a maneira de tratar o resultado de “o valor da variável é x ” para “o valor da variável deve variar entre $(x-y) < (x) < (x+y)$ ”. Métodos de simulação, como o de Monte Carlo, permitem

colocar como dado de entrada no modelo uma distribuição de probabilidades de um parâmetro (no caso deste trabalho, a condutividade hidráulica), gerando como saída uma distribuição de probabilidades do resultado (no caso do modelo de fluxo, a distribuição das cargas hidráulicas), uma para cada valor aleatório do parâmetro de entrada “escolhido” pelo algoritmo.

2.3 Análise das incertezas e da variabilidade dos modelos de fluxo e transporte

Uma **incerteza**, de forma simples, é aquilo que desaparece quando se está certo. Como conseqüência, é algo que possui um valor correto, porém desconhecido. Suas origens podem ser a falta suficiente de informação, simplificações ou suposições efetuadas para considerar uma análise, ou desconhecimento do modelo real do fenômeno. Existem basicamente dois grupos de incertezas em modelos:

- Incertezas dos parâmetros: desconhecimento do valor real do parâmetro;
- Incertezas do modelo: origina-se de suposições ou simplificações do processo real.

A **variabilidade** é uma função do sistema que está sendo estudado e deve-se ao efeito da aleatoriedade.

Enquanto a variabilidade é natural do sistema, a incerteza pode ser diminuída através de maior quantidade de dados e estudo.

Freeze *et al.* (1990) dividem as incertezas nos modelos de fluxo e transporte em dois grandes grupos (que representam os mesmos dois grupos citados anteriormente): incertezas geológicas e incertezas nos parâmetros.

A maioria das incertezas classificadas como geológicas referem-se às condições de contorno adotadas nos modelos.

As incertezas nos parâmetros hidrogeológicos estão relacionadas às incertezas quanto aos valores e variabilidade espacial de condutividade hidráulica (K) e porosidade (n_e). São também relacionados como fontes de incerteza alguns parâmetros relacionados ao contaminante: coeficiente de difusão, dispersividade, fator de retardo e taxa de decaimento (meia vida), que não são abordados neste trabalho devido à escolha do modelo *MODPATH* de trajetória de partículas, que calcula somente os processos de advecção de partículas.

A propagação da incerteza, considerando-se os parâmetros hidrogeológicos (condutividade/transmissividade e porosidade), é função da abordagem utilizada na simulação do problema de fluxo e transporte do contaminante (Gomes, 2008).

Em uma abordagem determinística, a análise da incerteza é realizada através de uma análise de sensibilidade dos parâmetros, onde são testados valores para os parâmetros e observado o quanto a variação em seus valores influenciam no resultado final. Nesta abordagem não se sabe qual a incerteza em relação ao parâmetro, e conseqüentemente, de todo modelo, pois, os valores “testados” foram “chutados” de maneira aleatória, permitindo apenas identificar os parâmetros mais sensíveis, não levando em consideração sua distribuição de probabilidade de ocorrência.

Em uma abordagem estocástica, a incerteza dos dados e/ou parâmetros de entrada do modelo é especificada na forma de uma função densidade de probabilidade ou pela média e variância de uma dada distribuição de probabilidade. Existem três abordagens básicas para a propagação das incertezas através do modelo de simulação hidrogeológica e para a análise da incerteza nos resultados (Freeze *et al.*, 1990):

- Análise de primeira ordem (*First-order analysis*);
- Análise das perturbações (*Perturbation analysis*);
- Análise Monte Carlo (*Monte Carlo analysis*).

Sobre as análises de primeira ordem podem ser consultados Dettinger e Wilson (1981) e para a análise das perturbações podem ser consultados Dagan (1982a), Dagan (1982b) e Gelhar (1986).

A distribuição de probabilidades frequentemente adotada para a condutividade hidráulica é a distribuição lognormal e a análise da variabilidade espacial é feita utilizando-se ferramentas de geoestatística, que não serão utilizadas nesta pesquisa, mas faz-se uma breve introdução teórica para situar esta ferramenta neste trabalho e salientar a importância da quantidade de dados para o sucesso do uso desta ferramenta, podendo ainda, o uso da geoestatística futuramente ser uma complementação deste trabalho.

As formulações matemáticas dos processos de simulação, que tentam representar as incertezas dos modelos gerados, serão especificadas brevemente após a introdução matemática da construção dos modelos de fluxo e transporte.

2.4 Modelo de fluxo em meio poroso-saturado

2.4.1 Contextualização histórica

A evolução dos modelos teóricos que explicam a origem, o armazenamento e a circulação das águas subterrâneas se deu, ao longo do tempo, através da metodologia científica, aonde os modelos estabelecem relações com o mundo real através da formulação de hipóteses.

Silva et al. (2002) descrevem a evolução dos modelos teóricos de água subterrânea desde a antiguidade clássica até o século XX. No século XV, Leonardo Da Vinci (1454-1519), propôs um modelo de origem, armazenamento e circulação de águas subterrâneas já muito próximo do aceite atualmente, no qual a água subterrânea se originava da água da chuva, era armazenada em poros e fraturas das rochas, e sua circulação se dava **apenas através da permeabilidade** das formações geológicas.

O modelo de ciclo hidrológico, tal como aceita-se atualmente, foi confirmado no século XVII, por Perrault (1611- 1680), Mariotte (1620-1684) e Halley (1656-1742). Contudo, foi no século XIX que Darcy (1803- 1858) propôs a lei do fluxo da água, permitindo construir o modelo científico atual (Todd, 1959; Price, 1996).

O modelo aceite atualmente pode ser resumido da seguinte forma:

- Quanto a sua origem, a água subterrânea é, essencialmente, proveniente da precipitação atmosférica;
- O armazenamento da água subterrânea ocorre em formações geológicas porosas e permeáveis (poros, fraturas, cavidades de dissolução e vesículas);
- A circulação da água subterrânea realiza-se devido ao **gradiente hidráulico e a permeabilidade (Lei de Darcy)**, através de poros, fraturas, cavidades de dissolução e vesículas e infiltrando-se na superfície da Terra (hipótese da infiltração) através da precipitação atmosférica.

2.4.2 Uso do modelo

No gerenciamento das águas subterrâneas, incluindo os problemas de contaminação, o modelo matemático serve como uma ferramenta de previsão, devido ao

seu potencial em simular condições reais de um sistema e analisar os parâmetros mais importantes no comportamento do meio físico.

O passo inicial na construção de um modelo é a concepção de um modelo conceitual aonde são assumidas hipóteses e posteriormente o modelo matemático tentará reproduzir este modelo conceitual utilizando-se de ferramentas computacionais. Entre as hipóteses na construção de um modelo conceitual estão:

- Geometria do meio poroso;
- Unidades hidrogeológicas;
- Direção do fluxo;
- Propriedades hidrogeológicas do aquífero;
- A forma do fluxo (uni, bi ou tri dimensional);
- O regime (laminar ou turbulento);
- Temporalidade (estado permanente ou transitório);
- Zonas de recarga e descarga;
- Condições de contorno (como o sistema interage com a vizinhança);
- Fontes de poluição;
- Demais características das águas subterrâneas, que variam de local para local.

A segunda parte na construção de um modelo é a transformação destas hipóteses em relação ao meio físico assumidas na primeira etapa em um modelo matemático, aonde consta:

- Definição da geometria de todas as camadas envolvidas no modelo e seus contornos;
- Discretização do volume modelado em blocos (*Grids*).
- Uso de equações diferenciais que expressem a continuidade do meio físico;
- Condições iniciais e condições de contorno.
- Escolha de um algoritmo que resolva as equações diferenciais que regem o problema para cada nó de *grid* e suas condições iniciais e de contorno.

2.4.3 Formulação matemática do fluxo em meio poroso saturado

Para a aplicação de modelos numéricos de fluxo são necessários conhecimentos de hidrogeologia, descrito por diversos autores em textos clássicos do assunto, como

Domenico e Schwartz (1990), Fetter (1999), Freeze and Cherry (1979), Todd (1959), McWorther e Sunada (1981), Marsily (1986), Bear e Verruijt (1987), Spitz e Moreno (1996), e Charbeneau (2000), assim como o conhecimento teórico e prático de modelagem de águas subterrâneas e modelos matemáticos, descritos em Bear e Verruijt (1987), Bear e Bachmat (1990), McDonald e Harbaugh (1988), Wang e Anderson (1982), Anderson e Woessner (1992).

Neste item será abordada a formulação matemática do fluxo em meios porosos saturados, contudo, não serão abordados todos os conceitos envolvidos no problema, como as hipóteses na construção das equações, entre outros, que já foram exaustivamente discutidos nas referências acima citadas.

A *Lei de Darcy* (1803- 1858) para o fluxo em meios porosos saturados pode ser formulada, de forma geral, da seguinte maneira:

$$\mathbf{q} = - \frac{k}{\mu} \left(\frac{dp}{dl} + \frac{dz\rho g}{dl} \right) \quad (1)$$

onde: q = velocidade de Darcy [LT^{-1}];

k = permeabilidade intrínseca [L^2];

μ = viscosidade dinâmica [FTL^{-2}]

dp/dl = gradiente de pressão [-]

ρ = massa específica do fluido [ML^{-3}]

g = gravidade [LT^{-2}]

dz/dl = gradiente de posição [-]

Esta relação é válida para aquíferos livres e confinados e para qualquer tipo de fluido. Para fluidos incompressíveis, ou seja, com massa específica constante, como é o caso da água em aquíferos livres, esta relação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{q} = - \frac{k\rho g}{\mu} \cdot \frac{d}{dl} \left(z + \frac{p}{\rho g} \right) \quad (2)$$

onde: $\frac{k\rho g}{\mu}$ = condutividade hidráulica = K

$$Z + \frac{p}{\rho g} = \text{altura piezométrica (ou carga hidráulica)} = h$$

A equação (1) pode finalmente ser reescrita:

$$\mathbf{q} = -K \text{ grad}(h) \quad (3)$$

onde: q = velocidade de *Darcy* [LT^{-1}];

K = condutividade hidráulica no meio saturado [LT^{-1}];

h = carga hidráulica [L];

$\text{grad} (.)$ = operador gradiente.

O termo h , chamado também de altura piezométrica, é originado através da *Equação de Bernoulli*:

$$Z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = H \quad (4)$$

onde: v = velocidade da partícula [LT^{-1}]

H = carga hidráulica [L]

Para chegar à fórmula da altura piezométrica o termo $\frac{v^2}{2g}$ é desprezado, devido à baixa velocidade das águas subterrâneas. Assim, o termo (h) da eq. (3) representa a carga hidráulica no movimento de águas subterrâneas, e o termo (K) representa a condutividade do fluido através dos poros e/ou fraturas do estrato geológico, estando de acordo com a teoria atual de movimentação das águas subterrâneas.

A combinação da *lei de Darcy* (eq. (3)) com a equação de balanço hídrico aplicada a um volume de controle, descrita detalhadamente em Anderson e Woessner (1992), resulta na equação que descreve o fluxo em meios porosos saturados, que pode ser formulada da seguinte maneira (adaptado de Charbeneau (2000) e Anderson e Woessner (1992)):

$$\text{div} (q) = - S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R \quad (5)$$

onde: h = carga hidráulica [L]

S_s = armazenamento específico [L^{-1}]

$\text{div} (.)$ = operador divergente

q = velocidade de Darcy [LT^{-1}]

R = fonte/sumidouro externo [$L^3T^{-1}L^{-3}$]

O termo $\text{div} (q)$ representa o balanço dos fluxos que entram e que saem do volume de controle. O termo (S_s) é o armazenamento específico, definido como sendo o volume de água subtraído ou adicionado em um volume de controle por unidade de volume por unidade de variação de carga hidráulica (h) e está relacionado com o mecanismo de liberação de água de um aquífero. O produto $S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$ representa a taxa de variação do volume de água armazenado em um determinado volume de controle em relação ao tempo e o termo (R) representa uma fonte e/ou sumidouro externos e que se caracterizam por adicionar ou retirar água do volume de controle a partir de pontos no interior do mesmo, ou seja, pontos não pertencentes às fronteiras do referido volume de controle. Embora a equação seja válida tanto para aquíferos livres como aquíferos confinados, o significado do termo de armazenamento específico S_s é diferenciado: para aquíferos livres, a variação no armazenamento ocorre devido à mudança na posição do nível freático e a entrega de água ocorre através da porosidade efetiva do solo, enquanto para aquíferos confinados o armazenamento específico S_s está relacionado aos mecanismos de compressão e descompressão da água e deformação da matriz sólida, ambos resultantes da variação na carga hidráulica.

Outra maneira, mais comum, de apresentar a eq. (5) pode ser encontrada na maioria dos textos sobre o assunto, como em Anderson (1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (6)$$

Onde: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} , são os valores de condutividade hidráulica através dos eixos coordenados e h é a carga hidráulica do aquífero.

A eq. (6) é válida para regimes de escoamento transiente em meios poroso saturado heterogêneo e anisotrópico, e assumindo que a condutividade hidráulica é colinear aos eixos x,y,z. A solução desta equação tem a forma $h = f(x, y, z, t)$.

No caso particular, considerando-se o fluxo permanente, a eq. (6) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} (K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) = R \quad (7)$$

Outro caso particular bastante descrito na bibliografia é o caso de regime permanente sem fontes e/ou sumidouros externos, para meio homogêneo (K é constante independentemente da posição) e isotrópico (K é constante independentemente da direção, e $K_y = K_x = K_z$), e a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Tanto a eq. (7) quanto a eq. (8) possuem solução do tipo $h = f(x, y, z)$. A eq. (8), conhecida também como *Equação de Laplace*, embora se distancie mais da realidade em relação as outras equações devido a natureza heterogênea e anisotrópica dos fenômenos naturais, possui a vantagem de ser resolvida de forma analítica. As equações (6) e (7) são normalmente resolvidas numericamente.

A eq.(7) combinada com as condições de contorno e o valor dos parâmetros assumidos em cada nó da grade (*grid*) do modelo descrevem o modelo matemático utilizado neste trabalho.

2.4.4 Código numérico

Um código computacional é necessário para realizar a aproximação das equações diferenciais (equação governante e condições de contorno no caso de regime permanente) que regem o fluxo em meio poroso saturado, formando um modelo matemático numérico. O modelo computacional utilizado foi o *MODFLOW* (McDonald e Harbaugh, 1988). O *MODFLOW* utiliza *grids* de diferenças finitas e resolve problemas

de fluxos permanentes e transientes tridimensionais em meios porosos saturados. É provavelmente o modelo mais utilizado no mundo.

A discretização do aquífero tridimensional para a resolução numérica das equações é feita através de um modelo de blocos, onde o aquífero é discretizado em células, identificadas por linha, coluna e camada (*layer*), como apresentado na figura (3):

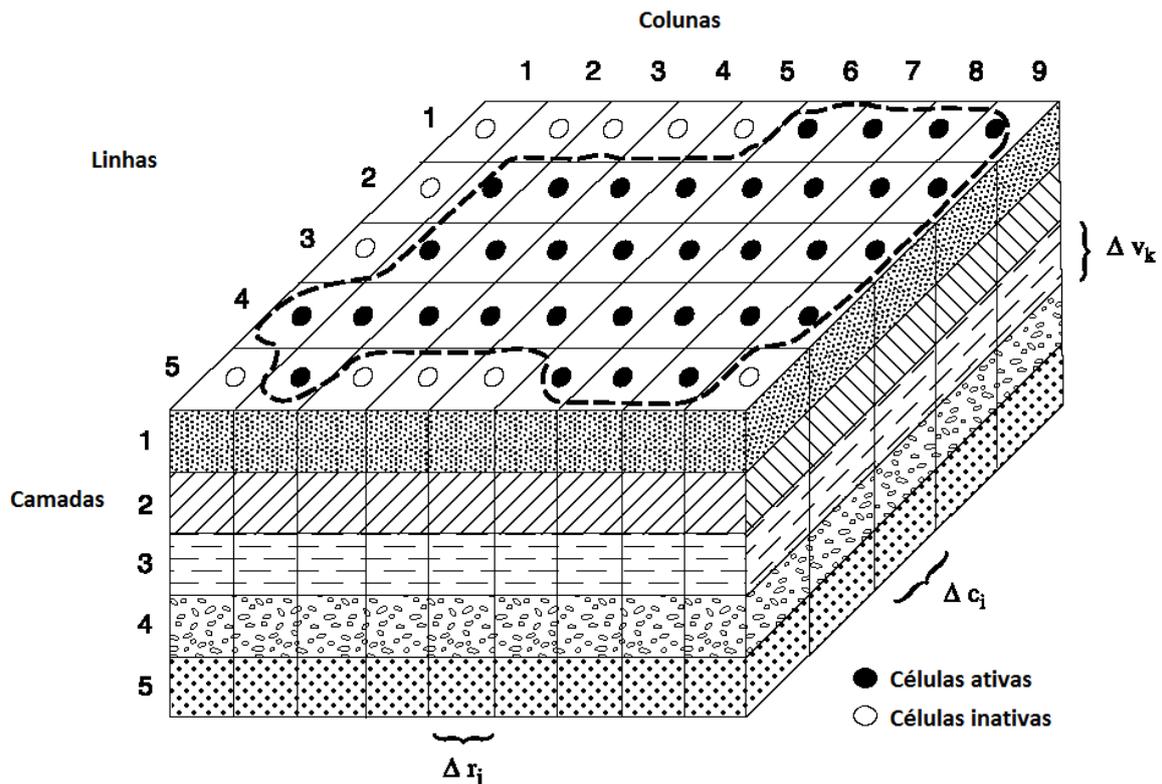


Figura 3: Aquífero hipotético simplificado. (Fonte: modificado de McDonald e Harbaugh (1988)).

Como mostra a figura (3), devido as dimensões do aquífero não serem exatamente do tamanho da soma dos blocos ou células, a discretização do aquífero acompanha a presença de células ativas, nas quais são resolvidas as equações de diferenças e células inativas, nas quais não são escritas equações de diferenças.

McDonald e Harbaugh (1988) mostram um esquema de como é realizada a solução numérica para cada célula (i, j, k). A equação apresentada a seguir, de McDonald e Harbaugh (1988), representa que a entrada e saída de todos os fluxos em uma célula (i, j, k) qualquer deve ser igual à variação na taxa de armazenamento dentro da mesma célula e equivale a eq. (6) discretizada:

$$\begin{aligned}
& Cx_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + Cx_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\
& + Cy_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + Cy_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
& + Cz_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + Cz_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
& + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,k}\Delta x_j\Delta y_i\Delta h_{i,j,k}/\Delta t
\end{aligned} \tag{9}$$

Onde C_x , C_y e C_z representam as condutâncias nas direções x , y e z , respectivamente, e os termos $P_{i,j,k}$, $h_{i,j,k}$ e $Q_{i,j,k}$ representam fluxos provenientes de processos externos ao aquífero, como recarga, evapotranspiração, interação com rios e lagoas, entre outros. Detalhes de como são obtidas as condutâncias, e a relação entre a célula (i, j, k) com as células adjacentes podem ser encontrados em McDonald e Harbaugh (1988). As condutâncias são a combinação de parâmetros da *Equação de Darcy*, a saber:

$$Q = \frac{KA(h_1-h_2)}{L}$$

Aonde a condutância C , é igual a:

$$C = \frac{KA}{L}$$

A equação (9) é válida, assim como a eq. (6), para fluxo transiente em meios porosos saturados. Para fluxo permanente, onde não há variação no armazenamento ao longo do tempo, a discretização da eq. (7), pode ser realizada através da retirada dos termos a direita da igualdade na eq. (9), que representam a variação no armazenamento, como é apresentada em McDonald e Harbaugh (1988):

$$\begin{aligned}
& Cx_{i,j-1/2,k}(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + Cx_{i,j+1/2,k}(h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\
& + Cy_{i-1/2,j,k}(h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + Cy_{i+1/2,j,k}(h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\
& + Cz_{i,j,k-1/2}(h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + Cz_{i,j,k+1/2}(h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\
& + P_{i,j,k}h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = 0
\end{aligned} \tag{10}$$

2.5 Modelos de transporte em meio poroso saturado

2.5.1 Contextualização histórica e formulação matemática do transporte em meio poroso saturado

O problema de transporte de contaminantes já foi exaustivamente discutido em diversas referências, podendo citar como livros clássicos do assunto Fetter (1999) e Charbeneau (2000); Marsily (1986), Zheng (1990), Bear e Verruijt (1987), Grove e Stollenwerk (1984), Kinzelbach (1986), Remson et al (1971); e Zheng e Bennett (2002).

O processo de transporte de contaminantes no solo não se dá apenas pelo movimento do fluxo do fluido no qual o soluto está dissolvido, mas também aos mecanismos físicos, químicos e biológicos pelos quais o contaminante está submetido. Slichter (1899) foi o primeiro a descrever que o emprego de uma velocidade média de acordo com a velocidade de fluxo, também chamado de processo de advecção, não permite descrever completamente o transporte de solutos. Na década de 30, a teoria de fluxo através de meios porosos foi amplamente desenvolvida na engenharia de petróleo (Muskat, 1937). Na década de 50, o interesse em meios porosos pela indústria química levou ao desenvolvimento de teorias estatísticas e da dispersão hidrodinâmica semelhantes à teoria da difusão (Scheidegger, 1954; Josselin De Jong, 1958; Saffman, 1959). Na década de 60, Bear (1961) trouxe grandes avanços à teoria de advecção-dispersão. O assunto foi cada vez mais estudado, podendo citar ainda Bear (1972) e Freeze e Cherry (1979), além das bibliografias já citadas. Spitz e Moreno (1996) discutem aspectos práticos sobre a modelagem de fluxo e transporte em meios porosos saturados e apresenta um sumário dos modelos computacionais mais utilizados.

Diversas equações para os fenômenos de transporte são descritas na bibliografia. Uma das mais apresentadas é a equação da advecção-dispersão bi-dimensional, como em Anderson e Woessner (1992):

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = + \frac{\partial}{\partial x_i} (D_{i,j} \frac{\partial c}{\partial x_j}) - \frac{\partial}{\partial x_i} (c v_i) - \lambda c R_d + \frac{C' w^*}{n_e} \quad (11)$$

onde: C = concentração do contaminante dissolvido na água subterrânea [ML⁻³];

x_i = distância ao longo do eixo coordenado x_i [L];

$D_{i,j}$ = coeficiente de dispersão hidrodinâmica [L^2T^{-1}];

v_i = velocidade média na direção do eixo coordenado x_i [LT^{-1}];

C' = concentração de contaminante dissolvido em fonte/sumidouro externos [ML^{-3}];

w^* = fluxo volumétrico de fonte/sumidouro externos por unidade de volume do aquífero [T^{-1}];

n_e = porosidade efetiva [-];

R_d = Fator de retardo [-];

λ = taxa constante de reação para reações químicas de primeira ordem [T].

Hipóteses sobre a construção da equação podem ser encontradas nos textos referência apresentados no início do capítulo. É importante salientar que o processo de transporte de contaminantes em meios porosos é um sistema multi-fásico e a concentração do contaminante varia para cada fase. Relações entre as concentrações de contaminante em cada fase e discussão do problema de partição de um contaminante entre as fases sólida, aquosa e gasosa podem ser encontrados em Marsily (1986), Spitz e Moreno (1996) e Chabernau (2000).

Na equação (11), o termo a esquerda da igualdade representa a variação na concentração de determinado contaminante ao longo do tempo. Os primeiros dois termos do lado direito da igualdade, representam, respectivamente, os processos de dispersão e advecção para a variação do contaminante ao longo do tempo. O terceiro termo representa as reações químicas que podem transformar o contaminante, e finalmente, o quarto termo representa a contribuição de processos externos ao aquífero.

O código para resolução de um modelo de transporte de solutos consiste em duas etapas: a primeira consiste na resolução da equação do fluxo para encontrar a distribuição da carga hidráulica (h), pela qual a velocidade média (v) é calculada em função da porosidade específica do solo (n_e) e substituída na equação de transporte, gerando uma solução do tipo $C = f(x, y, z, t)$.

2.5.2 Solução numérica do problema de transporte em meio poroso saturado

Diversos métodos numéricos foram desenvolvidos para a resolução da equação de dispersão-advecção. Estes métodos podem ser classificados em Eulerianos, Lagrangianos ou mistos.

Modelos Eulerianos descrevem a variação local da concentração em um sistema de coordenadas fixo. Segundo Neuman (1984) esta categoria de métodos é mais simples por utilizar um sistema de coordenadas fixo, contudo são inadequados para tratar de problemas envolvendo frentes abruptas de contaminação.

Os métodos Lagrangeanos descrevem a trajetória individual de partículas em um sistema de coordenadas que segue o movimento das partículas. Estes métodos são capazes de representar frentes abruptas de contaminação, porém apresentam dificuldades para resolver problemas envolvendo meio heterogêneo com múltiplas fontes e condições de contorno complexas.

Os métodos mistos Eulerianos-Lagrangeanos, segundo Neuman (1984), tentam eliminar as desvantagens dos métodos Eulerianos e dos métodos Lagrangeanos, procurando combinar a simplicidade de um sistema de coordenadas fixo no tempo com o poder computacional da abordagem Lagrangeana.

Os modelos computacionais mais utilizados para a resolução numérica das equações de transporte são o *MT3D* (Zheng, 1990) ou *MODPATH* (Pollock, 1988, 1989). O *MT3D* é um modelo computacional de transporte tridimensional que simula processos de dispersão, advecção e reações químicas em meios porosos sob regime transiente e utiliza um modelo misto Euleriano-Lagrangeano. O *MODPATH* é um modelo computacional que simula apenas processos de advecção e utiliza o método das características (MOC), desenvolvido para resolver problemas de transporte afetados somente pela advecção.

O recente interesse da agência americana (USEPA, 1987) em definir zonas de contribuição em torno de poços de bombeamento motivou o desenvolvimento de programas advectivos de rastreamento de partículas visando, especificamente, sua aplicação em projetos de delimitação de áreas de proteção de poços (Blandford e Huyarkon, 1990). Os códigos computacionais de simulação das trajetórias de partículas em meios porosos são, em sua maioria, pós processadores de modelos de fluxo, uma vez que os mesmos têm, como dados de entrada, a distribuição de carga hidráulica computada pelo modelo de fluxo. Os códigos numéricos de rastreamento de partículas utilizam da

distribuição de velocidades gerada pelo modelo numérico de fluxo, mas, no entanto, utilizam métodos de interpolação, visto que as partículas movem-se em um domínio espacial contínuo, enquanto as velocidades calculadas pelo modelo de fluxo existem em pontos discretos (nós da grade).

O *MODPATH* é um programa de rastreamento de partículas desenvolvido com o objetivo de ser utilizado para computar fluxos tridimensionais utilizando os dados de saída das simulações de fluxo de água subterrânea realizadas pelo *MODFLOW*. O *MODPATH* calcula a trajetória de partículas e as apresenta em uma interface gráfica. O *MODPATH* baseia-se na velocidade da trajetória da partícula, dada pela relação $v = Q/n_e$, onde v = velocidade de fluxo, Q = vazão perpendicular de uma seção transversal e n_e é a porosidade efetiva do meio poroso. O *MODPATH* utiliza os valores de carga hidráulica simulados nos modelos de fluxo para através da relação entre vazão (Q) e carga hidráulica (h), simular a velocidade das partículas, sendo desconsiderados os processos de dispersão, reações químicas e levando em consideração somente a parcela relacionada à advecção da eq. (11), desta maneira a eq. (7) pode ser reescrita:

$$\frac{\partial (nv_x)}{\partial x} + \frac{\partial (nv_y)}{\partial y} + \frac{\partial (nv_z)}{\partial z} = R \quad (12)$$

Onde V_x , V_y e V_z , são os componentes de velocidade linear em cada uma das direções, n é a porosidade e R representa a entrada ou saída de água referente a processos externos. A solução desta equação, no caso de regime permanente é do tipo $v = f(x,y,z)$, descrevendo a velocidade das partículas em cada uma das direções.

Mais detalhes sobre o método das características (MOC) e utilização do *MODPATH* podem ser encontrados em Anderson e Woessner (1992) e Pollock (1994).

2.5.3 Avaliação da migração de contaminante em água subterrânea

Gomes (2008) descreve os diferentes tipos de abordagens em relação ao risco causado pela contaminação de água subterrânea. A abordagem desta pesquisa refere-se à avaliação da migração do contaminante, que se caracteriza pela probabilidade de captura de uma partícula ao longo do domínio do estudo para os poços simulados de extração de água na região do “Bairro do Registro”, em Santana do Livramento.

A avaliação de migração de contaminantes é um problema mais estudado que a avaliação de risco a saúde humana ou meio ambiente, por exemplo, visto que se baseia fundamentalmente no problema de transporte de contaminantes, que já foi largamente estudado por diversos autores, podendo-se citar Massmann e Freeze (1987a), Massmann e Freeze (1987b) como trabalho específico sobre a migração de contaminantes em águas subterrâneas.

Outro fator importante na escolha da abordagem de avaliação de migração do contaminante é que o transporte de contaminantes e a determinação de suas concentrações é um processo necessário tanto na avaliação de migração do contaminante como na avaliação de risco à saúde humana ou meio ambiente. Assim, entende-se a avaliação de risco à saúde humana ou meio ambiente como um passo posterior a avaliação de migração de contaminantes, ainda em estudo evolutivo, e que não será abordada neste trabalho.

Considerando apenas a migração do contaminante, Massmann e Freeze (1987a), Massmann e Freeze (1987b) adotam modelos de decisão baseados em uma análise de custo-benefício, onde o risco é definido como a probabilidade de um evento de contaminação exceder aos limites impostos pela legislação, atualmente estes valores são obtidos através da Resolução Conama 396, de 03 de abril de 2008.

O conceito de risco pode ser definido, segundo Guimarães (2003), como a quantificação de um perigo, sendo esta a probabilidade de dano (pessoal, ambiental ou material), doença ou morte sob circunstâncias específicas. Pode ser transformado em um índice com valor de 0 (zero) a 1 (um). No entanto, não deve ser confundido com o termo de avaliação de risco. Embora este conceito de risco seja utilizado em geral, nas técnicas de avaliação do risco (à saúde humana, meio ambiente) outros fatores e diferentes metodologias que não serão abordados neste trabalho são consideradas. Para esta pesquisa, o risco é definido como a probabilidade de um evento de contaminação (partícula) ser capturada por um dos poços simulados de extração na região do Registro,

em Santana do Livramento (RS), assim como em Massmann e Freeze (1987a), Massmann e Freeze (1987b).

2.6 Campos aleatórios de condutividade hidráulica

2.6.1 Funções aleatórias

Uma variável aleatória é uma variável em que seus valores são gerados aleatoriamente de acordo com algum mecanismo probabilístico (Isaaks e Srivastava., 1989). Se a lei do mecanismo probabilístico ou simplesmente distribuição de probabilidades é conhecida, podem-se calcular parâmetros que descrevem o comportamento desta variável aleatória. O “conhecimento” da distribuição de probabilidades se dá através dos valores observados, portanto, quanto maior a quantidade de valores observados, mais próxima da distribuição real da variável estará à distribuição de probabilidades dos dados amostrais. Estes valores observados podem ser apresentados em forma de histograma, gerando uma função distribuição de probabilidade (FDP) ou histograma acumulado, gerando uma função de distribuição cumulativa, ou (FDC).

Contudo, Isaaks e Srivastava (1989) faz duas observações a respeito dos parâmetros das variáveis aleatórias: primeiro, uma distribuição completa de valores não pode ser determinada com o conhecimento de apenas alguns parâmetros; e segundo, os parâmetros não podem ser calculados apenas através dos dados observados.

Estas afirmações nos trazem algumas informações: um conjunto de parâmetros não define uma distribuição de probabilidade. Duas distribuições podem ter a mesma média e variância e serem bastante diferentes em outros aspectos. No entanto, algumas distribuições podem ser completamente descritas através de alguns parâmetros, como é o caso da distribuição normal (gaussiana) e da distribuição uniforme. Segundo, os parâmetros não podem ser calculados exatamente através de dados observados, mas ao invés disso são parâmetros de um modelo conceitual, que tenta representar a real distribuição de probabilidades. Como consequência, uma quantidade de dados observados pode fornecer determinados valores para os parâmetros da distribuição de uma variável aleatória e outro grupo de dados observados de uma mesma variável fornecerá valores diferentes do primeiro.

Os principais parâmetros de uma variável aleatória são:

- Valor esperado (média):

$$E\{V\} = m = \sum_{i=1}^n p_i \cdot v(i) \quad (13)$$

onde: n = número de ocorrências da variável aleatória;

v (i) = valor observado da variável aleatória;

p_i = probabilidade de ocorrência do valor observado v(i).

- Variância:

$$\text{Var}\{V\} = E\{[V - E\{V\}]^2\} \quad (14)$$

Variáveis aleatórias também podem ocorrer conjuntamente de acordo com um mecanismo probabilístico. Um dos principais parâmetros de variáveis aleatórias conjuntas é a covariância, definida por:

$$\text{Cov}\{UV\} = E\{(U - E\{U\})(V - E\{V\})\} \quad (15)$$

Onde: Cov{UV} é a covariância entre as variáveis aleatórias U e V.

Chilès e Delfiner, (1999) definem uma função aleatória da seguinte maneira: dados um domínio $D \hat{=} \hat{A}n$, com volume positivo, e um espaço de probabilidades (W, A, P), uma função aleatória é uma função de duas variáveis $Z(\mathbf{x}, u)$, tal que, para cada $\mathbf{x} \hat{=} D$, a seção $Z(\mathbf{x}, \bullet)$ é uma variável aleatória em (W, A, P). Além disso, cada função $Z(\bullet, u)$, definida em D como seção da função aleatória em $u \hat{=} W$, é uma realização da função aleatória $Z(\mathbf{x}, u)$. Na literatura técnica, uma função aleatória é chamada de *processo estocástico* quando \mathbf{x} varia em um espaço unidimensional e de *campo aleatório* quando \mathbf{x} varia em um espaço com mais de uma dimensão (Chilès e Delfiner, 1999).

A variável aleatória $Z(\mathbf{x}, \bullet)$ representa, então, o conjunto das realizações da função aleatória $Z(\mathbf{x}, u)$ em um determinado ponto do domínio D e a função aleatória $Z(\bullet, u)$ representa uma realização da função aleatória $Z(\mathbf{x}, u)$ sobre todo o domínio D .

Um importante conceito em funções aleatórias para dados espacializados é o conceito de estacionaridade: para uma função aleatória $V\{\mathbf{x}\}$ a lei de probabilidade não

depende da posição x , e similarmente para duas variáveis, $V\{x\}$ e $V\{x + h\}$ não dependem da posição x , mas apenas do vetor de separação h (Isaaks e Srivastava, 1989). Embora existam técnicas geoestatísticas para funções aleatórias não estacionárias, a grande parte das funções aleatórias utilizadas é estacionária. Devido ao comportamento espacial das variáveis hidrogeológicas é importante o emprego de técnicas de geoestatística para a descrição da variabilidade espacial e a geração de campos aleatórios de condutividade hidráulica. Neste trabalho, a condutividade hidráulica será considerada homogênea, visto que a determinação do valor de todos estes parâmetros ao longo de toda a área de estudo é impossível com apenas alguns dados amostrais. No entanto, a identificação dos parâmetros mais sensíveis ao resultado e o conhecimento da incerteza relacionada a estes parâmetros, permitem estimar os valores dos modelos levando em consideração a incerteza nos resultados, através da utilização de um processo estocástico.

Faz-se a ressalva da importância, também, da distribuição espacial da porosidade efetiva nas simulações de trajetórias de partículas através do *MODPATH*.

2.7 Simulação estocástica

Uma simulação estocástica condicionada combina os dados nas posições observadas, os dados já simulados e a informação do variograma (no caso de simulação de dados espacializados) para computar novas realizações para localizações ainda não consideradas. O conjunto de valores realizados, em uma determinada posição possibilita a inferência de estatísticas e incertezas locais a respeito do atributo. O conjunto de campos obtidos pela simulação permite a inferência de estatísticas e incertezas globais a respeito do atributo (Felgueiras, 1999).

Gutjahr e Brás (1993) apresentam uma breve revisão sobre as abordagens geoestatísticas usadas pelos modelos estocásticos de variação espacial aplicados a problemas de fluxo e transporte nos meios porosos saturados e não saturados.

Wen e Kung (1993) classificam os métodos de geração de campos aleatórios de condutividade hidráulica espacialmente correlacionados de acordo com dois tipos genéricos de abordagens geoestatísticas: métodos paramétricos (multigaussianos) e não paramétricos (não multigaussianos). São citados como exemplos de métodos paramétricos: método espectral, método da matriz de covariância, método do vizinho mais próximo, método das bandas rotativas e, o mais recente, método de simulação

gaussiana seqüencial (SGS). Como exemplo de método não paramétrico, Wen e Kung (1993) citam o método de simulação de indicadores seqüencial (SIS).

A diferença básica entre os dois tipos de abordagem refere-se ao fato de que a abordagem paramétrica (multigaussiana) procura reproduzir a média e a variância da distribuição teórica usada para representar a variabilidade espacial de um determinado atributo do solo. Já a abordagem não paramétrica (não multigaussiana) procura reproduzir indicadores, aqui entendidos simplesmente como percentis da distribuição teórica usada na representação de um determinado atributo do solo.

Vários estudos procuram comparar o desempenho das técnicas paramétricas e não paramétricas na representação da variabilidade espacial da condutividade hidráulica, citando se os trabalhos de Wen e Kung (1993), Gómez-Hernández e Wen (1998), Wen e Gómez- Hernández (1998) e Zinn e Harvey (2003).

Zinn e Harvey (2003) destacam que, em campos de condutividade hidráulica gerados por técnicas multigaussianas, os valores de condutividade próximos à média tendem a formar grandes estruturas, enquanto que os valores extremos tendem a se agrupar em regiões isoladas, não formando canais ou estruturas que se estendam sobre todo o comprimento do campo. A conectividade pode ser uma característica fundamental em muitos campos de condutividade hidráulica e, portanto, um controle importante, se não dominante, no transporte de solutos (Zinn e Harvey, 2003).

