

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**AVALIAÇÃO DO MODELO SCBR PARA OS PARÂMETROS DE  
FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASOS**

**Marcos Felipe Wendt**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**AVALIAÇÃO DO MODELO SCBR PARA OS PARÂMETROS DE  
FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASOS**

**Marcos Felipe Wendt**

**Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental**

**Orientador  
Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
SETEMBRO/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO MODELO SCBR PARA OS PARÂMETROS DE FLUXO DA  
ÁGUA SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASOS**

**MARCOS FELIPE WENDT**

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos  
para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e  
Ambiental–TCC II**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Henry Xavier Corseuil**  
(Orientador)

---

**Prof. Dr. Masato Kobiyama**

---

**Prof. Dr. José Carlos Silveira de Oliveira**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

*Aos meus pais, Marcos e Rose,  
e à minha namorada, Giselle.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, nosso Pai criador e eterno protetor, por toda a sabedoria e por sempre estar presente junto comigo me guiando pelos caminhos mais belos.

Aos meus pais, Marcos e Rose, por sempre estarem junto comigo em todos os momentos, por sempre me incentivarem, pela confiança, pela dedicação, pelo amor, pelo carinho e por nunca medirem esforços para a minha formação.

Ao amor da minha vida, Gi, por todo o companheirismo, por todo o amor, pela compreensão nos momentos em que tive que me ausentar devido a provas e trabalhos, pela motivação nos momentos de desânimo, por toda a força e ajuda nos momentos de esgotamento, pelo carinho e cuidados sempre tão amorosos.

Aos meus irmãos, Rafael e Bianca, por sempre respeitarem o meu espaço e pela confiança.

Aos meus queridos avós, Douglas e Florentina, meus maiores incentivadores, por todo amor e mimos.

Aos meus sogros queridos, Jaime e Rozane, pela confiança e incentivo sempre tão carinhosos.

Ao professor Henry por ter me orientado por três anos de iniciação científica e pela orientação neste trabalho de conclusão de curso.

Aos professores Masato e Zé, por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

À toda equipe REMAS: Ana Hilda, Ana Paula, Beatriz, Cássio, Gerly, Helen, Jovani, Márcio, Mariana, Marilda, Mário, Nara, Rafael, Tatiana, em especial ao Alexandre, por sua assistência sempre imediata e prestativa, ao Carlos, por “quebrar alguns galhos”, e à Cristina, por muitas vezes indicar o melhor rumo na realização deste trabalho.

À equipe TECNOAMB – Tecnologias Ambientais Ltda., Márcio e Marcos, em especial ao Márcio, pelo convite de estágio e pela orientação nos trabalhos realizados durante este período.

Aos amigos da turma ENS03-1, Clésio, Elton, Guilherme, Pedro, Roberto e Tito, pelo companheirismo nesses cinco anos de graduação, por todos os madrugadões, enfim, pela sincera amizade. Os momentos compartilhados nesta jornada sempre serão lembrados e recontados.

À Petrobras/Transpetro pelos dados fornecidos para a realização deste trabalho.

## RESUMO

O SCBR é um modelo bidimensional desenvolvido para simular o transporte e o destino de compostos químicos dissolvidos nas águas subterrâneas, que considera a interferência do etanol. O objetivo deste trabalho foi realizar as etapas de calibração, verificação e análise de sensibilidade do modelo SCBR com dados obtidos em campo. Foram utilizadas duas fontes de dados de campo, uma proveniente da Fazenda Experimental da Ressacada e outra fornecida pela Petrobras/Transpetro. A metodologia empregada para a calibração e verificação do modelo SCBR baseou-se na norma ASTM D 6025-96 e no Guia de Modelagem Matemática de Águas Subterrâneas do Estado Americano de Michigan (MANDLE, 2002). O SCBR foi considerado calibrado e verificado com a obtenção de um  $R^2$  maior que 0,80 (SCHNOOR, 1996). Na calibração da Área Experimental 01, o maior valor de  $R^2$  obtido foi de 0,9974 e para a Área 02, 0,8156. Na calibração do Terminal Transpetro, atingiu-se para o  $R^2$  o valor de 0,80. O SCBR também foi considerado verificado para as Áreas da Ressacada, encontrando-se para o  $R^2$  0,95 e 0,80 nas Áreas 01 e 02, respectivamente. Entre os parâmetros variados, a recarga foi o parâmetro que exerceu a maior influência sobre os valores de carga hidráulica.

**PALAVRAS-CHAVE:** SCBR; fluxo da água subterrânea; calibração e verificação.

## ABSTRACT

SCBR is a two-dimensional model developed to simulate the transport and fate of chemical compounds dissolved in groundwater considering ethanol interference. This work aimed at performing the steps of calibration, verification and sensitivity analysis of the SCBR model with data collected in the field. Two sources of field data were used, one from “Fazenda Experimental da Ressacada” and another provided by Petrobras/Transpetro. The methodology used for calibrating and verifying the SCBR model was based on the ASTM D 6025-96 and on the Guide to Mathematical Modeling of Groundwater the State of Michigan American (MANDLE, 2002). SCBR was considered calibrated and verified with a  $R^2$  greater than 0.80 (SCHNOOR, 1996). In the calibration of “Área Experimental 01”, the highest value of  $R^2$  obtained was 0.9974, and for “Área 02” was 0.8156. In the calibration of “Terminal Transpetro”, the value for the  $R^2$  was 0.80. SCBR also was considered verified for the two areas from “Fazenda da Ressacada”, for which the values of  $R^2$  were 0.95 and 0.80 in “Área 01” and “Área 02”, respectively. Among the parameters changed, recharge was the one that had the greatest influence on hydraulic head values.

**KEY-WORDS:** SCBR; groundwater flow; calibration and verification.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>3. REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Escoamento em águas subterrâneas .....</b>	<b>16</b>
3.1.1. Lei de Darcy, Condutividade Hidráulica e Armazenamento Específico .	16
3.1.2. Equação geral para o fluxo tridimensional em aquíferos .....	18
3.1.3. Equações de fluxo em aquíferos confinados.....	20
3.1.4. Equações de fluxo em aquíferos não-confinados .....	21
3.1.5. Porosidade.....	21
<b>3.2. Formulação de um modelo.....</b>	<b>22</b>
3.2.1. Condições de contorno.....	23
3.2.2. Calibração e verificação de um modelo matemático .....	24
3.2.3. Análise de sensibilidade.....	25
<b>3.3. Modelos mais utilizados .....</b>	<b>25</b>
3.3.1. Bioscreen .....	26
3.3.2. RBCA Tool Kit for Chemical Releases.....	26
3.3.3. Risc 4 .....	27
3.3.4. Modflow.....	27
3.3.5. Flowpath .....	27
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
<b>4.1. Modelo SCBR.....</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Obtenção dos dados de campo.....</b>	<b>30</b>
4.2.1. Fazenda Ressacada .....	30
4.2.1.1. Área Experimental 01 da Fazenda Ressacada .....	31
4.2.1.2. Área Experimental 02 da Fazenda Ressacada .....	32

4.2.2. Terminal Petrobras/Transpetro .....	34
<b>4.3. Calibração do modelo SCBR .....</b>	<b>35</b>
4.3.1. Calibração das Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada.....	36
4.3.2. Calibração do Terminal Parque SUAPE.....	40
<b>4.4. Verificação do modelo SCBR .....</b>	<b>40</b>
<b>4.5. Análise de sensibilidade .....</b>	<b>42</b>
<b>4.6. Comparação dos resultados de simulação do SCBR com os resultados de simulação do modelo Flowpath.....</b>	<b>42</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>68</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 3.1: Valores de porosidade, rendimento específico e retenção específica para alguns materiais. ....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 4.1: Coordenadas absolutas dos piezômetros e as cotas das tampas de cada piezômetro para a Área Experimental 01.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4.2: Coordenadas absolutas dos piezômetros e as cotas dos tubos de cada piezômetro para a Área Experimental 02.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.3: Coordenadas absolutas e caracterização hidrogeológica dos poços de monitoramento do Parque SUAPE.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 4.4: Valores de carga hidráulica medida nas Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada utilizados na calibração do SCBR.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4.5: Tipos de calibração realizados para as Áreas 01 e 02 da Fazenda Ressacada.</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4.6: Características da calibração realizada para o Parque SUAPE.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 4.7: Dados de carga hidráulica das Áreas 01 e 02 da Fazenda Ressacada inseridos no modelo SCBR para o procedimento de verificação.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 4.8: Coordenadas da área de simulação e configuração da malha de cálculo do modelo Flowpath para realização do procedimento de comparação com o SCBR. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 5.1: Valores de R<sup>2</sup> obtidos na calibração das Áreas da Fazenda Ressacada.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 5.2: Redução percentual do R<sup>2</sup> nos cenários com recarga em relação aos valores de R<sup>2</sup> obtidos nas calibrações tipo 1 e 2 da Área 01 da Fazenda Ressacada. ....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.3: Valores de carga hidráulica obtidos com o SCBR na calibração do Parque SUAPE.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.4: Análise de sensibilidade 1 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5.5: Análise de sensibilidade 2 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5.6: Análise de sensibilidade 3 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 5.7: Análise de sensibilidade 1 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 5.8: Análise de sensibilidade 2 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5.9: Análise de sensibilidade 3 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 5.10: Valores de carga hidráulica obtidos no procedimento de verificação do SCBR com os dados da L.P. 50 da Área 01 da Ressacada. ....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 5.11: Valores de carga hidráulica obtidos no procedimento de verificação do SCBR com os dados da L.P. 22 da Área 02 da Ressacada. ....</i>	<i>66</i>

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 3.1: Tipos de aquíferos em função da pressão exercida sobre a água.</i>	16
<i>Figura 3.2: Volume de controle utilizado na derivação da equação de fluxo.</i>	19
<i>Figura 3.3: Fluxograma do processo de desenvolvimento de um modelo matemático.</i>	23
<i>Figura 3.4: Exemplo de comparação estatística entre os resultados obtidos com o modelo e os dados medidos em campo.</i>	25
<i>Figura 4.1: Interface do modelo SCBR – versão 2.0.</i>	28
<i>Figura 4.2: Localização da Fazenda Experimental da Ressacada.</i>	30
<i>Figura 4.3: Área Experimental 01 da Fazenda Ressacada.</i>	31
<i>Figura 4.4: Piezômetros instalados na Área Experimental 01.</i>	31
<i>Figura 4.5: Área experimental 02 da Fazenda Ressacada.</i>	32
<i>Figura 4.6: Piezômetros instalados na Área Experimental 02.</i>	33
<i>Figura 4.7: Terminal de Armazenamento de Combustíveis Parque SUAPE, localizado no município de Madre de Deus (BA).</i>	34
<i>Figura 4.8: Piezômetros instalados no Terminal Parque SUAPE.</i>	35
<i>Figura 4.9: Domínio de simulação (DS) simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros da Área 01.</i>	37
<i>Figura 4.10: Domínio de simulação (DS) simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros da Área 02.</i>	37
<i>Figura 4.11: Domínio de simulação (DS) ajustado paralelamente à direção do fluxo da água subterrânea da Área 01.</i>	38
<i>Figura 4.12: Domínio de simulação (DS) ajustado paralelamente à direção do fluxo da água subterrânea da Área 02.</i>	38
<i>Figura 4.13: Inspetor de polilinha criado no limite do domínio de simulação da Área 02 da Fazenda Ressacada.</i>	44
<i>Figura 4.14: Gráfico dos valores de carga hidráulica (m) versus a distância (m) obtido através do inspetor de polilinha.</i>	44
<i>Figura 4.15: Área Experimental 02 configurada no modelo Flowpath.</i>	45
<i>Figura 5.1: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 69 da Área 01.</i>	46
<i>Figura 5.2: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 72 da Área 01.</i>	46
<i>Figura 5.3: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 20 da Área 02.</i>	47
<i>Figura 5.4: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 21 da Área 02.</i>	47
<i>Figura 5.5: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 69 da Área 01.</i>	48
<i>Figura 5.6: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.</i>	48
<i>Figura 5.7: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.</i>	49