Deutsch e Journel (1998) diferenciam os algoritmos de interpolação, incluindo a krigagem, da simulação estocástica em dois principais aspectos:

- Os algoritmos de interpolação têm como objetivo prover o melhor, porém único, resultado de uma estimativa local sem se preocupar com a estatística espacial das estimativas simultaneamente. A simulação estocástica reproduz as tendências e as estatísticas globais (histograma, covariância) em favor da acuracidade na estimativa local;
- Krigagem promove uma incompleta medida da acuracidade local, e nenhuma informação de acuracidade conjunta quando várias localidades estão sendo consideradas simultaneamente. Simulação estocástica é feita especificamente para promover estas medidas de acuracidade, tanto local, quanto com várias localidades envolvidas. Essas medidas são feitas através da diferença entre os L valores simulados em uma localidade (acuracidade local) ou os L campos simulados (acuracidade global ou conjunta).

Entende-se por simulação estocástica o processo de realização de modelos alternativos equiprováveis da distribuição espacial de uma determinada variável $V\{x\}$.

A simulação estocástica difere, portanto, do processo de estimativa por obter diversos resultados (equiprováveis) das simulações, ao invés de um único resultado. Assim, torna-se possível que o planejador, por exemplo, tome sua decisão baseado não em um evento isolado, mas na análise probabilística do fenômeno estudado (Fonseca, 2004). A característica principal da simulação é a capacidade de reproduzir a variação dos dados de entrada, tanto no sentido univariado (via histograma) quanto espacialmente (através do variograma ou outro modelo de covariância) (Vann et al.; 2002). Neste trabalho, como já foi dito anteriormente, as simulações reproduzirão o histograma dos dados de condutividade hidráulica apenas.

Uma simulação é dita condicional (ou condicionada) se as realizações resultantes representarem valores observados em diferentes localizações, (Deutsch e Journel, 1998).

Nos itens seguintes, como os variogramas podem ser uma ferramenta utilizada na simulação estocástica de dados espacializados, através da utilização do método SGS, lembrando que, pela ausência de dados suficientes, será utilizada apenas a metodologia de Monte Carlo (MC). Em uma análise completa de incertezas, a função variograma (ou correlograma, por exemplo) é utilizada juntamente da função distribuição de probabilidade (FDP) do parâmetro que deseja ter sua incerteza medida, gerando metodologias que unificam conhecimentos de geoestatística e o método de Monte Carlo (MC). Um exemplo disso é o método de Simulação Gaussiana Sequencial (SGS).

2.7.1 Método de Monte Carlo (MC)

O método de Monte Carlo (MC) pode ser definido como um método computacional utilizado para gerar distribuições de probabilidades de uma variável dependente de outras variáveis que também são representadas como distribuições de probabilidades (Poulter, 1998). Este método foi utilizado neste trabalho para a geração das simulações estocásticas.

A simulação de Monte Carlo aplicada à modelagem de fluxo consiste na repetição das simulações em que a variável de entrada (independente) é uma variável aleatória (VA). O método exige que os valores de entrada sejam obtidos a partir de uma função que descreva o comportamento probabilístico da (VA) no espaço. Assumindo-se como conhecidas as funções de densidade de probabilidade (FDP) e distribuição

cumulativa (FDC) da variável que representa a propriedade do aquífero, obtêm-se amostras aleatórias a partir da FDC, que são usadas, então, como variáveis de entrada nas simulações. O modelo de fluxo é repetidamente utilizado, usando-se, a cada vez, um conjunto diferente de valores da variável independente (realização da VA). O resultado é um intervalo com valores da variável de saída obtido em cada ponto que pode ser representado através de uma função distribuição de probabilidade (Loomis et al., 1987). Este processo estocástico diferencia-se da metodologia de “análise de sensibilidade”, em que se estuda o comportamento de determinada variável em função da variação no valor de determinados parâmetros, visto que as simulações geradas procuram reproduzir, no caso de um processo estocástico, o histograma dos valores da variável encontrados em campo.

Consta ainda em Marquezan (2008), uma bibliografia de aplicações de simulações em águas subterrâneas e a abordagem da simulação MC na modelagem de fluxo (e do transporte) aplicada para incorporar os parâmetros hidrológicos do modelo. Ressalva-se, ainda, que esta abordagem exige um grande esforço computacional na geração das simulações, sendo seu esforço dependente do número de parâmetros que se pretende medir a incerteza no modelo e o nível de confiança desejado para a estatística destes parâmetros.

Segundo Mello (2010), o princípio do método consiste em amostrar aleatoriamente valores das distribuições dos parâmetros de interesse e aplicá-los no modelo que se deseja propagar as incertezas. Isto é feito centenas de vezes (ou quantas vezes forem necessárias), selecionando centenas de combinações possíveis igualmente prováveis dos parâmetros, apresentando a saída do modelo sob a forma de distribuição probabilística com tantos valores quanto for o número de realizações realizadas.

Mello (2010) descreve a relação entre o método de Monte Carlo (incorporação das incertezas) e a incorporação da heterogeneidade, da seguinte maneira: “Na sua forma mais simples, o método de Monte Carlo necessita apenas de informações sobre a natureza das distribuições dos parâmetros de interesse e seus atributos característicos (média, desvio-padrão, moda, máximo, mínimo, etc.), resultando numa análise pontual das incertezas. No entanto, também é possível realizar a mesma análise, porém incorporando aspectos como a heterogeneidade espacial de algum parâmetro ou sua variabilidade temporal, o que exige um aparato muito maior de informações adicionais”. Neste trecho, Mello (2010), refere-se aos métodos geoestatísticos, a medida de variogramas e métodos como o SGS, já explicados anteriormente.

A técnica de Monte Carlo é freqüentemente usada para simular numericamente o fluxo e transporte de massa em meio poroso quando a condutividade hidráulica é descrita como um campo aleatório (Zhang e Pinder, 2003).

O uso do método de Monte Carlo em problemas de fluxo em meio poroso envolvendo a representação espacial e as incertezas associadas à condutividade hidráulica consistem basicamente de três passos (Revelli e Ridolfi, 2000):

- Geração de N realizações do meio poroso heterogêneo, tomadas aleatoriamente da mesma população da variável aleatória espacial $K = K(\mathbf{x})$;
- Solução determinística do problema de fluxo para cada uma das N realizações;
- Após a obtenção das N soluções do problema de fluxo, análise das principais características estatísticas relativas às distribuições espaciais das cargas hidráulicas e do fluxo.

Deste modo, a técnica de Monte Carlo pode ser utilizada em conjunto com um método de geração de campos aleatórios, como o SGS, por exemplo.

Discussões específicas sobre técnicas de amostragem envolvendo o método Monte Carlo e aplicações em fluxo e transporte sobre escoamento em meios porosos podem ser encontradas em Kupfersberger e Deutsch (1999) e em Pebesma e Heuvelink (1999).

Devido à falta de dados suficientes de condutividade hidráulica, situação na qual sua variabilidade pudesse ser estimada de forma satisfatória (representando sua heterogeneidade), este trabalho se limitará a geração de campos aleatórios de condutividade hidráulica utilizando somente a técnica de Monte Carlo, não utilizando de ferramentas geoestatísticas e SGS (Simulação Gaussiana Seqüencial). Portanto, o meio físico será considerado homogêneo e simulará com um valor diferente de K para cada realização em toda sua extensão, não dependendo da posição espacial no modelo.

2.8 Modelo estocástico de trajetória advectiva de partículas

Da mesma maneira que o modo estocástico do *MODFLOW* gera uma distribuição de probabilidades para as distribuições de carga hidráulica em cada nó de *grid* no domínio do modelo, o modo estocástico do *MODPATH* calcula, para cada uma das saídas do modo estocástico do *MODFLOW* uma trajetória de partículas, gerando assim uma distribuição de probabilidades de partículas. Neste trabalho, este modelo foi utilizado para representar a probabilidade de captura de partículas dos poços de bombeamento instalados na região do Cerro do Registro, em Santana do Livramento – Rio Grande do Sul. Destaca-se na utilização nesta metodologia Marquezan (2008), que utilizou a probabilidade de captura de partículas como ferramenta no traçado de oleodutos.

2.9 Perímetro de proteção de poços

O perímetro de proteção de poços (PPP) pode ser considerado como “a área de superfície e subsuperfície circundando um poço, nascentes ou campo de poços, que abastecem um sistema público, na qual existe uma grande probabilidade de contaminantes presentes se movimentarem e atingirem os mesmos”.

Os PPP's dependem de cada sistema aquífero e suas condições hidrogeológicas.

Em âmbito nacional, a portaria DNPM nº 231 de 31 de julho de 1998, conceitua 3 (três) zonas para proteção de poços para águas minerais:

ZI – Zona de influência – Área do cone de depressão do poço (rebaixamento da superfície potenciométrica).

ZC – Zona de contribuição – Área de recarga associada ao ponto de captação de água, delimitada pelas linhas de fluxo que convergem a este ponto.

ZT – Zona de transporte – Zona entre a área de recarga e o ponto de captação.

No Rio Grande do Sul, o decreto 42.047 de 2002 instituiu como 10m o perímetro imediato de proteção sanitária, sendo este raio cercado e protegido, resguardando a entrada ou infiltração de poluentes. Além deste perímetro a legislação prevê a implantação de um segundo perímetro baseado na zona de contribuição (ZC), aonde é vedada a implantação de atividades potencialmente poluidoras.

A Companhia ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), através do Decreto Estadual 32.955 de 07/02/1991, classificam as áreas de proteção como:

I - Área de Proteção Máxima: compreendendo, no todo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público;

II - Área de Restrição e Controle: caracterizada pela necessidade de disciplina das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras; e

III - Área de Proteção de Poços e Outras Captações: incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.

O "*Wellhead Protection Advisory Committee*" do estado de Wyoming (EUA) divide os PPP's em três zonas:

A zona 1 (um) é a área mais crítica e que tem a função de proteger o poço ou nascente no seu entorno próximo. Qualquer contaminação causará o imediato desligamento do poço ou nascente do sistema de captação, portanto, sendo necessário um intenso monitoramento. Esta zona se estende ao redor do poço de bombeamento ou nascente sendo o raio de aproximadamente trinta metros ($Z1=A1$ (área ao redor do poço ou nascente)).

A zona 2 (dois) foi estabelecida para proteger o poço do contato com microorganismos patogênicos (bactérias e vírus) que possam estar vindo, por exemplo, de uma fossa séptica localizada nas suas proximidades, como também prover tempo para uma ação emergencial, no caso de uma contaminação nesta zona. Esta zona considera um tempo de percurso de partículas de em média dois anos, tempo para que as mesmas, quando lançadas no perímetro desta zona, atinjam o poço de bombeamento ($Z2=A2-A1$).

A zona 3 (três) é definida como a zona de ações de remediação e possui a finalidade de proteger o poço de contaminantes que possam migrar para o mesmo num período mais largo de tempo. Esta zona normalmente inclui uma grande parte da zona de recarga do aquífero e é extensa o suficiente para que haja tempo para uma ação de remediação e o desenvolvimento de uma nova fonte de abastecimento. Esta zona considera um tempo de percurso de partículas de em média cinco anos, tempo para que as mesmas, quando lançadas no perímetro desta zona, atinjam o poço de bombeamento ($Z3=A3-A2-A1$).

As técnicas mais utilizadas para a delimitação de perímetros de proteção, da mais simples até a mais sofisticada são:

1. Raio fixo arbitrário;
2. Raio fixo calculado;
3. Formas variáveis simples;
4. Modelos analíticos;
5. Modelos numéricos de fluxo e transporte.

2.10 Introdução à legislação e gestão de recursos hídricos

O uso racional da água é cada vez mais necessário. A escassez dos recursos hídricos e o caráter econômico da água fazem do desperdício e da contaminação os grandes vilões destes recursos.

Para Campos (2000), o estabelecimento de uma política de recursos hídricos visa proporcionar meios para que a água, recurso essencial ao desenvolvimento social e econômico, seja usada de forma racional e justa pelo conjunto da sociedade.

Utilização justa é aquela em que as necessidades vitais têm atendimento prioritário sobre as demais demandas. A utilização racional, por sua vez, é aquela realizada sem desperdícios e atendendo aos modernos conceitos de gestão.

Campos (2000) ainda acentua que uma política de recursos hídricos, como a de qualquer outro bem, é formada por objetivos a serem alcançados, fundamentos ou princípios sobre os quais devem ser erguidos, instrumentos ou mecanismos para a implementação, uma lei ou norma jurídica para lhe dar sustentação e instituições para executá-la e fazer seu acompanhamento. Outra importante característica da gestão de recursos hídricos é que as políticas devem ser moldadas de acordo com o espaço geográfico, respeitando as peculiaridades locais.

Em síntese, pode-se afirmar que a gestão é um conjunto de atividades, ações e instrumentos que permitem organizar, regradar e controlar as disponibilidades e os diversos usos da água no que se refere à quantidade e à qualidade a fim de garantir as condições mínimas de satisfação da sociedade.

Estima-se que atualmente 1,6 bilhão de pessoas vive em áreas com escassez de água no mundo e que em aproximadamente 20 anos cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas com moderada ou séria falta de água. Analisando o problema do ponto de vista global, observa-se que existe quantidade suficiente de água para o atendimento de toda a população. No entanto, a distribuição não uniforme dos recursos hídricos e da população sobre o planeta acaba por gerar cenários adversos quanto à

disponibilidade hídrica em diferentes regiões. Segundo levantamento realizado pela ANA (Agência Nacional de Águas) em 2011, nos municípios brasileiros, mais da metade (55%) poderá ter problemas no abastecimento de água até 2015.

O problema de escassez hídrica decorre, fundamentalmente, da combinação entre o crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas. Este quadro é consequência dos desordenados processos de urbanização, industrialização e expansão agrícola (ANA, 2001).

Desde a década de 30 o Brasil dispõe do código das águas – Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934. Entretanto, este código não foi suficiente para resolver todos os conflitos existentes no uso da água no país. Para resolver este problema foram sancionadas a Lei nº 9.433, de 08 de Janeiro de 1997, que instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos e estabeleceu o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos, e a Lei nº 9.984, de 17 de Julho de 2000, que criou a Agência Nacional de Águas (ANA), entidade federal encarregada da implementação dessa Política e da coordenação desse Sistema.

Os fundamentos principais da Política Nacional dos Recursos Hídricos, instituídos pela Lei nº9.433 são:

- I – a água é um bem de domínio público;
- II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;
- III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- IV – a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- V – a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a implementação da Política Nacional dos Recursos Hídricos e a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos recursos Hídricos;
- VI – a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

Ainda segundo a lei nº 9.433/1997, Art. 30, cabe aos Poderes Executivos **Estaduais** e do Distrito Federal:

- outorgar os direitos de uso de recursos hídricos e regulamentar e fiscalizar os seus usos;
- realizar o controle técnico das obras de oferta hídrica;
- implantar e gerir o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, em âmbito estadual e do Distrito Federal.
- promover a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental.

Integram o Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (Art.33):

- o Conselho Nacional de Recursos Hídricos;
- os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal;
- os Comitês de Bacia Hidrográfica;
- os órgãos dos poderes públicos federal, estaduais e municipais cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos;
- as Agências de Água.

Na Constituição Federal de 1988, as águas passaram a ser de domínio da União (corpos de água que atravessam mais de um estado e/ou país) e dos Estados. Esta norma legal estabelece, ainda, que as águas subterrâneas são de domínio estadual. No Brasil, a tutela das águas subterrâneas é extremamente frágil, do ponto de vista legal. A legislação federal carece de normas específicas sobre águas subterrâneas e, nos Estados, são poucos os que editaram leis nesse sentido.

No Rio Grande do Sul foi instituído, através da Lei nº 10.350 de 1994, o Sistema Estadual de Recursos Hídricos. O Sistema Estadual de Recursos Hídricos - SERH é integrado pelo Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul (CRH-RS), pelo Departamento de Recursos Hídricos (DRH-SEMA), pelos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica, pelas Agências de Região Hidrográfica, e pelo órgão ambiental estadual, a FEPAM, conforme o Artigo 5º da Lei Nº 10.350/94.

O Conselho de Recursos Hídricos do Rio Grande do Sul – CRH-RS é instância deliberativa superior do SERH e basicamente compete ao CRH-RS propor alterações ou opinar sobre propostas de alterações na Política Estadual de Recursos Hídricos, apreciar o anteprojeto de lei do Plano Estadual de Recursos Hídricos, aprovar os relatórios anuais sobre a situação dos recursos hídricos, aprovar critérios de outorga do uso da água, aprovar os regimentos dos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica, decidir os conflitos de uso de água em última instância, entre outras.

O Departamento de Recursos Hídricos – DRH, atualmente está vinculado à estrutura institucional da Secretaria Estadual de Meio Ambiente – SEMA, atua como órgão de integração do Sistema Estadual de Recursos Hídricos. Ao DRH compete, por força de lei, elaborar o anteprojeto de lei do Plano Estadual de Recursos Hídricos, coordenar e acompanhar a execução do Plano Estadual de Recursos Hídricos, propor ao CRH-RS critérios para a outorga de uso da água, regulamentar a operação e uso dos mecanismos de gestão dos recursos hídricos, elaborar o relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos no Estado e assistir tecnicamente o Conselho de Recursos Hídricos.

Os Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica consistem em órgãos descentralizados e de participação social no processo de planejamento e gestão dos recursos hídricos no Estado do Rio Grande do Sul e as atribuições dos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica consistem em: encaminhar ao DRH as propostas locais para o Plano Estadual de Recursos Hídricos, conhecer e manifestar-se sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos, aprovar o plano da respectiva bacia hidrográfica, apreciar o relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos, propor o enquadramento dos corpos de água da bacia hidrográfica, aprovar os valores a serem cobrados pelo uso da água, realizar o rateio dos custos de obras de interesse de uso comum, aprovar os programas anuais e plurianuais de investimentos e compatibilizar os interesses dos diferentes usuários da água, diminuindo, em primeira instância, os eventuais conflitos.

As Agências de Região Hidrográfica consistem na única parte integrante do Sistema Estadual de Recursos Hídricos ainda não instituídos. Às Agências cabe prestar apoio técnico ao Sistema Estadual de Recursos Hídricos, incluindo o assessoramento técnico aos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica, o fornecimento de subsídios aos Comitês, através de estudos técnicos, com vistas a possibilitar a definição dos valores de cobrança pelo uso da água e na proposição de enquadramento para os corpos de água, subsidiar o DRH na elaboração do relatório anual sobre a situação dos recursos hídricos e do Plano Estadual de Recursos Hídricos, manter e operar os equipamentos e mecanismos de gestão dos recursos hídricos e arrecadar e aplicar os recursos correspondentes à cobrança pelo uso da água.

A FEPAM é o órgão ambiental estadual que, segundo a legislação, tem atribuições no Sistema Estadual de Recursos Hídricos, tais como: a outorga de lançamento de efluentes e o monitoramento da qualidade da água.

Uma vez que os órgãos estaduais de recursos hídricos são responsáveis pela gestão das águas subterrâneas e, portanto, da outorga, apresentando leis diferenciadas e

que os limites dos aquíferos não coincidem, necessariamente, com os das bacias hidrográficas, nem com os limites administrativos, torna-se necessária a gestão conjunta e articulada entre estes, intermediada pela União.

Para promover esta articulação entre os estados foram atribuídas à SRH/MMA (atual SRU/MMA), pelo Decreto nº 5.776/06, diversas competências entre as quais se destacam: a proposição de políticas, planos, normas e a definição de estratégias de gestão de águas transfronteiriças; a promoção, em articulação com órgãos e entidades estaduais, federais e internacionais, de estudos técnicos relacionados aos recursos hídricos; a proposição de encaminhamento de soluções; a coordenação, em sua esfera de competência, da elaboração de planos, programas e projetos nacionais referentes às águas subterrâneas e o monitoramento do desenvolvimento de suas ações, dentro do princípio da gestão integrada de recursos hídricos (MMA, 2007).

Nas questões relativas às águas subterrâneas, o CNRH (principal instância do SINGREH) é assessorado pela Câmara Técnica de Águas Subterrâneas (CTAS), que possui entre suas atribuições: compatibilizar as legislações relativas à exploração e utilização destes recursos, propor mecanismos institucionais de integração das águas superficiais e subterrâneas, além de mecanismos de proteção e gerenciamento das águas subterrâneas (Resolução CNRH nº 09/00).

Existem outras regulamentações relacionadas às águas subterrâneas, como a relativa à fiscalização da qualidade para água potável, pela Agência Nacional Vigilância Sanitária (Anvisa) além do disciplinamento do uso das águas minerais, potáveis de mesa, balneárias e geotermiais que, segundo o Código de Águas Minerais (Decreto-Lei nº 7.841/45), são consideradas um bem mineral e cuja concessão é disciplinada pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

Mesmo com a legislação para *recursos hídricos em geral* de âmbito Federal e Estadual, as legislações são confusas e muitas vezes contraditórias no que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos e transfronteiriços, como explicita Caubet et al. (2007), sobre a denominação das águas subterrâneas ora como recurso hídrico e ora como recurso mineral.

2.11 Aquífero Guarani

No caso de um aquífero de grande extensão, interestadual e internacional, como o Guarani, não existe uma legislação específica que aborde o assunto, tanto do ponto de vista das águas subterrâneas interestaduais como dos recursos hídricos internacionais, e no caso do Aquífero Guarani, entre os países Argentina – Brasil – Paraguai – Uruguai. Não só as realidades destes países podem sofrer alterações em suas políticas internacionais ao longo dos anos, como suas próprias legislações internas nem sempre são claras, como já foi apresentado por Caubet et al., (2007) a respeito do Aquífero Guarani e da integração entre uma política conjunta entre os países: “ Não somente suas legislações internas são diferentes - ou até incompatíveis, se consideradas as modalidades de gestão, posse ou propriedade; participação dos grupos sociais e econômicos nas tomadas de decisão; e os objetivos oficiais das políticas públicas - como não há motivo de pensar que usariam as mesmas referências normativas de direito internacional”.

No intuito de resolver esta problemática, uma reunião realizada em Foz do Iguaçu, no Paraná, em janeiro de 2000, foi o marco inicial das discussões entre Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai em torno de um projeto comum de pesquisa, para avaliação de potencial e de exploração do Aquífero Guarani. O Banco Mundial (BIRD) aprovou a proposta que lhe foi submetida. O projeto, iniciado em março de 2003, teve fim em meados de 2009.

Este projeto foi financiado com recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF – Global Environment Facility) sendo o Banco Mundial a agência implementadora dos recursos e a Organização dos Estados Americanos (OEA), a agência executora internacional do Projeto. O PSAG (Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, como foi chamado) foi executado por meio da Secretaria Geral do Projeto, em estreita coordenação com as quatro agências executoras nacionais. No Brasil, o papel de Agência Executora Nacional do projeto foi desempenhado pela Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente (SRU / MMA). O projeto consolidou os conhecimentos técnicos sobre o aquífero e estabeleceu os conceitos básicos para estabelecimento de um marco de gestão conjunta entre os países de abrangência. Parte deste material está disponibilizado na biblioteca do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e no sítio da Agência Nacional das Águas (ANA).

Dependendo do problema específico no gerenciamento dos recursos hídricos, das variáveis decisórias, funções objetivo e restrições, os valores necessários para a solução do problema, que podem ser a distribuição espacial dos níveis de água, qualidade de água, subsidência, entre outros, tem como principal ferramenta utilizada para previsão destes valores para a tomada de decisão o modelo hidrogeológico.

Neste ponto inicia-se esta pesquisa, com o objetivo de incorporar as incertezas referentes ao modelo hidrogeológico proposto para uma das áreas piloto deste projeto (PSAG), na região de Santana do Livramento (Brasil) e Rivera (Uruguai), na tentativa de analisar os possíveis impactos causados pela não incorporação das incertezas em relação ao meio físico na execução dos modelos. Mais especificamente, este trabalho analisa o impacto das incertezas referentes ao parâmetro de condutividade hidráulica na construção do modelo e a hipótese de relocação de poços para outros locais da área de estudo e a delimitação de perímetros de proteção para estes poços utilizando uma ferramenta que incorpore a incerteza em relação ao meio físico aos resultados.

2.12 Hidrogeologia – SAG regional

O SAG é um dos maiores reservatórios de água doce do planeta, com uma capacidade de armazenamento estimada em 45.000km³ (Araújo et al., 1995), abrangendo países como o Brasil, a Argentina, o Paraguai e o Uruguai. A área total de ocorrência deste aquífero, que possui caráter transnacional, alcança 1.400.000 quilômetros quadrados, dos quais cerca de 1 milhão encontra-se em território Brasileiro, ocorrendo nos Estados de Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

MAPA ESQUEMÁTICO DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI

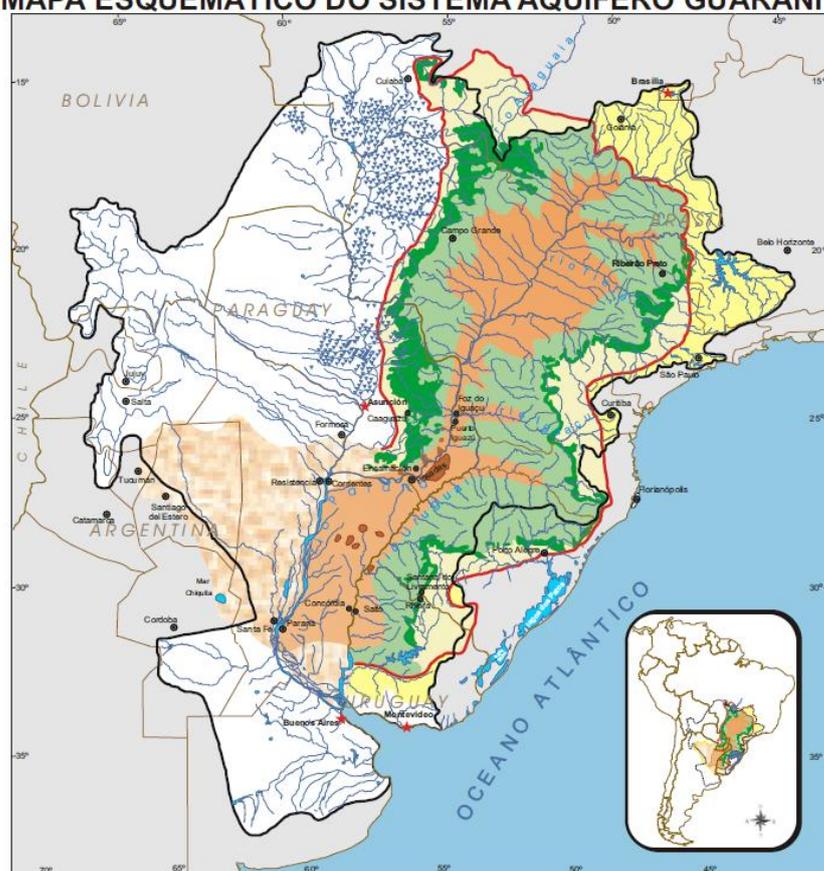


Figura 4: Mapa SAG (Fonte: modificado de DNPM/CPRM, 1996).

A água do SAG está contida dentro dos poros e fraturas das rochas sedimentares. Parte destas rochas se encontram aflorantes e outra parcela localiza-se abaixo do manto de basaltos de variada espessura (Serra Geral), sendo a qualidade e profundidade das águas muito variáveis regionalmente (Pérez y Rocha, 2002). A zona aflorante do SAG se encontram em sua periferia, visualizada na figura 4.

Do ponto de vista global, o SAG constitui de um dos maiores aquíferos transfronteiriços do mundo e sua importância para as regiões que o compõem tem grandes impactos sócio-econômicos, legais e ambientais.

O aumento considerável da população e dos bens de consumo e conseqüentemente da demanda de água potável têm influenciado para o deterioramento e esgotamento dos recursos hídricos.

A espessura média do aquífero é de 200m, mas em sua porção confinada pode alcançar valores superiores a 1000m (Araújo *et al.*, 1995,1999 e Rosa *et al.*, 1998, 2003). De acordo com Rebouças (1976) e Teissedre & Barner (1981), um dos parâmetros mais representativos do SAG é a condutividade hidráulica, que varia entre 8,0 m/dia para arenitos da Formação Botucatu e 0,8 m/dia para o Grupo Rosário do Sul. A porosidade efetiva varia entre 10 e 20% no aquífero livre e seu coeficiente de armazenamento diminui de 10^{-3} a 10^{-6} com o aumento do confinamento. Os valores de transmissividade encontrados variam de 350 a 550 m²/dia.

Nas áreas aflorantes, as águas possuem temperatura de 22°C a 27°C, pH entre 5,4 e 9,2, salinidade inferior a 100 mg/L e caráter predominantemente bicarbonatado cálcico ou misto. Na área semi-confinada, a temperatura varia de 22 a 58,7°C, pH de 6,3 a 9,8, salinidade entre 100 e 500 mg/L e caráter bicarbonatado sódico, localmente sulfatado ou cloretado sódico (Campos, 2000; Silva, 1983; Silva *et al.*, 1982; Kimmelman e Silva *et al.*, 1989).

As linhas de fluxo dirigem-se principalmente para as grandes drenagens, sendo a direção principal do fluxo das áreas confinadas em direção ao Rio Uruguai na divisa com a Argentina.

Em cima desta realidade, o projeto para proteção ambiental e uso sustentável do SAG foi um importante passo em direção a estes objetivos propostos. O projeto teve seu início em 2003 e encontra-se finalizado. Entre os produtos deste projeto encontram-se uma unificação da base de dados de uso e conservação do aquífero para as comunidades interessadas e, sobretudo para os tomadores de decisão, tanto em nível regional, como local (projetos pilotos). Encontra-se também a construção de mapas temáticos em escalas regionais, cadastramento de poços, projeção de redes de monitoramento e estudos sobre o comportamento hidrodinâmico do SAG, através de modelos conceituais e modelos numéricos de fluxo. Dando continuidade aos estudos do PSAG, foram simulados neste trabalho 2 (dois) cenários distintos para analisar a vulnerabilidade de poços na região do Bairro do Registro.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Caracterização da área

A área de estudo localiza-se em Santana do Livramento, no Estado do Rio Grande do Sul, região de fronteira com o Uruguai, mais especificamente possui continuidade física com a cidade uruguaia de Rivera e distancia-se 498km a sudoeste de Porto Alegre.

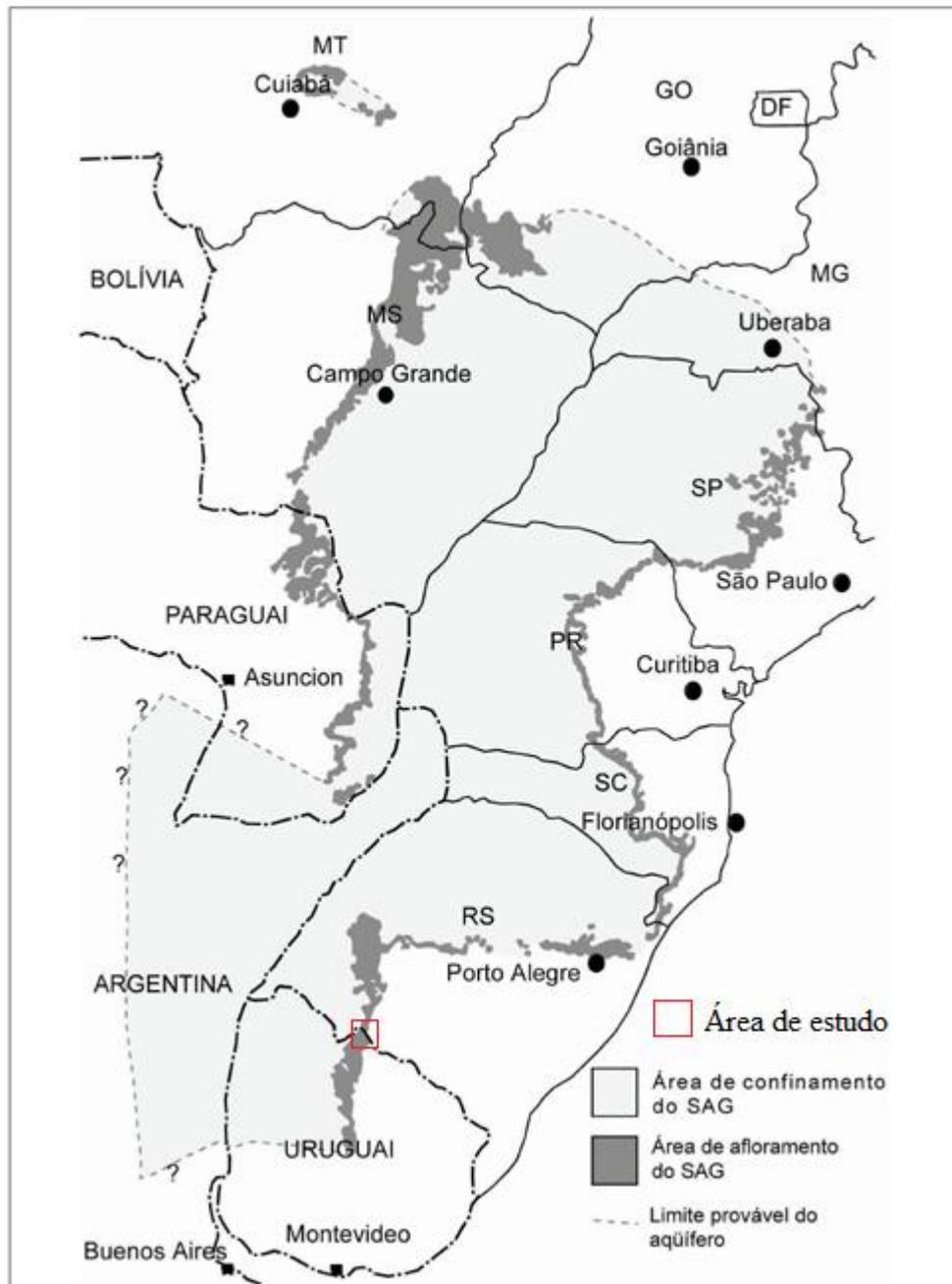


Figura 5: Localização da área de estudo.

A área de estudo, em vermelho, contempla os seguintes vértices:

VÉRTICE	LATITUDE	LONGITUDE
V1	30°43'55.80"S	55°40'24,90"O
V2	30°43'41.40"S	55°19'37,60"O
V3	31° 4'34.24"S	55°19'15,80"O
V4	31° 4'48.80"S	55°40'7,60"O

Os mapas neste trabalho serão apresentados em sistema de coordenadas UTM (*Projeção de Mercator*), e sistema de referência SIRGAS 2000, abrangendo as seguintes coordenadas:

VÉRTICE	LATITUDE	LONGITUDE
V1	6599328	626985
V2	6599328	660166
V3	6560744	660165
V4	6560745	626985

A área total de estudo pode ser visualizada em coordenadas UTM – Sirgas2000, referenciando as cidades de Santana do Livramento e Rivera em relação à área do modelo:

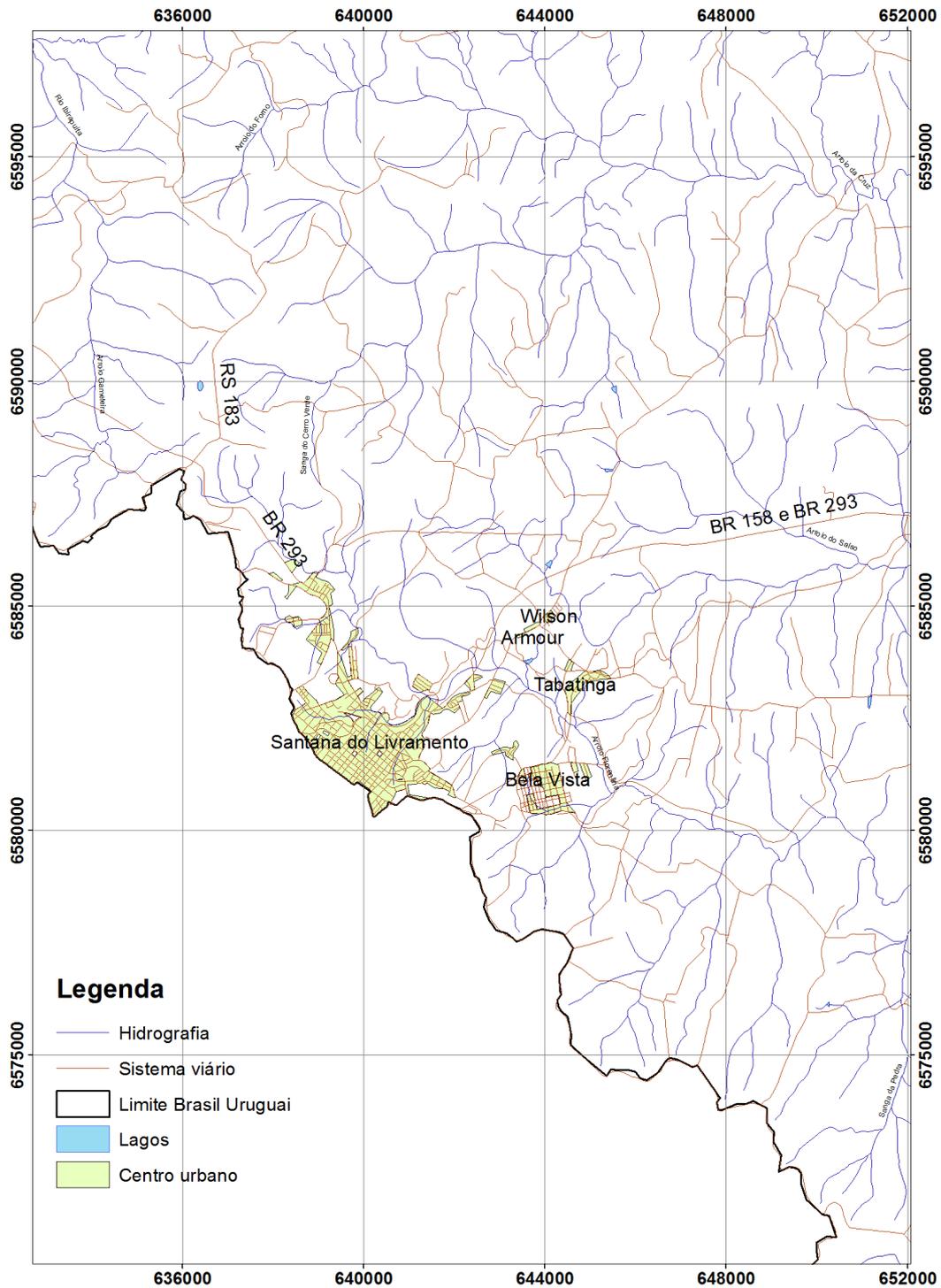


Figura 6: Mapa de localização da área estudo.

3.1.1 Relevo e Geomorfologia

Para a geração da superfície do terreno no modelo foi utilizado um MDE (modelo digital de elevação), através do satélite *Shuttle Radar Topography Mission*

(SRTM), do serviço geológico dos Estados Unidos da América (EUA), com resolução de aproximadamente 3 segundos, o que é equivalente a cerca de 90m.

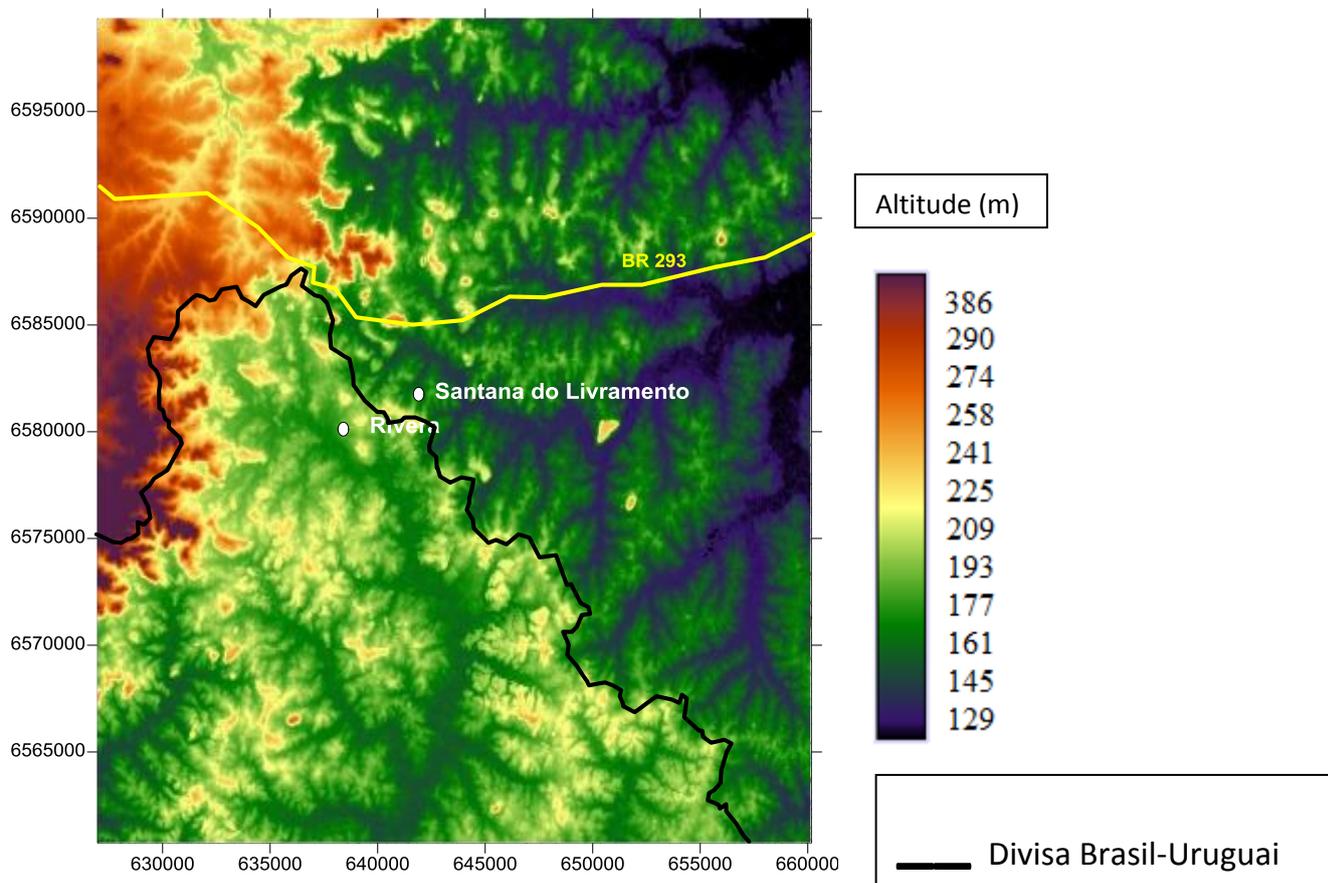


Figura 7: Relevo (SRTM) da área do modelo (em metros).

A altitude média da região é de 208m acima do nível do mar. As altitudes e o relevo na região são de extrema importância na construção do modelo geológico conceitual, que implicará diretamente no resultado do modelo, sobretudo na sobreposição das camadas geológicas (em especial a capa da primeira camada) e a cota dos rios e condições de contorno do modelo.

Quanto às unidades geomorfológicas, a região encontra-se na divisa da Depressão Central Gaúcha do Rio Ibicuí e Rio Negro e do Planalto de Uruguiana, conforme figura 8. Embora boa parte da região do estudo pertença ao Uruguai, na caracterização da área é dada prioridade para a parte brasileira da área de estudo, em virtude do problema prático da pesquisa relativo à relocação de poços e delimitação de

perímetros de proteção de poços (PPP), que foi realizado na cidade de Santana do Livramento.

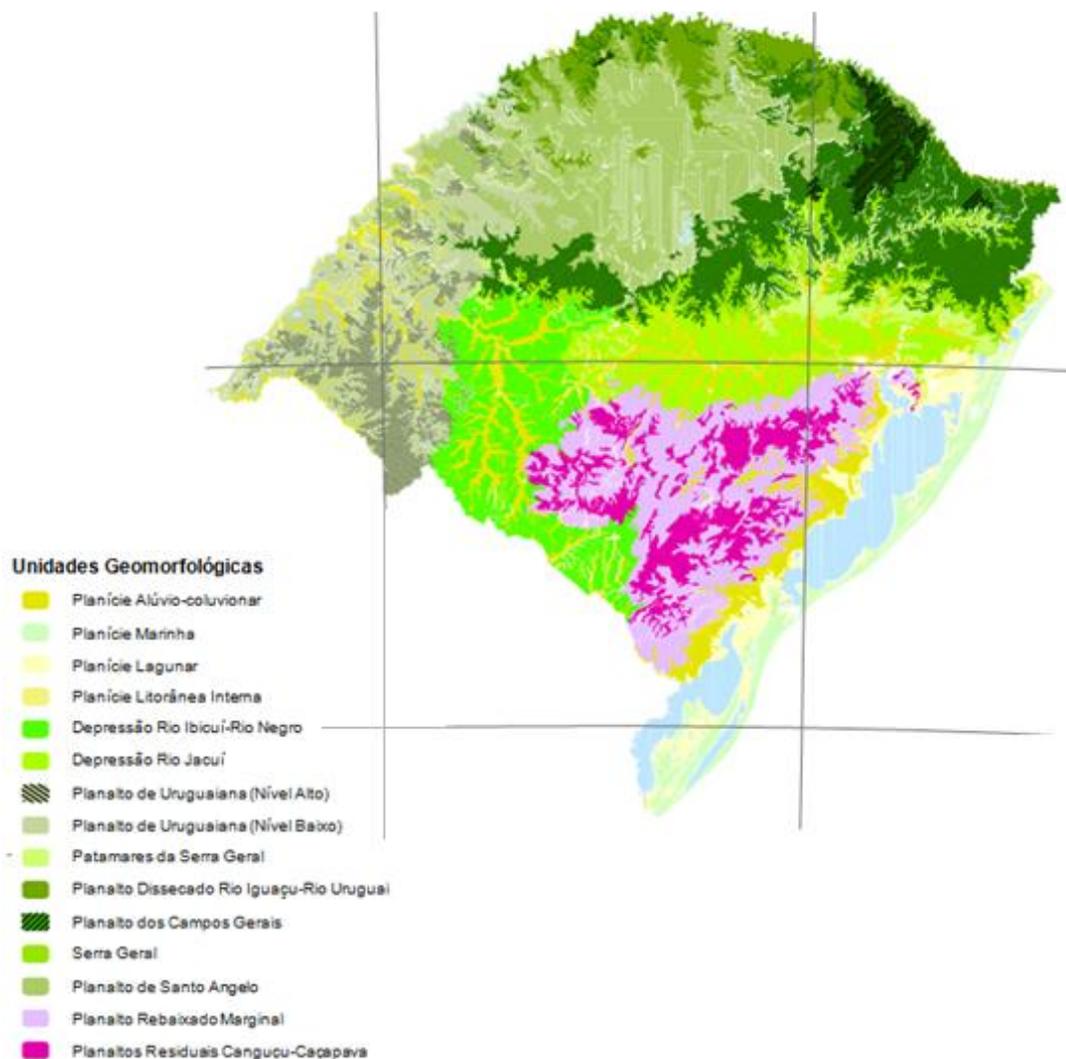


Figura 8 - Unidades geomorfológicas do Rio Grande do Sul (modificado de IBGE).

3.1.2 Clima

Aqui foram utilizados dados do DNM (Diretório Nacional de Meteorologia), por abrangerem boa parte da região do estudo e serem significativos para toda a área.

A precipitação média, de acordo com o DNM é de cerca de 1369mm/ano e a temperatura média anual é de 17,5°C.

As temperaturas mais altas ocorrem geralmente em janeiro e fevereiro, enquanto as temperaturas mais baixas ocorrem nos meses de junho e julho. A tendência de maior utilização de água nos meses mais quentes e de estiagem não foram representativas para uma diferença significativa no modelo referente às estações de seca e chuvosa. Estes

dados, fornecidos pelo DAE – Departamento de Água e Esgoto – de Santana do Livramento, creditam o modelo de fluxo em estado permanente (não altera em função do tempo), tanto para as estações de seca, quanto para a estação chuvosa.

3.1.3 Solos

A área estudada caracteriza-se por solos da Unidade de Mapeamento São Pedro (Reinert *et al.*, 2007) resultante da decomposição da Formação Rosário do Sul e Botucatu. O relevo possui declividades inferiores a 5% com maior declive à meia encosta e junto aos cursos d'água. Os solos são suscetíveis à erosão laminar e eólica. São formados pelos horizontes A e B. O horizonte A possui textura arenosa e profundidade média de 0,5 à 1,0 m. O horizonte B tem textura argilosa a franco argilo-arenosa e espessura média de 0,8 à 1,5 m. O pH do solo está entre 4,5 a 5,0.

Em classificação mais recente, o solo foi classificado como Argissolo vermelho distrófico arênico de textura média com relevo ondulado (Reinert *et al.*, 2007). Correspondem a solos profundos, avermelhados, bem drenados e que contém argila com baixa CTC (capacidade de troca de cátions), ou seja, maior perda de nutrientes por lixiviação. São friáveis e com textura superficial arenosa, pobres em matéria orgânica (6,9 g/Kg de C) e nutrientes, necessitando uso moderado de implementos agrícolas. Possuem baixa capacidade de retenção de água e são muito susceptíveis à erosão devido à textura e ao relevo.

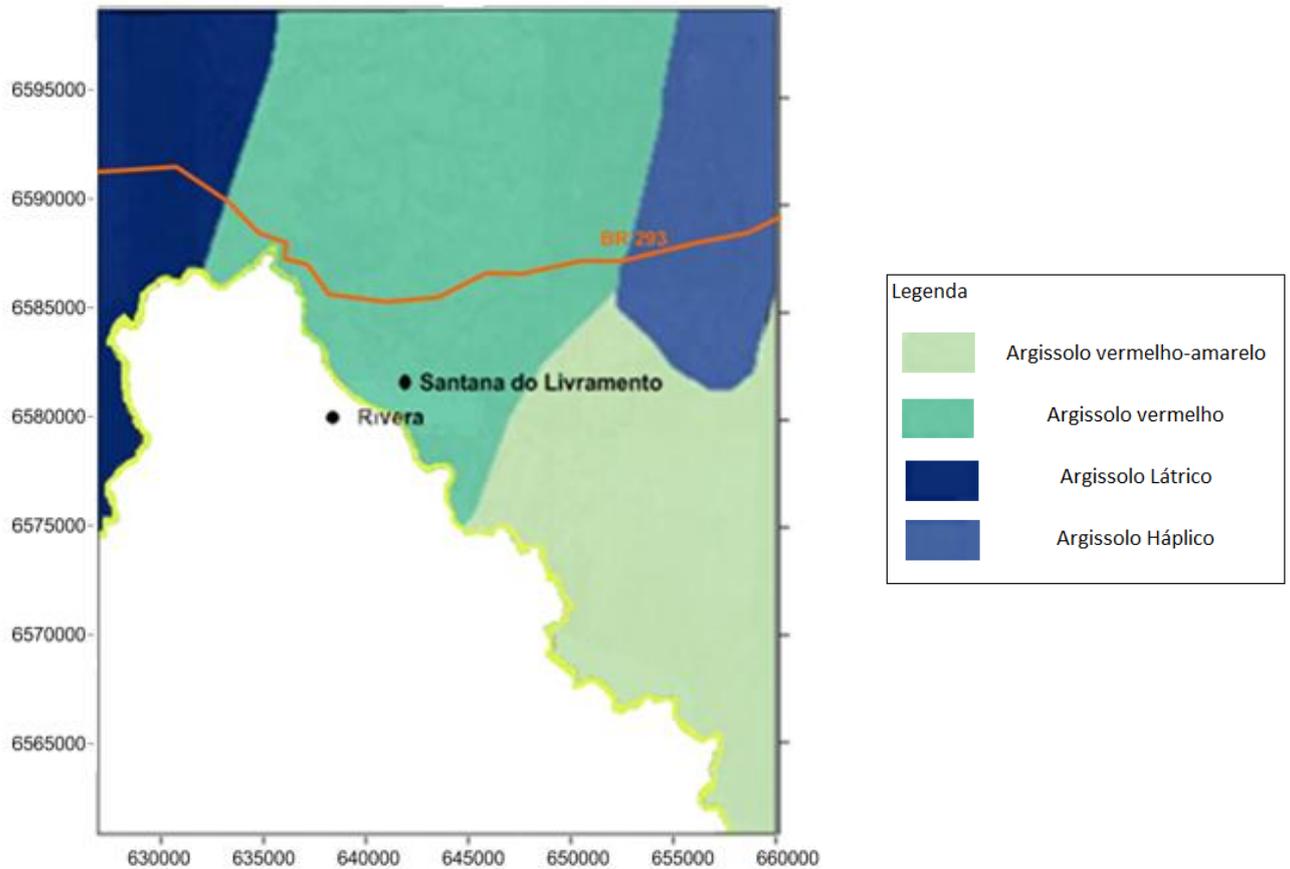


Figura 9: Solos (Modificado de IBGE).

Frantz e Camponogara (2005) realizaram levantamento do uso do solo para avaliação da vulnerabilidade do aquífero nesta mesma região e concluíram que, em geral, as localidades mais próximas do centro urbano de Rivera (Uruguai) e Santana do Livramento (Brasil) apresentam maior vulnerabilidade de contaminações.

3.1.4 Geologia regional

A região de Santana do Livramento localiza-se na borda da Bacia do Paraná e nela afloram seqüências arenosas do Grupo Rosário do Sul e da Formação Botucatu, de idades Triássico e Jurássico, respectivamente. Basaltos da Formação Serra Geral são escassos e aparecem superpostos às camadas sedimentares, restringindo-se às cotas mais elevadas de morros testemunhos na parte ocidental do município. Depósitos aluvionares quaternários ocorrem ao longo dos principais cursos d'água.

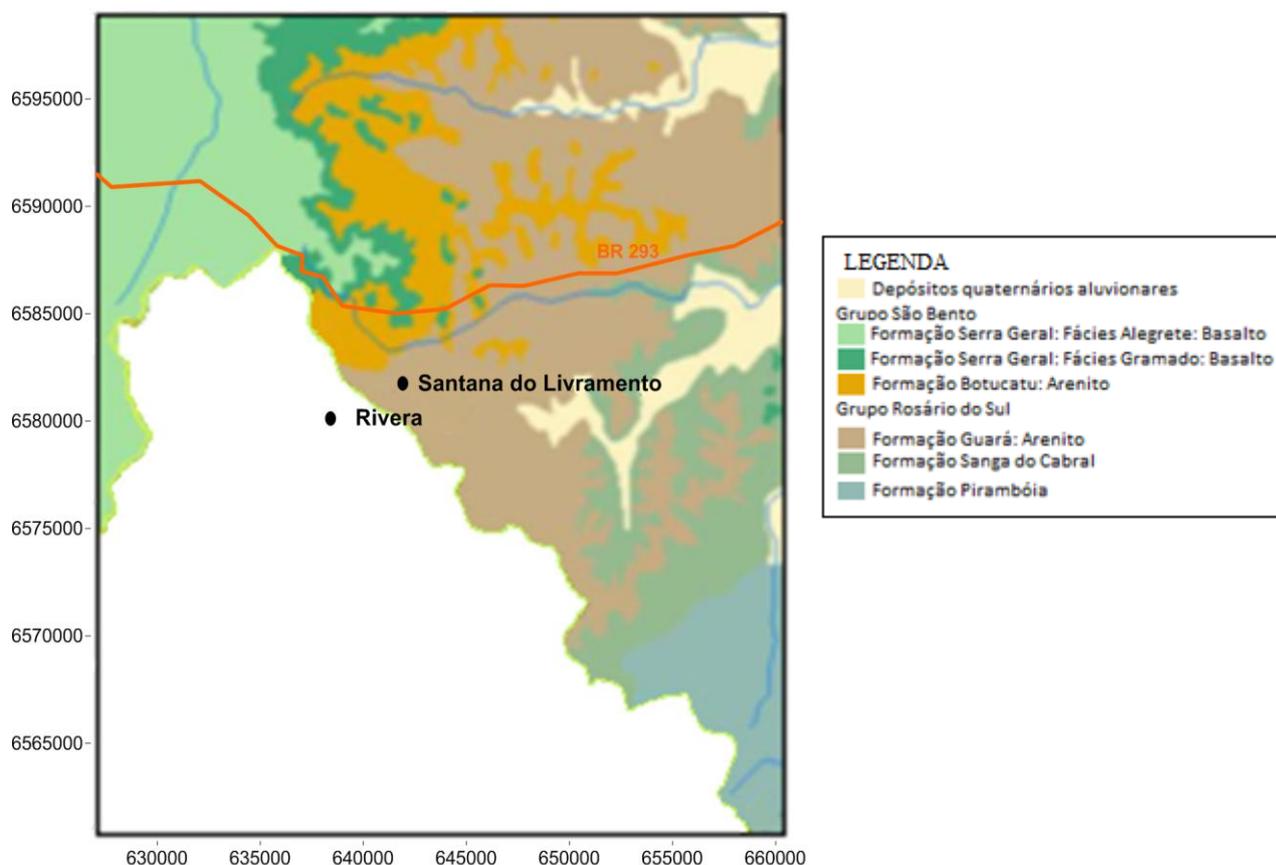


Figura 10: Geologia regional (Fonte:modificado de CPRM, 2008).

A seguir é apresentada breve descrição geológica das principais formações na área de estudo:

Grupo Rosário do Sul (Triássico Inferior):

O Grupo Rosário do Sul (Gamermann, 1970; Geologia do Rio Grande do Sul, 2000) compreende a maior parte aflorante da área de estudo e abrange as Formações Guarà e Sanga do Cabral.

- Formação Sanga do Cabral

Esta Formação é constituída principalmente por arenitos subarcoseanos ou arcoseanos de cores avermelhada a alaranjada com geometria tabular ou lenticular

alongada. São comuns brechas e conglomerados intraformacionais, enquanto siltitos e argilitos ocorrem raramente, com caráter maciço ou com laminação paralela. Esta unidade é depositada em ambiente continental, fluvial entrelaçado com freqüente presença de restos de vertebrados (anfíbios e répteis) como o *Procolophon pricei* correlacionável à Zona de *Lystrosaururs*.

- Formação Guará

Esta Formação consiste em arenitos finos a conglomeráticos, de cores esbranquiçadas a avermelhadas, ocasionalmente intercalados com níveis centimétricos de pelitos. É depositada em ambiente continental desértico, com depósitos fluviais, eólicos e lacustres restritos.

Grupo São Bento

As Formações Botucatu e Serra Geral constituem as unidades do Grupo São Bento aflorantes na área de estudo.

- Formação Botucatu (Jurássico Superior): A Formação Botucatu é constituída por arenitos médios a finos de coloração avermelhada alternados com raros ciclos pelíticos de cor cinza a verde. Os grãos são bem arredondados com alta esfericidade, dispostos em *sets* e/ou *cosets* de estratificações cruzadas de grande porte. É representativa de paleoambiente continental desértico com depósitos de dunas eólicas.

- A Formação Serra Geral na região é representada por uma sucessão de derrames de basaltos e basalto-andesitos de filiação toleítica, pertencentes às Fácies Alegrete e Gramado. Ignimbritos de caráter riolítico a riodacítico são comuns em outras regiões, porém não ocorrem em Santana do Livramento. Intercalações de lentes de arenitos com características da Formação Botucatu são comuns. A Fácies Alegrete é representada por derrames de composição intermediária, variando de andesitos a basaltos, com textura de fluxo e auto-brechas no topo e na base. A Fácies Gramado é constituída por basaltos cinza-escuros a cinza-esverdeados, finos a médios, contendo níveis vesiculares no topo e na base, normalmente preenchidos por zeólitas, carbonatos e argilominerais.

Depósitos aluvionares (Quaternário):

Os depósitos aluvionares são formados por sedimentos inconsolidados provenientes da erosão das Formações Botucatu e do Grupo Rosário do Sul. São constituídos por areias, areias quartzosas, cascalhos, silte, argila e, localmente, turfa.

A espessura das principais camadas geológicas na área, segundo o informe de geologia final da área piloto de Santana do Livramento-Rivera, realizado por PyT Consultoria, obtidas com os perfis dos mesmos poços cadastrados utilizados nesta pesquisa é:

BRASIL	URUGUAI	ESPESSURA MÉDIA(m)
Serra Geral	Arapey	100m
Botucatú Superior	Rivera	100m
Botucatú Inferior	Tacuarembó	80m

A figura 11 ilustra uma seção transversal típica da área, apresentada pelo PSAG em 2008:

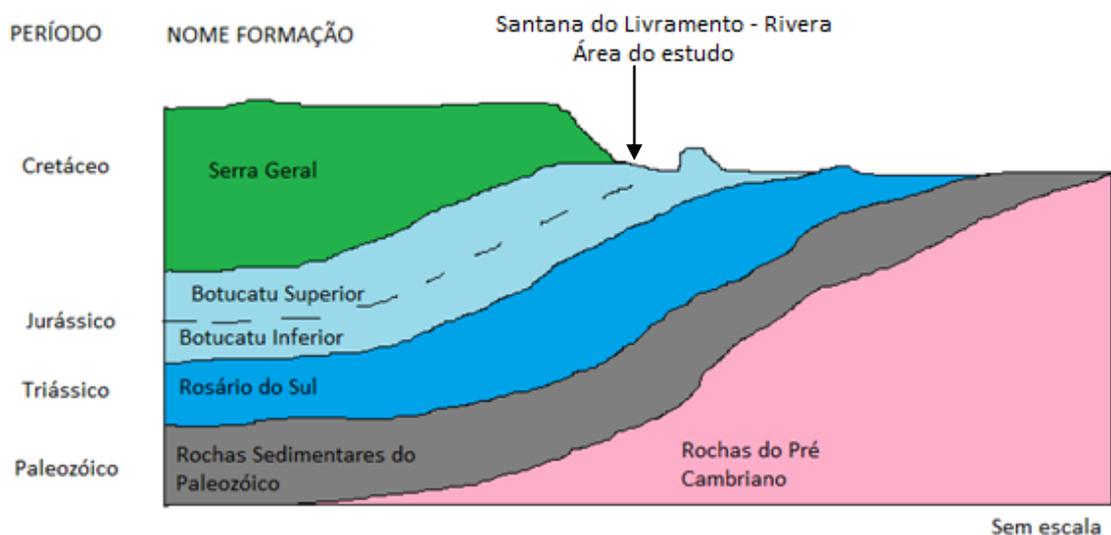


Figura 11: Seção transversal (modificado de Lavalin, 2008).

3.1.5 Geologia local

Da mesma forma como as elevações do terreno e níveis dos rios foram baseados na imagem do SRTM, as formações geológicas e a base e capa de cada camada geológica inserida no modelo foram baseadas no seguinte mapa geológico de detalhe da área, realizado por Lavalin (2008), ilustrado na figura 12:

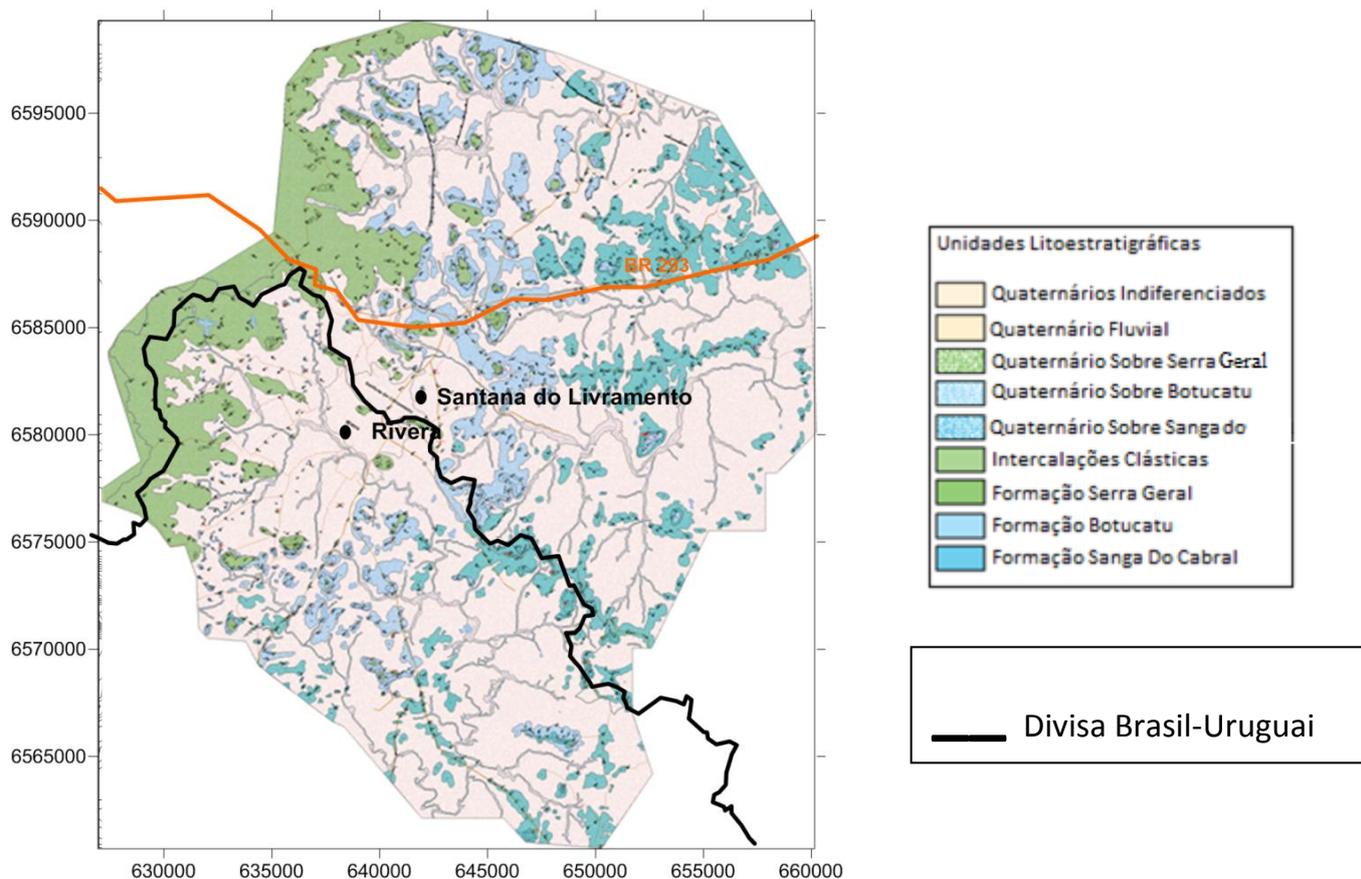


Figura 12: Mapa geológico local da área de estudo.

3.1.6 Bacias hidrográficas e Hidrogeológicas

As bacias hidrográficas têm papel fundamental em qualquer estudo hidrológico. As águas subterrâneas, no entanto, não se comportam em cumplicidade com a delimitação das bacias hidrológicas, tendo as bacias hidrogeológicas limites não coincidentes. Como discutido na revisão bibliográfica do assunto, são inúmeras as dificuldades na delimitação das bacias hidrogeológicas e estas delimitações nem sempre são confiáveis. No entanto, o ciclo hidrológico superficial esta intimamente ligado ao

subterrâneo, tendo, sobretudo, o comportamento de cheias e secas dos rios ligação direta com a recarga e descarga de água subterrânea. Para tanto, as bacias hidrográficas que se localizam na região de estudo são: na região de trabalho, no lado Brasileiro da divisa, fazem parte da Bacia Hidrográfica dos Rios Quaraí, do Rio Ibicuí e do Rio Santa Maria. No lado Uruguaio, fazem parte a Bacia Hidrográfica do Rio Negro.

Devido à escolha das condições de contorno do modelo ser baseada no mapa geológico de detalhe apresentado por SNC-Lavalin (2008), as bacias hidrográficas do Quaraí e do Ibicuí não têm importância significativa na construção do modelo, visto que estas bacias ficam em áreas de células inativas do modelo, conforme o capítulo seguinte “construção do modelo”.

Portanto, a bacia do Rio Negro, pela parte Uruguaia, e do Rio Santa Maria, pela parte Brasileira, predominam na área de estudo, sendo as demais não significativas.

3.1.7 Hidrogeologia

A área que circunda os municípios de Santana do Livramento (Brasil) e Rivera (Uruguai) se caracteriza por uma zona de afloramento do SAG, pertencente à formação Botucatu ou Tacuarembó, respectivamente como é chamada no Brasil e no Uruguai, em contato com os basaltos da Formação Serra Geral ou Arapey, como é chamada respectivamente no Brasil e no Uruguai. Esta zona já foi objeto de análise de diversos trabalhos hidrogeológicos, entre eles destacam-se Pessy e Hardy (1998), Decoud e Rocha (2000), Pérez e Rocha (2002), Pacheco (2004), Gómez (2007) e o trabalho realizado pela consultoria SNC-Lavalin (2008) para o “projeto para proteção ambiental e uso sustentável do Sistema Aquífero Guarani (SAG)”.

Nesta região, o SAG se comporta como um aquífero de múltiplas camadas, com transmissividades estimadas entre 25 a 139 m²/dia e condutividades da ordem de 0,48 e 1,66 m/d (Machado, 2005). Sobre a recarga nesta área, diversos autores calcularam a recarga na zona aflorante do SAG e nas fissuras dos basaltos, em cerca de 3 a 5 % da precipitação média anual (Montaño y Carrión, 1990; Pacheco, 2004; Gómez, 2006; entre outros).

Entre os antecedentes de modelação do SAG pode-se citar os trabalhos de Campos (1998), Vives et al., (2001), Vassolo (2005), mais recentemente Gómez (2007) e o modelo proposto pelo “Projeto para Proteção Ambiental e Uso Sustentável do SAG”.

As águas subterrâneas da região são primordialmente usadas para abastecimento público e doméstico, seguido do uso para agricultura (irrigação de hortaliças e vinhedos) e na dessedentação de animais no campo em períodos de estiagem. Em trabalhos prévios (Silva et al., 2007), amostras de águas subterrâneas foram coletadas em poços profundos localizados em indústrias, casas de consumidores domésticos, irrigantes e em clubes com piscinas. As análises demonstraram caráter bicarbonatado cálcico e magnésiano (Pérez, 2002), conteúdo de sólidos totais dissolvidos (STD) variável entre 40 e 714 mg/L, pH entre 5,16 e 7,52 e alcalinidade total de 9,26 a 267,27 mg/L. As concentrações de flúor são baixas (0,6 a 0,9 mg/L), inferiores ao Valor Máximo Permissível (VMP), dado pela portaria nº 518 de 2004 do Ministério da Saúde. Fianco (2008) apontou contaminação de solo e águas subterrâneas na região de Santana do Livramento ocasionada por fungicidas à base de metais, utilizados na zona vinícola.

Em Santana do Livramento o SAG encontra-se em condição de área de recarga, possuindo características predominantemente de aquífero livre e com alta vulnerabilidade. As águas em geral são de boa qualidade para o abastecimento público e seu uso inadequado pode comprometer a qualidade do aquífero.

3.1.8 Características sócio-econômicas

Livramento utiliza uma média anual de 8.657.460 m³ provenientes totalmente do recurso subterrâneo, enquanto que em Rivera o consumo anual é de 5.117.348 m³, dos quais a água subterrânea representa 70%, contra 30% proveniente de rios em função da variação sazonal das reservas superficiais.

O relatório final do Projeto de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do Sistema Aquífero Guarani (PSAG) apresentou dois grandes objetivos:

1. Avaliação da viabilidade operacional, institucional e social de concentrar a produção de água potável do SAG em áreas protegidas, fora dos limites de urbanização das cidades de Rivera e Santana do Livramento.

2. Investigar os mecanismos existentes que possam ser utilizados para declarar tais áreas como reserva de água potável ou zona de proteção ecológica, com uso predominante para atividades recreativas e agrícolas não intensivas.

Considerando que Rivera já dispõe de uma área protegida pública, o Parque Municipal Grã-Bretanha de propriedade da Intendência e que a OSE “Obras Sanitárias del Estado” já está relocando poços profundos para essa área, o estudo da viabilidade socioeconômica da relocação de poços de abastecimento de água concentrou-se na cidade de Santana do Livramento.

De acordo com as informações do Departamento de Águas e Esgotos – DAE, o local ideal para a relocação dos poços é o Bairro Registro. As razões dessa preferência são devidas por um lado à tendência de aumento da vazão de bombeamento dos poços nessa direção noroeste e, por outro, por ser a região mais próxima dos demais locais de consumo. Além disso, o Cerro do Registro é o local definido no Plano Diretor de Santana do Livramento como área de proteção de nascentes. Deste modo, existe uma grande vantagem em afastar possíveis pontos de contaminação desta região, ilustrada na figura 13:

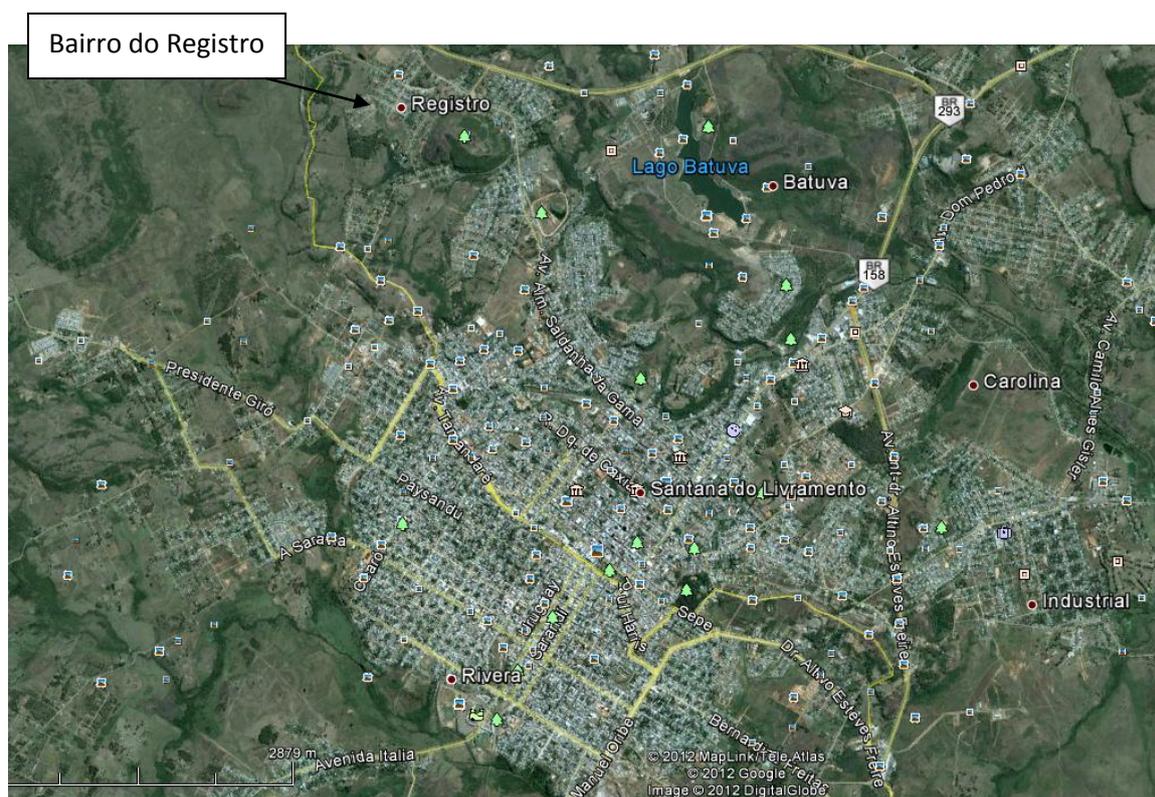


Figura 13: Bairro Registro (Fonte: Google, 2012).