<i>Figura 5.8: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 21 da Área 02.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.9: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 69 da Área 01.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.10: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.11: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.12: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 21 da Área 02.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.13: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=0mm/ano). .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.14: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=5mm/ano). .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.15: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=25mm/ano). .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.16: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=50mm/ano). .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.17: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=100mm/ano). .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.18: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; recarga=200mm/ano). .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.19: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=0mm/ano). .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.20: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=5mm/ano). .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.21: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=25mm/ano). .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 5.22: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=50mm/ano). .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.23: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=100mm/ano). .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.24: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; recarga=200mm/ano). .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.25: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 20; recarga=0mm/ano). .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.26: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 20; recarga=0mm/ano). .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.27: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 21; recarga=0mm/ano). .....</i>	<i>57</i>

<i>Figura 5.28: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 21; recarga=0mm/ano).</i>	57
<i>Figura 5.29: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; recarga=100mm/ano).</i>	58
<i>Figura 5.30: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; recarga=100mm/ano).</i>	58
<i>Figura 5.31: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 21; recarga=100mm/ano).</i>	59
<i>Figura 5.32: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 21; recarga=100mm/ano).</i>	59
<i>Figura 5.33: Avaliação da calibração do SCBR para os dados provenientes do Terminal Transpetro Parque SUAPE através do modelo de regressão linear.</i>	60
<i>Figura 5.34: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR na calibração do Parque SUAPE.</i>	61
<i>Figura 5.35: Análise de sensibilidade 1 para a Área 01.</i>	62
<i>Figura 5.36: Análise de sensibilidade 2 para a Área 01.</i>	62
<i>Figura 5.37: Análise de sensibilidade 3 para a Área 01.</i>	62
<i>Figura 5.38: Análise de sensibilidade 1 para a Área 02.</i>	62
<i>Figura 5.39: Análise de sensibilidade 2 para a Área 02.</i>	62
<i>Figura 5.40: Análise de sensibilidade 3 para a Área 02.</i>	62
<i>Figura 5.41: Verificação do modelo SCBR para a L.P. 50 da Área 01.</i>	67
<i>Figura 5.42: Verificação do modelo SCBR para a L.P. 22 da Área 02.</i>	67
<i>Figura 5.43: Calibração tipo 1 para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	73
<i>Figura 5.44: Calibração tipo 1a para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	73
<i>Figura 5.45: Calibração tipo 1b para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	73
<i>Figura 5.46: Calibração tipo 2 para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	74
<i>Figura 5.47: Calibração tipo 2a para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	74
<i>Figura 5.48: Calibração tipo 2b para a L.P. 69 da Área Experimental 01.</i>	74
<i>Figura 5.49: Calibração tipo 1 para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	75
<i>Figura 5.50: Calibração tipo 1a para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	75
<i>Figura 5.51: Calibração tipo 1b para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	75
<i>Figura 5.52: Calibração tipo 2 para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	76
<i>Figura 5.53: Calibração tipo 2a para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	76
<i>Figura 5.54: Calibração tipo 2b para a L.P. 72 da Área Experimental 01.</i>	76
<i>Figura 5.55: Calibração tipo 1 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.</i>	77

<i>Figura 5.56: Calibração tipo 1a para a L.P. 20 da Área Experimental 02.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.57: Calibração tipo 1 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.58: Calibração tipo 2 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.59: Calibração tipo 2a para a L.P. 20 da Área Experimental 02.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.60: Calibração tipo 2b para a L.P. 20 da Área Experimental 02.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.61: Calibração tipo 1 para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.62: Calibração tipo 1a para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.63: Calibração tipo 1b para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.64: Calibração tipo 2 para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.65: Calibração tipo 2a para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.66: Calibração tipo 2b para a L.P. 21 da Área Experimental 02.....</i>	<i>80</i>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, 1,1 bilhões de pessoas não têm acesso regular a água potável. A escassez de recursos hídricos associada ao crescimento populacional e à poluição ambiental são motivos de grande preocupação por parte da comunidade internacional. Esta situação é reconhecida pela Organização das Nações Unidas como a “Crise Mundial da Água” (UNITED NATIONS, 2003). Esta preocupação motivou a ONU a definir o período de 2005 a 2015 como o “Decênio Internacional para a Ação – Água Fonte de Vida”, com objetivo de estimular a execução de programas e projetos relacionados com a preservação de recursos hídricos (UNITED NATIONS, 2005). A importância das águas subterrâneas como uma das principais fontes de suprimento de água potável justifica a preocupação com a preservação dos aquíferos e a busca de alternativas para minimização de impactos causados por empreendimentos potencialmente poluidores.

Dentre as atividades industriais potencialmente poluidoras das águas subterrâneas, destaca-se a indústria de petróleo e derivados. Durante as operações de extração, refino, transporte e armazenamento de petróleo e seus derivados, ocorre um grande número de incidentes que resultam na contaminação ambiental, deteriorando a qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Na ocorrência de derramamentos de combustíveis como a gasolina, esta se solubilizará parcialmente em contato com a água subterrânea, liberando compostos como os hidrocarbonetos monoaromáticos benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos (BTEX), que são reconhecidos como compostos perigosos por afetarem o sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas. Esses compostos são os constituintes da gasolina que possuem maior mobilidade e toxicidade no meio ambiente e, portanto, são os contaminantes de maior importância em uma avaliação de risco ambiental (WIEDEMEIER, 1999).

A presença do etanol na gasolina comercial brasileira tem grande influência na variação da concentração desses compostos no aquífero (CORSEUIL e FERNANDES, 1999; CORSEUIL et al., 2004). Estudos realizados pela Universidade Federal de Santa Catarina e a PETROBRAS na Fazenda Experimental da Ressacada têm demonstrado que a presença do etanol em derramamentos subsuperficiais pode aumentar a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo por meio do efeito co-solvência. Além disso, o etanol torna-se o substrato preferencial inibindo a biodegradação dos compostos BTEX (CORSEUIL et al., 1998).

Os resultados das pesquisas realizadas na Fazenda Ressacada motivaram a UFSC e a PETROBRAS a desenvolver em 2003 a primeira versão do modelo matemático SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco – SCBR 1.0. O SCBR é um modelo bidimensional desenvolvido para simular o transporte e o destino de compostos químicos dissolvidos nas águas subterrâneas, que considera a interferência do etanol, e permite a avaliação do risco em áreas contaminadas ou passíveis de contaminação. Este modelo já possui inclusive pedido de registro no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPE n.º 65320). Atualmente está sendo desenvolvida a versão 2.0 do modelo SCBR – SCBR 2.0, com o módulo completo de avaliação de risco para geração de mapas de riscos à saúde humana para as rotas de exposição através do solo-água-ar.

De acordo com a ASTM – *American Society for Testing and Materials* (2002), o desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação do fluxo e do transporte em águas subterrâneas envolve basicamente oito etapas: formulação de um modelo conceitual que represente o problema físico em questão; formulação matemática baseada neste modelo conceitual; definição dos métodos que poderão ser utilizados na solução da formulação matemática; implementação computacional; verificação do código computacional; calibração do modelo com dados de campo; verificação do modelo com dados de campo; e análise de sensibilidade. A precisão das previsões realizadas com o modelo é fortemente dependente do sucesso na execução de todas as etapas, mas principalmente da calibração e da verificação, que são importantes para avaliar o grau de correspondência dos resultados simulados e os valores medidos em campo. Além disso, estas duas etapas podem indicar a necessidade de alterações na formulação matemática ou no código computacional. No processo de desenvolvimento do SCBR já foram iniciadas as etapas de verificação do código, mas ainda é necessário executar as etapas de calibração, verificação e análise de sensibilidade, que foram os objetivos deste trabalho.

A metodologia empregada para a calibração e a verificação do modelo SCBR 2.0, baseou-se na norma ASTM D 6025 – 96 (*Standard Guide for Developing and Evaluating Ground-Water Modeling Codes*) e no Guia de Modelagem Matemática de Águas Subterrâneas do Estado Americano de Michigan (MANDLE, 2002). Foram utilizadas duas fontes de dados de campo, uma proveniente da Fazenda Ressacada (localizada no município de Florianópolis, SC) e outra fornecida pela Petrobras/Transpetro (Terminal localizado na ilha de Madre de Deus, BA). A calibração e a verificação do SCBR foram avaliadas através do modelo de regressão linear, pela determinação do  $R^2$  da reta obtida pela construção de um gráfico dos pontos medidos em campo versus os resultados da simulação. Na análise de sensibilidade os parâmetros de simulação recarga e condutividade hidráulica foram variados para determinar a influência de cada parâmetro sobre os valores de carga hidráulica.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo Geral***

Realizar as etapas de calibração e verificação do modelo matemático SCBR (Solução Corretiva Baseada no Risco), em relação ao modelo de fluxo da água subterrânea.

### ***2.2. Objetivos Específicos***

1. Calibrar o modelo SCBR para o parâmetro de fluxo carga hidráulica de duas Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada e de um Terminal de Armazenamento de Combustíveis da Transpetro;
2. Avaliar os critérios usados no modelo SCBR para as condições de contorno;
3. Realizar a análise de sensibilidade para os dados de entrada condutividade hidráulica e recarga do aquífero, para determinar os efeitos de pequenas variações nestes dados de entrada sobre os resultados de simulação;

4. Comparar os resultados de simulação do modelo SCBR para as Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada com os resultados obtidos para estas Áreas Experimentais com o modelo FLOWPATH;
5. Verificar o modelo SCBR para o parâmetro de fluxo carga hidráulica das Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. Escoamento em águas subterrâneas

As formações geológicas saturadas formadas por rochas permeáveis, que contêm água em quantidade suficiente para servir como fontes de abastecimento são chamadas de aquíferos (BEDIENT et al., 1997). Em função da pressão a que a água está submetida, os aquíferos podem ser classificados em confinados e não-confinados (Figura 3.1). Os aquíferos confinados, ou artesianos, são aqueles que possuem um estrato permeável confinado entre duas unidades impermeáveis ou pouco permeáveis, onde a água encontra-se com uma pressão maior que a pressão atmosférica. Já os aquíferos não-confinados, também chamados de freáticos ou livres, são limitados na base por uma camada impermeável, e possuem o nível da água submetido à pressão atmosférica.

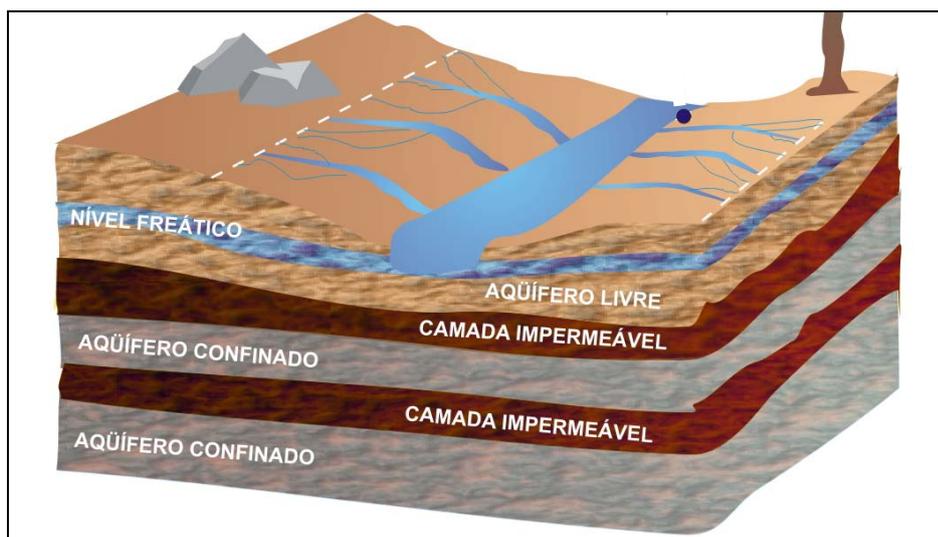


Figura 3.1: Tipos de aquíferos em função da pressão exercida sobre a água.