Como parte integrante do marco do projeto, elaborou-se ainda no PSAG um Plano de Gestão Local (PGL) inicial e posteriormente elaborou-se uma Análise de Diagnóstico Transfronteiriço (ADT), assim como se realizou uma compilação de normas,

permissões, etc., que complementam a base de gestão a nível local. As principais conclusões do PGL e do ADT do Projeto Piloto Rivera - Santana foram:

1. Exposição elevada à contaminação antrópica;
2. Dependência quase exclusiva da água do aquífero, (100% em Santana e 60-80% em Rivera);
3. Presença de dois níveis aquíferos, que são explorados atualmente;
4. Rápida infiltração da água de precipitação;
5. Indícios pontuais de contaminação por nitratos;
6. Sobre exploração com um incipiente cone de depressão na zona central do aglomerado urbano, que alcança mais de cinco metros no ponto central;
7. Presença de assentamentos precários em ambas as cidades com escasso ou ausente sistema de saneamento;
8. Cobertura de saneamento de 40% em Santana e 40% em Rivera, com uma carga substancial de águas negras no aquífero, que tem uma relativa alta vulnerabilidade à contaminação;
9. Não existe informação consolidada sobre o consumo para usos agrícola e industrial;
10. Existem cerca de 600 poços não cadastrados, sem dados de nenhum tipo;
11. Não existem zonas ou áreas de proteção dos poços de abastecimento;
12. Existem sérias ameaças de contaminação pontual e difusa associados a problemas de: (i) baixa cobertura da rede de esgotos e tratamento de efluentes cloacais; (ii) inadequada disposição de resíduos domiciliares; (iii) postos de combustíveis, entre outros;
13. Existem numerosas leis e decretos a nível nacional para ambos os países e estadual para o Brasil que deveriam ser aplicados em benefício da gestão;
14. No marco existente deveriam ser propostos mecanismos de coordenação interinstitucional.

Assim as linhas de ação definidas na ADT do Projeto Piloto Rivera – Santana foram:

- Estabelecer zonas ou perímetros de proteção para as fontes mais importantes de abastecimento público de água por meio do ordenamento adequado do uso do solo (tanto urbano como rural);
- Reforçar a Comissão Transfronteiriça do Aquífero Guarani (COTRÁGUA), com representantes usuários locais de cada país (oficinas governamentais locais,

empresas de água, perfuradores de poços, várias ONGs e organismos relacionados com a agricultura, hidrologia e saúde pública);

- Gerar ações para aumentar a cobertura de saneamento (esgoto).

3.2 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo detalhar os passos na transformação do modelo conceitual no modelo matemático computacional de fluxo e transporte:

Preliminarmente, quanto a espacialidade do modelo, este foi construído como um modelo de fluxo homogêneo, que considera a condutividade hidráulica constante ao longo do tempo e do espaço.

No que diz respeito a temporalidade, é um modelo permanente, ou seja, as cargas hidráulicas não sofrem alterações ao longo do tempo.

Estas simplificações da realidade trazem consigo erros embutidos: em relação a espacialidade, como mencionado anteriormente, a falta de dados não permitiu uma abordagem geoestatística e, conseqüentemente, uma melhor avaliação da heterogeneidade e anisotropia dos parâmetros do modelo. Em relação a temporalidade, não foram percebidas grandes alterações nos regimes no que diz respeito as estações do ano. Segundo o próprio DAE as vazões de água utilizadas nos poços de captação não sofrem alterações superiores a 10% da estação chuvosa e a estação seca, o que reflete pouca diferença no consumo de água ao longo do ano. Quanto aos níveis de água nos corpos de água superficiais e córregos (utilizados na construção do modelo), são corpos de pequeno porte, muitos próximos de arroios, e a diferença de nível que possa ocorrer, espera-se ter pouca influencia em uma análise global de todo ciclo hidrogeológico na área. Para averiguar esta suposição, é necessária a medição e acompanhamento do nível de água nestes cursos de água ao longo do ano, para refinar ainda mais este ou futuros modelos na região.

3.2.1 Discretização do modelo

O primeiro passo na construção do modelo foi a delimitação da área de estudo. A área foi delimitada levando em consideração principalmente a quantidade de informações na região: Poços de bombeamento e observação, mapa geológico, parâmetros físicos, etc.

A area escolhida tem cerca de 1280 km², delimitada pelas longitudes E 626985 e E 660166 e latitudes S 6560744 e S 6599328, no sistema de referência de coordenadas SIRGAS 2000. O modelo se estende de seu canto inferior esquerdo com coordenada (E

626984, S 6560744) até o canto superior direito com coordenada (E 660166, S 6599329), medindo em torno de 33km por 38km. Todas as camadas possuem a seguinte configuração de *grid*: Inicialmente foram projetadas 222 colunas e 258 linhas para o modelo, com espaçamento regular de 150m. Devido á importância da geologia nos modelos hidrogeológicos, este mapa definiu, também, as células ativas e inativas do modelo, conforme é apresentada na figura 14:

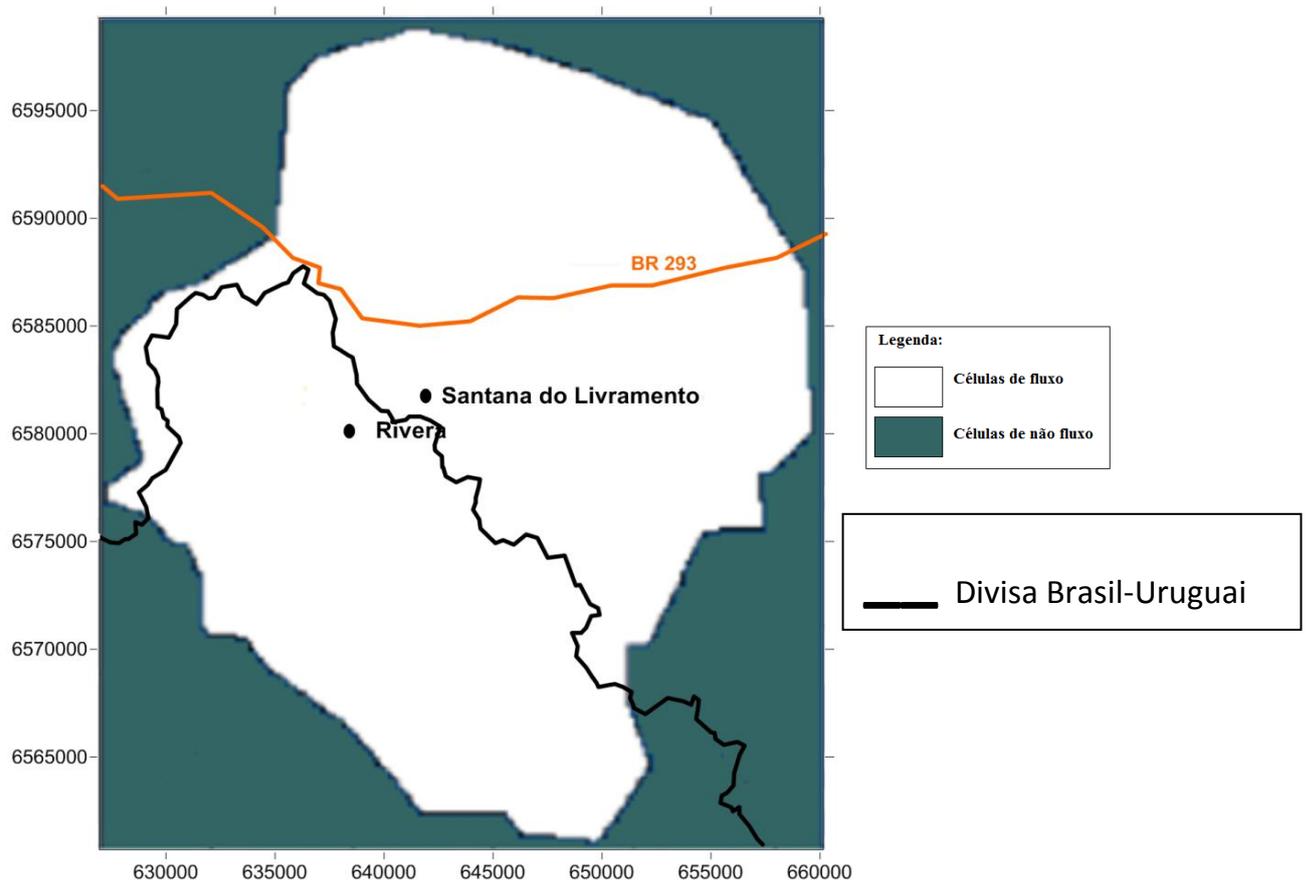


Figura 14: Células de Fluxo e Não Fluxo.

Após a delimitação do modelo no plano XY, o próximo passo foi à discretização vertical do modelo, com a construção do modelo geológico de camadas e o objetivo de estimar a base e o topo das camadas reproduzindo aproximadamente a situação encontrada em campo. O limite superior do modelo foi escolhido como a superfície representada pelo modelo digital de elevação SRTM (precisão de 90m), enquanto o limite inferior foi escolhido como as rochas sedimentares do período Paleozóico, abaixo da Formação Rosário do Sul, sendo considerada impermeável, devido a sua baixa permeabilidade descrita na bibliografia. O modelo digital de elevação para a região, obtido do satélite SRTM foi utilizado não somente para a determinação das altitudes na

capa do modelo através da interpolação do MDE (Modelo Digital de Elevação), como também para as cotas das condições de contorno, como os rios da região. A figura 15 representa as curvas de nível do terreno em planta, obtida através da interpolação do Modelo Digital de Elevação SRTM:

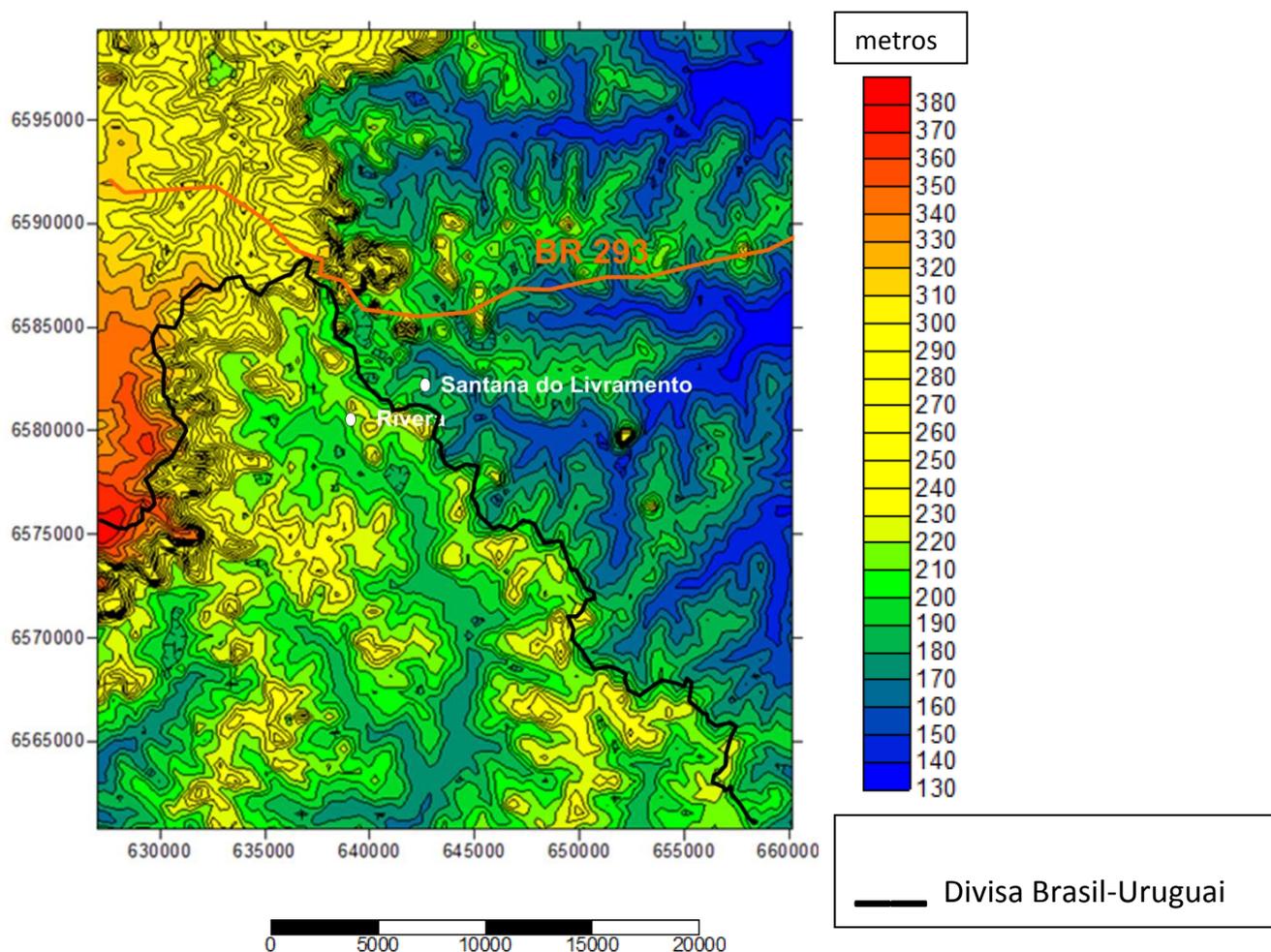


Figura 15: Camada 1 c Superfície topográfica do modelo (em metros).

A figura 15 nos traz a sugestão da existência de três camadas geológicas distintas aflorantes. A diferença de altitudes das escarpas da Formação Serra Geral em contato com os arenitos da Formação Botucatu, identifica a primeira formação geológica, enquanto o mapa geológico de detalhe local e o divisor de águas claramente observado na figura 19, determinam a existência das outras duas camadas aflorantes, já identificadas por Gómez (2007) e Charlesworth et al (2008).

A figura 15 em conjunto com o mapa geológico de detalhe local apresenta nas maiores altitudes (entre 240m e 380m) os basaltos da Formação Serra Geral, estando o aquífero parcialmente confinado a pequenas profundidades. As altitudes entre 170m e 240m, a sudoeste do divisor de águas superficiais indicam a Formação Botucatu Superior,

aflorante na região, e a nordeste do divisor de águas superficiais nas altitudes entre 130m e 220m, juntamente com o mapa geológico, indicam a Formação Botucatu Inferior. Conforme apresentado no mapa geológico, muitas áreas da região do modelo estão cobertas por sedimentos recentes do Quaternário, sobretudo ao redor dos cursos de água.

Em vista da dificuldade da modelagem das três camadas aflorantes em uma mesma região de trabalho, as camadas basalto foram consideradas horizontalizadas, enquanto as formações sedimentares possuem mergulho regional de aproximadamente 1% na direção Oeste (W), para baixo da Formação Serra Geral. O mesmo procedimento foi utilizado para a Formação Botucatu inferior em relação à Formação Botucatu superior e a Formação Serra Geral. Foram então adicionadas cinco camadas (*layers*) no modelo que representam:

Camada 1: Formação Serra Geral (aflorante na área do modelo)

Camada 2: Formação Botucatu Superior (Rivera no Uruguai, aflorante na área do modelo)

Camada 3: Formação Botucatu Inferior (Tacuarembó no Uruguai, aflorante na área do modelo)

Camada 4: Formação Rosário do Sul (Buena Vista no Uruguai, não aflorante na área do modelo)

Camada 5: Sedimentos do Paleozóico (Camada impermeável, não aflorante na área do modelo)

A figura 16 mostra a distribuição superficial das camadas observadas em planta:

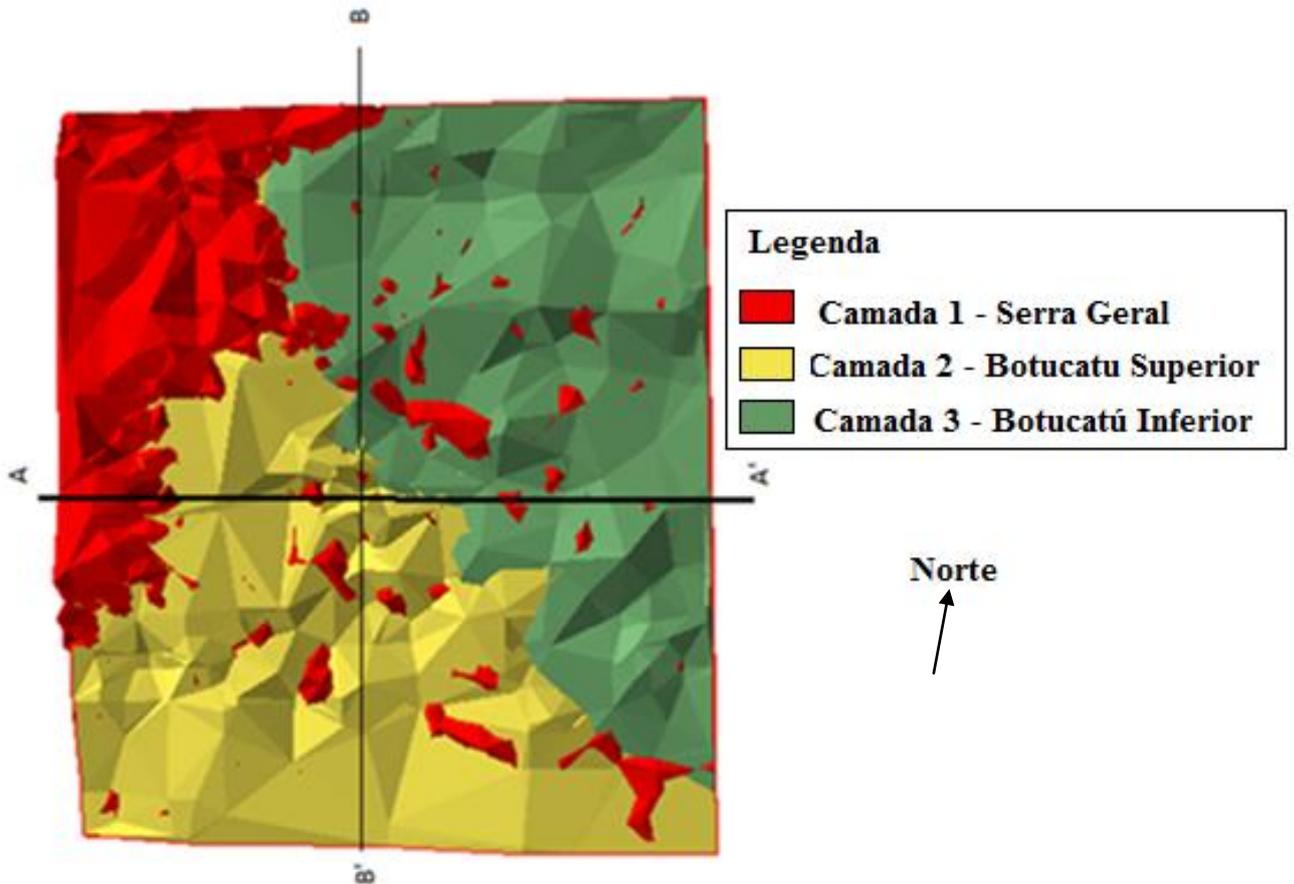
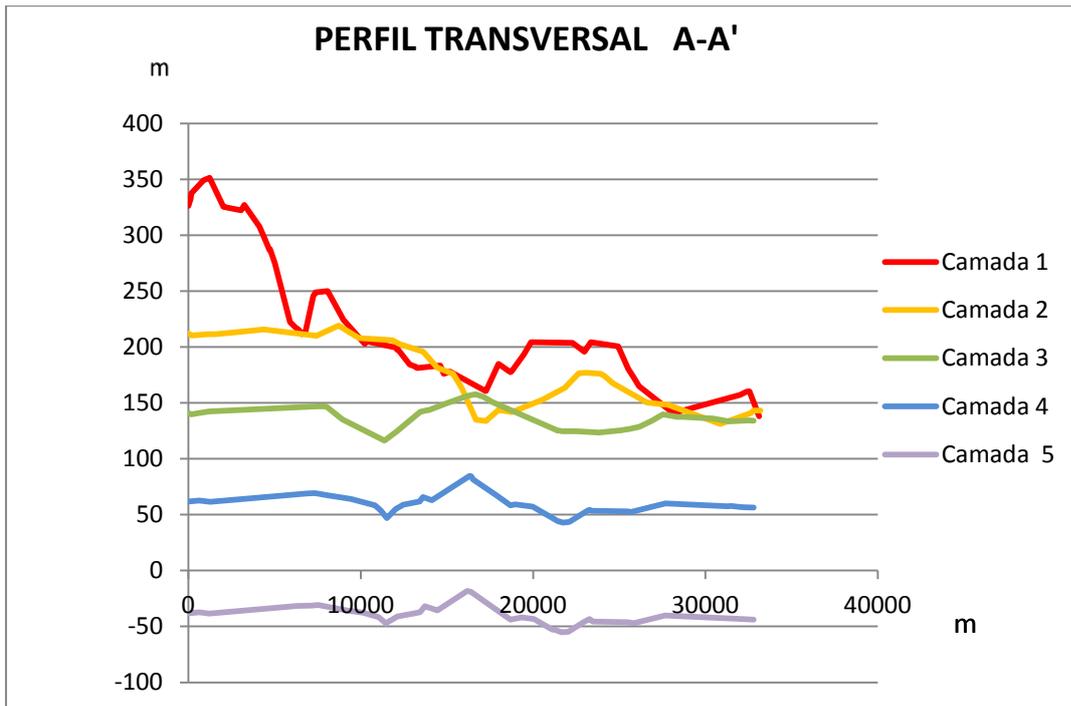
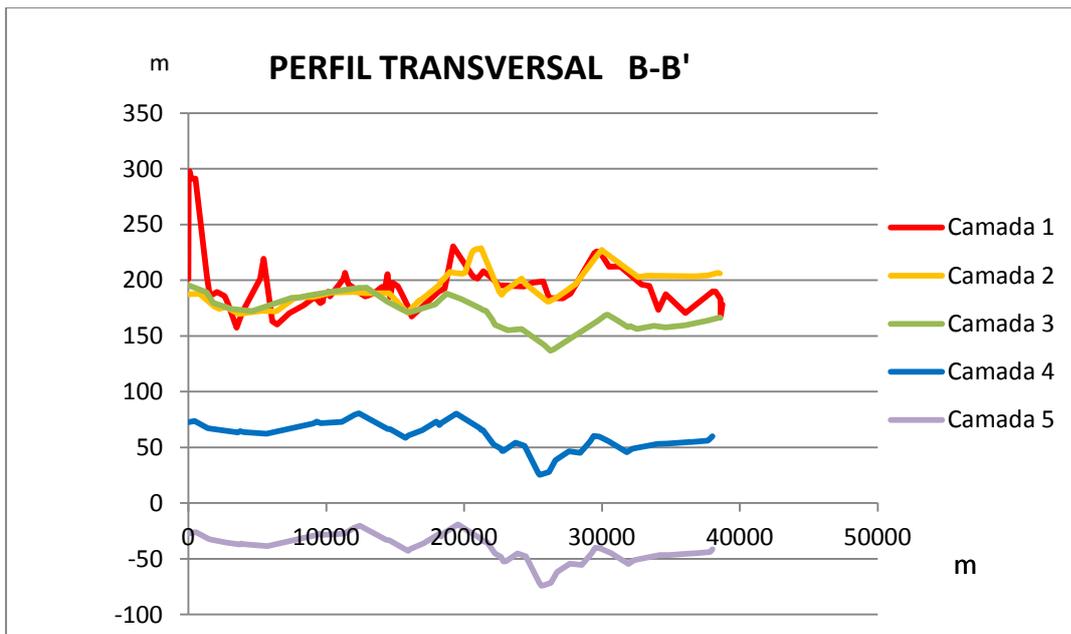


Figura 16 : Modelo geológico de camadas aflorantes.

A figura 16 mostra a localização dos perfis transversais no objetivo de compreender melhor a distribuição das camadas na área e a complexidade de transformar estas feições naturais para um modelo geológico, futuramente utilizado para o cálculo do modelo matemático computacional. A localização dos perfis transversais apresentados na figura 16, A-A' e B-B', representam o topo das respectivas camadas e são apresentados na figura 17:



(a): Perfil transversal A-A' (sentido W-E)



(b) Perfil transversal B-B' (sentido S-N)

Figura 17: Perfis transversais.

A visualização em perspectiva do modelo geológico construído permite identificar melhor o mergulho das camadas, conforme figura 18:

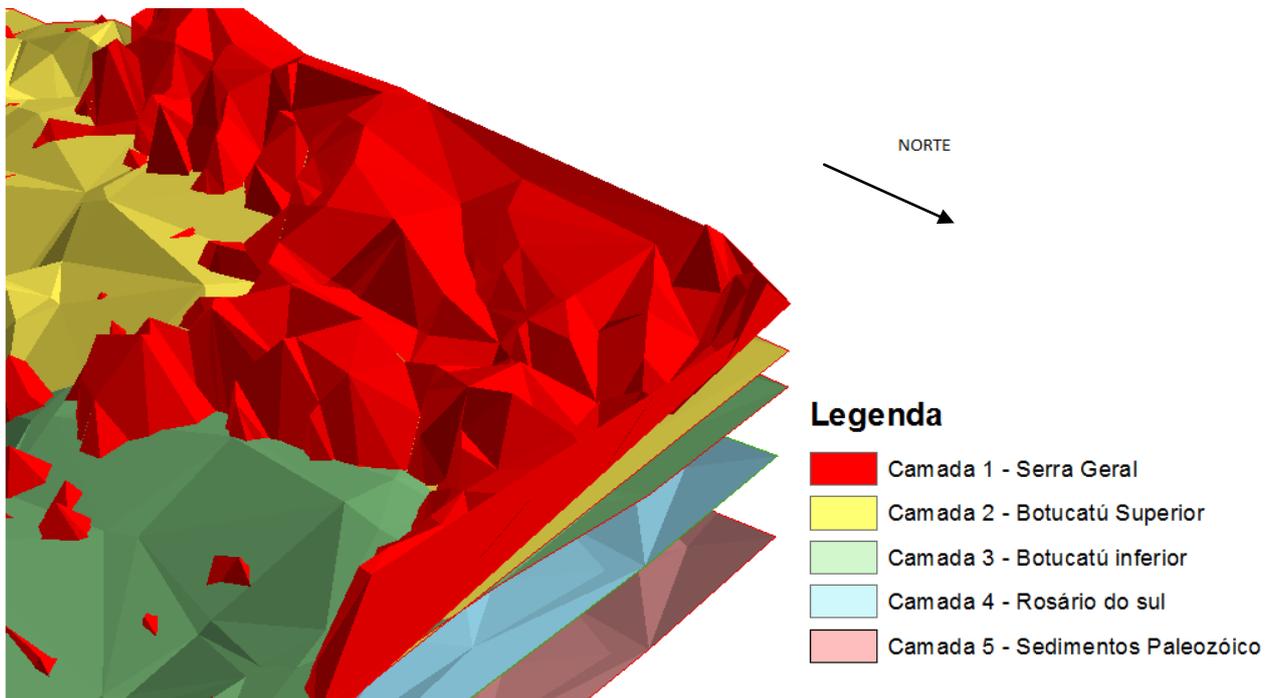


Figura 18: Mergulho das camadas – Visualização em perspectiva.

A divisão em 5 (cinco) camadas baseou-se na hipótese de que estas camadas possuem características hidrogeológicas distintas. Foram utilizados além do modelo digital de elevação SRTM, estimativa da espessura das camadas profundas considerando que cada camada possuía um mergulho de 1% em relação à camada concordante subjacente. Segundo Anderson et al., (1992), mergulhos destas dimensões não afetam de forma considerável os resultados do modelo matemático, podendo estas camadas terem sido todas consideradas horizontais, não causando erros significativos. De qualquer forma, a modelagem das camadas profundas considerou esta inclinação de 1% de forma que a segunda camada Botucatu superior esteja aflorando em parte da região do modelo e a camada Botucatu inferior está aflorando em outra região do modelo, tendo desta maneira 3 (três) camadas geológicas aflorantes na região de estudo.

Foram adicionadas as camadas verticais de acordo com as espessuras estimadas no item Geologia Regional e os nós tornaram-se cubos tridimensionais.

A não consideração das camadas horizontais e a complexidade da distribuição vertical das camadas geológicas trouxeram para o processo da escolha do *grid* e dos parâmetros algumas dificuldades.

A Formação Serra Geral tem ocorrência em pequena parte da área de estudo (figuras 16 e 17), sendo modelada em uma camada em separado, a camada 1 (hum), como aponta a figura 19, aonde as zonas cinza-verde escuras são zonas não ativas do modelo. A primeira camada geológica, representando a Formação Serra Geral, pôde ser modelada individualmente sem maiores problemas. A figura 19 apresenta a configuração desta primeira camada:

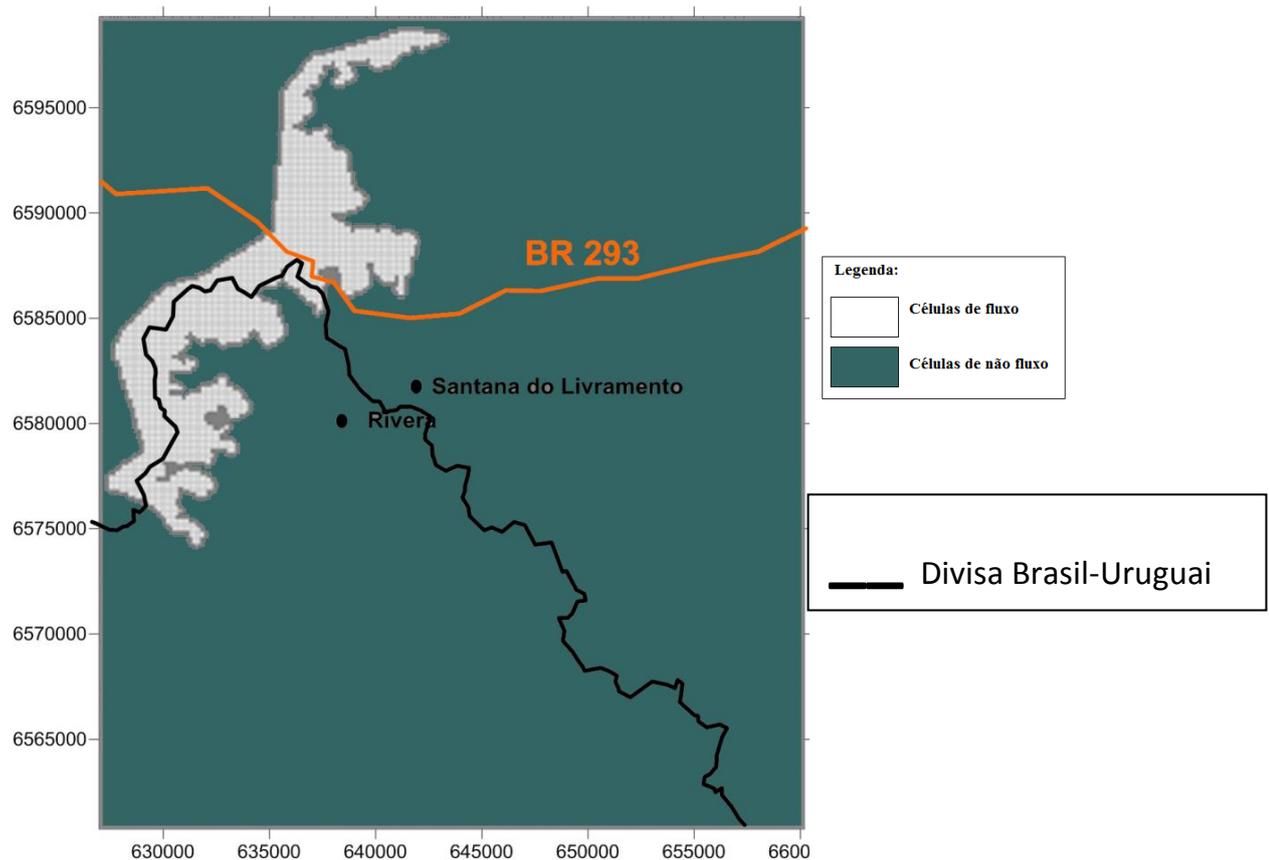


Figura 19: Camada 1 – Formação Serra Geral – grid.

Contudo, a segunda e a terceira camadas tiveram as seguintes dificuldades: A escolha de uma segunda camada geológica no modelo (*layer*) em que ficassem em evidência a Formação Botucatu Superior (representante desta camada) e seu mergulho embaixo da Formação Serra Geral (primeira camada), considerando as demais células inativas, não foi possível do ponto de vista computacional. Segundo McDonald e Harbaugh (1988), desenvolvedores do *MODFLOW*, os principais erros de convergência associados a modelos numéricos, em especial, o *MODFLOW*, correspondem a: Células de espessura zero, células ativas cercadas por células secas, grandes mudanças de

condutividade hidráulica sobre células adjacentes, grandes diferenças entre tamanhos de células adjacentes, descontinuidade lateral entre células da mesma camada, entre outros. Destes, pode-se citar vários que impediram a modelagem da segunda camada em sua “mais intuitiva” condição, principalmente:

- Descontinuidade lateral entre células da mesma camada – Devido ao afloramento da terceira camada, a segunda camada tem a característica de afinar-se em direção ao encontro da terceira e primeira camada, como visualizado no perfil transversal, causando um afinamento brusco, gerando uma camada de pequena espessura e descontinuidade espacial entre células da mesma camada na camada 2.
- Células de espessura zero – O afinamento da segunda camada como apresentado nos perfis transversais pode gerar no encontro com as camadas 1 (um) e 3 (três), além de sua descontinuidade lateral e abrupta mudança de espessura, podem ocorrer células de espessura zero que impediram a execução do modelo.
- Células ativas cercadas por células secas – Devido as células inativas na camada 1 (um) na região aflorante das camadas 2 (dois) e 3 (três), a recarga representando a precipitação colocada na zona aflorante, pode ter evitado a execução do modelo, pois a camada superior era inativa e devido a baixa infiltração vertical dos meios porosos (aonde predomina o movimento horizontal), uma célula seca na camada 3 e uma célula ativa na camada 2 teriam impedido rodar o modelo.
- Grandes diferenças de tamanho entre células adjacentes – Como se percebe nos perfis transversais, o afinamento para o encontro das camadas aflorantes pode também gerar este problema, dificultando em diversos aspectos a modelagem computacional da situação real.

A solução para estes problemas, exclusivamente computacionais, foi considerar a segunda camada em toda extensão das zonas ativas do modelo, igualando-se no plano XY as camadas 3 (três), 4 (quatro) e 5 (cinco), como apresentado na figura 20:

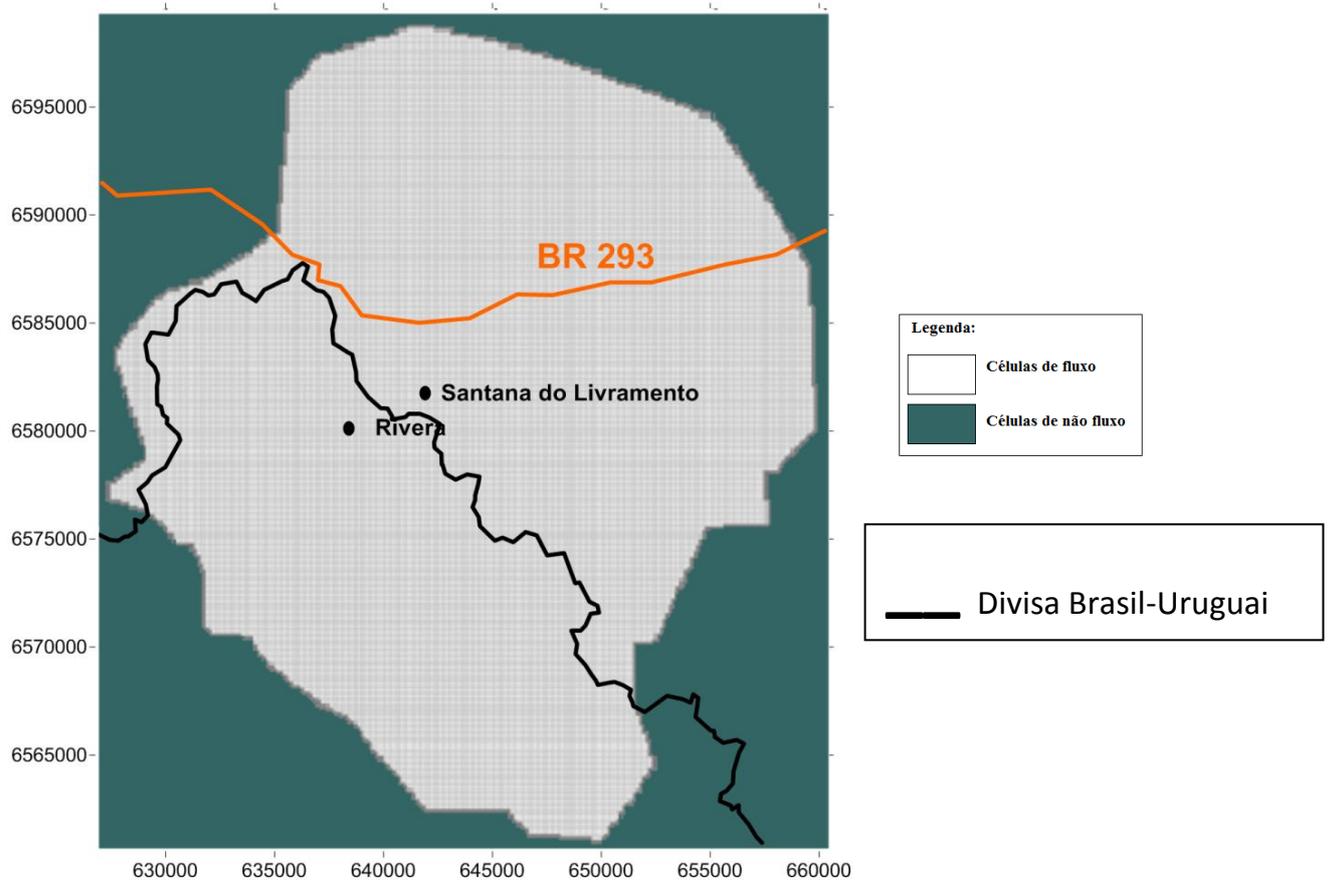


Figura 20: Camadas 2, 3, 4 e 5 – grid.