Fonte: BORGHETTI et al., 2004.

#### 3.1.1. Lei de Darcy, Condutividade Hidráulica e Armazenamento Específico

Ao investigar os fatores que governam o fluxo de água através de meios porosos, Henry Darcy<sup>1</sup> (1856) verificou que a vazão específica ( $q$ ) através de um meio poroso é proporcional à diferença de carga de água existente entre dois pontos ( $dh$ ) e inversamente proporcional à distância entre estes dois pontos ( $dl$ ). Darcy

<sup>1</sup> Henry Philibert Gaspard Darcy nasceu na cidade de Dijon, França, no ano de 1803. Em 1856, Darcy realizou experimentos em laboratório para verificar os fatores que governam a velocidade do fluxo d'água através de meios contendo areia. Os resultados dos seus experimentos definiram os princípios empíricos básicos no estudo do fluxo da água subterrânea (FITTS, 2002).

também determinou que essa quantidade de fluxo é proporcional a condutividade hidráulica  $K$  (Equação (1)) (FETTER, 1994).

$$q = -K \frac{dh}{dl} \quad (1)$$

A lei de Darcy para o fluxo em três dimensões é análoga a definição para o fluxo em uma dimensão:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2)$$

O sinal de menos é necessário porque o fluxo de água ocorre do ponto de maior carga d'água para o de menor carga (SCHNOOR, 1996). A relação entre  $dh$  e  $dl$  é conhecida como gradiente hidráulico. Fitts (2002) destaca que a lei de Darcy pode ser aplicada a maioria dos fluxos de água subterrânea. Entretanto, ela também encontra restrições, que são verificadas quando a velocidade de fluxo é muito alta em meios com poros grandes, e quando o meio poroso é muito irregular.

A constante condutividade hidráulica ( $K$ ) pode ser traduzida como a capacidade do meio poroso em transmitir água, ou seja, traduz a facilidade com que a água se desloca ao longo do perfil do solo, podendo seu valor ser determinado tanto em laboratório como em campo (BEDIENT et al., 1997). Entre as principais técnicas de campo utilizadas para determinar a condutividade hidráulica estão o *slug test*, o ensaio de bombeamento, o ensaio com traçador e o ensaio de tubo aberto. Entre os métodos laboratoriais destacam-se os permeâmetros e as fórmulas de condutividade hidráulica. Nos meios porosos reais, a condutividade hidráulica dos materiais possui uma distribuição complexa e irregular (FITTS, 2002). Quando o valor de  $K$  varia no espaço tem-se um material heterogêneo. Se o valor de  $K$  não variar com a posição, o material é dito homogêneo. Com relação à direção, se o valor de  $K$  variar ( $K_x \neq K_y$ , por exemplo, onde  $K_x$  representa a condutividade na direção  $x$  e  $K_y$  a condutividade na direção  $y$ ) o meio será anisotrópico, sendo isotrópico quando a condutividade hidráulica não variar com a direção ( $K_x = K_y = K_z$ ).

A vazão específica definida por Darcy (ou velocidade de Darcy) também pode ser compreendida como o volume de água fluindo através de uma seção transversal de uma unidade de área do solo por unidade de tempo (Equação (3)). Em um meio poroso esta seção transversal inclui a porção do solo ocupada pelo líquido que nele escoar e a parcela ocupada por sólidos e ar. Por admitir que o fluxo da água subterrânea ocorre através de uma seção transversal inteira de uma amostra de solo, considerasse a velocidade de Darcy uma velocidade fictícia. Na realidade, verifica-se que o fluxo de água subterrânea escoar somente nos canais interconectados entre os poros (velocidade intersticial). Assim, a velocidade de fluxo real geralmente é muito maior do que a velocidade de Darcy (BEDIENT et al., 1997).

$$q = -\frac{Q}{A} \quad (3)$$

$$v_i = -\frac{Q}{(A \times n_e)} \quad (4)$$

onde,

$Q$  = vazão da água subterrânea;  $A$  = área da seção transversal perpendicular à direção do fluxo;  $v_i$  = velocidade intersticial;  $n_e$  = porosidade efetiva.

Outro conceito importante para o estudo do fluxo em aquíferos é o do armazenamento específico ( $S_s$ ), que pode ser definido como a quantidade de água liberada de uma unidade de volume do material saturado ( $V_w$ ) por unidade de variação da carga hidráulica ( $dh$ ) e por unidade de volume do meio ( $V_t$ ), conforme a Equação (5) (FITTS, 2002).

$$S_s = -\frac{dV_w}{V_t} \frac{1}{dh} \quad (5)$$

O armazenamento específico também pode ser dado pela expressão:

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (6)$$

onde,

$\rho_w$  = densidade da água;  $g$  = aceleração da gravidade;  $\alpha$  = compressibilidade do aquífero;  $n$  = porosidade;  $\beta$  = compressibilidade da água.

### 3.1.2. Equação geral para o fluxo tridimensional em aquíferos

O fluxo de água subterrânea através de meios porosos é governado pelas leis da física e depende de diversas variáveis. Sendo assim, ele pode ser descrito por diferentes equações diferenciais parciais, onde as coordenadas espaciais ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) e o tempo ( $t$ ) são variáveis independentes. Para obter as equações que regem o fluxo de água em aquíferos, empregam-se os princípios de conservação da massa e conservação de energia, e a Lei de Darcy (FETTER, 1994).

Para desenvolver a equação que representa o fluxo tridimensional em aquíferos, Fitts (2002) considerou o volume de controle apresentado na Figura 3.2, assumindo que o mesmo está localizado na zona saturada do aquífero e que as suas dimensões são fixas no espaço. Fitts também assumiu que o fluxo macroscópico na vizinhança do elemento é unidimensional na direção  $x$  ( $q_x \neq 0$ ,  $q_y = q_z = 0$ ). Desta maneira, ele obteve primeiro a equação geral para o caso unidimensional, estendendo-a em seguida, para o fluxo tridimensional.

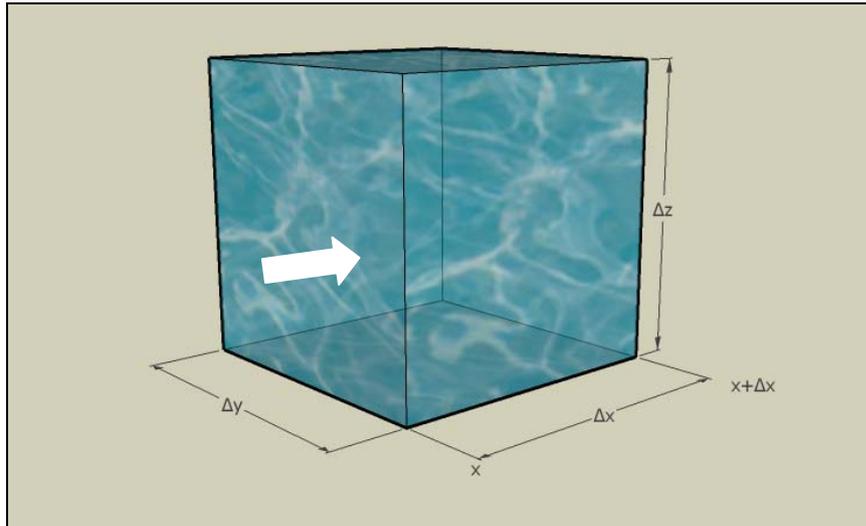


Figura 3.2: Volume de controle utilizado na derivação da equação de fluxo.

Através da realização do balanço de massa no volume de controle considerado,

$$\underbrace{\rho_w(x)q_x(x)\Delta y\Delta z}_{\text{Fluxo de massa que entra no volume de controle}} - \underbrace{\rho_w(x+\Delta x)q_x(x+\Delta x)\Delta y\Delta z}_{\text{Fluxo de massa que sai do volume de controle}} = \underbrace{\rho_w S_s \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x\Delta y\Delta z}_{\text{Taxa de variação de massa armazenada dentro do volume}} \quad (7)$$

onde,

$\Delta x$  = dimensão do volume de controle no eixo  $x$ ;  $\Delta y$  = dimensão do volume de controle no eixo  $y$ ;  $\Delta z$  = dimensão do volume de controle no eixo  $z$ .

Se os fluxos através do lado esquerdo e do lado direito do volume de controle forem iguais, tem-se o estado estacionário. Quando estes fluxos forem diferentes, tem-se o estado transiente (estado não-estacionário).

Aplicando alguns conceitos do cálculo diferencial, chega-se na equação:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

Substituindo  $q_x$  pela definição apresentada na Lei de Darcy (Equação (2)), obtém-se a equação geral unidimensional para o fluxo da água subterrânea:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (9)$$

Estendendo para o fluxo tridimensional, obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

Se no cenário considerado houver uma fonte ou sumidouro ( $R$ ), representando o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de volume do meio e por unidade de tempo, a Equação (10) transforma-se em:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (11)$$

A Equação (11) aplica-se ao escoamento tridimensional da água subterrânea, tanto no aquífero confinado quanto no aquífero não-confinado.

### 3.1.3. Equações de fluxo em aquíferos confinados

Considerando o aquífero homogêneo e isotrópico e o volume de controle da Figura 3.2, a massa total acumulada neste volume de controle pode ser representada por:

$$-\left( \frac{\partial}{\partial x} \rho_w q_x + \frac{\partial}{\partial y} \rho_w q_y + \frac{\partial}{\partial z} \rho_w q_z \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (12)$$

A variação de massa d'água no tempo  $\left( \frac{\partial M}{\partial t} \right)$  é dada pela Equação (13):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial h}{\partial t} \quad (13)$$

A massa total acumulada (Equação (12)) é igual a variação de massa d'água (Equação (13)),

$$-\left[ \frac{\partial(q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(q_z)}{\partial z} \right] \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \rho_w \Delta x \Delta y \Delta z \frac{\partial h}{\partial t} \quad (14)$$

Da Lei de Darcy (Equação (2)), obtém-se a equação que representa o fluxo tridimensional em um aquífero confinado, homogêneo e isotrópico (Equação (15)):

$$K \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15)$$

No estado estacionário não há variações no nível piezométrico do aquífero (carga hidráulica). Considerando que o escoamento através do volume de controle ocorra na horizontal, a equação de fluxo bidimensional em aquífero confinados pode ser expressa como:

$$\left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{e}{T} \right) = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (16)$$

onde,

$e$  = taxa de acumulação;  $T$  = transmissividade; e  $S$  = armazenamento.

### 3.1.4. Equações de fluxo em aquíferos não-confinados

Nos aquíferos não-confinados a espessura da camada saturada pode variar com o tempo, diferente do que ocorre nos aquíferos confinados, onde esta espessura é constante (FETTER, 1994). Sendo assim, a transmissividade ( $T$ ) dos aquíferos livres também varia (Equação (17)).

$$T = Kh \quad (17)$$

onde,

$h$  = espessura da camada saturada a partir da base horizontal do aquífero.

Desta forma, a equação geral para o fluxo bidimensional em aquíferos não-confinados, conhecida por Equação de Boussinesq<sup>2</sup> (1904), pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (18)$$

$S_y$  = coeficiente de armazenamento do meio não-saturado (expressa a relação do volume de água que escoar de uma rocha ou solo saturado devido à atração da gravidade, para o volume total de rocha ou solo).

Se a variação na carga hidráulica do aquífero é reduzida quando comparada com a espessura saturada, a variável espessura ( $h$ ) pode ser substituída por uma espessura média ( $b$ ), assumida como constante. A equação de Boussinesq (Equação (18)) pode ser então linearizada,

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_y}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (19)$$

### 3.1.5. Porosidade

A água subterrânea pode preencher a fração da rocha ou do solo que não é ocupada por matéria sólida. Estes espaços são chamados de interstícios ou espaços porosos (TODD, 1980). A porosidade ( $n$ ) de um solo ou rocha é a medida dos seus interstícios e é expressa pelo percentual do volume total do material que é ocupado por vazios (FETTER, 1994; FITTS, 2002), ou seja,

$$n = \frac{V_v}{V_t} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (20)$$

onde,

$V_v$  é o volume de vazios;  $V_t$  é o volume total de amostra do solo ou rocha;  $V_s$  é o volume de sólidos na amostra.

A porosidade de um solo indica a quantidade máxima de água que este solo pode conter quando está saturado (HEATH, 1983). Todavia, somente uma parcela

---

<sup>2</sup> Joseph Valentin Boussinesq, matemático francês, nasceu em 1842 na cidade de Saint-André-de-Sangonis. Foi professor de física, ciências, mecânica, física experimental, matemática e cálculo das probabilidades (WIKIPÉDIA, 2007).

desta água está disponível para suprir a demanda de um poço ou de uma nascente (Equação (21)). A porosidade disponível para o fluxo da água, ou seja, a fração da porosidade total na qual a água move-se livremente é conhecida como porosidade efetiva ( $n_e$ ), também chamada de rendimento específico ( $s_y$ ). A parcela d'água que não está disponível para uso humano, estando retida no solo após ser drenada por gravidade é chamada de retenção específica ( $s_r$ ). A Tabela 3.1 apresenta valores de porosidade, rendimento específico e retenção específica para alguns materiais.

$$n = s_y + s_r \quad (21)$$

$$s_y = \frac{V_d}{V_t} \quad (22)$$

$$s_r = \frac{V_r}{V_t} \quad (23)$$

onde,

$V_d$  é o volume de água que drena do volume total (volume de vazios que está interconectado e transmitindo o fluxo de água subterrânea (FITTS, 2002));  $V_r$  é o volume de água retido no volume total  $V_t$ .

Tabela 3.1: Valores de porosidade, rendimento específico e retenção específica para alguns materiais.

<b>Material</b>	<b>Porosidade total (%)</b>	<b>Rendimento específico (%)</b>	<b>Retenção específica (%)</b>
Argila	50	2	48
Areia	25	22	3
Cascalho	20	19	1
Carbonato	20	18	2
Basalto	11	8	3
Granito	0,1	0,09	0,01

Fonte: HEATH, 1983.

### 3.2. *Formulação de um modelo*

O desenvolvimento de modelos matemáticos para simulação do fluxo e do transporte em águas subterrâneas envolve basicamente oito etapas. A Figura 3.3 apresenta um fluxograma que representa o processo de desenvolvimento de um modelo.

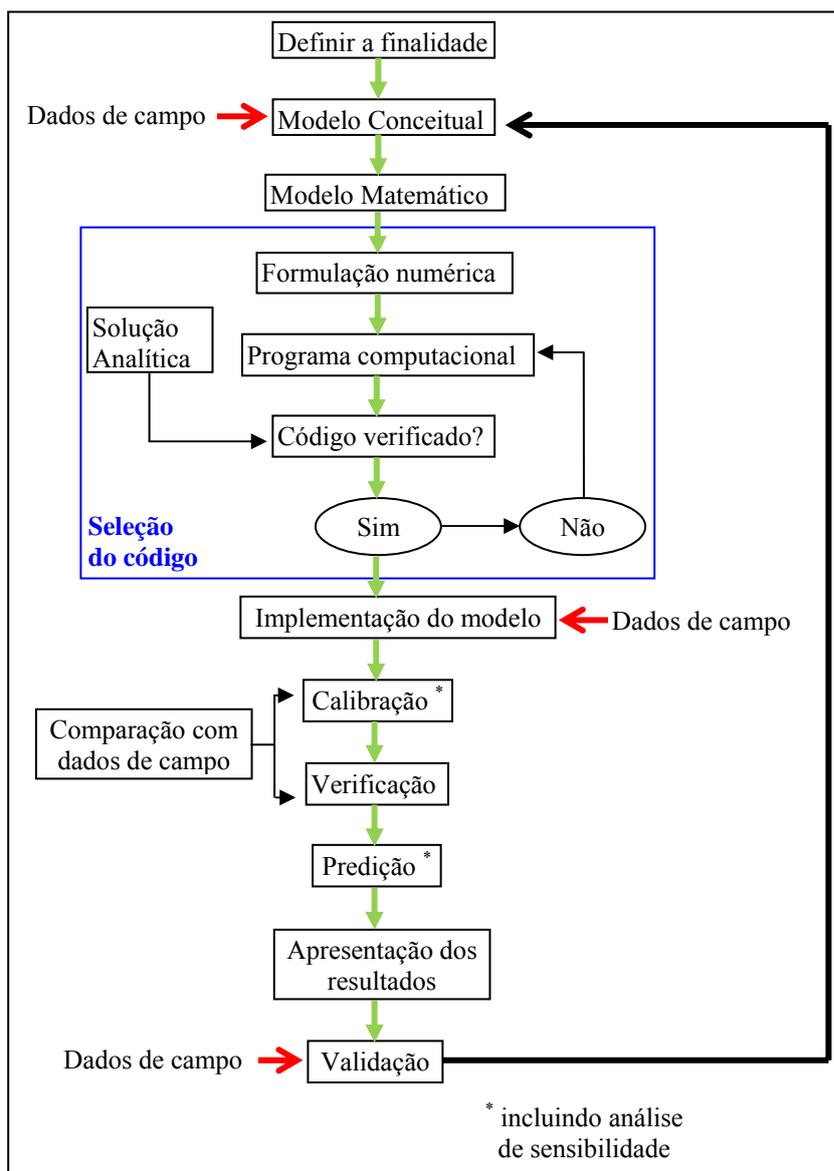


Figura 3.3: Fluxograma do processo de desenvolvimento de um modelo matemático.

### 3.2.1. Condições de contorno

Segundo Filho e Cota (2003), os modelos matemáticos de simulação do fluxo da água subterrânea geralmente são formados por três elementos: uma equação governante que descreve o processo físico que ocorre no sistema; condições de contorno, que consistem em enunciados matemáticos que especificam a variável dependente (carga) ou a derivada da variável dependente (fluxo) nos limites do domínio do problema; e condições iniciais, as quais definem como a carga se distribui no início da simulação. Após especificar as condições iniciais e as condições de contorno, a interação da região considerada na simulação com o meio externo é estabelecida, permitindo assim a solução da equação diferencial parcial do fluxo de água em aquíferos, que pode ser resolvida analiticamente e numericamente.

Em termos matemáticos, as condições de contorno hidrogeológicas são representadas por três tipos: condição de Dirichlet, condição de Neuman e condição de Robin (ou Cauchy). Na condição de Dirichlet, também chamada de fronteira do primeiro tipo, a carga hidráulica é especificada no contorno, podendo ser uma constante ou uma função do espaço e do tempo. Na condição de Neuman, ou condição de fronteira do segundo tipo, o fluxo da água subterrânea é a variável conhecida no contorno. A combinação linear das duas condições anteriores, contorno com fluxo dependente da carga (fluxo através do contorno calculado a partir do valor da carga), constitui a condição de Robin, ou condição de fronteira do terceiro tipo.

### 3.2.2. Calibração e verificação de um modelo matemático

As etapas de calibração e verificação são essenciais no processo de desenvolvimento de modelos matemáticos. Estes procedimentos permitem realizar uma avaliação da performance do modelo que está sendo construído e auxiliam na redução das disparidades entre as simulações do modelo e os dados de campo, melhorando a exatidão do modelo (MANDLE, 2002).

A calibração de um modelo envolve a comparação entre resultados simulados e dados medidos em campo. Neste procedimento, utiliza-se primeiramente para os parâmetros do modelo valores determinados em campo, encontrados na literatura ou obtidos em laboratório. Após rodar o modelo, realiza-se uma comparação estatística entre os resultados obtidos com o modelo e os dados medidos em campo para as variáveis em estudo (Figura 3.4). Quando os erros se encontrarem dentro da faixa tolerável do método estatístico utilizado para a avaliação, o modelo será considerado calibrado. Se os erros não estiverem dentro da faixa tolerável do método de avaliação, deve-se variar sistematicamente os valores dos parâmetros de entrada no modelo até a obtenção de uma simulação aceitável. Ressalta-se que os valores arbitrados para os parâmetros devem situar-se dentro das faixas de valores recomendados pela literatura. O procedimento de calibração exige que as condições de campo do local em estudo sejam corretamente caracterizadas para evitar que o modelo seja calibrado sob circunstâncias que não representem o cenário real (SCHNOOR, 1996; MANDLE, 2002). Segundo MANDLE (2002), a calibração de um modelo deve incluir, no mínimo, uma comparação entre as condições simuladas pelo modelo e as condições reais de campo para os seguintes parâmetros: carga hidráulica, direção do fluxo da água subterrânea, gradiente hidráulico e balanço hídrico. Essas comparações devem então ser apresentadas em mapas, tabelas ou gráficos. Para os modelos que simulam o transporte de contaminantes, deve-se também comparar a concentração de contaminantes, a taxa de migração de contaminantes, a direção de migração e a taxa de degradação.

No procedimento de verificação de um modelo deve-se realizar uma comparação entre os resultados simulados e uma segunda série de dados, independente da série de dados utilizada na calibração. Schnoor (1996) recomenda que esses dois jogos de medidas de campo sejam obtidos sob circunstâncias diferentes. Durante a verificação, os parâmetros obtidos na calibração não podem mais ser alterados. A verificação pode ser avaliada sob diversos critérios, dependendo dos dados que estiverem sendo confrontados.

Um bom desempenho nas etapas de calibração e verificação de um modelo não garantem, ainda, a sua validação, uma vez que o modelo pode responder bem a uma determinada situação, mas trabalhar erroneamente em outras (SCHNOOR, 1996). Para a validação do modelo deve-se então aplicar o modelo nas mais diversas situações, realizando-se repetidas simulações em cada uma destas aplicações.

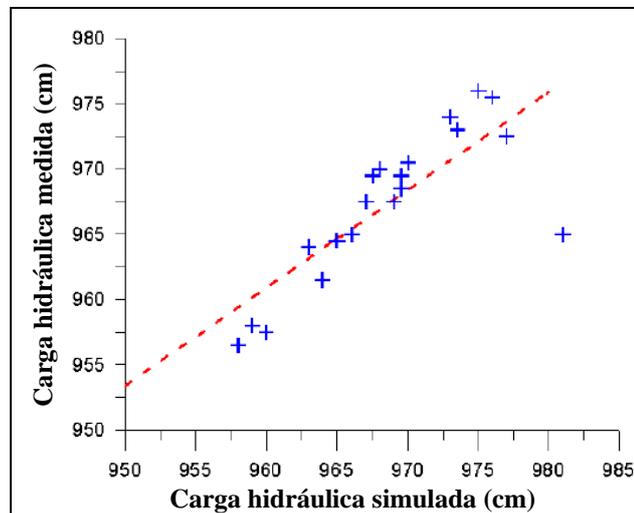


Figura 3.4: Exemplo de comparação estatística entre os resultados obtidos com o modelo e os dados medidos em campo.