Esta solução resolve os problemas computacionais, aumentando a ligação entre as camadas 2 (dois) e 3 (três), ambas da Formação Botucatu (a primeira continua inativa na região onde a camada 2 (dois) e 3 (três) afloram). Com isto, surge-se um novo problema: a segunda camada passa a ter uma extensão maior no modelo do que tem em sua forma “real”, visto que existe uma parte aflorante da terceira camada, que deveria aparecer como inativa na segunda camada, mas devido aos problemas computacionais expostos, ela teve de ser incorporada. A solução para minimizar este problema, foi na escolha dos parâmetros, onde a condutividade hidráulica da terceira camada foi colocada em uma zona da segunda camada, que representa a região em que a terceira camada aflora. Esta solução permite que mesmo aparecendo na segunda camada, o afloramento da terceira camada mantém na segunda camada suas propriedades hidrogeológicas. O zoneamento dos parâmetros pode ser melhor visualizados nas figuras 21 e 22.

3.2.2 Parâmetros do modelo

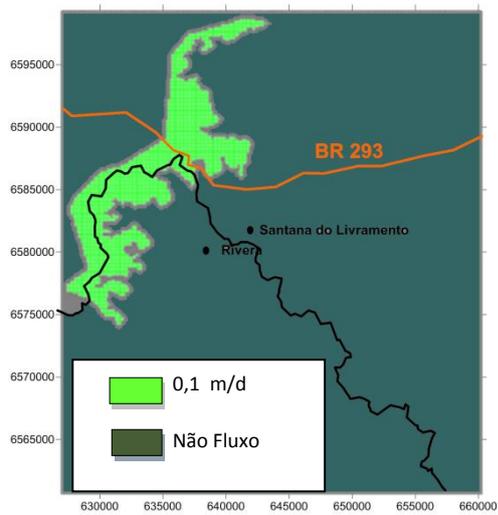
Na primeira formulação do modelo, as condutividades hidráulicas consideradas foram de acordo com cada camada e com os valores em metros por dia baseados na bibliografia:

Unidade Geológica	Condutividade hidráulica (m/d)	Função
Basalto	$K_h = 0,1$ $K_v = 1,0$	
Botucatu Superior	$K_h = 2,7$ $K_v = 0,27$	Aquífero principal
Botucatu Inferior	$K_h = 1,99$ $K_v = 0,199$	Aquífero
Rosário do Sul	$K_h = 1,0$ $K_v = 0,1$	Aquífero ruim
Rochas sedimentares do Plaeozóico	$K_h = 0,01$ $K_v = 0,001$	Aquitardo

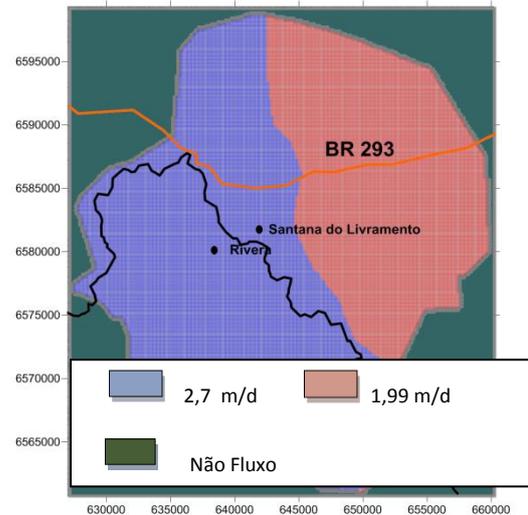
Figura 21: Parâmetro: Condutividade hidráulica.

As condutividades hidráulicas verticais na formulação do modelo foram assumidas como 10% do valor da condutividade hidráulica horizontal para as formações sedimentares, não considerando como importante o fluxo vertical entre as camadas geológicas, como costuma ocorrer em aquíferos livres. Na camada de basaltos a rocha geralmente apresenta menor condutividade horizontal, que nesta rocha ocorre em estruturas ou contatos entre derrames e maiores condutividades verticais que ocorrem devido às fissuras, levando a água precipitada da chuva rapidamente as camadas inferiores.

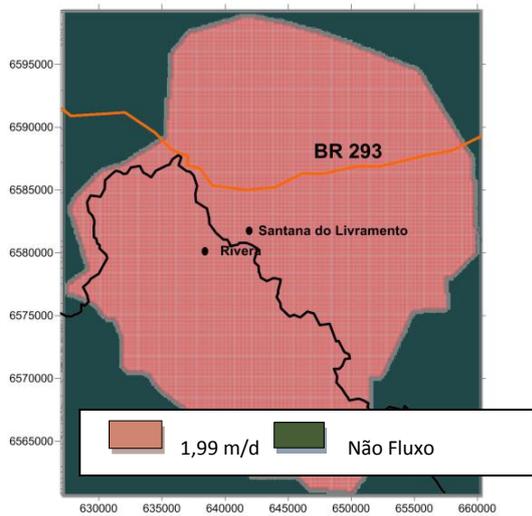
A figura 22 mostra as distribuições das zonas de condutividades hidráulicas e as camadas geológicas formuladas para o modelo:



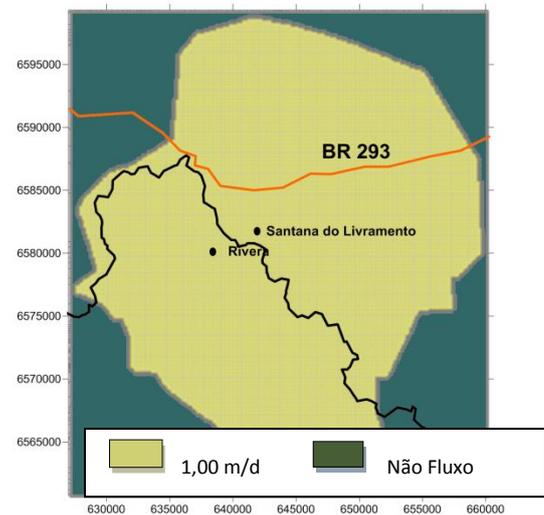
(a)



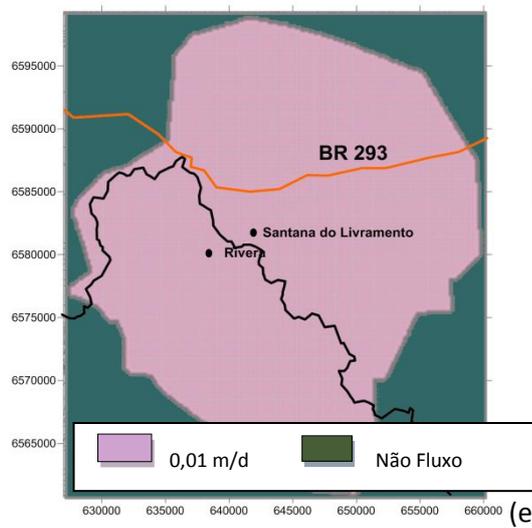
(b)



(d)



(c)



(e)

— Divisa Brasil-Uruguai

Figura 22: Condutividades Hidráulicas horizontais– Camadas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e).

Percebe-se na figura 22 (b) que a região aflorante da terceira formação teve suas propriedades hidrogeológicas mantidas na segunda camada, visto a dificuldade de excluí-la da modelagem numérica nesta camada. Para as condições de armazenamento, menos importantes que a condutividade hidráulica no regimento do modelo de fluxo, se considerou um armazenamento específico de 0,001 para os arenitos e 0,0001 para o basalto e uma porosidade de 0,1 para o basalto e 0,4 para os arenitos, todos valores retirados da biblioteca de dados *EnviroBrowser* versão 3.0 de janeiro de 2002, desenvolvido pela *Waterloo Hydrogeologic* e coincidentes com os modelos realizados por Gómez (2007), Charlesworth et al (2008).

Quanto à recarga na área, foram empregados os valores utilizados por Gómez (2007), que estimou a recarga na área em cerca de 140mm/ano para os arenitos e em cerca de 45mm/ano para a região dos basaltos, valores considerados razoáveis considerando uma taxa de recarga entre 3% e 8% da precipitação para os basaltos e entre 5% a 15% da precipitação para os arenitos. O Software *GroundwaterVistas 5* permite a colocação da recarga em camadas distintas da primeira, função que teve que ser utilizada devido a inatividade das células na camada 1 (hum) referente a área das regiões aflorantes das camadas 2 (dois) e 3 (três).

3.2.3 Condições de contorno

Nos modelos hidrogeológicos existem 3 tipos de condições de contorno:

- Carga constante: Onde é especificada uma carga constante em um nó do *grid* no contorno que não altera este valor na simulação.

- Fluxo constante: Onde é determinado um valor de fluxo no contorno que não se altera ao longo do processo da modelagem.

- Fluxo de carga dependente: Onde o fluxo é calculado em função da carga calculada do contorno.

Neste trabalho aparecem os dois primeiros tipos de condições de contorno.

Na camada 2, que representa a Formação Botucatu superior e que aflora em determinada parte da região do modelo, foram inseridas as seguintes condições de contorno:

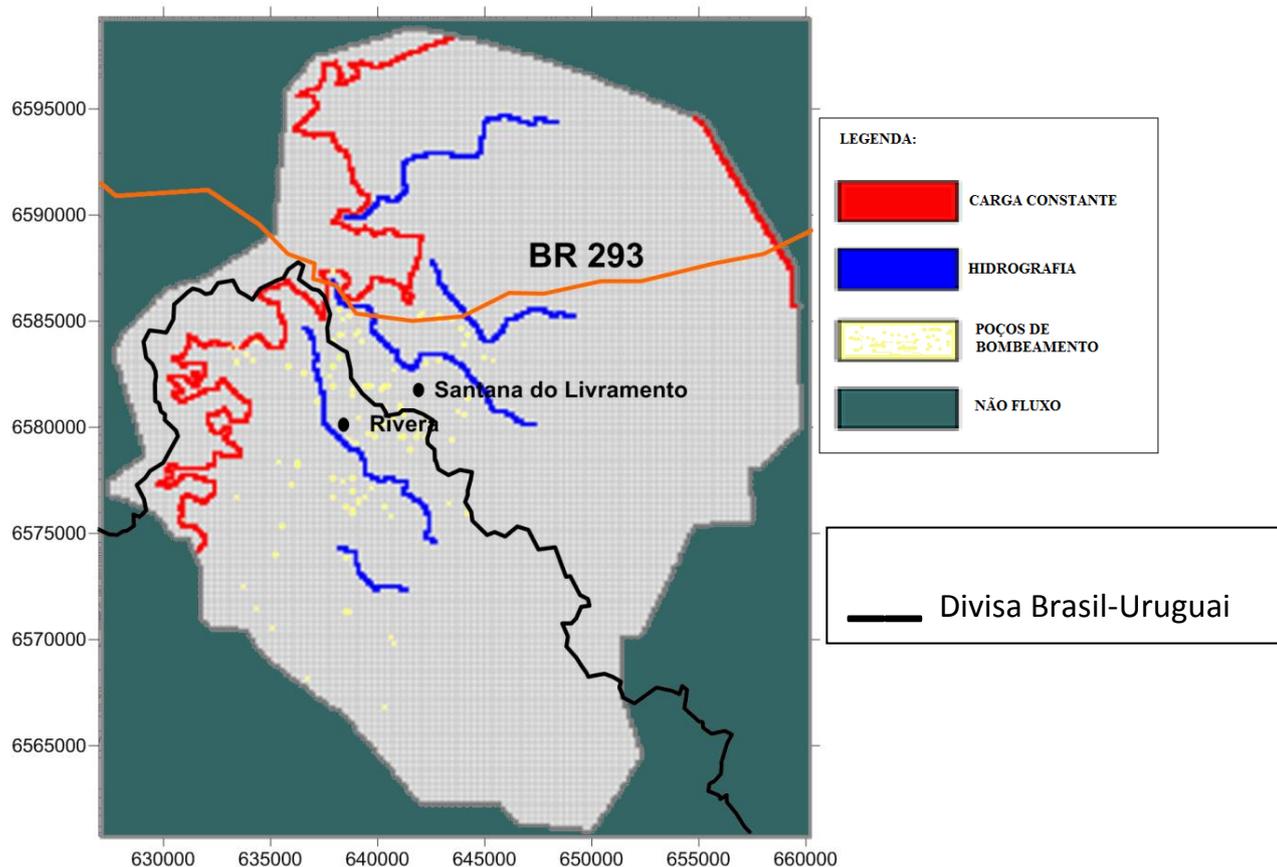


Figura 23: Condições de contorno – Camada 2.

Em azul, os cursos de água. Em amarelo os poços de bombeamento (ver anexos). Em vermelho, condições de contorno de carga constante. À esquerda, referente às escarpas na divisa entre os basaltos da Formação Serra geral e os arenitos da Formação Botucatu. Devido à fuga de água nas escarpas, foi considerado que toda a região de divisa entre as formações foi considerada carga constante, de magnitude igual ao valor obtido no modelo digital de elevação SRTM. Em vermelho, a direita, a ligação entre dois rios que serão considerados na camada 3 (três):

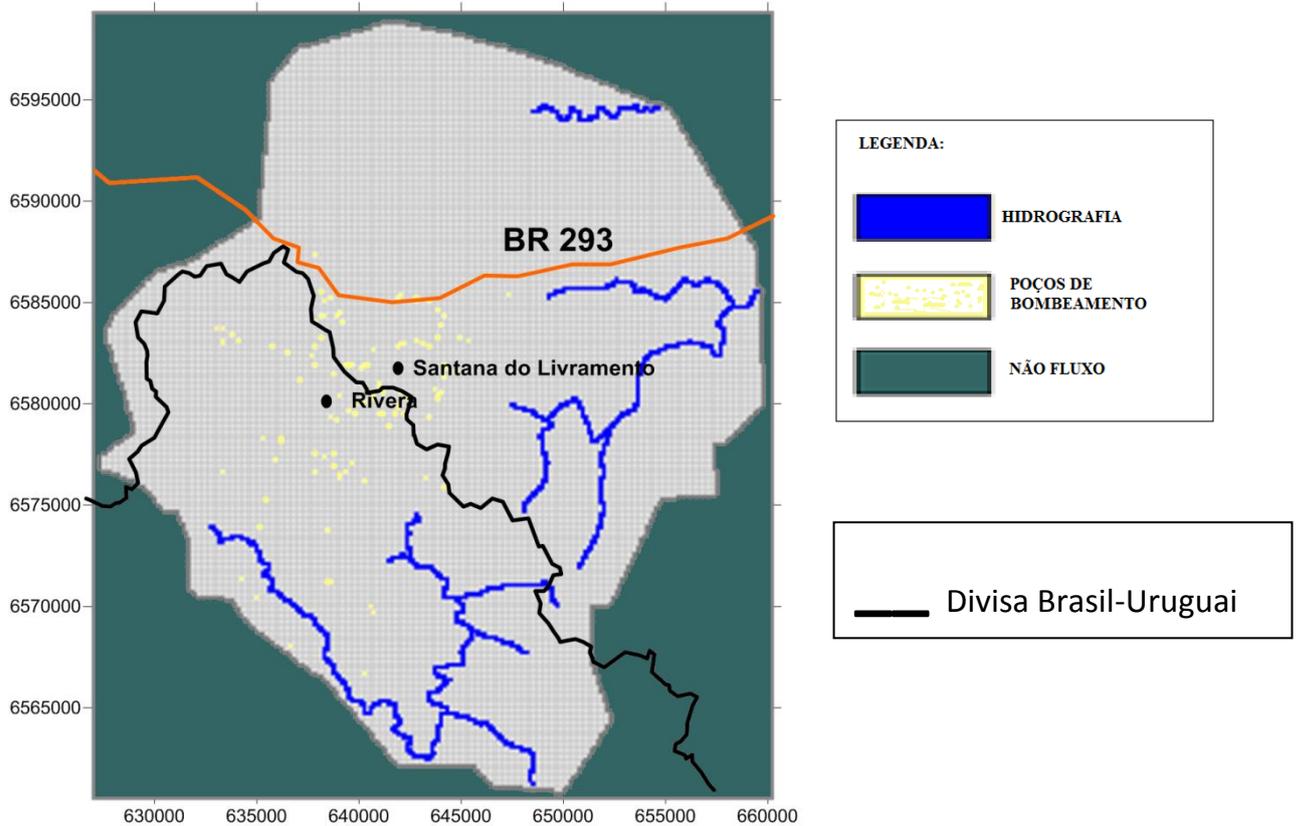


Figura 24: Condições de contorno – Camada 3.

Foram estabelecidas, também, condições de contorno de não fluxo (um caso particular de carga constante, onde a carga é zero) nas células externas do modelo.

Os valores dos parâmetros de condutância dos rios foram estabelecidas em $1\text{m}^2/\text{d}/\text{m}$ e considerou-se a profundidade dos cursos de água em 1m, uma vez que os cursos de água e arroios da região são pouco expressivos na maior parte do ano. Os valores de carga hidráulica foram retirados do modelo digital de elevação SRTM.

Os rios utilizados no modelo, aflorantes na região do arenito Botucatu superior são identificados no Uruguaí como: Del Farrapo, Curticeiras e Tacuarembó. Na parte superior do modelo é identificado o rio Cuñapiru.

Os poços de bombeamento utilizados neste modelo, que tiveram suas vazões computadas, foram obtidos pelo SIAGAS (Sistema de informações de águas subterrâneas) da CPRM.

3.2.4 Modelo de fluxo estocástico – Cenário atual

Para a continuidade do trabalho após a validação do modelo calibrado, a realização das simulações dos campos aleatórios de condutividade hidráulica é necessária para analisar a incerteza em relação a este parâmetro, função dos dados obtidos em campo. A figura 25 apresenta o histograma dos valores de K (condutividade hidráulica):

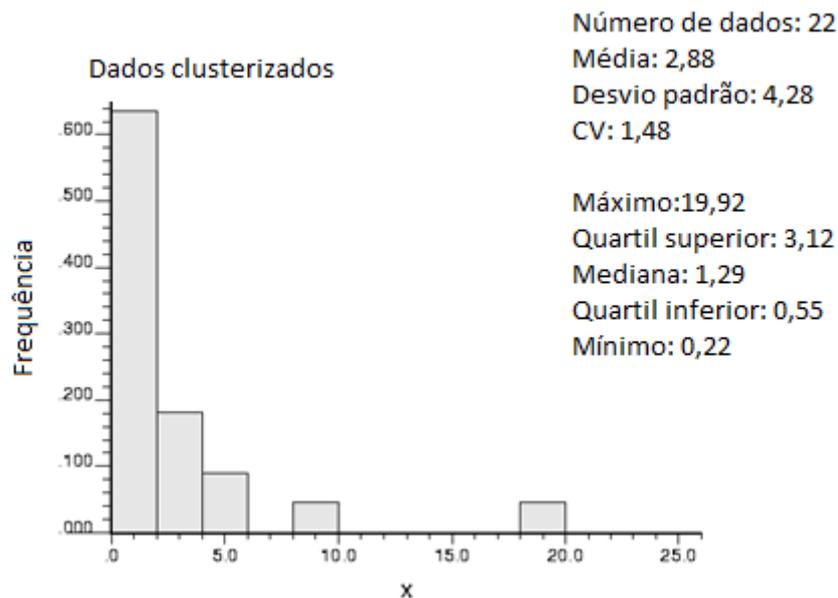


Figura 25: Histograma dados k.

Através da visualização do histograma da figura 25, utilizado no método de Monte Carlo como uma função distribuição de probabilidade (FDP), percebe-se que os dados assemelham-se a uma distribuição lognormal, e o logaritmo dos dados assemelham-se a distribuição normal, formando a seguinte distribuição:

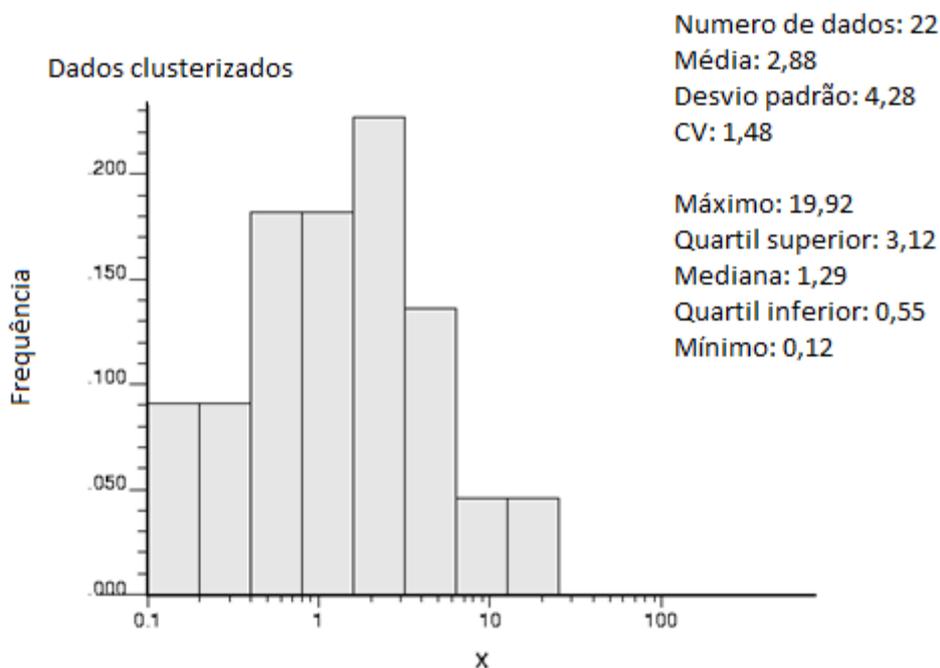


Figura 26: Histograma log-K.

Foram realizadas 100 simulações com diferentes condutividades hidráulicas, baseando-se no histograma dos dados de condutividade hidráulica obtidos na área do estudo, utilizando os seguintes parâmetros na simulação:

Média: 2,88

Mínimo: 0,12

Máximo: 19,92

Desvio padrão: 4,28

Distribuição: Lognormal

Foram simuladas as condutividades hidráulicas nas camadas referentes ao arenito da Formação Botucatu, por ser a camada mais permeável e utilizada na extração de água para o abastecimento da cidade de Santana do Livramento. Estas representam as camadas 2 (dois) e 3 (três) do modelo computacional.

Percebe-se que a média dos valores observados em campo de condutividade hidráulica aproximam-se dos valores utilizados pela bibliografia (2,77 m/d e 1,99 m/d) e pelo modelo calibrado (3,8m/d e 5,7m/d), lembrando, que estes valores são válidos para todo o domínio e a espacialização da condutividade hidráulica não foi considerada.

Outro fator a ser constatado é que o valor máximo da condutividade hidráulica esta bastante acima do quartil superior, podendo ser um erro de medição que poderia ser

retirado das simulações, considerado um *outlier*. Contudo, devido ao objetivo do estudo de diagnosticar o tamanho das incertezas em relação ao parâmetro de condutividade hidráulica, todos os valores foram utilizados, e quanto mais dispersos os valores de condutividade hidráulica, maior a quantidade de incertezas em relação ao fenômeno estudado, no caso, a distribuição de cargas hidráulicas.

3.2.5 Modelo estocástico advectivo de trajetória de partículas – Cenário do Bairro do Registro

Como explicitado no capítulo 3 (três), o Bairro do Registro é um setor viável para a locação de poços devido à baixa vulnerabilidade do aquífero na região. Por isso, foi realizada a projeção de um novo cenário, diferente do modelo executado até aqui, com o objetivo de analisar o efeito da relocação de todos os poços existentes na cidade de Santana do Livramento para o Bairro do Registro.

Para a simulação de captura de partículas pelos poços instalados neste Bairro do Registro, foi simulado um cenário com quatro poços no bairro de vazões somadas equivalentes a de todos os poços cadastrados na cidade atualmente e foram contabilizados 7300 dias, referentes a 20 anos de trajetória das partículas e um outro cenário, foi considerado o tempo de 100.000 dias, que equivale a um período de mais de 270 anos, na tentativa de analisar a vulnerabilidade dos poços nesta região através da utilização de um modelo estocástico de transporte (advectivo). Foi estipulado no cenário de 20 anos um aumento de 30% no consumo para este período e representado por 4 (quatro) poços nesta região e em segundo foi feita a análise dos efeitos da relocação dos poços no fluxo das águas subterrâneas na região. Posteriormente foi utilizado o modelo *MODPATH* de propagação de contaminantes, conjuntamente com a técnica de simulação estocástica, para delimitar os perímetros de proteção de poços. A simplificação da distribuição da vazões dos poços em apenas 4 poços teve como objetivo facilitar seu uso computacional, não representando uma situação real, visto que estes 4 poços não conseguiriam atingir vazões tão altas.

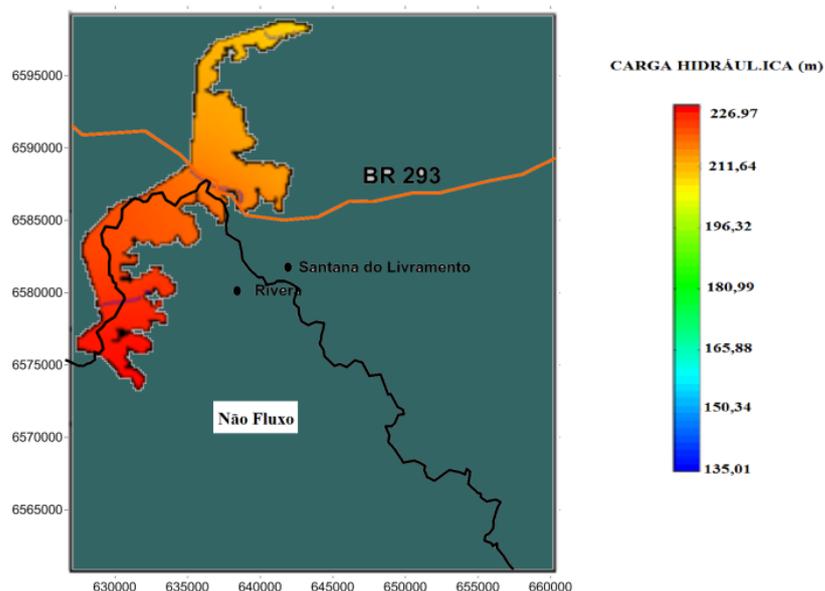
4 DISCUSSÃO E RESULTADOS

4.1 Calibração do modelo de fluxo determinístico – Cenário atual

O modelo em regime permanente foi executado e se obteve a calibração do modelo através da metodologia de tentativa e erro, comparando as cargas hidráulicas simuladas com as observadas. Foram realizadas simulações do modelo de fluxo com diferentes valores de parâmetros, sobretudo de condutividade hidráulica e recarga nas camadas 2 (dois) e 3 (três), referentes ao arenito da Formação Botucatu superior e inferior. Utilizou-se o algoritmo de calibração automática PEST, acoplado junto à grande maioria de programas de simulações hidrogeológicas.

A calibração que resultou no menor erro entre os valores calculados e observados, utilizou uma condutividade hidráulica nas camadas dos Aquíferos Botucatu superior e inferior de 3,8m/d e 5,7m/d, respectivamente, um pouco acima dos valores iniciais de 2,77m/d e 1,99m/d.

A figura 27 mostra os valores do resultado das cargas hidráulicas (em metros) do modelo calibrado:



(a)

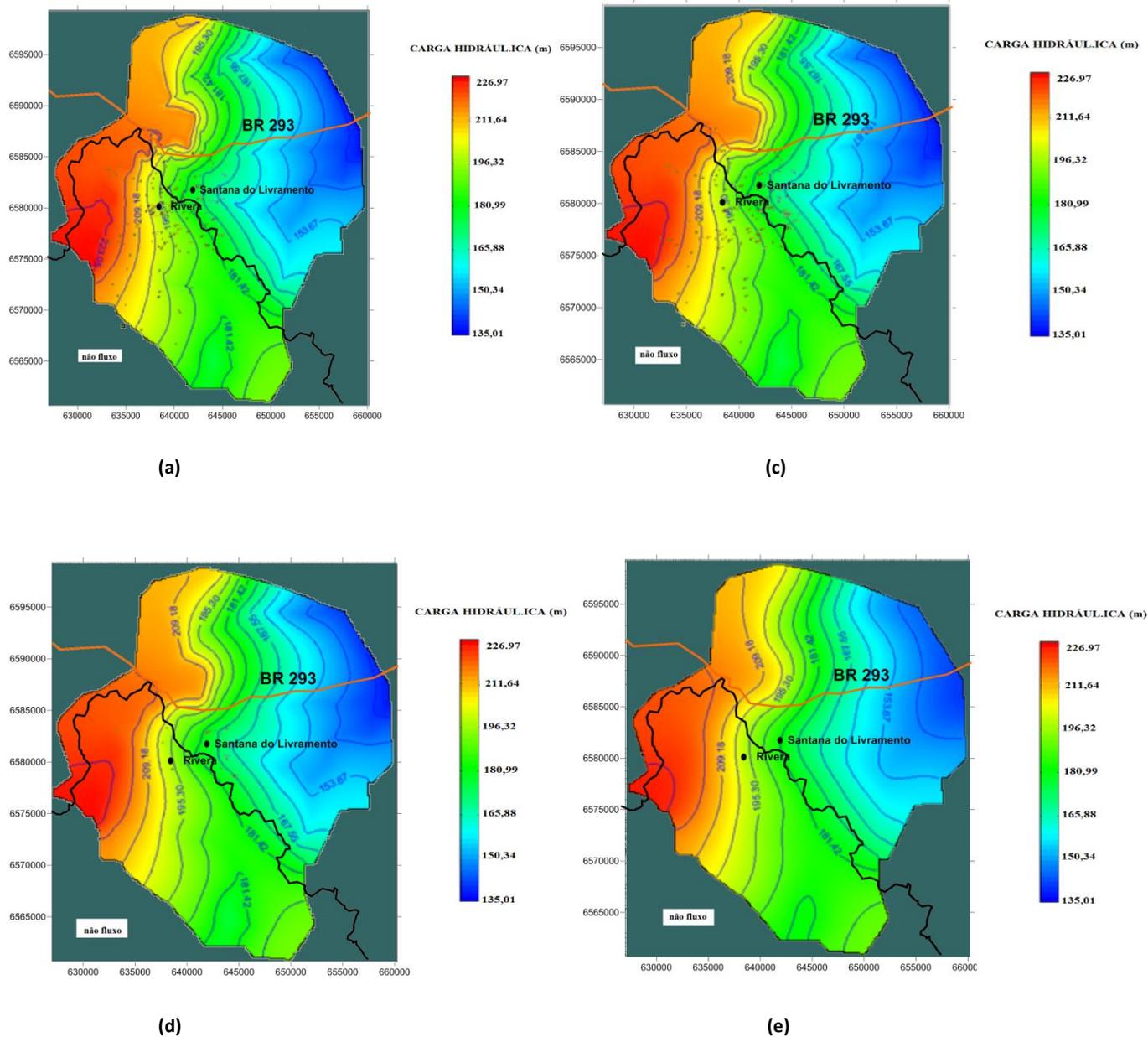


Figura 27: Camadas 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e).

Como esperado, as camadas 2 (dois), 3 (três) e 4 (quatro) possuem cargas hidráulicas similares, já que possuem características hidrogeológicas semelhantes e encontram-se completamente saturados. O pequeno fluxo vertical entre as camadas dos arenitos resulta em uma pequena, praticamente nula, diferença de carga hidráulica entre as camadas de arenito, como pode ser visualizado na comparação das cargas hidráulicas das camadas na figura 27 (b), 27 (c) e 27 (d). A primeira e última camada, por possuírem alta e baixa condutividade hidráulica vertical, respectivamente, em comparação com as camadas de arenito, apresentam diferenciados valores de carga hidráulica, acarretando em fluxo vertical.

Fica claro entre as camadas a tendência de fluxo na direção oeste-leste e o fluxo partindo da região dos basaltos da Serra Geral, aonde o aquífero se encontra sob pressão, em direção aos arenitos. Existe também, na zona arenosa, um divisor de águas subterrâneas, que divide o fluxo parte para região nordeste e parte para a região sudeste. Pode-se notar também a tendência de aumento de rebaixamento na zona próxima a região urbana de Santana do Livramento e Rivera, onde está localizada a grande maioria dos poços de bombeamento, exceção a última camada, que possui baixa condutividade hidráulica e conseqüentemente não é tão afetada pelos poços de bombeamento.

A comparação entre os valores observados nos poços de observação (anexo 2) e calculados aproximam-se da reta $y = x$, comprovando a acurácia do modelo, ou seja, a proximidade da medida relativamente ao verdadeiro valor da variável. A figura 28 ilustra a relação dos valores observados e calculados pelo modelo:

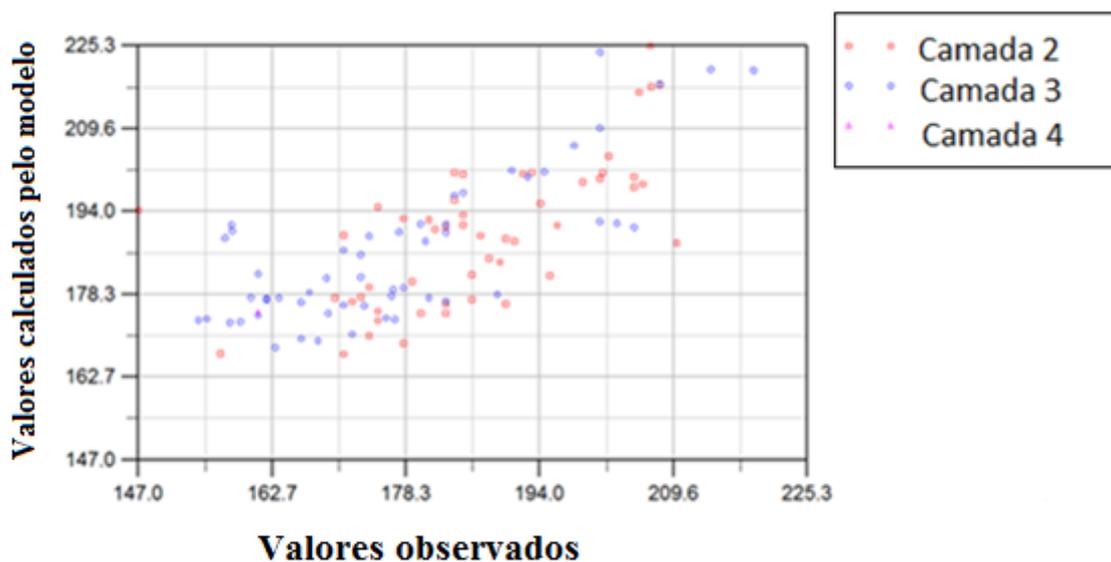


Figura 28: Valores observados VS calculados de carga hidráulica.

O quadrado do somatório dos erros entre os valores observados e calculados gera o SSR (*Sum Square Residuals*). Outra medida usada para avaliar a qualidade dos resultados obtidos no modelo é a raiz quadrada do SSR. Quanto menor for o valor do SSR, mais perto os valores calculados de carga hidráulica chegaram dos valores observados:

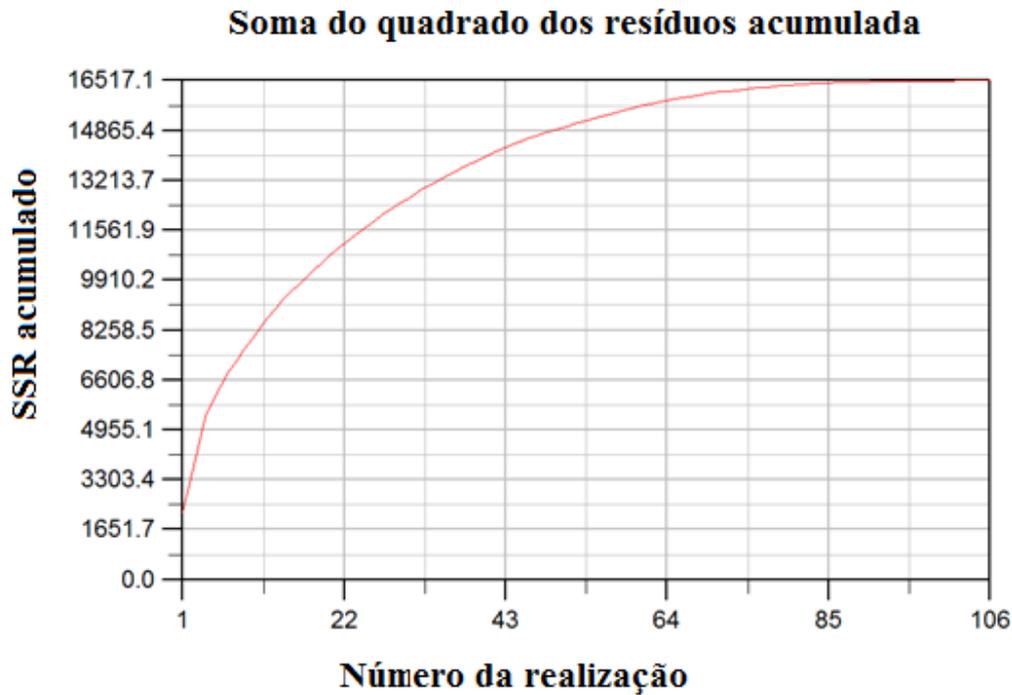


Figura 29: Soma dos quadrados dos resíduos entre valores observados e calculados pelo modelo acumulado.

Outra forma de validar o modelo é a comparação entre os valores observados e os resíduos. Este gráfico nos mostra se existe alguma tendência de, por exemplo, os valores estimados mais altos terem maior erro que os menores valores. Quanto mais simétrico este gráfico, menos tendenciosa é a estimativa. Percebe-se pela figura 30 que os dados possuem baixa tendenciosidade, sendo os resíduos praticamente nas mesmas magnitudes nos valores mais altos quanto nos valores mais baixos.

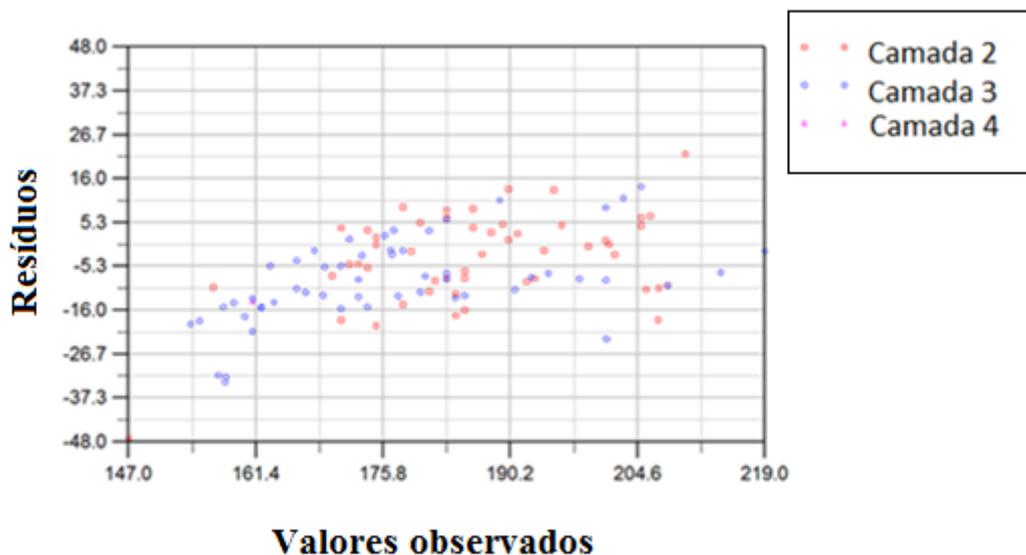


Figura 30: Valores observados VS resíduos.

A tabela 4 apresenta um sumário estatístico do modelo calibrado:

Média dos Resíduos	-6,15
Desvio padrão dos Resíduos	10,86
Soma dos quadrados dos Resíduos	1,65 e+ 004
RMS	12,48
Resíduo Mínimo	-47,15
Resíduo Máximo	21,95
Alcance das observações	72
Desvio padrão normalizado	0,151
Média absoluta normalizada	0,137
RMS normalizado	0,173

Observa-se através do sumário estatístico que os resíduos gerados possuem baixa média, comprovando a proximidade dos valores calculados pelo modelo e os observados em campo. O RMS (*Root Mean Square*) é a raiz quadrada da média dos valores e é um dos principais indicativos da qualidade do modelo. Quanto mais baixo o RMS, mais o valor calculado pelo modelo se aproximou do observado nos poços de observação. Considera-se baixo o valor encontrado, sendo considerada satisfatória uma correlação acima de 0,7 entre os dados observados e os valores calculados no modelo, apresentando em média um erro inferior a 10% em relação aos dados observados e calculados.

O balanço de massa do modelo, aonde C.H (*Constant head* ou carga constante), Riv (*river* ou rios), Rch (*Recharge* ou Recarga), e well são os poços de bombeamento, é apresentado na figura 31:

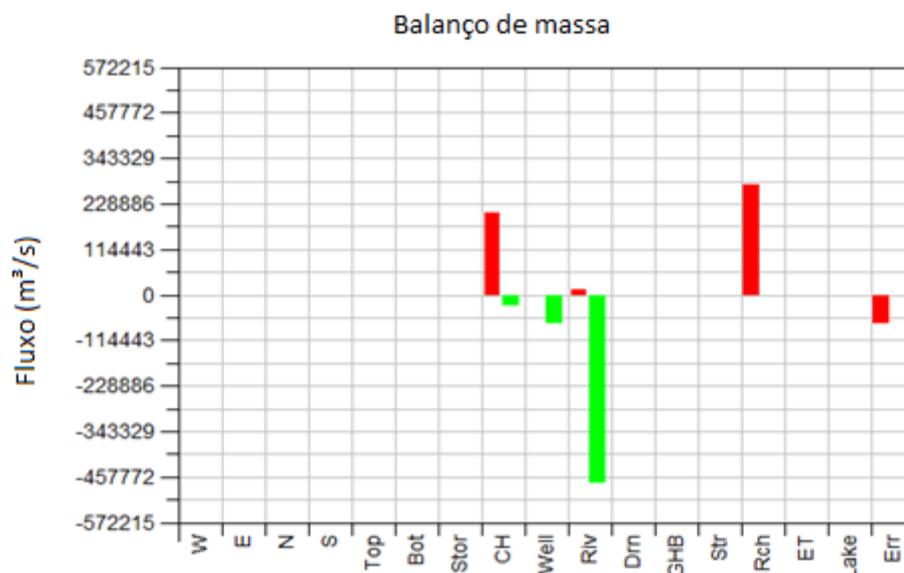


Figura 31: Balanço de massa.

O balanço de massa comprova que as maiores descargas de água ocorreram nos córregos e cursos de água e as recargas ficaram no encargo da precipitação e das cargas constantes, como a figura 32 mostra de forma quantitativa:

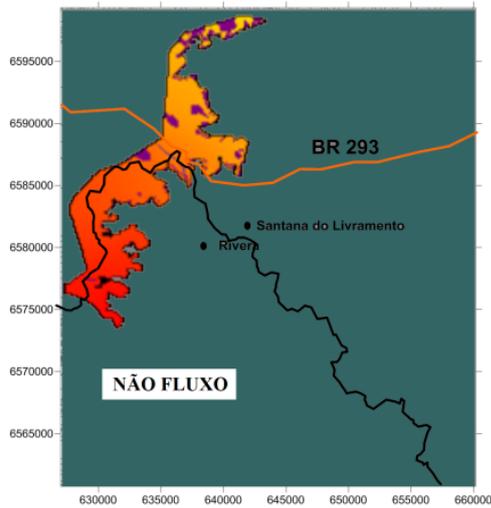
	ENTRADAS(m³/s)	SAÍDAS (m³/s)
Poços	0	72494
Carga constante	206975	26906
Rios	14726	472814
Recarga	277995	0
Total	499696	572214
Erro percentual	13,5%	

Figura 32: Balanço de massa.

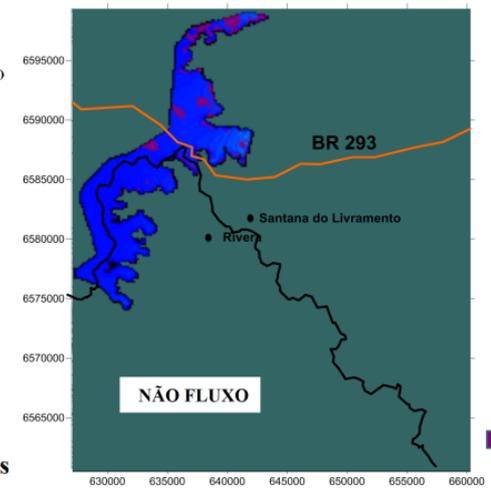
4.2 Modelo estocástico de fluxo – Cenário atual

Após a calibração do modelo, teve-se início o processo de simulação estocástica. Foram simulados, partindo do modelo calibrado, campos aleatórios de condutividade hidráulica, gerando um modelo de saída para cada condutividade hidráulica testada aleatoriamente através do algoritmo de Monte Carlo (MC).

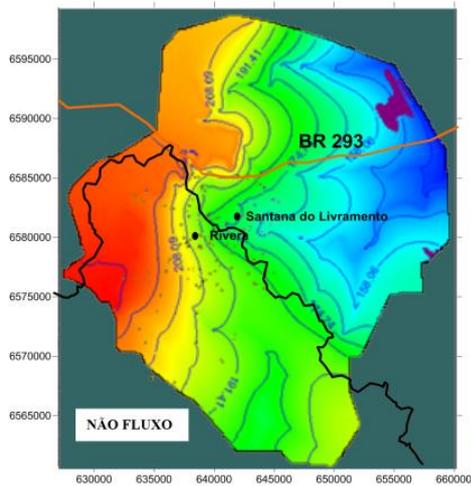
São apresentados na figura 33 a média e os desvios padrões das 100 simulações das diferentes camadas:



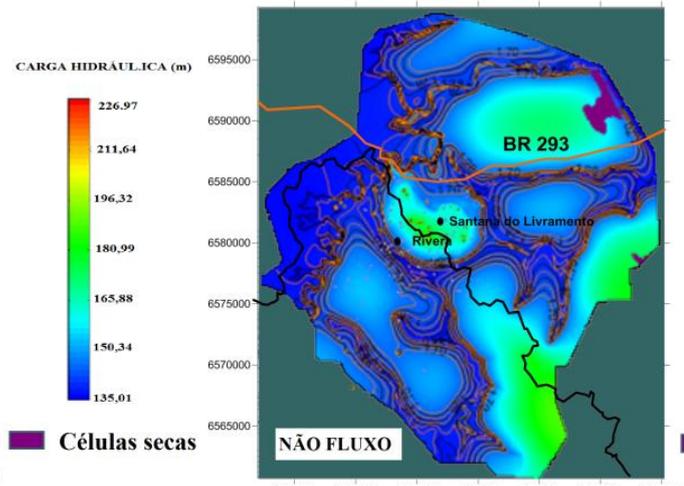
(a)



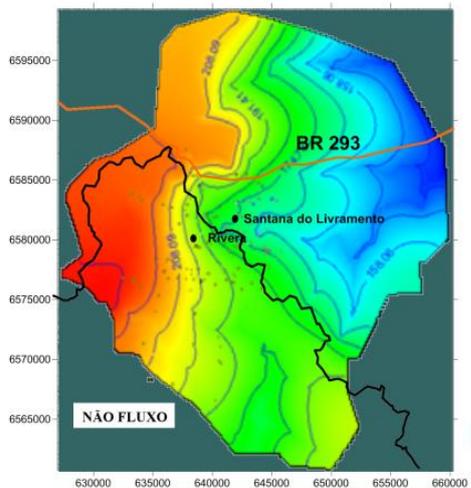
(b)



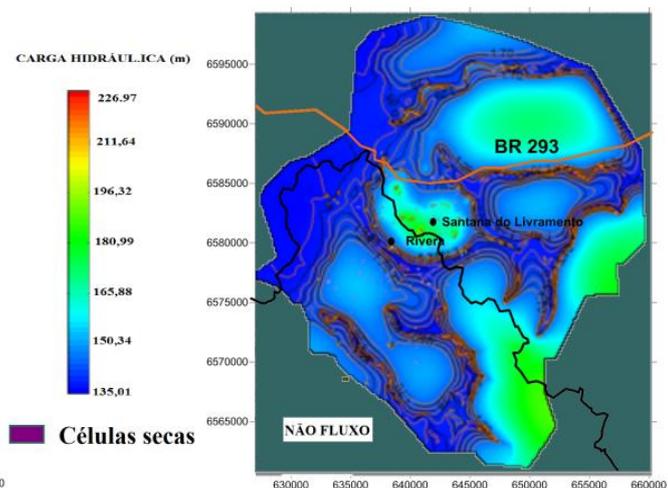
(c)



(d)



(e)



(f)

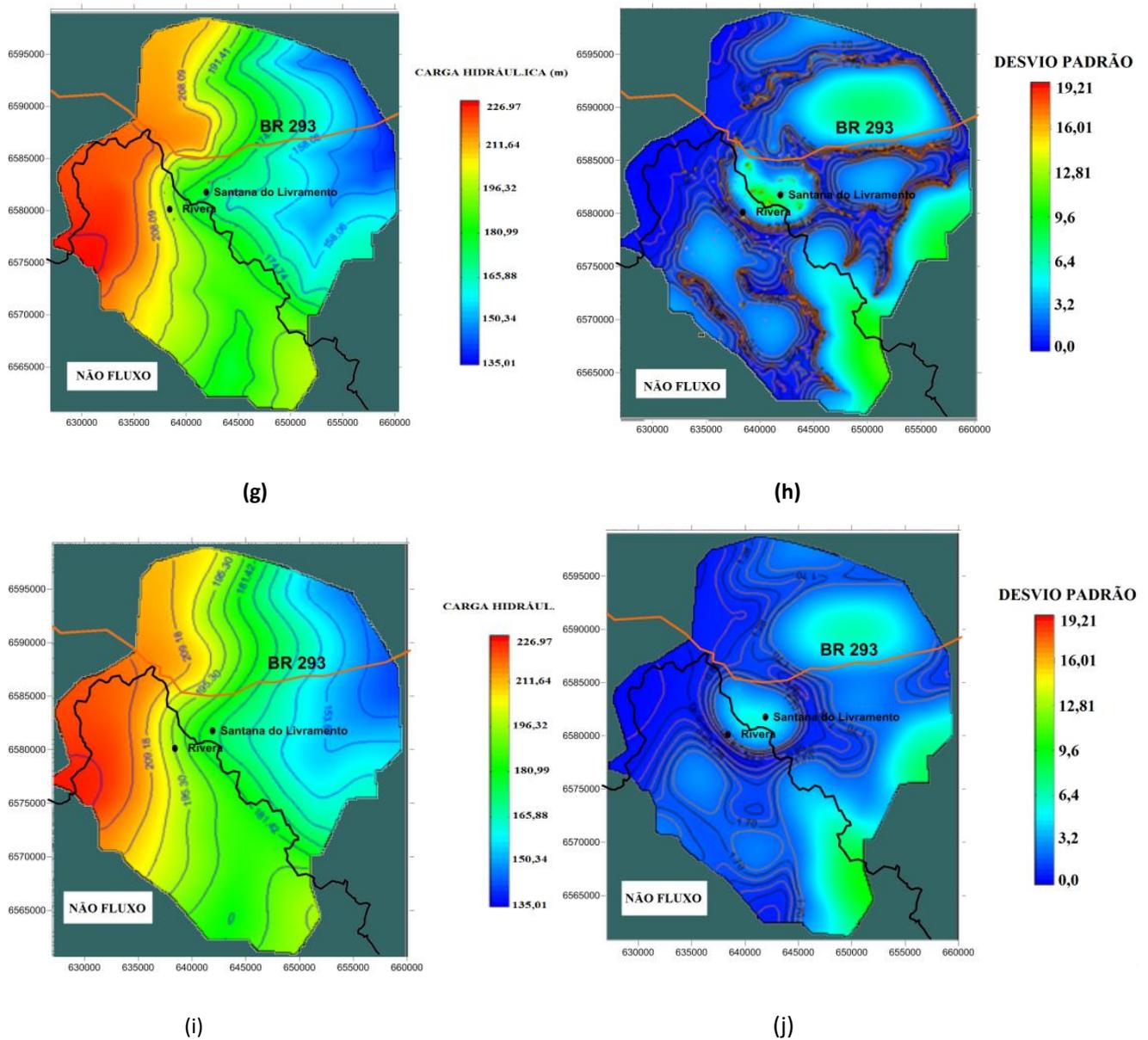


Figura 33: Média e desvio padrão camada 1(a) e (b), camada 2 (c) e (d), camada 3 (e) e (f), camada 4 (g) e (h), camada 5 (i) e (j) : 100 simulações.

Percebe-se através das simulações, que a média das 100 simulações aproxima-se aos valores encontrados no modelo determinístico calibrado, sendo, porém, mais perceptível o rebaixamento do lençol freático na região urbana próxima a Santana do Livramento e Rivera. A condutividade hidráulica assumida no modelo determinístico pode como resultado ter subestimado o cone de depressão formado devido aos poços de bombeamento, visto que, na média das simulações, o cone é maior que o encontrado no modelo determinístico. Em contrapartida, os desvios padrões das simulações, isto é, as diferenças encontradas para cada nó de *grid* em cada uma das simulações é maior na

região dos poços de bombeamento, que se localizam na zona urbana, indicando que existe uma maior incerteza quanto às cargas hidráulicas nesta região. Outra região notadamente afetada, com maior desvio padrão e conseqüentemente maiores incertezas, são as zonas dos córregos. Outro fator, não presente no modelo determinístico, foi à existência de células secas, que nos submete a idéia do modelo determinístico ter superestimado levemente os valores de cargas hidráulicas.

Através do resultado da média das 100 simulações do cenário atual, em comparação com o modelo determinístico, os resultados foram semelhantes, dando maior confiabilidade aos parâmetros escolhidos na elaboração do modelo determinístico.

Algumas das 100 simulações são apresentadas nas figuras 34 e 35:

CAMADA 2

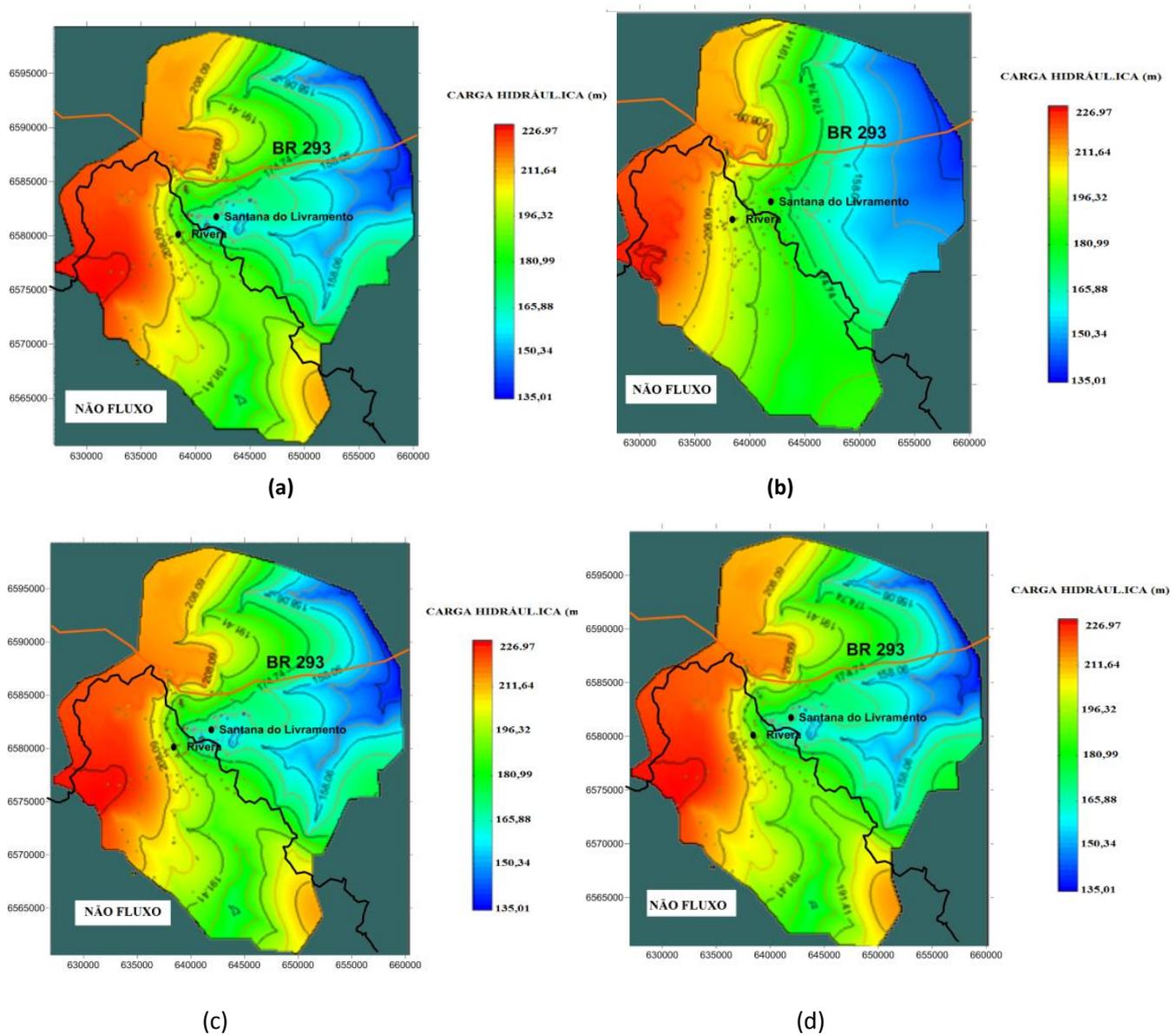


Figura 34: camada 2 - Realização 1 (a), 28 (b), 69 (c) e 99 (d).

CAMADA 5:

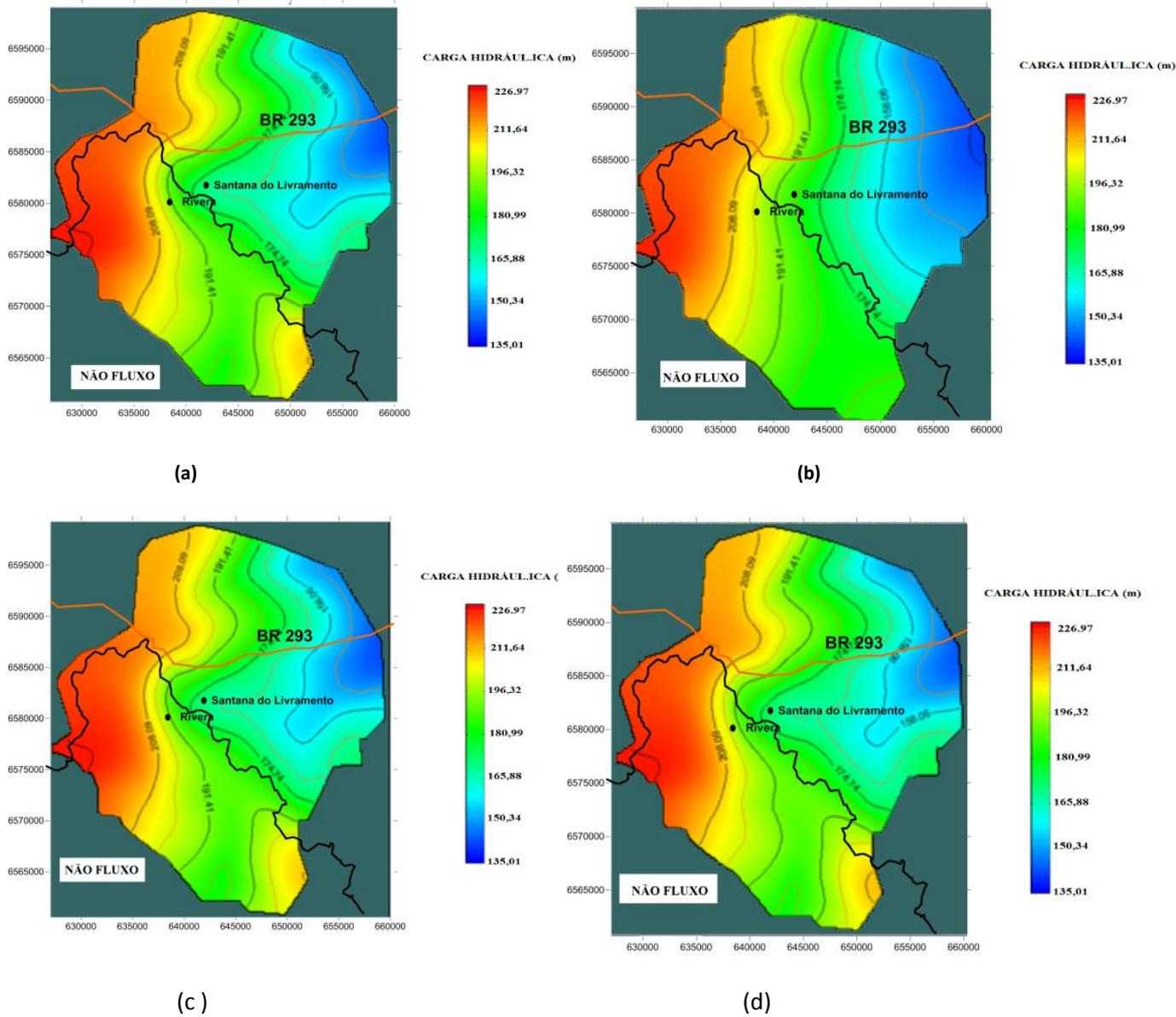


Figura 35: camada 5 - Realização 1(a), 28 (b), 69 (c) e 99 (d).

As simulações apresentadas acima comprovam como a condutividade hidráulica pode alterar o valor das cargas hidráulicas de forma significativa, alterando, sobretudo, levemente a direção do fluxo em pequenas regiões, como, por exemplo, a comparação das realizações 1 (um) e 28 (vinte e oito) (figuras 34 e 35). Para a precisão de um modelo de fluxo, a metodologia determinística pode ser suficiente, mas a confirmação do quanto o modelo é afetado pela condutividade hidráulica, que discutidamente na bibliografia juntamente com as condições de contorno são os principais parâmetros que regem o fluxo, só pode ser realizada através de um modelo estocástico.

Outra vantagem da abordagem estocástica é a não dependência da calibração do modelo, que pressupõe que os dados observados são confiáveis, o que não necessariamente é verdade, visto os erros nas medições de níveis de água e até mesmo medições em estações diferentes do ano sendo analisadas conjuntamente. A abordagem estocástica nos dá, portanto, uma dimensão da incerteza em relação ao resultado, sendo maior a incerteza, quanto mais duvidosos são os dados.

4.2.1 Validação das simulações estocásticas– Cenário atual

Os gráficos das figuras 36 e 37 mostram a validação das simulações estocásticas. O primeiro gráfico apresenta a média dos resíduos de cada simulação. Entende-se por resíduo a diferença entre os valores calculados e observados de carga hidráulica. A média dos resíduos ficaram aproximadamente entre -8 (oito) e -3 (três). Este primeiro gráfico serve para “eliminar” alguma simulação que pudesse por algum motivo ter tido um valor dito “outlier”, ou seja, fora do tolerável, o que não ocorre.

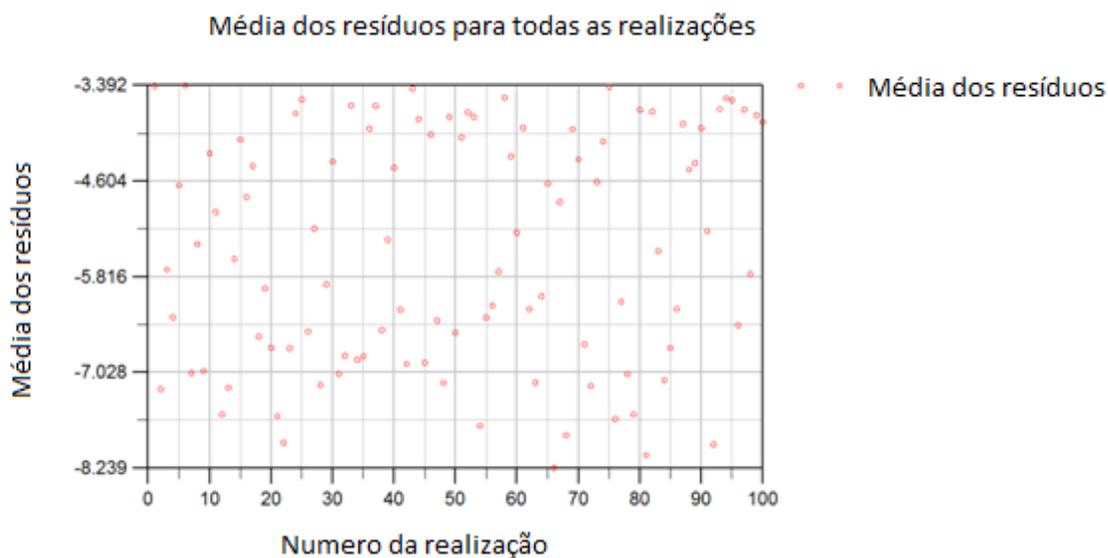


Figura 36: Média dos resíduos (erro) das simulações.

A figura 37 apresenta a média dos resíduos acumuladas em cada realização. Este gráfico demonstra a tendência de estabilização da média dos resíduos ao longo das simulações, comprovando que o número de 100 simulações é o suficiente para a análise estocástica deste modelo. Caso a média dos resíduos permanecesse oscilando, mais realizações seriam necessárias de forma a encontrar uma média das simulações significativas e que represente o fenômeno estudado. Em outras palavras, quanto maior a

incerteza em relação aos parâmetros analisados, mais simulações são necessárias para dimensionar as incertezas do modelo.

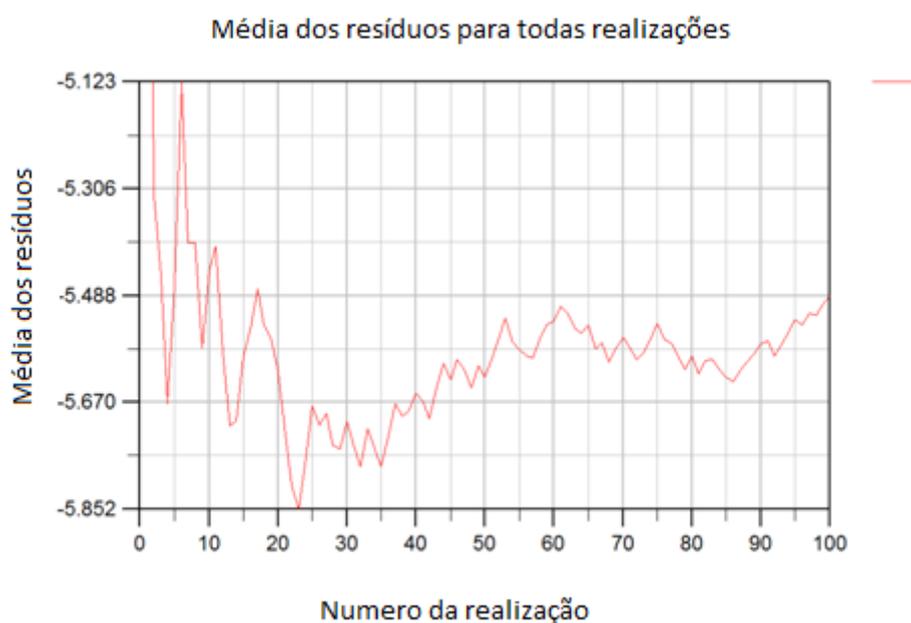


Figura 37: Média dos resíduos (erro) acumulado.

4.3 Comparação com modelos anteriores – Cenário atual

Um dos objetivos desta pesquisa é a comparação com modelos determinísticos realizados na região. Foi selecionado o modelo de Charlesworth et al., (2008). A forma de comparação, pelo acesso a informação dos modelos anteriores, baseia-se na inspeção visual das cargas hidráulicas e direção do fluxo e do sumário estatístico da distribuição das cargas hidráulicas e sua comparação com os poços de observação. A Comparação com os valores observados não é definitiva, visto que um dos principais benefícios da simulação estocástica é exatamente delimitar uma faixa de valores prováveis do resultado devido à incerteza nos parâmetros dos quais é função, e a incorporação dos valores observados neste caso não incorpora a incerteza na medição dos poços de observação. Outro fator, é que mesmo o modelo tendo sido realizado em modelo permanente e assumida a hipótese de baixa variabilidade sazonal, não se tem informações de que épocas do ano foram realizadas as observações, sendo mais uma fonte de erro. Portanto, as figuras 38-39, todas equiprováveis pela análise bruta da quantidade de informações disponíveis (não é completamente equiprovável, pois alguns valores estão sujeitos a

interpretação, e a experiência do executor pode descartar alguns valores, baseado em conhecimentos práticos, mas que não tem relação nenhuma com a formulação matemática da construção de um modelo), mostram a camada mais permeável do Aquífero Guarani, pertencente a formação geológica do Arenito Botucatu, nos modelos anteriormente realizados, comparando com o modelo determinístico realizado, no mesmo sistema de coordenadas que o modelo de Charlesworth et al.,(2008), a média das simulações, e algumas simulações equiprováveis:

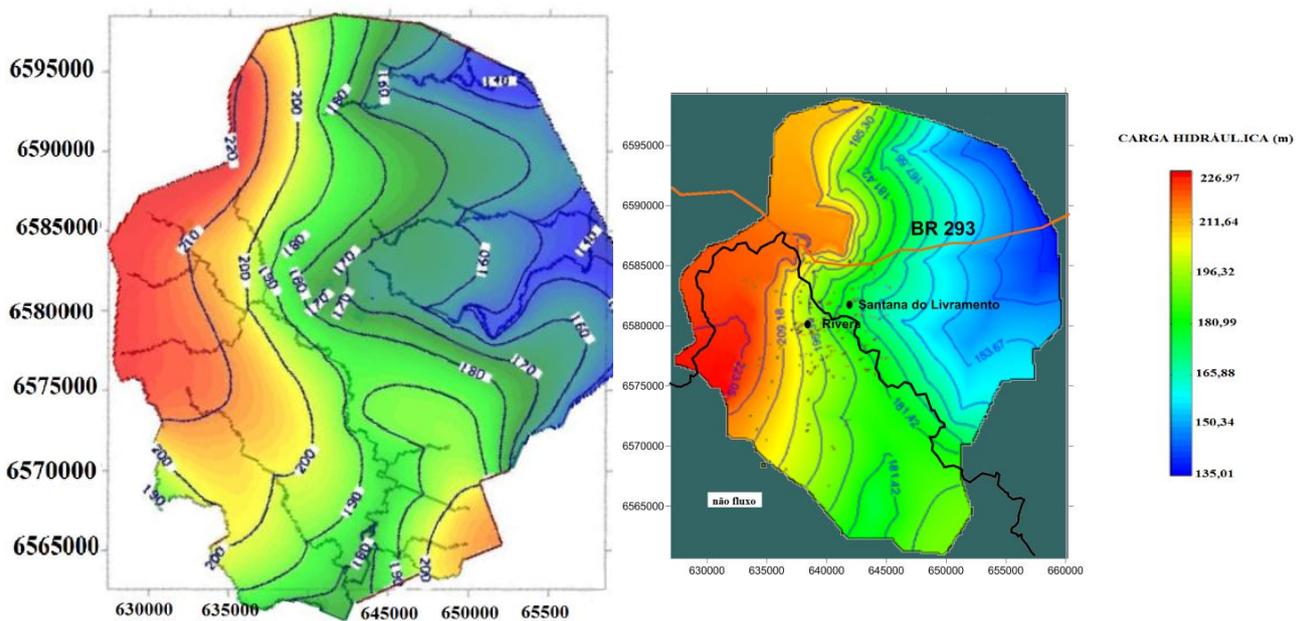
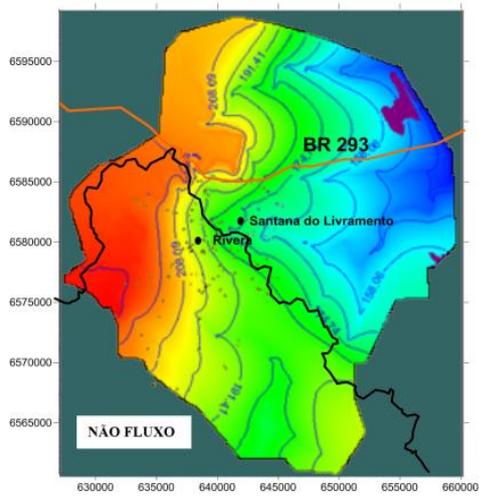
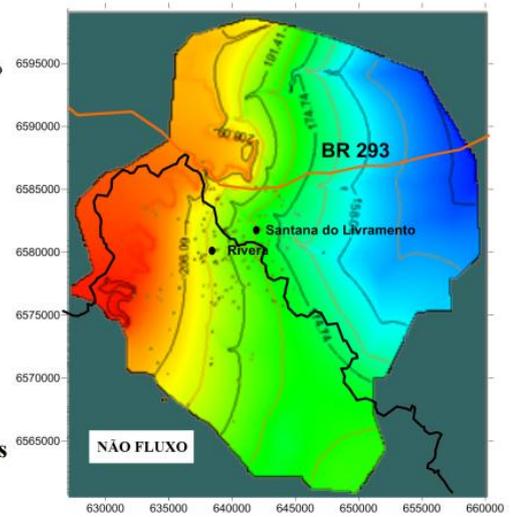
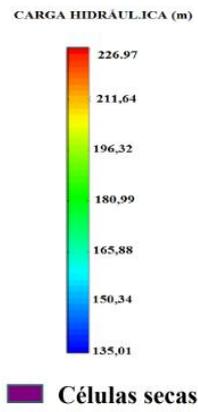


Figura 38: Distribuições de cargas hidráulicas modelo Botucatu (a) Charlesworth et al., (2008), (b) modelo determinístico calibrado.