Fonte: MANDLE, 2002.

### 3.2.3. Análise de sensibilidade

A calibração de um modelo matemático é cercada por incertezas quanto à exatidão da distribuição espacial e temporal dos parâmetros simulados que estão relacionados ao local estudado, além daquelas que envolvam condições de contorno e estresses (CAVALCANTI, 2002). A análise de sensibilidade objetiva estabelecer o efeito das incertezas no processo de calibração de um modelo.

A análise de sensibilidade pode ser definida como o estudo de como as variações dos resultados dos modelos matemáticos podem ser relacionadas às diferentes fontes de fatores que modificam o resultado (CARDOSO et al., 2004). Com o emprego da análise de sensibilidade é possível verificar a adequação do modelo ao sistema modelado, obter os parâmetros que mais contribuem com o resultado obtido e a delimitação de domínio onde as variações são mais relevantes, determinar as regiões ótimas para calibração de parâmetros e também determinar as dependências entre as variáveis. Em resumo, a análise de sensibilidade avalia a contribuição total das diferentes variáveis de entrada na incerteza final do resultado.

### 3.3. Modelos mais utilizados

O uso de modelos matemáticos para águas subterrâneas é bastante difundido no campo da hidrogeologia (MANDLE, 2002). Estes modelos tornaram-se uma ferramenta fundamental para o planejamento e a tomada de decisão nos processos de gerenciamento ambiental (ASTM, 2002). Modelos de fluxo da água subterrânea são

normalmente utilizados para determinar a velocidade e a direção do movimento da água subterrânea através dos aquíferos e unidades confinadas na subsuperfície. Já os modelos de transporte e transformação são desenvolvidos para estimar a concentração de um produto químico tanto na zona saturada como na zona insaturada do solo.

Um modelo representa uma aproximação de uma situação de campo real. Ou seja, modelos são aproximações conceituais que descrevem um sistema utilizando equações matemáticas (MANDLE, 2002). Quanto mais próximo da realidade do sistema que está sendo modelado forem as equações matemáticas, maior será a aplicabilidade deste modelo.

A solução das equações que descrevem o fluxo e os processos de transporte e transformação pode ser obtida utilizando-se modelos analíticos ou modelos numéricos. Nos modelos analíticos as condições de fluxo ou de transporte são simplificadas e as equações possuem solução exata. Estes modelos são recomendados para avaliações iniciais onde não é necessário um alto nível de exatidão e para checar os resultados obtidos com modelos numéricos. Nos modelos numéricos consegue-se resolver as equações que representam as condições de fluxo e de transporte mais complexas. Desta maneira, o método numérico de solução traz ao modelo maior robustez e flexibilidade, permitindo sua aplicação em situações diversas. A exatidão dos modelos numéricos depende basicamente dos dados de entrada no modelo e do método numérico utilizado para resolver as equações (MANDLE, 2002).

Existe um grande número de modelos matemáticos para águas subterrâneas, tanto uni, bi ou tridimensionais, analíticos ou numéricos. Dentre os modelos mais utilizados para o cálculo do fluxo e avaliação de risco destacam-se: Bioscreen, RBCA Tool Kit for Chemical Releases, Risc 4, Modflow e Flowpath. A seguir, são apresentadas as principais características destes modelos.

### 3.3.1. Bioscreen

O Bioscreen – Sistema de Suporte à Atenuação Natural – é um modelo unidimensional baseado no modelo analítico do transporte de solutos de Domenico, programado no Microsoft Excel, que simula a liberação de hidrocarbonetos de petróleo na zona saturada do solo incluindo advecção, dispersão, sorção e biodegradação – aeróbia e anaeróbia (USEPA, 2007). A principal simplificação verificada no modelo refere-se à fonte de contaminação, adotada como finita, plana e vertical, que se infiltra continuamente nos locais em que a cinética de dissolução dos contaminantes é aproximadamente de primeira ordem (MANUAL DO USUÁRIO, 2005). O modelo simula o decaimento das concentrações de soluto considerando o transporte sob três diferentes condições: sem biodegradação, com biodegradação instantânea, ou com biodegradação de cinética de primeira ordem.

### 3.3.2. RBCA Tool Kit for Chemical Releases

Este modelo contempla as exigências da norma americana ASTM E-1739 – *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action* – que apresenta a metodologia de

avaliação de risco (GROUND WATER SERVICE, INC., 1995 apud MANUAL DO USUÁRIO, 2005). O RBCA Tool Kit for Chemical Releases é um modelo unidimensional, analítico, construído no ambiente do Microsoft Excel, que combina modelos de transporte de contaminantes na água subterrânea com ferramentas de avaliação de risco utilizadas nas etapas 1 e 2 estabelecidas pela ASTM (MANUAL DO USUÁRIO, 2005).

### 3.3.3. Risc 4

O Risc 4 - *Risk-Integrated Software for Clean-ups* - é um modelo unidimensional, desenvolvido para simular o transporte e a transformação dos contaminantes e auxiliar na avaliação dos riscos potenciais que locais contaminados oferecem à saúde humana (SPENCE e WALDEN, 2001, apud CHIARANDA et al., 2005). O modelo disponibiliza 14 rotas de exposição, incluindo diversos cenários, como crescimento de vegetais em solos contaminados e irrigação.

A principal limitação verificada nestes modelos unidimensionais, Bioscreen, RBCA Tool Kit for Chemical Releases e Risc 4, é que os mesmos só podem ser utilizados em cenários mais simples, como por exemplo, cenário com baixa heterogeneidade e ausência de bombeamento (MANUAL DO USUÁRIO, 2005).

### 3.3.4. Modflow

O Modflow, cuja primeira versão foi apresentada em 1984, é um modelo tridimensional utilizado na simulação do fluxo da água subterrânea. As equações de transporte são resolvidas numericamente por meio do método de diferenças finitas (USEPA, 2007; MANUAL DO USUÁRIO, 2005). O Modflow permite simular o fluxo no estado estacionário e no não-estacionário, em aquíferos confinados e não-confinados, além de permitir a inserção de variações no escoamento, como recargas e bombeamentos.

### 3.3.5. Flowpath

O modelo Flowpath é uma ferramenta para análises numéricas bidimensionais que permite, entre outros, o cálculo da velocidade da água subterrânea e a simulação do transporte de contaminantes potenciais (FRANZ & GUIGUER, 1990). Sua primeira versão foi disponibilizada em 1989. Atualmente, o Flowpath é capaz de simular o fluxo da água subterrânea e o transporte de contaminantes em aquíferos não-confinados, confinados e semi-confinados nas mais diversas condições, como por exemplo, aquíferos com propriedades heterogêneas, múltiplos poços de bombeamento e complexas condições de contorno. Outra característica deste modelo é o cálculo da carga hidráulica para o estado estacionário. Para a solução da equação do fluxo bidimensional para o estado estacionário (Equação (24)) aplica-se o método das diferenças finitas.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \pm Q(x, y) = 0 \quad (24)$$

onde:  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$  são componentes principais do tensor transmissividade [ $L^2.T^{-1}$ ];  $h$  é a carga hidráulica [L];  $Q(x,y)$  representa o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de área do aquífero – pode representar um poço de injeção/bombeamento, infiltração ou evapotranspiração [ $L.T^{-1}$ ];  $x$ ,  $y$  são as coordenadas cartesianas.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Modelo SCBR

O modelo SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco – é resultado da parceria entre a PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), através do Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas (REMAS), com a colaboração da ESSS (*Engineering Simulation and Scientific Software*).

O SCBR é um modelo matemático bidimensional desenvolvido para auxiliar a tomada de decisão no gerenciamento ambiental de áreas impactadas ou em áreas onde são praticadas atividades potencialmente poluidoras (Figura 4.1). O modelo SCBR permite entre outros, a determinação do fluxo da água subterrânea, a estimativa do alcance e da velocidade de migração de plumas de contaminação, a definição de perímetros de proteção de aquíferos, o cálculo e o mapeamento do risco à saúde humana considerando diversas rotas de exposição e a geração de relatórios e animações. Destaca-se que o modelo SCBR considera a interferência do etanol sobre a biodegradação e a solubilidade dos hidrocarbonetos de petróleo para os casos de contaminações por combustíveis brasileiros, onde se adicionam álcool.

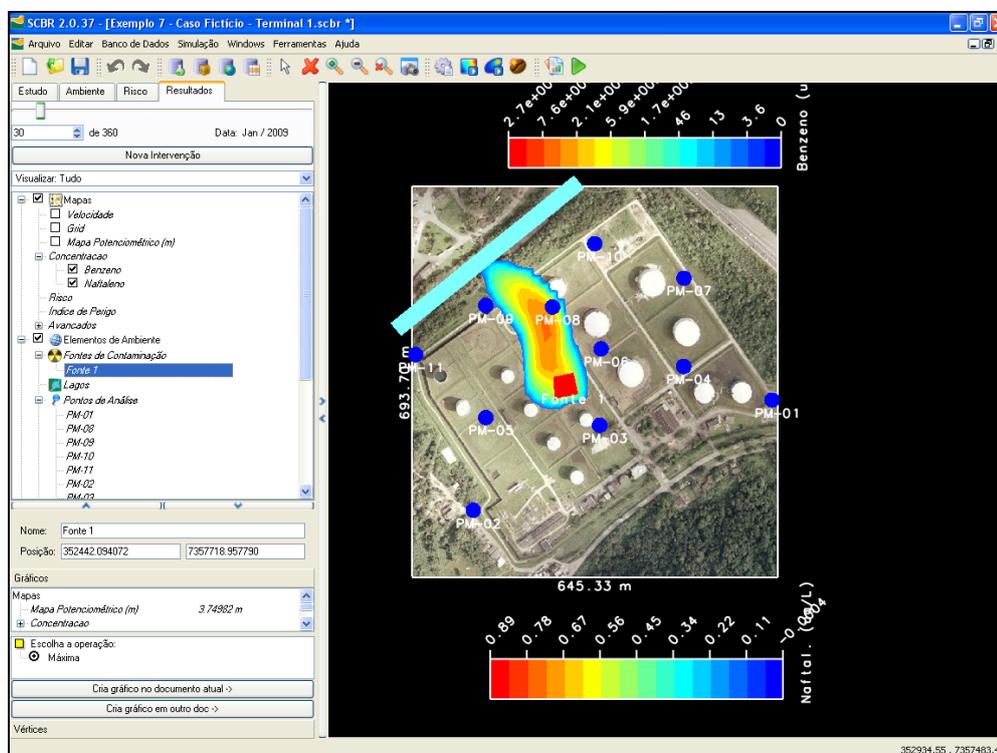


Figura 4.1: Interface do modelo SCBR – versão 2.0.

Entre os principais cenários que abrangem o uso do SCBR estão as contaminações ambientais, como por exemplo: rompimento de dutos, vazamento de tanques de armazenamento de petróleo e seus derivados, contaminação por aterros industriais e outros cenários que envolvam a liberação de compostos tóxicos orgânicos ou inorgânicos (PETROBRAS, 2006).