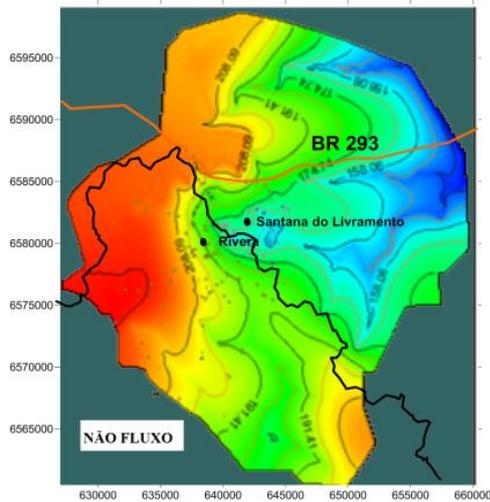
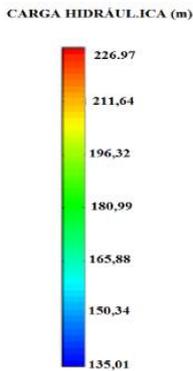
CAMADA 2:



(a)



(b)



(c)

Figura 39: Cargas hidráulicas correspondentes a média das 100 simulações de fluxo (a)realização 28 (b) e 99 (c), respectivamente.

COMPARAÇÃO	Modelo Calibrado	Média 100 Simulações	Charlesworth (2008)
Média dos Resíduos	-6,15	-5.488	-2,449
Desvio padrão dos Resíduos	10,86	12,1	7,51
RMS error	12,48	9,31	7,86
Coeficiente de correlação linear	0,73	0,81	0,878

Percebe-se pelas figuras 38-39 que o modelo determinístico ficou muito próximo do modelo construído por Charlesworth et al., (2008), e que a média das 100 simulações estocásticas se aproximaram deste modelo, indicando ter maior probabilidade destes modelos estarem próximos da “realidade”. Ainda assim, o processo de simulação é mais benéfico, por ter a possibilidade de apresentar probabilidades de excedência e não excedência de determinados valores arbitrários de carga hidráulica, o que geralmente é o mais importante em um modelo de gestão. Qual a probabilidade da vazão em determinado poço superar um limite imposto?

Devido às gerações aleatórias de valores de condutividade hidráulica, o resultado do modelo, apresentado como distribuição espacial de cargas hidráulicas é, também, uma realização aleatória, podendo gerar resultados não adequados e completamente diferentes, como a realização 28 (figura 39(b)) que subestima o cone de depressão e a realização 99 (Figura 39(c)) que superestima o cone de depressão. Provavelmente estas simulações utilizaram valores de condutividade alta e baixa, respectivamente, que é inversamente proporcional a carga hidráulica. Isto chama a atenção para dois fatores: Primeiramente, pequenos erros na escolha da condutividade hidráulica em modelos determinísticos podem causar resultados desastrosos. Segundo, a realização de simulações nos dá maior segurança no modelo construído. Marquezan (2008) já havia concluído em seu trabalho que: “A realização de simulações, melhoram o modelo calibrado”, no sentido de “dar maior confiabilidade nos resultados”.

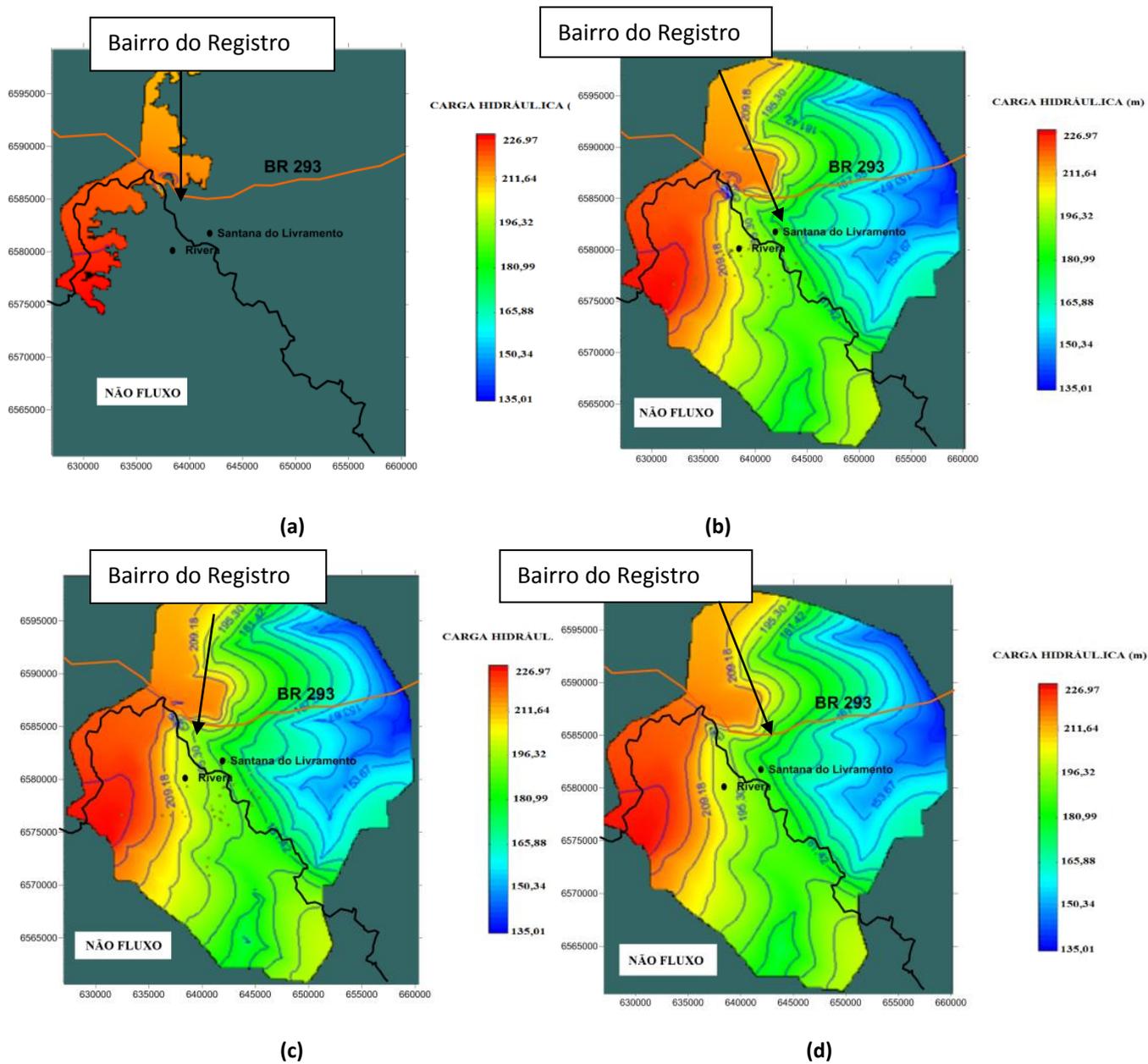
4.4 Perímetro de proteção de poços – Cenário Bairro do Registro modelo determinístico

Este item tem como objetivo apresentar um uso prático das simulações, utilizando modelos de transporte (advecção) na delimitação de perímetro de proteção de poços.

Um cenário foi simulado, aonde foi estipulado um aumento de consumo de 30% para a cidade de Santana do Livramento nos próximos 20 anos. Este aumento significa um incremento dos 72854.081m³/d estimados atualmente pelo DAE – Departamento de Água e Esgoto – de Santana do Livramento, para 94710.3053m³/d.

Cada um dos poços cadastrados pelo DAE tem em média uma vazão de 42m³/h, que equivale a 1009 m³/d. Para atingir o consumo em 20 anos, seriam necessários cerca de 94 (noventa e quatro) poços. A idéia do trabalho é substituir os poços existentes na

cidade, que se encontram em sua maioria no centro urbano, em zonas de vulnerabilidade do aquífero, por poços no Bairro Registro, mais distante da cidade e menos vulnerável a contaminações. Para tal, foram simulados 4 poços de vazão aproximada de 22500m³/d, praticamente equivalente a 94 poços de 1009m³/d, para fins de facilitar o processo de modelagem. Os demais parâmetros do modelo não sofreram nenhuma alteração. O resultado do modelo é apresentado na figura 40:



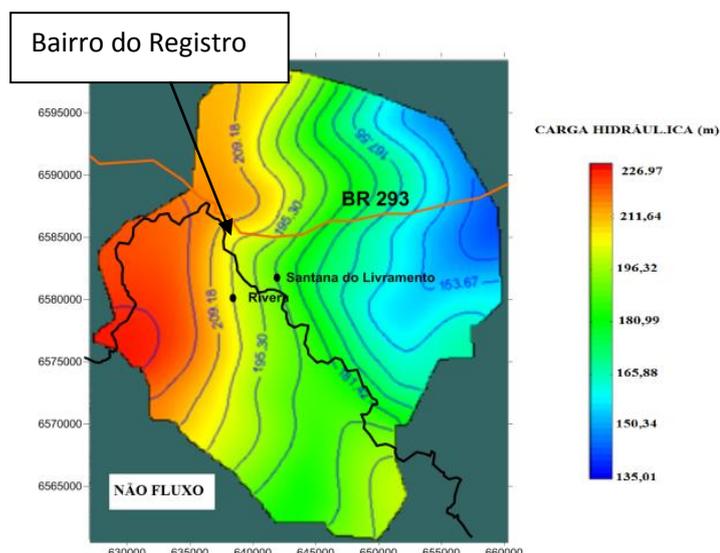


Figura 40: Camada 1(a), 2(b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e) – poços Bairro Registro.

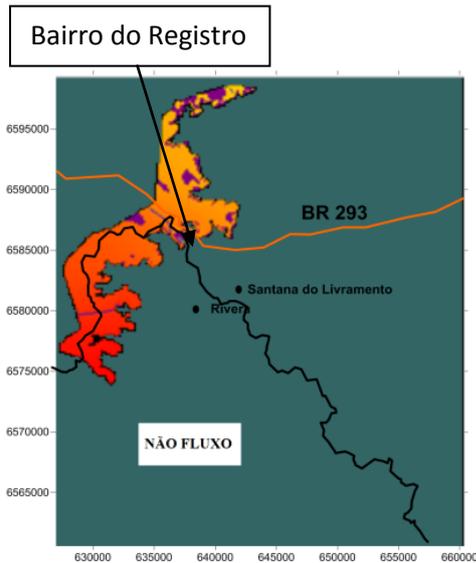
Para o cenário do Bairro Registro, a calibração do modelo perde sua referência, visto que o novo cenário de poços simula uma situação diferente na qual foram realizadas as medidas dos poços de observação, contudo, serão comparados os valores calculados e observados neste novo cenário, para fins de comparação com o cenário anterior (situação atual), ou seja, a diferença entre os erros é uma medida na mudança das cargas hidráulicas devido à realocação dos poços.

A calibração que resultou no menor erro entre os valores calculados e observados utilizaram uma condutividade hidráulica nas camadas dos aquíferos Botucatu superior e inferior de 1.9m/d e 2.7 m/d, respectivamente.

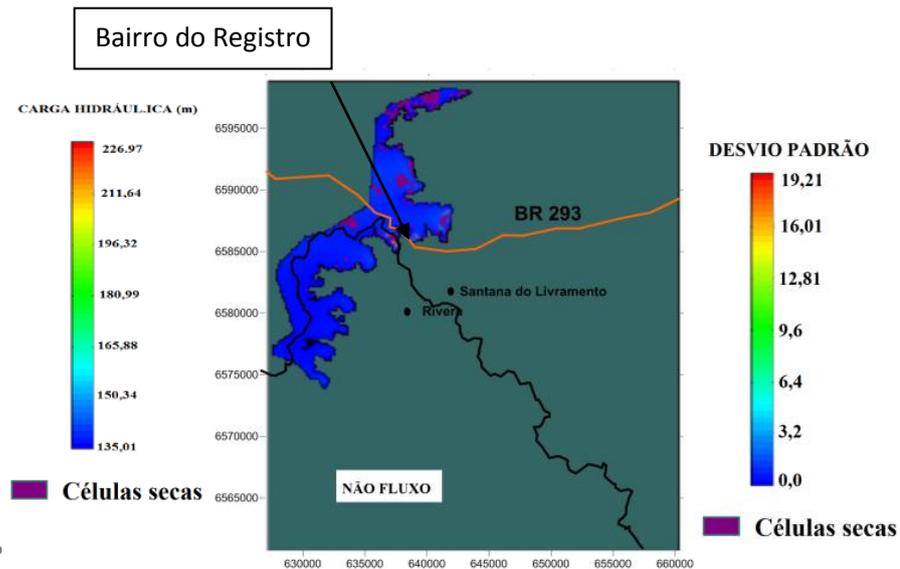
Percebe-se que as cargas hidráulicas não se alteram de forma significativa com um aumento de consumo de cerca de 30% nos próximos 20 anos, o que impõe alguma pequena credibilidade nas medições de observação. Porém, o cone de depressão visivelmente se desloca para a região do Bairro do Registro, a noroeste do centro urbano na figura 40 (b), alterando significativamente a direção do fluxo de água subterrânea.

4.5 Modelo estocástico de fluxo - Cenário Bairro do Registro

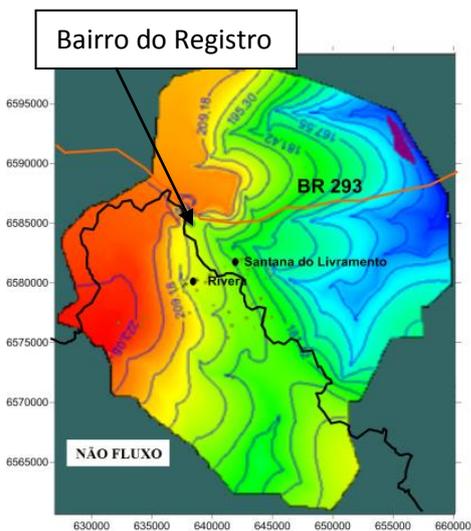
A partir do modelo determinístico, foi simulado através da metodologia de MonteCarlo (MC) para obter cenários equiprováveis do modelo de fluxo deste novo cenário de poços localizados no Bairro Registro. Abaixo os resultados das médias e do desvio padrão das simulações estocásticas:



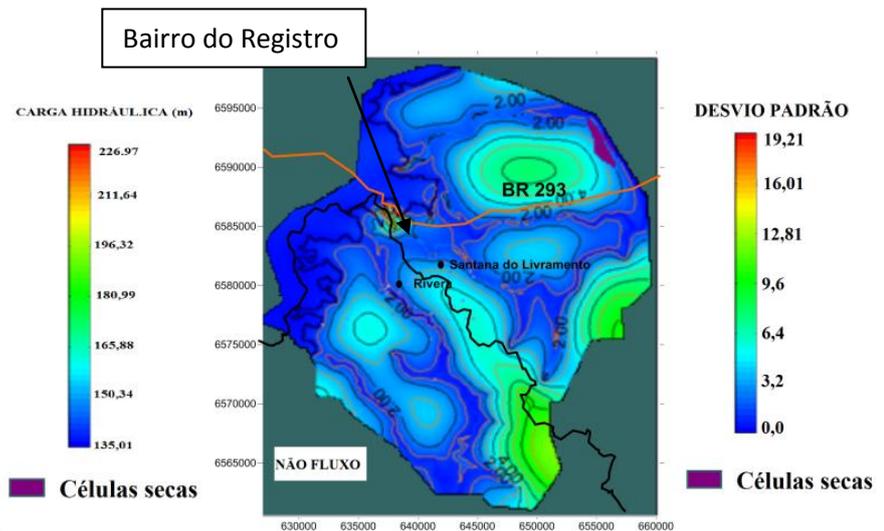
(a)



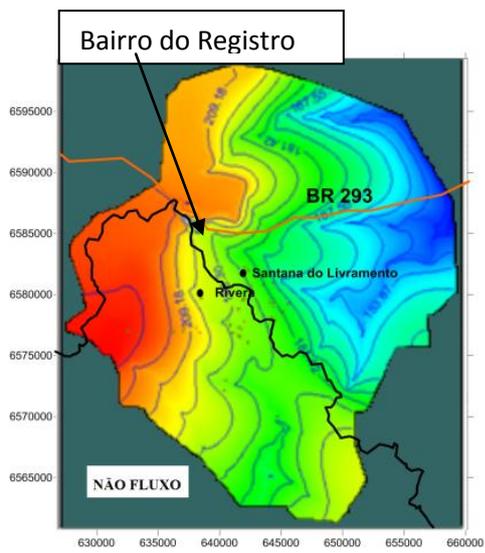
(b)



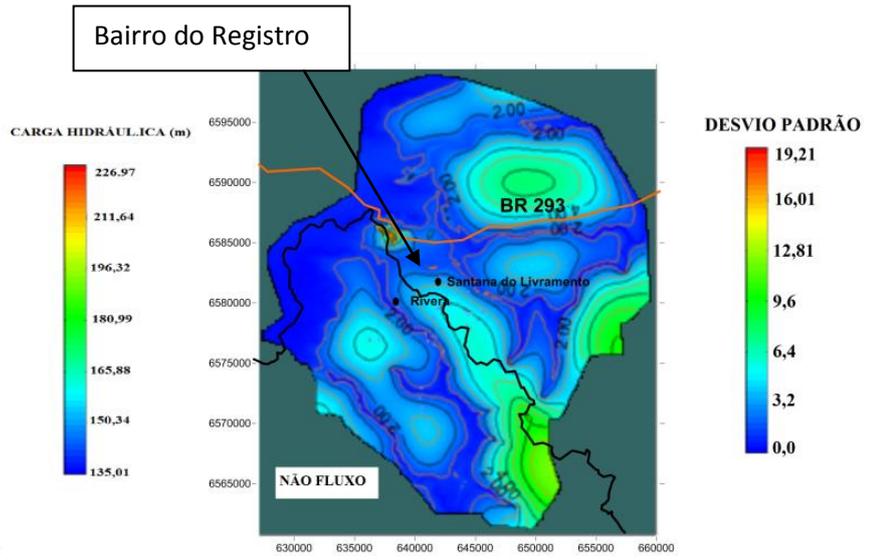
(c)



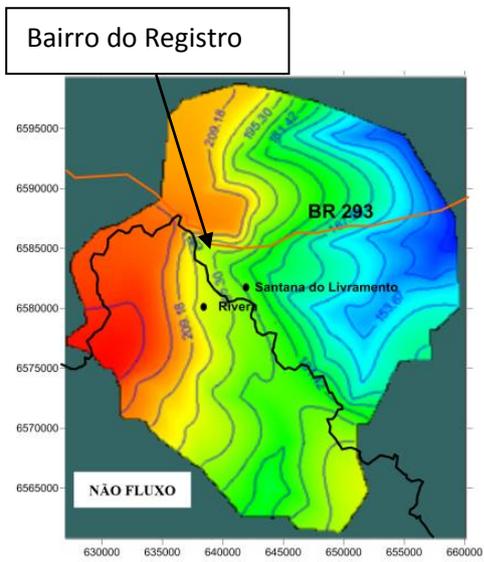
(d)



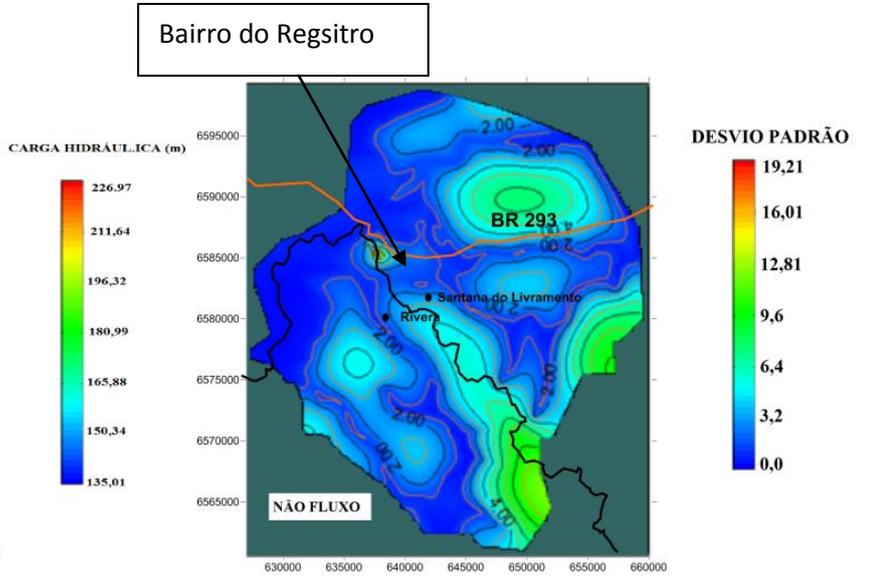
(e)



(f)



(g)



(h)

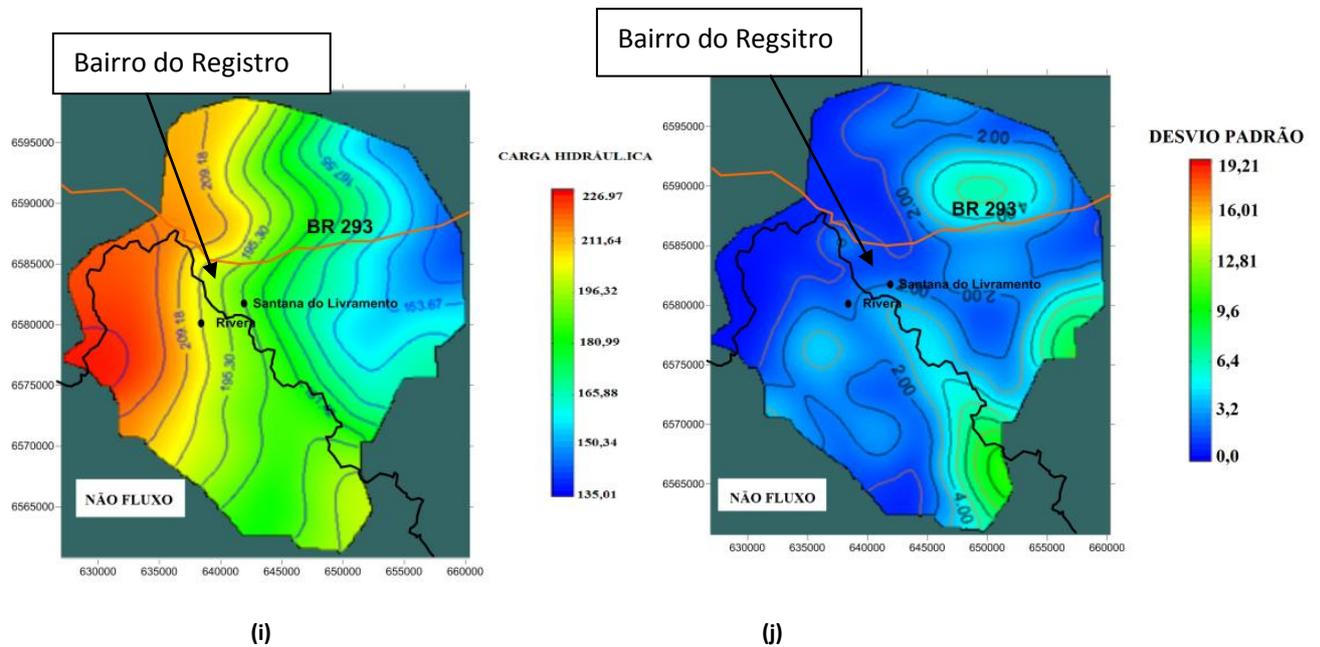


Figura 41: Média e desvio padrão das 100 simulações poços no Bairro Registro

camada 1(a) e (b), camada 2 (c) e (d), camada 3 (e) e (f), camada 4 (g) e (h), camada 5 (i) e (j).

Da mesma maneira que no modelo determinístico, o cone de depressão deslocou-se levemente para o bairro do registro, diminuindo na região em que atualmente se encontram os poços de bombeamento. Outro fator a ser considerado é o aumento do desvio padrão (aumento da incerteza) localizado no novo local aonde foram simulados os 4 (quatro) poços de bombeamento e também na região sudeste do modelo, próximo ao divisor de águas.

Algumas das outras simulações de fluxo do cenário Bairro Registro são apresentadas abaixo:

CAMADA 2:

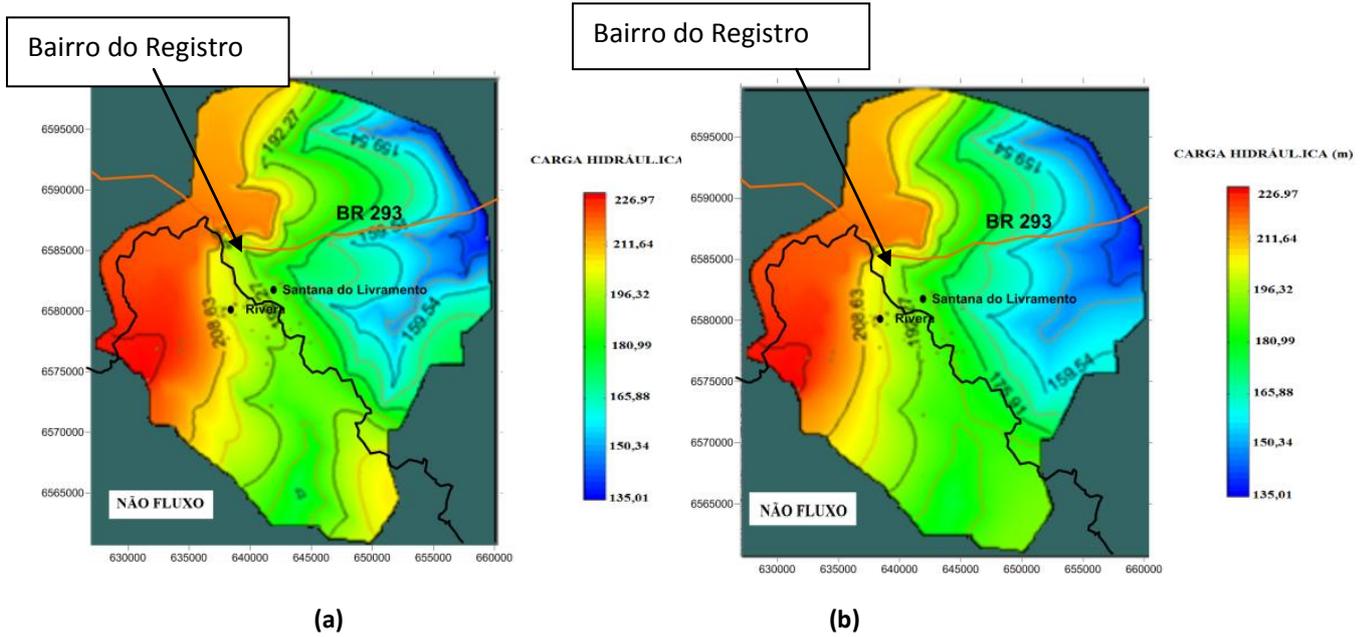


Figura 42: Distribuição das cargas hidráulicas da realização 1 (a) e 77(b)

CAMADA 4:

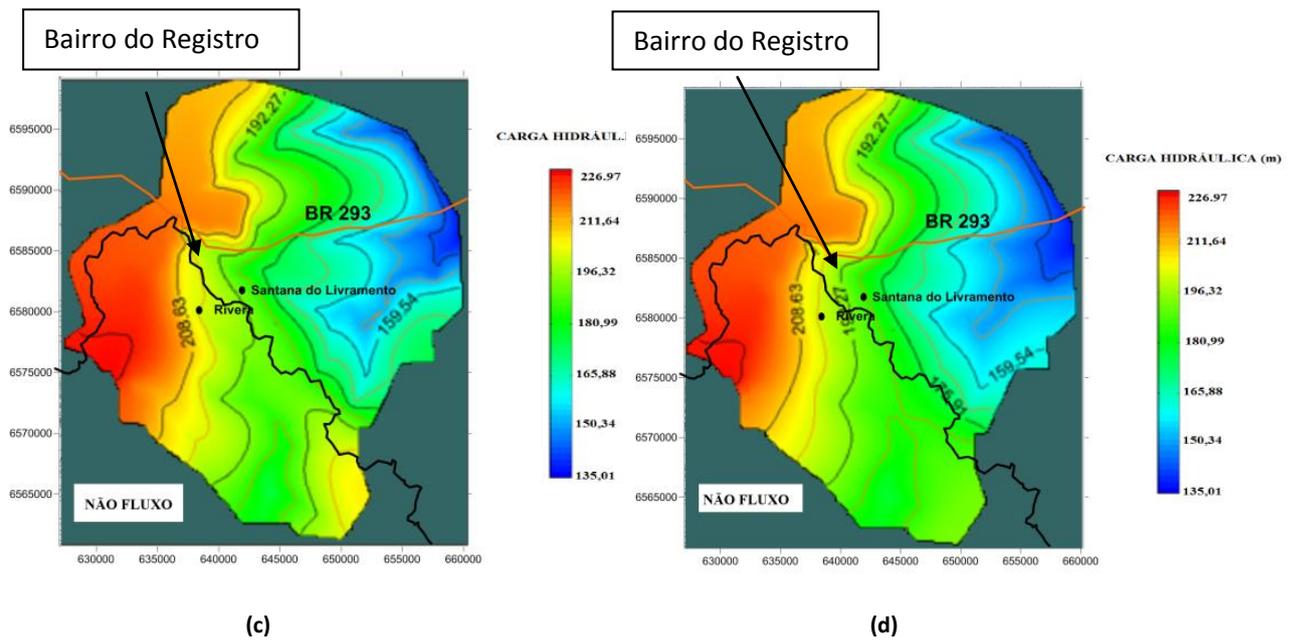


Figura 43: Distribuição das cargas hidráulicas da realização 24 (c) e 77 (d).

Estas simulações comprovam o observado na média e no desvio padrão das realizações, visto que no canto inferior direito, os valores de carga hidráulica tiveram bastante variância entre uma realização e outra (alto desvio padrão).

Concluiu-se das simulações de fluxo no Bairro do Registro, que o cone de depressão, antes localizado no centro urbano, desloca-se nitidamente para noroeste, no sentido do Bairro do Registro. As incertezas, quantificadas e localizadas através do desvio padrão, deslocam-se também para a zona do Bairro do Registro, permanecendo grande nas zonas dos córregos e cursos de água.

4.5.1 Validação da simulação – Cenário Bairro do Registro

De forma similar ao modelo determinístico do cenário do Bairro do Registro, devido à realocação de poços de bombeamento, os gráficos abaixo perdem o significado visto que os dados observados foram capturados em outro cenário. Contudo, serve de comparação entre as simulações e nos dá indicativos nas mudanças do fluxo na região devido à realocação dos poços, ao menos nos locais dos poços de observação. O primeiro gráfico apresenta a média dos resíduos de cada simulação entre os valores calculados no modelo por este novo cenário e os poços de observação. Entende-se por resíduo a soma das diferenças entre os valores calculados e observados. A média dos resíduos ficaram entre aproximadamente -9 e -18, ligeiramente mais elevadas se comparado ao cenário anterior, que considerava os atuais poços de extração da cidade de Santana do Livramento. Este fato se justifica, também, pelo aumento do desvio padrão das simulações e a maior diferença de valores de cargas hidráulicas encontrados entre as simulações. Este primeiro gráfico serve também para “eliminar” alguma simulação que pudessem por algum motivo ter tido um valor dito “outlier”, ou seja, fora do tolerável, o que não ocorre.

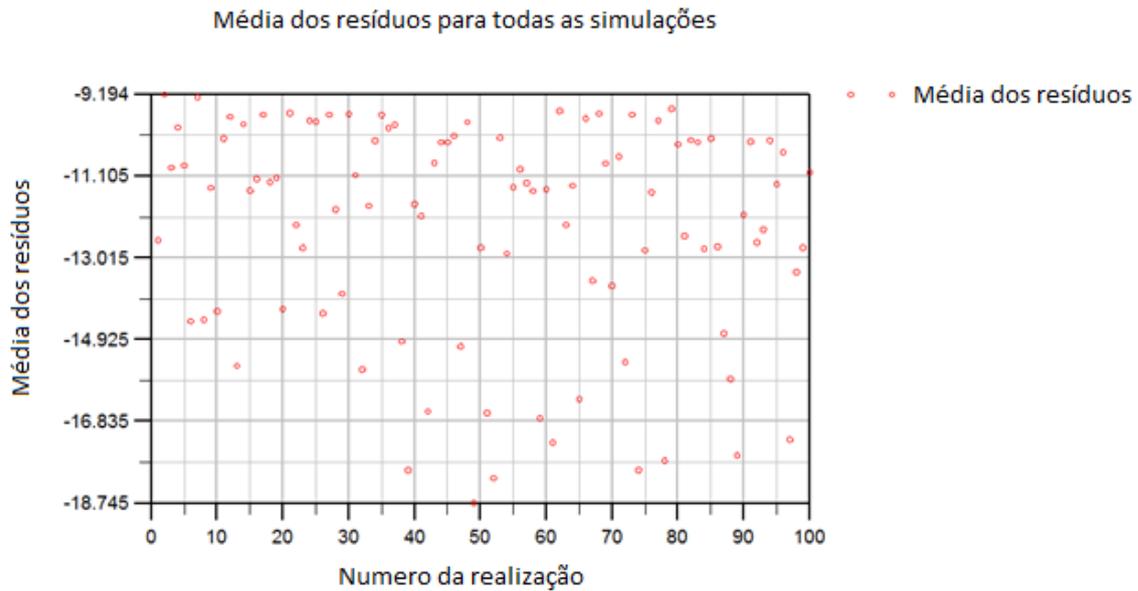


Figura 44: Média dos resíduos das cargas hidráulicas (calculada – observada).

Novamente, a figura 45 apresenta a média dos resíduos acumuladas em cada realização. Este gráfico demonstra a tendência de estabilização da média dos resíduos ao longo das simulações, comprovando que o número de 100 simulações também é o suficiente para a quantificação das incertezas deste novo cenário de poços no Bairro do Registro. Caso a média dos resíduos permanecesse oscilando, mais realizações seriam necessárias de forma a encontrar uma média das simulações significativas e que represente o fenômeno estudado.



Figura 45: Média dos resíduos de carga hidráulica acumulada.

Na figura 46, o gráfico do desvio padrão de cada uma das realizações. O desvio padrão, que nos passa uma idéia de espalhamento em relação à média, oscila pouco em relação a cada simulação, fazendo entender que poucas simulações seriam necessárias para dimensionar as incertezas em relação à condutividade hidráulica do modelo de fluxo.

Quanto maior a amplitude deste gráfico, maior a variabilidade da distribuição das cargas hidráulicas entre as simulações de fluxo.



Figura 46: Desvio padrão das simulações (variabilidade entre as simulações).

O desvio padrão segue uma tendência de estabilização e de baixa variação, oscilando entre 10,8 e 10,9 somente.



Figura 47: Desvio padrão acumulado das realizações (variabilidade acumulada entre simulações).

Finalizando a validação das simulações do cenário de poços simulados no Bairro do Registro, a soma do quadrado dos resíduos nos indica a variação entre cada uma das simulações. O fato dos valores serem elevados ao quadrado deixa a análise ainda mais sensível na identificação de “outliers” e simulações que não condizem com o esperado, o que não ocorre. A raiz quadrada destes valores nos dá uma boa relação do somatório do erro, que se aproxima de 200, acima do cenário anterior, o que já era esperado, visto que os poços de observação estão relacionados ao cenário anterior.



Figura 48: Soma dos quadrados dos resíduos das realizações de distribuição de cargas hidráulicas.

A soma dos quadrados acumulados comprova mais uma vez que o número de 100 simulações foi suficiente para capturar e medir as incertezas em relação ao parâmetro de condutividade hidráulica no modelo de fluxo, visto que existe pouca variação após a simulação 70, indicando que este número de simulações já é capaz de capturar o tamanho das incertezas deste modelo.



Figura 49: Soma dos quadrados acumulada das realizações.

4.6 Modelo estocástico advectivo de trajetória de partículas – Cenário Bairro do Registro

Em cada um dos modelos de fluxo simulados foi utilizada a metodologia de *particle tracking (advecção)*, aonde neste caso foi analisada a probabilidade de uma partícula (uma em cada célula do modelo) ser capturada pelos poços de bombeamento locados no Bairro do Registro. Foi utilizado o algoritmo do *MODPATH*, um dos mais utilizados no mundo. Foram simulados dois cenários, o primeiro para 7300 dias, equivalente a 20 anos de trajetória das partículas, e um segundo prevendo um cenário futuro para daqui cerca de 270 anos. Os resultados abaixo mostram em uma escala de 0 (zero) a 1 (um), a probabilidade de captura de uma partícula ao longo de todo domínio do modelo nos poços instalados na área de influência do Bairro do Registro:

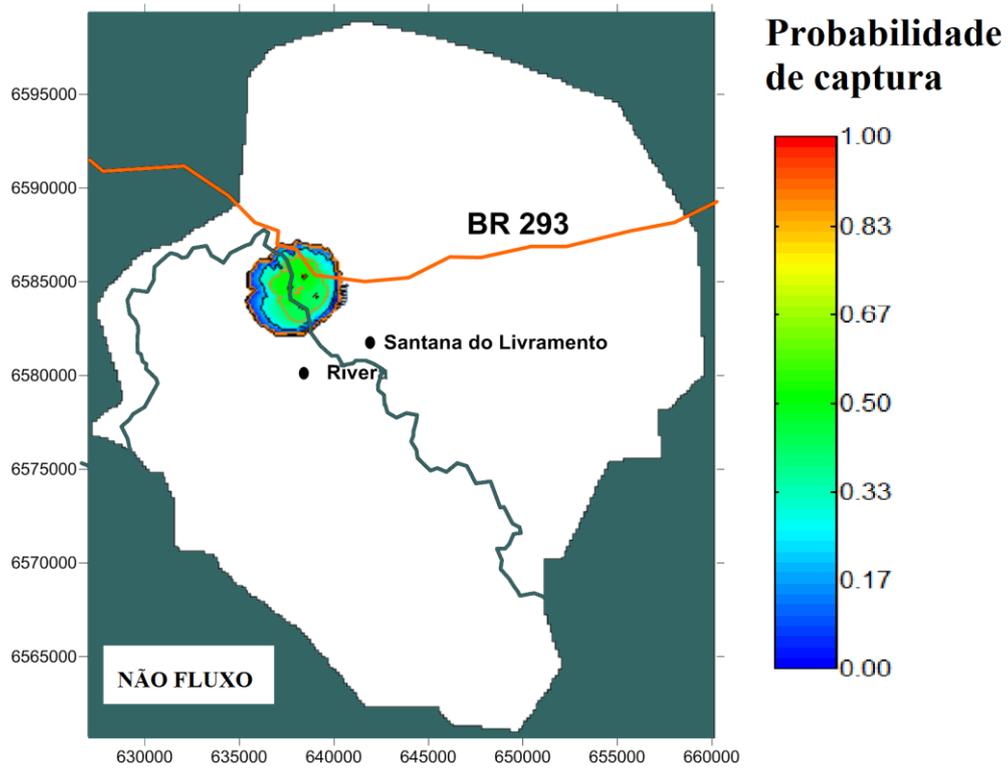


Figura 50: Probabilidade captura partículas t=20 anos

Em verde no mapa, as regiões mais suscintas a captura de partículas, sendo que este valor chega a aproximadamente 50%, ou seja, se aquela região sofrer contaminação, existe uma probabilidade de 50% do contaminante chegar ao poço de extração que abastece a cidade em até 20 anos:

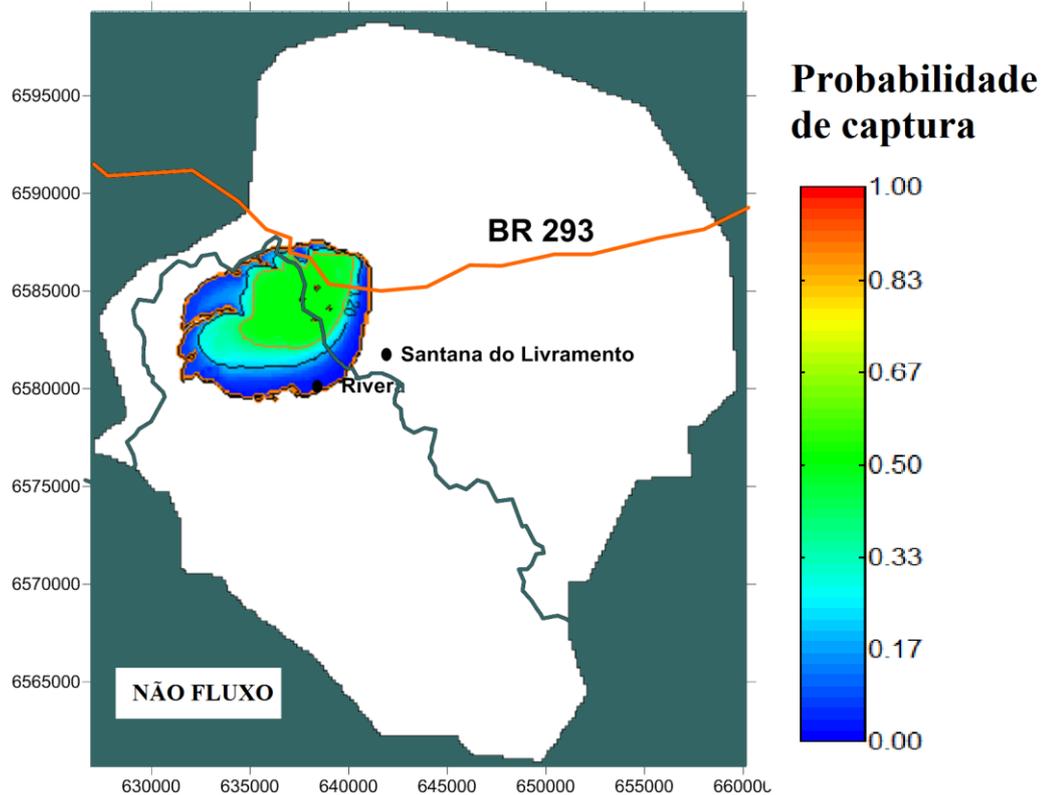


Figura 51: Probabilidade captura partículas $t=270$ anos

Os cenários de trajetória das partículas, se comparado com o perímetro de proteção de poços registrados na legislação brasileira, comprovam que o Bairro do Registro é ideal para o abastecimento da cidade e que a região é pouco vulnerável a contaminações. Os cenários prevêem que mesmo em cerca de 200 anos as partículas das regiões mais poluidoras das cidades, aonde se encontram o centro urbano, postos de combustíveis e etc, a poluição pouco afetaria o abastecimento público. Faz-se a ressalva da importância do parâmetro de porosidade efetiva nos modelos de trajetórias de partículas, que foi considerada constante e não tem sua incerteza dimensionada.

5 CONCLUSÕES

As simulações estocásticas mediram a incerteza no modelo em relação ao parâmetro da condutividade hidráulica e comprovou que este parâmetro pode alterar de maneira significativa os modelos de fluxo, sobretudo em nível de detalhe, alterando em pequenas regiões até mesmo a direção de fluxo. Para análises mais grosseiras, mostrou-se que a média das 100 simulações estocásticas ficaram bastante próximas do modelo determinístico calibrado e do modelo anteriormente proposto por Charlesworth et al.,(2008).

No entanto, algumas simulações com valores diferenciados de condutividade hidráulica, resultado da aleatoriedade da geração das realizações, resultaram modelos completamente diferentes, como as realizações exemplificadas de número 28 que subestima o cone de depressão e a realização de número 99, que superestima o cone de depressão. Provavelmente estas simulações utilizaram valores de condutividade alta e baixa, respectivamente. Isto chama a atenção para dois fatores: Primeiramente, pequenos erros na escolha da condutividade hidráulica em modelos determinísticos podem causar resultados muito ruins, fator que pode ser minimizado através da calibração do modelo. A realização de simulações dá, também, maior segurança no modelo construído. A realização de simulações melhoram o modelo calibrado, no sentido de “dar maior confiabilidade nos resultados”. Este fato chama a atenção para a importância de modelos estocásticos dando confiabilidade ao modelo sugerido, visto que a escolha de um único valor de um parâmetro importante pode comprometer todo trabalho de modelagem, propagando os erros para os fins pelos quais os modelos são propostos, normalmente vinculados a gestão de recursos hídricos e a utilização de água para diversos usos. Como já era esperado, o desvio padrão da média das simulações abrange uma faixa maior de valores, atendendo ao tamanho das incertezas do fenômeno estudado.

O modelo hidrogeológico é o passo inicial no processo de tomada de decisão, e para que estas sejam corretas do ponto de vista físico, devem incorporar as incertezas nos resultados, senão estarão sujeitos a grandes erros de estimativa. Outro fator levantado na simulação estocástica é que permite ao tomador de decisão escolher um determinado rumo baseado na probabilidade de acontecimento do que esta sendo analisado, e, se o grau de incerteza for muito grande, ou seja, as distribuições de probabilidades do resultado possuem grande desvio padrão, pode ser solicitado o aumento do número de coleta de dados, para diminuir as incertezas e a tomada de decisão ser tomada assumindo

o risco que lhe é devido para cada caso em particular, excluindo o técnico desenvolvedor do modelo como “culpado” por um futuro erro de planejamento, que na verdade baseou-se na confiabilidade de poucos dados ruins.

Através do resultado da média das 100 simulações do cenário atual, em comparação com o modelo determinístico, os resultados foram semelhantes, dando maior confiabilidade aos parâmetros escolhidos nos modelos antigos na elaboração do modelo determinístico.

Para o uso de um modelo de fluxo a metodologia determinística auxiliada a análise de sensibilidade de alguns parâmetros pode ser suficiente, mas o quanto a condutividade hidráulica pode variar em cada estudo de caso, que discutidamente na bibliografia juntamente com as condições de contorno é o principal parâmetro que rege o fluxo subterrâneo, só pode ser inferido através de um modelo estocástico.

Outra vantagem da abordagem estocástica é a não dependência da calibração do modelo, que pressupõe que os dados observados são confiáveis, o que não necessariamente é verdade, visto os erros nas medições de níveis de água e até mesmo medições em estações diferentes do ano sendo analisadas conjuntamente. A abordagem estocástica nos dá, portanto, uma dimensão da incerteza em relação ao resultado, sendo maior a incerteza, quanto mais duvidosos forem os dados.

Em relação ao cenário dos poços no Bairro do Registro, as simulações comprovaram que este local é ideal para sistema de extração de água e abastecimento da cidade, devendo somente ter sua região isolada para evitar contaminações próximas aos poços de extração. Chama-se a atenção que mesmo o fluxo da grande maioria das simulações irem a sentido sudeste a partir das formações de basaltos, a probabilidade do sentido contrário não é nula, o que nos diz o resultado final deste modelo, em que existe a possibilidade de contaminação nos poços do Bairro Registro devido ao uso antrópico nos centros urbanos de Santana do Livramento e Rivera. Concluiu-se das simulações de fluxo no Bairro do Registro, que o cone de depressão, antes localizado no centro urbano, desloca-se nitidamente para noroeste, no sentido do Bairro do Registro. As incertezas, quantificadas e localizadas através do desvio padrão, deslocam-se também para a zona do Bairro do Registro, permanecendo grande nas zonas dos córregos e cursos de água.

Como proposta para projetos futuros, propõe-se a coleta de dados de condutividade hidráulica para a realização de simulações geoestatísticas, respeitando a heterogeneidade do fenômeno de condutividade hidráulica.

Também é proposto o estudo do efeito da incerteza em relação ao parâmetro de porosidade efetiva na construção do modelo estocástico de trajetória de partículas, e a incorporação de modelos geológicos estocásticos 3D, como realizados por Quental (2011), englobando assim, mais incertezas em relação ao fenômeno estudado.

Este trabalho comprova a importância da incorporação das incertezas nos modelos de fluxo e espera incentivar o uso desta ferramenta na elaboração dos modelos de fluxo e transporte, que largamente discutido na bibliografia do assunto, ainda se tem desconhecimento em relação à ocorrência dos fenômenos naturais. Espera-se que a partir deste trabalho e outros que estão surgindo, a idéia da simulação estocástica seja amplamente divulgada e utilizada pelos técnicos das diversas áreas do conhecimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ANA) Agência Nacional das Águas. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. Brasília, 2001.

(ANA) Agência Nacional das Águas. *Atlas Brasil: Abastecimento urbano de água – volume I e II*. Brasília, 2011.

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

ARAÚJO, L.M.; FRANCA, A.B.; POTTER, P.E. *Acuífero Gigante del Mercosur (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay: Mapas Hidrogeológicos de las Formaciones Botucatu, Piramboia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó*. PETROBRAS-FPR., Brasil, 1995.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A.B.; POTTER, P. E. *Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA*. *Hydrogeology Journal*, 7(3):317-336, 1999.

BEAR, J. *Hdraulics of groundwater*. McGraw-Hill Inc, 1979. 567 p.

BEAR, J. *On the tensor form of dispersion*. *Journal of Geophysical Research*, 1961. p. 1185-1197.

BEAR, J. *Dinamics of Fluids in Porous Media*. New York. Dover Publications, 1972. 764 p.

BEAR, J.; BACHMAT, Y. *Introduction to Modeling of Transport Phenomena in Porous Media*. Kluwer academics publisher. Dordrecht. Netherlands, 1990.

BEAR, J.; VERRUIJT, A. *Modeling groundwater flow and pollution*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1987. 414 p.

BLANDFORD, T.N.; HUYAKORN, 1990. *WHPA – A modular semi-analytical model for the delineation of wellhead protection areas*. USEPA, office of Ground-Water Protection, 1990.

CAMPOGARA, I. *Vulnerabilidade natural do sistema Aquifero Guarani, em Santana do Livramento, RS, com uso de Geotecnologias*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

CAMPOS, J.N.B. *O modelo institucional*. In: *Gestão de águas – princípios e práticas*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, 2001.

CAUBET, C.G; NOGUEIRA, A.C.C; SILVA, L.D; LIMA, M.L.M; BRZEZINSKI, M.L.N.L. *Águas transfronteiriças do Aquífero Guarani: Dilemas e perspectivas do Brasil*. INESC, 2007

CHARBENEAU, R. J. *Groundwater hydraulics and pollutant transport*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000. 593 p.

CHARLESWORTH, D.; ASSADI, A.; SANGAM, H. *Modelo numérico hidrogeológico Del área piloto* Rivera-Santana, 2008.

CAMPOS, H.C.N.S. *Mapa hidrogeológico do aquífero Guarani*. *Acta Geológica Leopoldensia* 23: 1-50, 2000.

CAMPOS, H.C.N.S. *Applied groundwater modeling in the Botucatú aquifer system, Brazil*. *8th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment*, Vancouver, Canadá, 1998. Proceedings Balkema, Rotterdam, 2359-2366.

CHILÈS, J. P.; DELFINER, P. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. New York : John Wiley & Sons, 1999. 695 p.

Constituição Federal. Brasília, 1988.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hidrology, whit observations on their calibrations and use, 1973. *Journal of Hidrology*. 19, 1-20.

COIMBRA, J. F.; Material da disciplina “Simulação Estocástica”, ministrada pelo autor no Departamento de Engenharia de Minas (DEMIN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2009.

DAGAN, G. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities: 1. conditional simulation and the direct problem*. *Water Resources Research*, v. 18, n. 4, p. 813-833, 1982a.

DAGAN, G. *Stochastic modeling of groundwater flow by unconditional and conditional probabilities : 1. the solute transport*. *Water Resources Research*, v. 18, n. 4, p. 835-848, 1982b.

DECOUD, P.; ROCHA, L. *Aportes a la hidráulica subterránea del Acuífero Guarani en el NW del Uruguay*. *1º Encuentro Mundial de Hidrogeología*. Fortaleza, Brasil, 2000.

Decreto 42.047 de 2002, Estado do Rio Grande do Sul. SEMA. www.sema.rs.gov.br.

Decreto nº 24.643, de 10 de julho – Código das águas, 1934.

Decreto Estadual 32.955 de 07/02/1991 - Estado de São Paulo.

DETTINGER, M. D.; WILSON, J. L. *First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow: part 1: mathematical development*. Water Resources Research, v. 17, n. 1, p. 149-161, 1981.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. *Gslib: geostatistical software library and user's guide*. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1998. 369 p. Coleção Applied Geostatistics Series.

DIMITRAKOPOULOS, R. *Conditional Simulation Algorithms for Modelling Orebody Uncertainty in Open Pit Optimization*. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1998, vol. 12, n. 4, p.173-179.

DOMENICO, P.A.; SCHWARTZ, F.W. *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, 1990. 824 p.

FELGUEIRAS, C.A.; *Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informações geográficas: o paradigma geoestatístico por indicação*. Tese de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos, 1999.

FETTER, C. W. *Contaminant hydrogeology*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 500 p.

FIANCO, A.C.B.; *contaminação de solos e água subterrânea por fungicidas à base de metais em vinhedos da região de Santana do Livramento, RS*. Trabalho de conclusão de curso - Departamento de Geociências - UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FONSECA, W. S. *Contribuição da simulação de monte carlo na projeção de cenários para gestão de custos na área de laticínios*. Dissertação de mestrado em Engenharia de Produção. 2005. 137p. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG. Dezembro. 2004.

FRANTZ, L. C.; *Avaliação do índice de vulnerabilidade do Aquífero Guarani no perímetro urbano da cidade de Santana do Livramento – RS*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

FREEZE, R.A. et al. *Hydrogeological decision analysis: 1. framework*. Ground Water, v. 28, n. 5, p. 738-766, 1990.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979. 604 p.

GAMERMANN, N. *Formação Rosário do Sul*. 1970. 91 f.: il., mapas.

Geologia do Rio Grande do Sul. 2000. Porto Alegre: CIGO/UFRGS, 445 p.

GELHAR, L. W. *Stochastic subsurface hydrology from theory to applications*. Water Resources Research, v. 22, n. 9, p. 135S-145S, 1986.

GOMES, J. *Uso de uma abordagem estocástica para a avaliação do risco à saúde humana devido a ingestão de água subterrânea contaminada*. Tese de doutorado - IPH/UFRGS, 2008

GÓMEZ, A.A. *Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó - Arapey del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay. Tesis remitida para Magíster en Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Del Litoral*, 2006.

GÓMEZ A.A.; RODRÍGUEZ, L.B.; VIVES, L. S. *Finite Difference Model for Evaluating the Recharge of the Guaraní Aquifer System on the Uruguayan Brazilian Border. Mecánica Computacional*. Vol XXV, pp. 1479-1496, 2006.

GÓMEZ, A.A. *Análisis del comportamiento hidrológico subterráneo de las Formaciones Tacuarembó – Arapey Del Sistema Acuífero Guaraní, en el norte de Uruguay* Santa Fé, Argentina, 2007

GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J.; WEN, X. H. *To be or not to be multi-gaussian ?: a reflection on stochastic hydrogeology*. Advances in Water Resources , v. 21, n. 1, 47-61, 1998.

GOOVAERTS, P. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York, 1997, 464p.

GROVE, D. B.; STOLLENWERK, K. G. *Computer model of one-dimensional equilibrium-controlled sorption processes*. Denver: U. S. Geological Survey, 1984. 58 p. (Water Resources Investigation Report 84-4059).

GUIMARÃES, C. H. D. *Avaliação de risco ambiental de sítios contaminados por hidrocarbonetos de petróleo*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2003. 315 p. Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente da Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GUTJAHR, A. L.; BRAS, R. L. *Spatial variability in subsurface flow and transport: a review*. Reliability Engineering and System Safety, v. 42, p. 293-316, 1993.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York Oxford University Press, 146.

JOSSELING DE JONG, G. Longitudinal and transverse diffusion in granular media. Trans. Am. Geophys. Union, 39, pág 524-536. (1958).

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London, 1978, 600p.

KIMMELMANN.; SILVA, A.A.; REBOUÇAS, A.C.; SANTIAGO, M.M.F.; SILVA, R.B.G. *Isotopic study of the Botucatu aquifer system in the brazilian portion of the Paraná basin*. In: *REGIONAL SEMINAR FOR LATIN AMERICA ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN HYDROLOGY*, 1989, Ciudad de México. Abstracts. Ciudad de México, OIEA, p. 51-71.

KINZELBACH, W.; *Groundwater modeling: An introduction with sample programs in BASIC*. *Developments in water science*, 25, Elsevier, 1986, 334p.

KUPFERSBERGER, H.; DEUTSCH, C. V. *Ranking stochastic realizations for improved aquifer response uncertainty assessment*. *Journal of Hydrology*, v. 223, p. 54-65, 1999

Lei n° 9.433, de 08 de Janeiro. Brasília, 1997.

Lei n° 9.984, de 17 de Julho. Brasília, 2000.

Lei n° 10.350 – Estado do Rio Grande do Sul, 1994.

LOOMIS, S. A. WARNER, J. W. *Stochastic analysis of through unsaturated volcanic tuffs at the Potential Nuclear Wasted Repository Site, Yucca Mountain, Nevada*. Colorado State University, 1987. Technical report, N° 14, pp. 140.

MACHADO, J.L.F. *Compartimentação espacial e arcabouço hidroestratigráfico do Sistema Aquífero Guaraní no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, Brasil, 2005.

MARSILY, G. de *Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers*. San Diego: Academic Press Corporation, 1986. 440 p.

MARQUEZAN, R.G.; *Análise de recursos digitais como ferramentas de avaliação em ações de proteção de aquíferos no trajeto de oleodutos*. Tese de Doutorado. IPH-UFRGS. Porto Alegre, 2008.

MASSMANN, J.; FREEZE, R. A. *Groundwater contamination from waste management sites: the interaction between risk-based engineering design and regulatory policy: 1. methodology*. *Water Resources Research*, v. 23, n. 2, p. 351-367, 1987a. 49.

MASSMANN, J.; FREEZE, R. A. *Groundwater contamination from waste management sites: the interaction between risk-based engineering design and regulatory policy: 2. results*. *Water Resources Research*, v. 23, n. 2, p. 368-380, 1987b.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Washington: U. S. Government Printing Office, 1988. paginação irregular. (Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6 - Modeling Techniques. Chapter A1).

McWHORTER D. B.; SUNADA, D. K. *Ground-Water Hydrology and Hydraulics*. Ann Arbor : Water Resources Publication, 1981. 290 p.

MELO, T.M.; *Soluções analíticas para transporte de hidrocarbonetos de petróleo em água subterrânea: Avaliação determinística e probabilística do risco à saude humana*. Dissertação de Mestrado, IPH-UFRGS, Porto Alegre, 2010.

MMA. Ministério do Meio Ambiente – Brasil. *Águas subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido*. Brasília, 2007.

MONTAÑO, J.; CARRIÓN, R. *Optimización de la explotación del sistema acuífero Jurásico Triásico Tacuarembó-Buena Vista*. Anais 6º Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas, 1990. Trabajo Nº 44, pp. 181-189.

MUSKAT, M. *The flow of homogeneous fluids through porous media*. Ann Arbor, Michigan, J.W. Edwards, INC, 1937

NEUMAN, S. P. *Adaptive Eulerian-Lagrangian finite element method for advection dispersion*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v. 20, n. 2, p.321-337, 1984.

PACHECO, V.F. *Informe Final: Estudio Hidrogeológico del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera – Sant´Ana do Livramento. II Curso Internacional de Hidrología Subterrânea (Versión a Distancia)*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2004.

PEBESMA, E. J.; HEUVELINK, G. B. M. *Latin hypercube sampling of gaussian random fields*. Technometrics, v. 41, n. 4, p. 303-312, 1999.

PESSI, M.; HARDY, G. *El Sistema Acuífero Tacuarembó en la ciudad de Rivera, Uruguay*. 4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterrânea. ALHSUD, Montevideo, Uruguay, 1998. pp. 460-468.

PÉREZ, A.; ROCHA, L. *Aportes al conocimiento Del Acuífero Guaraní. Área Ciudad de Rivera – Uruguay*. Groundwater and Human Development (OSE, Obras Sanitarias del Estado, Uruguay,2002) Pp. 598 – 605.

PÉREZ, A.; ROCHA, L. *Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Área Ciudad de Rivera – Uruguay*. Groundwater and Human Development Conference. XXXII

International Congress of the International Association of Hydrogeologists. Mar del Plata, Argentina, 2002.

PyT CONSULTORIA. *Informe sobre Mapeo Geológico del Área Piloto Rivera – Sant’Ana do Livramento (Projeto PSAG)*; Mendoza, Argentina.

PRICE, M. *Introducing Groundwater*. London: Chapman & Hall, 1996

POLLOCK, D.W.; *Semianalytical computation of path lines for finite difference models*. *Ground Water*, 1988. p. 743-750.

POLLOCK, D.W.; *Documentation of computer programs to complete and display pathlines using results from the U.S Geological Survey modular three-dimensional finite difference ground water model*. USGS, Report 89-381, 81p.

Portaria DNPM nº 231 de 31 de julho de 1998. www.dnpm.gov.br.

POULTER, S.R. *MonteCarlo Simulation in environmental Risk Assessment – Science, Policy and Legal Issues*. *Risk: Health, Safety and Environment*. Vol 7, pp 7-26, 1998.

QUENTAL, P.A.L.A; *Modelos geológicos estocásticos 3D e interface para modelos de simulação de fluxo. Aplicação a área subjacente da antiga fábrica da SPEL*. Lisboa, 2011.

REBOUÇAS, A.C.; *Recursos hídricos-subterrâneos da Bacia do Paraná: Análise de pré-viabilidade. Tese de Livre Docência Universidade de São Paulo*, 143 p, 1976.

REHFELDT, K. R.; BOGGS, J. M.; GELHAR, L. W. *Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer: 3. geostatistical analysis of hydraulic conductivity*. *Water Resources Research*, v. 28, n. 12, p. 3309-3324, 1992.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; DALMOLIN, R.S.D.; AZEVEDO, A.C.; PEDRON, F.A. *Principais solos da Depressão Central e Campanha do Rio Grande do Sul – Guia de excursão*. Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Ciências Rurais – Departamento de solos. 2º edição, 2007.

REMSON, I.; HORNBERGER, G. M.; MOLZ, F. J. *Numerical methods in subsurface hydrology: with an introduction to the finite element method*. New York: John Wiley & Sons, 1971. 389 p.

REVELLI, R; RIDOLFI, L. *Influence of heterogeneity on the flow in unconfined aquifers*. *Journal of Hydrology*, v. 288, p. 150-159, 2000.

ROSA, F. E. F.; FORLIN, M.; XAVIER, J. M. *Informações básicas sobre a distribuição do Sistema Aquífero Guarani nas regiões sul e sudeste do Brasil, 1998. Água em Revista, 10:23–26.*

ROSA, F. E. F.; HINDI, E. C.; ROSTIROLLA, S. P.; FERREIRA F. J. F.; BITTENCOURT, A. V. L. *Sistema Aquífero Guarani – Considerações Preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no Fluxo das Águas Subterrâneas, 2003. Revista Águas Subterrâneas, 17:91-111.*

SAFFMAN, P.G.; *A theory of dispersion in a porous medium. Journal of Fluid Mechanics, 6, n°3, 1959. p.321-349.*

SCHEIDEGGER, A. E. *Statistical Hydrodynamics in Porous Media. Journal of applied physics, 25, 8, 994-1001, 1954*

SILVA, J.L.S.; BESSOUAT, C.; CAMPONOGARA, I.; FRANTZ, .C.; GUIMARAENS, M.; GAMAZO, P.; FAILACHE, L.; FLORES, E.L.M.; FLORES, E.M.M.; DRESSLER, V.L.. *Caracterização de áreas de recarga e descarga do SAG em Rivera – Livramento (R-L) e Quaraí – Artigas (Q-A). Estudo da vulnerabilidade na área de influência da Quaraí – Artigas. Aquífero Guarani – Avanços no conhecimento para sua gestão sustentável, (1): 61 – 75, 2007.*

SILVA, R. B. G. *Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu no estado de São Paulo, Brasil. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Brasil, 1983.*

SMITH, L.; SCHWARTZ, F. W. *Mass transport: 1. A stochastic analysis of macrodispersion. Water Resources Research, v. 16, n. 2, p. 303-313, 1980.*

SMITH, L.; SCHWARTZ, F. W. *Mass transport: 2. Analysis of uncertainty in prediction. Water Resources Research, v. 17, n. 2, p. 351-369, 1981a.*

SMITH, L.; SCHWARTZ, F. W. *Mass transport: 3. Role of hydraulic conductivity data in prediction. Water Resources Research, v. 17, n. 5, p. 1463-1479, 1981b.*

SILVA, M.M.; AMADOR, F. *Dos modelos históricos (história da geologia) aos modelos dos alunos. Um estudo exploratório sobre os modelos mentais, respeitantes à origem, ao armazenamento e à circulação das águas subterrâneas, realizado com os alunos do 12º ano do ensino secundário português. Investigações em ensinos de ciências – V7(3), PP 205-214, 2002.*

SLICHTER, C.S; *Theoretical investigation of the motion of the ground waters. U.S.Geology Survey. 19th, Ann. Rept, pt2, 1899, p.295.*

SPITZ, K.; MORENO, J. *A practical guide to groundwater and solute transport modeling*. New York: John Wiley & Sons, 1996. 461 p.

TEISSEDRE, J. M.; BARNER, U. *Comportamento geotérmico e geoquímico das águas do aquífero Botucatu na Bacia do Paraná*. *Rev. Águas subterrâneas*, nº IV, p. 85- 95, 1981.

TODD, D.K. *Gound Water Hidrology*. Nova york, 1959

VANN, J.; BERTOLI, O.; JACKSON, S. *An Overview of Geostatistical Simulation for Quantifying Risk*. In: Association of Australasia symposium “Quantifying Risk and Error” March, 2002.

VASSOLO, S. *Modelo hidrogeológico y numérico del sector oriental Del Paraguay. Presentación en el Taller SAG-PY*. Asunción, Paraguay. 19-20 septiembre, 2005.

VIVES, L.; CAMPOS, H.; CANDELA, L.; GUARRACINO, L. *Modelación del acuífero Guaraní*. *Boletín Geológico y Minero*, 2001. Vol. 112, No. Esp., 51-64.

WANG, H. F.; ANDERSON, M.P. *Introduction to groundwater modeling: Finite difference and finite element methods*. Freeman and Co, 1982. 237 pp. (reprinted in 1995 by Academic Press).

WEN, X. H.; KUNG, C. S. Stochastic simulation of solute transport in heterogeneous formation: a comparison of parametric and nonparametric geostatistical approaches. *Ground Water*, v. 31, n. 6, p. 953-965, 1993.

WEN, X. H.; GÓMEZ-HERNÁNDEZ, J. J. *Numerical modeling of macrodispersion in heterogeneous media: a comparison of multi-gaussian and non-multi-gaussian models*. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 30, 129-156, 1998.

ZHANG, Y.; PINDER, G. *Latin hypercube lattice sample selection strategy for correlated random hydraulic conductivity fields*. *Water Resources Research*, v. 39, n. 8, 1226, 2003

ZHENG, C. *MT3D : a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. Rockville : S.S. Papadoulos & Associates, 1990. Páginação Irregular.

ZHENG, C.; BENNETT, G. D. *Applied contaminant transport modeling*. 2. ed. New York : John Wiley & Sons, 2002. 621 p.

ZHENG, C. *MT3D : a modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in*

groundwater systems. Rockville : S.S. Papadoulos & Associates, 1990. Páginção Irregular.

ZINN, B.; HARVEY, C. F. *When good statistical models of aquifer heterogeneity go bad: a comparison of flow, dispersion, and mass transfer in connected and multivariate Gaussian hydraulic conductivity fields*. *Water Resources Research*, v. 39, n. 3, 1051, 2003 (doi: 10.1029/2001wr001146, SBH 4.1-4.15).

ANEXOS

X	Y	Bombeamento (m³/d)	X	Y	Bombeamento (m³/d)
636542	6582732	-406	641068	6581018	-1200
635808	6583002	-259	641083	6580889	-960
637792	6582091	-1350	640682	6580676	-1920
639816	6580160	-528	640273	6580996	-720
637906	6583009	-1099	640737	6580491	-960
633332	6583939	-864	640973	6581206	-2160
638682	6579527	-161	640732	6580591	-960
639033	6576591	-105	640661	6580592	-1200
637167	6581396	-696	643468	6585231	-158
637877	6577735	-60	642054	6580813	-1440
638795	6576267	-100	637858	6584171	-36
633000	6583911	-1440	642858	6585482	-36
633415	6583241	-780	644057	6584057	-96
633824	6583666	-377	641903	6583032	-720
640990	6579668	-132	642052	6583200	-1680
638251	6577644	-6	639578	6579909	-86
635895	6577526	-84	640218	6580265	-142
641730	6579660	-30	642018	6585512	-24
634279	6584165	-936	640348	6582051	-840
634037	6583329	-446	640298	6582091	-768
641965	6580066	-48	640118	6581961	-960
637800	6576890	-270	638523	6574024	-144
641139	6579779	-230	647247	6585536	-144
642280	6579758	-322	639272	6584210	-3120
638823	6577110	-269	642188	6583161	-360
638167	6583521	-720	638698	6581992	-101
641933	6580117	-600	640599	6575975	-101
639593	6577348	-297	641395	6579144	-240
633375	6583298	-34,081	641938	6585491	-72
643344	6579624	-1118	638898	6584541	-1440
638710	6581654	-336	639106	6584721	-1920
638921	6579449	-120	638997	6584603	-2400
638736	6577742	-9	640660	6570020	-144
638498	6576391	-43	638425	6571454	-156
639086	6576761	-79	638546	6571522	-384
637808	6582074	-859	640531	6570201	-120
637714	6582556	-540	635008	6570711	-43
640698	6582861	-214	634775	6568613	-360
644977	6583481	-1440	634197	6571559	-360
639322	6582150	-480	639874	6579707	-96
639623	6582192	-1440	636252	6578546	-168
639570	6582091	-1800	636160	6578327	-168
644971	6583485	-960	639044	6580596	-106
645347	6583321	-202	635479	6575515	-144
638338	6585331	-72	635165	6574219	-12
644023	6580841	-2376	633649	6572685	-480
643879	6580587	-960	643312	6576565	-144
643848	6580461	-1560	644105	6576112	-60
643727	6580902	-840	633344	6576858	-144
643345	6583091	-1200	636631	6568293	-144
643164	6583218	-960	640236	6566925	-54
643358	6583011	-960	635322	6578586	-24
642757	6583296	-1560	639333	6576843	-240
644788	6581781	-1440	638706	6576130	-122
644158	6582071	-720	637790	6587488	-888
644352	6581982	-960	638247	6584551	-240
644198	6581592	-1440	642775	6585219	-480
638647	6585412	-120	640204	6576419	-168
643859	6584807	-36	642298	6580441	-960
642198	6583221	-96	641093	6580833	-363
638228	6584541	-29	643893	6583482	-360
638198	6585662	-36	644098	6584499	-960

Figura 52: Poços de bombeamento

X	Y	h - Observado	X	Y	h - Observado
643.155.755	6579944.24	173.4	6.378.769.133	6.579.293.251	185.00
6.324.716.933	6.576.976.741	201.05	6.376.710.582	6.580.062.123	201.00
632.337.198	6.576.927.654	206.91	6.429.960.725	6.581.286.409	183.00
6.417.627.253	6.576.535.062	183.00	6.429.242.938	6.580.967.499	175.00
6.416.393.379	6.576.684.947	181.70	6.436.834.916	6.580.788.281	172.00
6.416.532.124	6.576.598.495	158.00	6.426.590.351	6.580.747.186	171.00
6.411.392.919	6.576.818.467	180.00	6.424.253.339	6.581.013.313	172.00
6.409.423.716	6.577.469.167	183.00	6.423.844.994	6.582.124.694	186.00
6.417.018.524	6.577.286.042	174.00	642.290.238	6.582.302.004	173.00
6.443.581.524	6.578.074.905	176.60	6.438.215.413	6.581.645.159	174.00
6.400.646.912	6.577.556.498	147.00	643.903.029	6.581.657.798	166.00
6.419.221.597	6.579.542.918	161.00	6.446.845.405	6.581.477.133	171.00
638.494.909	6579552.02	185.00	6.444.373.299	6.580.678.428	178.00
6.385.609.201	6.579.649.329	184.00	6.442.791.834	6.579.580.851	154.00
6.421.488.208	6.582.215.274	189.00	6.440.286.118	6578965.21	183.00
6.432.113.724	6.581.496.518	177.00	6.446.487.358	6.577.802.803	160.15
6.425.340.277	6.579.904.726	167.00	6.432.851.601	6.578.489.102	179.00
6.449.109.245	6.580.933.628	156.58	6.370.249.929	6576971.06	198.00
6.446.531.626	6.578.133.741	166.00	6.362.449.119	6.576.935.147	201.00
6.446.202.871	6.577.844.808	181.00	6.344.853.939	6.576.548.723	205.55
6.445.076.665	6.580.936.332	163.00	6.341.586.368	6576776.01	208.00
6.407.971.319	6.577.821.459	157.90	6.343.840.045	6.577.412.156	207.00
6.339.464.816	6.576.226.175	208.00	6.417.065.253	6.572.279.299	210.00
6.434.691.854	6.576.458.418	189.30	6.416.135.767	6.571.888.592	190.00
6.384.270.878	6.576.866.932	192.55	6.404.541.713	6.572.076.856	203.00
6.381.203.135	6.575.982.968	190.70	6.424.092.831	6.576.035.427	180.58

6.406.286.483	6.571.300.069	201.00	6.384.519.258	6.571.922.435	205.00
6.404.394.119	6.578.005.969	181.00	638.174.799	6.577.755.409	201.35
6.377.030.809	6.579.554.837	193.00	6.333.595.824	6.576.758.498	219.00
6.378.073.414	6.579.642.186	205.00	6.333.039.847	6.576.682.026	214.00
6.420.611.005	6.579.558.006	173.00	6.405.764.933	6.572.946.149	205.00
6.420.472.692	6.579.618.361	169.00	6.413.745.094	6.575.679.908	196.00
6.416.285.391	6578789.28	173.00	6.381.731.643	6.577.264.031	194.50
6.414.178.636	6.577.821.491	171.00	6.428.490.683	6.577.345.276	188.00
6.417.188.304	6.576.625.528	177.50	6.393.338.226	6.579.753.788	185.00
6.447.774.652	6.579.248.263	157.70	6.395.087.674	6.580.239.889	185.00
6.453.132.069	6.578.595.055	158.90	6.418.031.394	6.581.683.532	176.80
6.444.806.776	6.579.025.514	169.20	6.398.126.521	6.580.986.518	191.00
644.295.905	6.579.323.317	161.00	6.397.137.933	6.580.706.113	187.00
6.445.129.941	6.579.308.844	155.00	6.387.803.915	6.579.650.764	184.00
6.445.226.425	6.578.893.963	161.00	6.401.293.144	6.578.407.017	178.00
6.421.411.194	6.577.779.052	171.00	6.429.189.613	6.579.821.467	162.00
6.417.780.714	6.581.957.152	178.00	6.424.943.294	6.580.391.281	162.00
6.409.929.861	6.581.659.916	195.10	6.429.819.852	6.581.345.583	180.00
6.409.268.433	6.581.608.961	186.00	6.426.028.285	6.582.270.969	190.00
6.424.383.066	6.581.961.436	183.00	6.431.529.223	6.581.493.588	175.95
6.371.042.247	6.579.801.631	202.00	6.432.840.337	6.581.787.586	175.00
6.375.844.228	6579867.28	184.00	6.457.320.852	6.579.249.074	168.00
6.378.103.431	6580227.28	199.00	6.449.449.578	6577408.93	170.00
6.374.146.192	6.580.312.685	192.00	6.443.594.684	6.577.433.468	174.00
6.379.328.923	6580168.24	206.00	6.395.160.053	6.580.351.458	183.00
6.386.782.151	6.580.562.663	194.00	6.446.782.662	6.577.804.831	163.44
6.388.315.163	6.580.507.903	175.00	6.418.546.162	6.577.127.649	157.14

Valores observados em campo