A formulação matemática do SCBR foi fundamentada com base no modelo conceitual que representa a contaminação das águas subterrâneas de unidades aquíferas não confinadas. Neste modelo conceitual, os mecanismos primários de contaminação das águas subterrâneas são vazamentos em sistemas de armazenamento e distribuição de produtos químicos, atividades agrícolas, disposição inadequada de resíduos tóxicos, entre outros (CORSEUIL et al., 2006). Ainda com relação a formulação matemática do modelo matemático SCBR, destaca-se que ela envolve a solução das equações de Darcy no meio poroso, acrescidas das equações de transporte de soluto. Para a solução da equação do escoamento bidimensional o SCBR utiliza o método numérico de volumes finitos, método que emprega volumes de controle na discretização do domínio e satisfaz a conservação da propriedade em nível de volumes elementares, eliminando inconsistências de perda ou ganho de propriedades no interior do domínio de cálculo (MALISKA, 1995). A opção pelo método numérico de solução das equações ao invés da analítica, acarreta em maior robustez e flexibilidade ao modelo, permitindo sua aplicação em situações diversas, podendo ser incorporado na simulação a heterogeneidade do aquífero, múltiplas fontes de contaminação, bombeamentos, barreiras, rios e lagos (CORSEUIL et al., 2006).

O modelo de fluxo bidimensional da água subterrânea para aquíferos não confinados implementado no SCBR é conhecida como equação de Boussinesq. Formalmente, a equação de Boussinesq é obtida através da integração da equação tridimensional de fluxo sobre a dimensão vertical do aquífero:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + (q_z + I) + F = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (25)$$

onde:  $K_x$  e  $K_y$  são componentes principais do tensor condutividade hidráulica, ao longo dos eixos de coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente [L/T];  $q_z$  é a velocidade específica da água subterrânea, na direção de  $z$ , que atravessa a base do aquífero, representando a drenança (ganho ou perda) de água através da interface com a camada confinante inferior [L/T];  $I$  é termo de infiltração de água (recarga) através da superfície superior da zona saturada do meio, representando o volume de água introduzido no aquífero, por unidade de tempo [L/T];  $S_y$  é o coeficiente de armazenamento do meio não-saturado, [adimensional];  $F$  representa o termo fonte ou sumidouro de água, ou seja, o volume de água introduzido (ou retirado) por unidade de área do meio e por unidade de tempo [L<sup>3</sup>/L<sup>2</sup>.T] – o valor de  $F$  é positivo, se for uma fonte, e negativo se for um sumidouro.

As condições de contorno utilizadas na solução da Equação (25) são do 1º Tipo (Dirichlet), onde a carga hidráulica é especificada no contorno, e o caso especial da condição de 2º Tipo (Neumann), especificando no contorno a condição de não fluxo.

Desde o ano de 2005 está sendo desenvolvida a versão 2.0 do modelo SCBR. É importante destacar que o projeto SCBR teve início em 2001, e que em 2003 foi

disponibilizada a primeira versão do SCBR – SCBR 1.0. No período compreendido entre 2003 e 2004 foi desenvolvida a versão 1.5 do modelo. Esta versão contemplou uma evolução nos modelos de transporte e transformação de contaminantes na água subterrânea e superficial. Para a versão 2.0 está sendo acoplado ao modelo o módulo completo de avaliação de risco.

#### **4.2. Obtenção dos dados de campo**

Para a realização da calibração e da verificação do modelo SCBR foram utilizadas duas fontes de dados, uma proveniente da Fazenda Experimental Ressacada e outra fornecida pela Petrobras/Transpetro. Para estas duas fontes foram levantados valores referentes aos parâmetros de fluxo condutividade hidráulica, carga hidráulica e porosidade efetiva. Também foram obtidas junto a estas fontes as coordenadas geográficas de cada área em estudo, bem como as coordenadas dos poços de monitoramento do nível d'água de cada área.

##### **4.2.1. Fazenda Ressacada**

Neste trabalho foram utilizados os dados das Áreas Experimentais 01 e 02 da Fazenda Ressacada (Figura 4.2). Esta se localiza no sul do município de Florianópolis, na região da Tapera, próxima ao Aeroporto Hercílio Luz. O clima encontrado na região de Florianópolis é úmido, com precipitação anual média de 1.583mm (dados obtidos junto ao Ajardinado Meteorológico do DPV – Destacamento e Proteção ao Vôo). No verão a média de temperatura ao mês é de 24°C e no inverno é de 17°C. Com relação a geologia da região da Ressacada, destaca-se a presença de depósitos de areia marinha, lacustre, aluvial e eólica.



Figura 4.2: Localização da Fazenda Experimental da Ressacada.

#### 4.2.1.1. Área Experimental 01 da Fazenda Ressacada

O solo da Área Experimental 01 (Figura 4.3) é caracterizado por uma camada superficial constituída de areia marrom acinzentada e por uma camada de subsuperfície composta de areia fina de coloração cinza, com teor de silte e argila menor que 5%, e granulometria uniforme. A porosidade efetiva do solo saturado ( $n_e$ ) é igual a 20%, conforme análise realizada no Laboratório de Solos da UFSC. A condutividade hidráulica média, obtida por meio de três ensaios de carga em níveis variados para uma área experimental próxima, é de  $6,6 \times 10^{-5}$  cm/s (ensaios realizados por Geodésia, Estudos, Projetos e Assessoria Ltda.). Para monitorar o nível d'água na Área 01, foram instalados 05 poços de monitoramento (piezômetros) ao redor da área experimental (Figura 4.4). A Tabela 4.1 apresenta as coordenadas absolutas EW (eixo  $x$ ), NS (eixo  $y$ ) e as cotas das tampas de cada piezômetro.



Figura 4.3: Área Experimental 01 da Fazenda Ressacada.

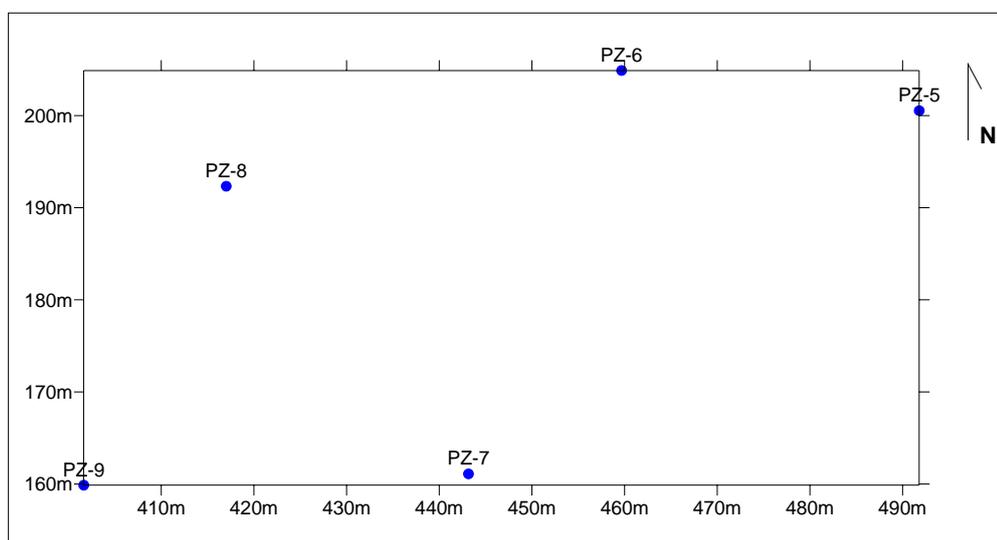


Figura 4.4: Piezômetros instalados na Área Experimental 01.

Tabela 4.1: Coordenadas absolutas dos piezômetros e as cotas das tampas de cada piezômetro para a Área Experimental 01.

<b>Piezômetros</b>	<b>EW [m] (x)</b>	<b>NS [m] (y)</b>	<b>Cota terreno [m]</b>	<b>Cota tampa [m]</b>
PZ-5	491,802	200,524	0,401	1,272
PZ-6	459,679	204,887	0,343	1,457
PZ-7	443,160	161,091	0,333	0,989
PZ-8	417,019	192,322	0,140	0,782
PZ-9	401,645	159,868	0,181	0,869

#### 4.2.1.2. Área Experimental 02 da Fazenda Ressacada

O solo da Área Experimental 02 (Figura 4.5) pode ser caracterizado como sendo constituído por uma areia fina de coloração variando do cinza ao cinza-marrom e pouco argiloso, contendo baixo teor de matéria orgânica. A condutividade hidráulica média desta Área é de  $1,0 \times 10^{-4}$  cm/s e a porosidade efetiva média é de 20%. Para monitorar o nível d'água na Área 02, foram instalados 19 piezômetros ao redor da área experimental (Figura 4.6). A Tabela 4.2 apresenta as coordenadas absolutas EW (eixo x), NS (eixo y) e as cotas dos tubos de cada piezômetro.



Figura 4.5: Área experimental 02 da Fazenda Ressacada.

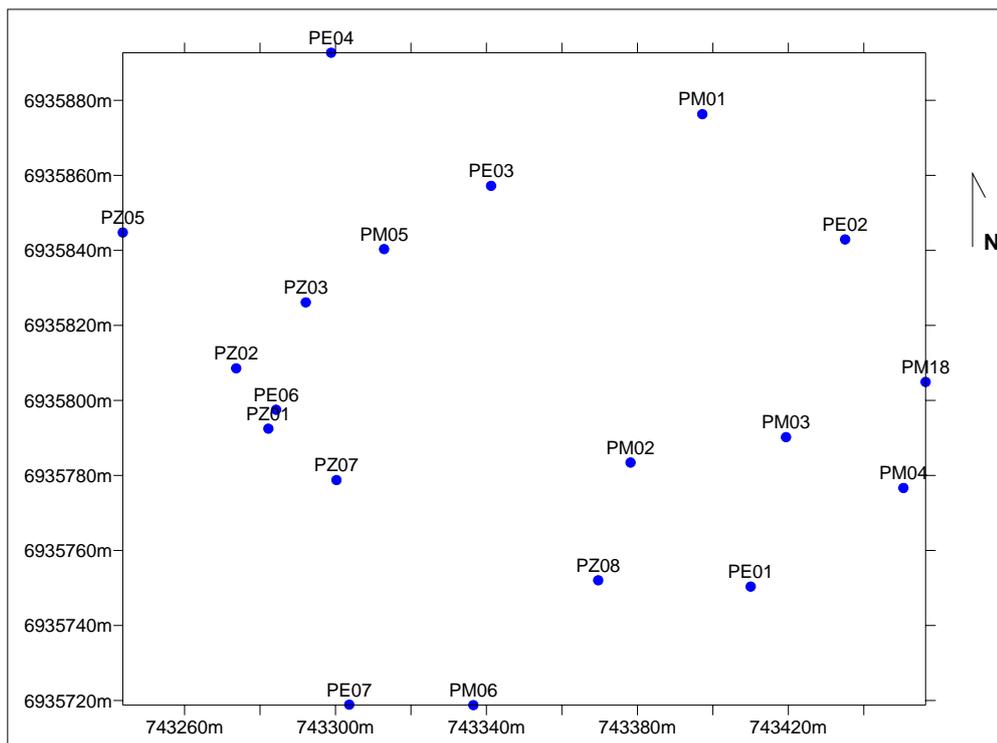


Figura 4.6: Piezômetros instalados na Área Experimental 02.

Tabela 4.2: Coordenadas absolutas dos piezômetros e as cotas dos tubos de cada piezômetro para a Área Experimental 02.

Piezômetro	EW [m] (X)	NS [m] (Y)	Cota terreno [m]	Cota tubo [m]
PE01	743410,016	6935750,373	5,01	5,55
PE02	743435,038	6935842,915	5,41	5,87
PE03	743341,238	6935857,196	5,54	6,05
PE04	743298,831	6935892,687	5,55	5,69
PE06	743284,258	6935797,512	5,23	5,45
PE07	743303,649	6935718,899	4,91	5,08
PM01	743397,215	6935876,308	5,43	5,94
PM02	743378,172	6935783,436	5,50	6,00
PM03	743419,381	6935790,209	5,35	5,83
PM04	743450,502	6935776,662	4,60	5,10
PM05	743312,879	6935840,342	5,49	6,00
PM06	743336,536	6935718,780	5,16	5,45
PM18	743456,379	6935804,919	4,86	5,17
PZ01	743282,209	6935792,474	5,19	5,37
PZ02	743273,678	6935808,555	5,14	5,46
PZ03	743292,129	6935826,134	5,41	5,66
PZ05	743243,630	6935844,762	5,26	6,06
PZ07	743300,256	6935778,772	5,27	5,90
PZ08	743369,618	6935752,049	5,22	5,32

#### 4.2.2. Terminal Petrobras/Transpetro

Os dados fornecidos pela Transpetro são oriundos de investigações ambientais realizadas no Terminal de Armazenamento de Combustíveis Parque SUAPE, localizado no perímetro do município de Madre de Deus, Bahia (Figura 4.7). O Parque SUAPE está situado na extremidade leste da ilha de Madre de Deus, na porção norte da Baía de Todos os Santos. Esta região é reconhecida como um pólo petrolífero, tanto pela produção de óleo em poços terrestres, como pela presença da Refinaria Landulfo Alves (RLAM) e outras unidades de distribuição aquaviárias ou terrestres de derivados (BRAIN TECNOLOGIA LTDA., 2004). É importante destacar que a área do Terminal Parque SUAPE sofre influências de maré, uma vez que se localiza adjacente ao litoral.

Para obter a caracterização dos parâmetros hidrogeológicos do local foram instalados na área do Terminal 15 poços de monitoramento (Figura 4.8). A Tabela 4.3 apresenta as coordenadas absolutas de cada poço e os valores de condutividade hidráulica e porosidade efetiva obtidos. Na Tabela 4.3 também estão indicados os valores de carga hidráulica medidos na área e que foram utilizados no procedimento de calibração do modelo SCBR.

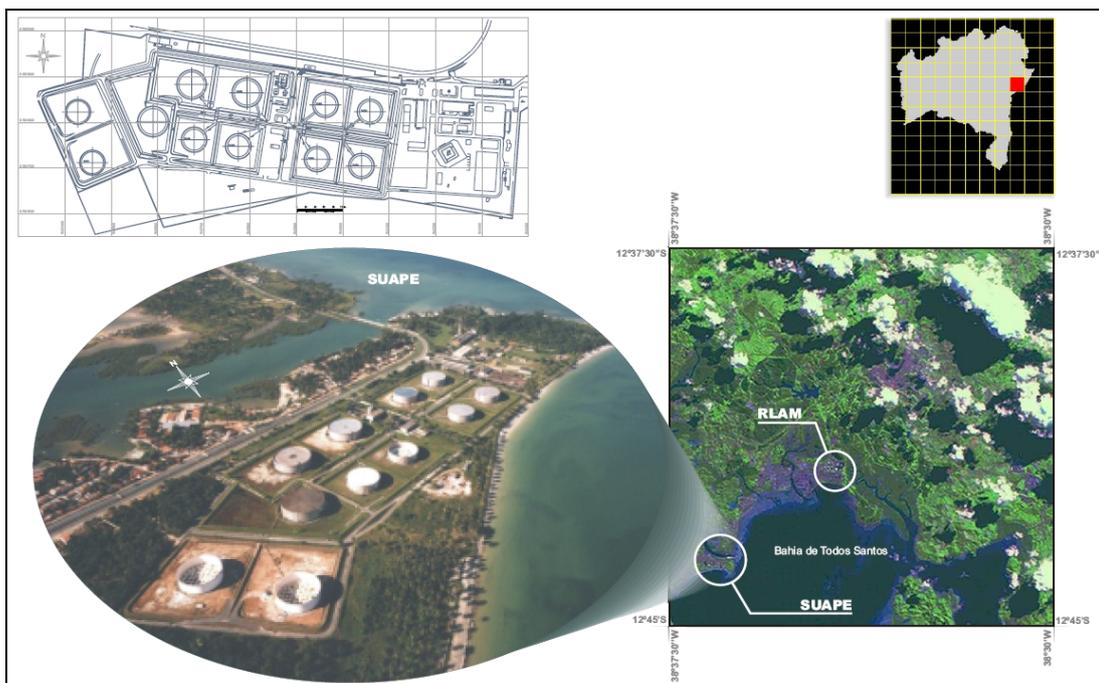


Figura 4.7: Terminal de Armazenamento de Combustíveis Parque SUAPE, localizado no município de Madre de Deus (BA).  
Fonte: BRAIN TECNOLOGIA LTDA., 2004.

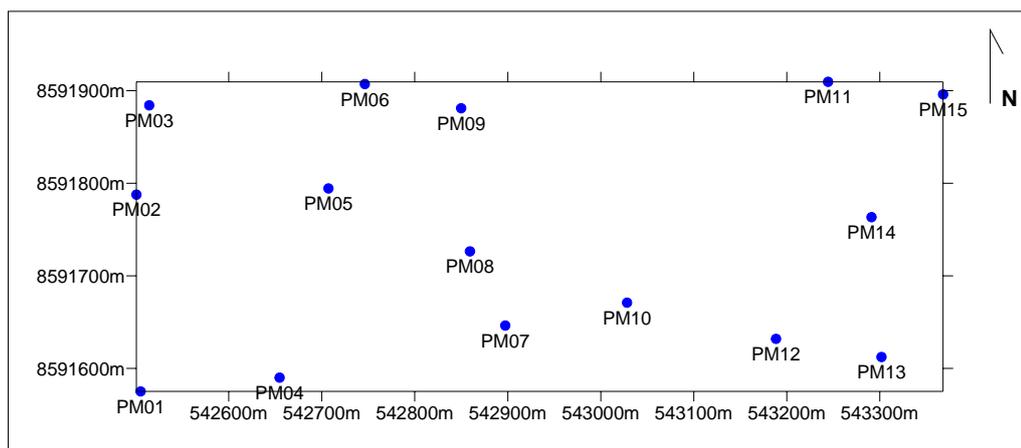


Figura 4.8: Piezômetros instalados no Terminal Parque SUAPE.

Tabela 4.3: Coordenadas absolutas e caracterização hidrogeológica dos poços de monitoramento do Parque SUAPE.

Poço de Monitoramento	EW [m] (x)	NS [m] (y)	Porosidade efetiva	$K$ [cm/s]	Carga hidráulica [m]
PM01	542505,210	8591575,207	0,21	$3,33 \times 10^{-5}$	1,64
PM02	542500,716	8591787,679	0,21	$1,21 \times 10^{-6}$	1,62
PM03	542514,518	8591884,120	0,21	$1,19 \times 10^{-6}$	0,70
PM04	542654,664	8591590,061	0,21	$1,84 \times 10^{-5}$	1,76
PM05	542707,210	8591794,366	0,21	$5,95 \times 10^{-6}$	1,22
PM06	542746,336	8591907,135	0,21	$2,75 \times 10^{-6}$	1,39
PM07	542897,334	8591646,327	0,21	$1,97 \times 10^{-5}$	2,33
PM08	542859,342	8591726,419	0,21	$9,84 \times 10^{-6}$	2,10
PM09	542849,845	8591880,954	0,21	$2,02 \times 10^{-6}$	1,33
PM10	543028,230	8591671,040	0,21	$1,24 \times 10^{-5}$	2,56
PM11	543244,379	8591909,486	0,21	$3,18 \times 10^{-5}$	1,43
PM12	543188,418	8591631,934	0,21	$1,31 \times 10^{-5}$	1,50
PM13	543301,838	8591612,349	0,21	$1,92 \times 10^{-5}$	1,50
PM14	543291,096	8591763,338	0,21	$2,49 \times 10^{-6}$	2,53
PM15	543368,072	8591895,958	0,21	$1,03 \times 10^{-5}$	2,25

### 4.3. Calibração do modelo SCBR

O procedimento de calibração adotado está inserido dentro das metodologias apresentadas pela norma ASTM D 6025 – 96 (*Standard Guide for Developing and Evaluating Ground-Water Modeling Codes*) e pelo Guia de Modelagem Matemática de Águas Subterrâneas do Estado Americano de Michigan (MANDLE, 2002), que abordam o desenvolvimento de modelos matemáticos. Neste trabalho, a calibração do SCBR foi realizada para os valores de carga hidráulica das Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada e para os valores de carga hidráulica provenientes do Parque SUAPE. Além dos valores de carga hidráulica, foram introduzidos no modelo os parâmetros de fluxo condutividade hidráulica, porosidade efetiva e recarga.

O procedimento utilizado na calibração do SCBR para os valores de carga hidráulica pode ser resumido da seguinte maneira:

a) Primeiro, o modelo SCBR foi configurado para as três áreas selecionadas. Os dados de condutividade hidráulica, carga hidráulica, porosidade efetiva e recarga foram inseridos no modelo;

b) Ajustou-se em seguida o domínio de simulação (condições de contorno) para cada área em estudo;

c) Rodou-se então o modelo;

d) Os resultados obtidos com o modelo para a carga hidráulica (carga hidráulica simulada) foram então comparados com os dados fornecidos (carga hidráulica medida). A calibração do SCBR foi então avaliada pelo modelo de regressão linear, através da obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos pontos medidos em campo versus os resultados da simulação, conforme exemplo apresentado na Figura 3.4. O modelo foi considerado calibrado com a obtenção de um  $R^2$  maior que 0,80 (SCHNOOR, 1996).

Ressalta-se que neste trabalho foi utilizada a versão 2.0.49 do SCBR. Versões anteriores ou posteriores podem apresentar resultados diferentes para as áreas simuladas em função de alguma alteração no código computacional do modelo.

#### 4.3.1. Calibração das Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada

Na calibração das Áreas Experimentais 01 e 02 da Fazenda Ressacada foram utilizadas duas séries de dados de carga hidráulica para cada Área Experimental, como mostra a Tabela 4.4. Para a Área 01 utilizaram-se as coletas 69 (leitura dos piezômetros – L.P. 69) e 72 (L.P. 72) realizadas nos dias 10/12/2003 e 03/08/2004, respectivamente. Já para a Área 02 fez-se uso das coletas 20 (L.P. 20) e 21 (L.P. 21), realizadas, respectivamente, nos dias 13 e 16 de abril de 2007.

Para cada série de dados de carga hidráulica medida foram realizadas seis calibrações sob diferentes condições de contorno. Assim, determinou-se o melhor conjunto de dados de entrada (melhor calibração) para cada Área Experimental. Na primeira calibração (tipo 1) o domínio de simulação (DS) foi simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros sem a preocupação de ajustá-lo paralelamente a direção do fluxo da água subterrânea (Figuras 4.9 e 4.10). Na calibração tipo 1 não foi considerada a influência da recarga ( $recarga=0,0\text{ mm/ano}$ ). Nas calibrações tipo 1a e 1b manteve-se o domínio de simulação conforme ajustado no tipo 1 e variou-se os valores da recarga para 50 e 100 mm/ano, respectivamente. Na calibração tipo 2 procurou-se ajustar o DS de maneira paralela ao fluxo da água subterrânea gerado pelo modelo SCBR (Figuras 4.11 e 4.12). Nesta calibração a influência da recarga não foi considerada, enquanto que nas calibrações tipo 2a e 2b variou-se, respectivamente, a recarga em 50 e 100 mm/ano, mantendo-se o ajuste do DS utilizado na calibração tipo 2. A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos tipos de calibração realizados.

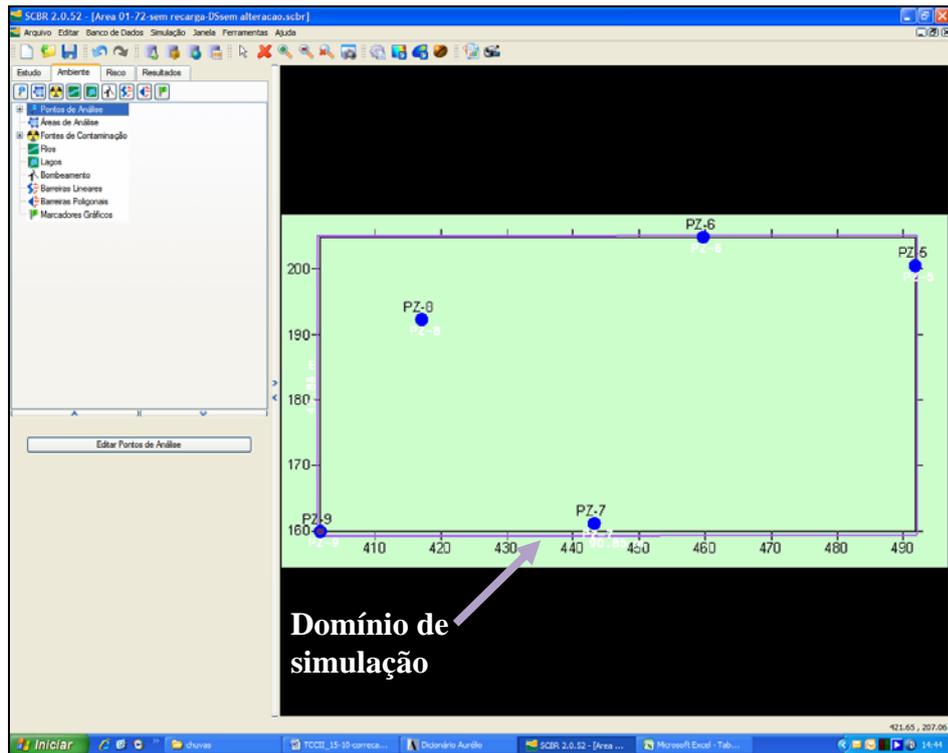


Figura 4.9: Domínio de simulação (DS) simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros da Área 01.

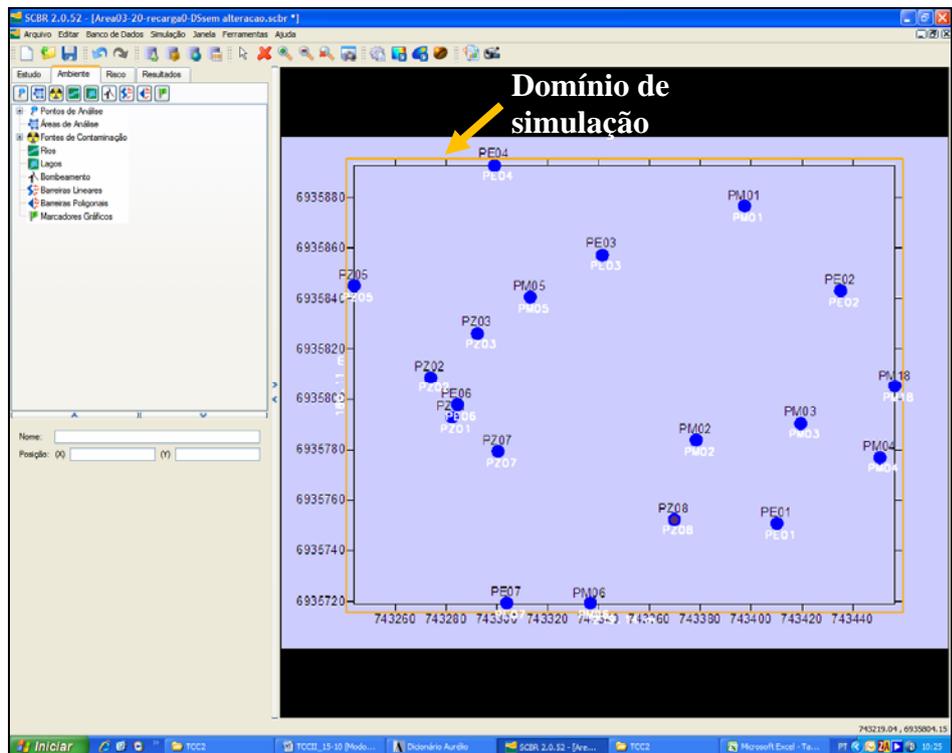


Figura 4.10: Domínio de simulação (DS) simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros da Área 02.

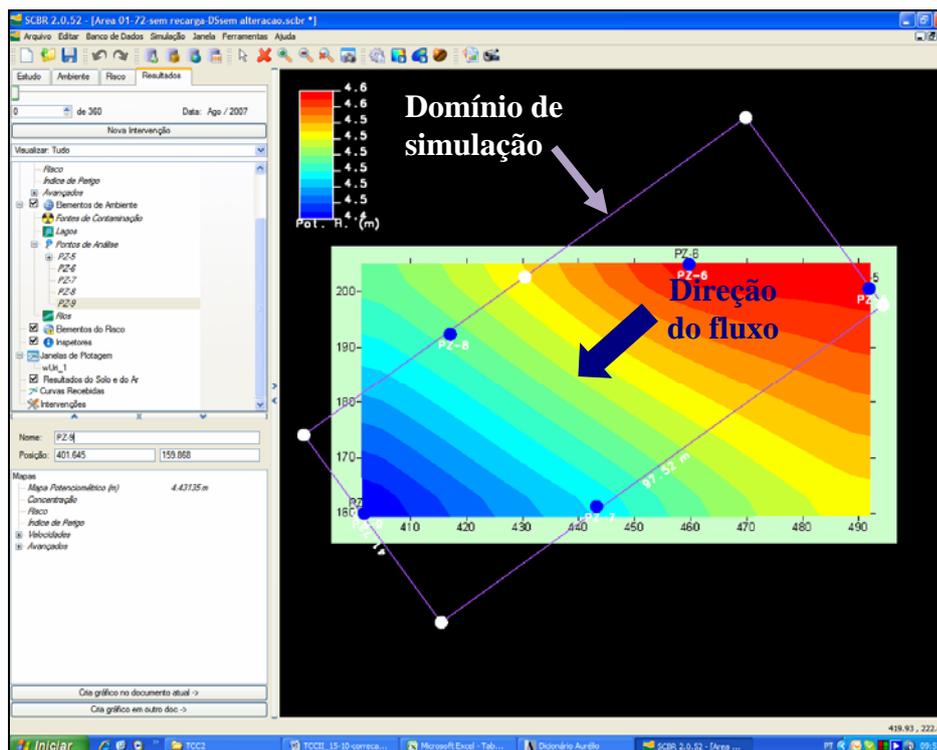


Figura 4.11: Domínio de simulação (DS) ajustado paralelamente à direção do fluxo da água subterrânea da Área 01.

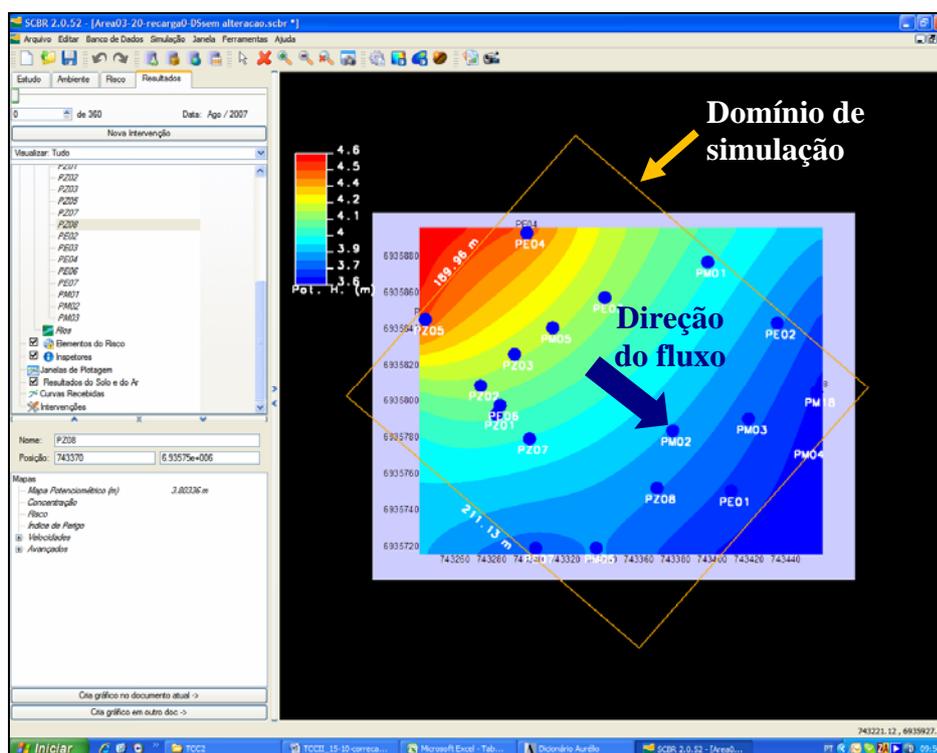


Figura 4.12: Domínio de simulação (DS) ajustado paralelamente à direção do fluxo da água subterrânea da Área 02.

Tabela 4.4: Valores de carga hidráulica medida, condutividade hidráulica e porosidade efetiva nas Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada utilizados no procedimento de calibração do modelo SCBR.

Área 01	Carga hidráulica medida (m)		Área 02	Carga hidráulica medida (m)	
	<i>Piezômetros</i>	<i>L.P. 69</i>		<i>L.P. 72</i>	<i>Piezômetros</i>
PZ-5	4,482	4,582	PE01	3,645	3,655
PZ-6	4,457	4,596	PE02	3,716	3,714
PZ-7	4,379	4,474	PE03	3,998	3,989
PZ-8	4,382	4,508	PE04	4,494	4,485
PZ-9	4,339	4,423	PE06	3,860	3,850
			PE07	3,723	3,700
			PM01	3,985	3,962
			PM02	3,714	3,717
			PM03	3,730	3,713
			PM04	3,626	3,632
			PM05	3,941	3,936
			PM06	3,822	3,828
			PM18	3,648	3,653
			PZ01	3,792	3,794
			PZ02	3,814	3,814
			PZ03	4,003	3,995
			PZ05	4,550	4,584
			PZ07	3,860	3,861
			PZ08	3,712	3,764
<i>Data</i>	<i>10/12/03</i>	<i>03/08/04</i>	<i>Data</i>	<i>13/04/07</i>	<i>16/04/07</i>
<i>Condutividade hidráulica – K (cm/s)</i>	<i>Área 01</i>		<i>Área 02</i>		
	6,6x10 <sup>-5</sup>		1,0x10 <sup>-4</sup>		
<i>Porosidade efetiva</i>	<i>Área 01</i>		<i>Área 02</i>		
	0,2		0,2		

Tabela 4.5: Tipos de calibração realizados para as Áreas 01 e 02 da Fazenda Ressacada.

Tipo de calibração	D.S. <sup>1</sup> sem considerar a direção do fluxo	D.S. <sup>1</sup> paralelo ao fluxo	Recarga (mm/ano)	Área do D.S. <sup>1</sup> (m <sup>2</sup> )		D.P. <sup>2</sup> (nº de poços/1000m <sup>2</sup> )	
				Área 01	Área 02	Área 01	Área 02
1	Sim	Não	Não	0			
1a	Sim	Não	Sim	50	4.168	39.469	1,20
1b	Sim	Não	Sim	100			0,48
2	Não	Sim	Não	0			
2a	Não	Sim	Sim	50	4.070	40.106	1,23
2b	Não	Sim	Sim	100			0,47

D.S.<sup>1</sup> – Domínio da simulação;

D.P.<sup>2</sup> – Densidade de piezômetros.

#### 4.3.2. Calibração do Terminal Parque SUAPE

A calibração do Terminal Parque SUAPE foi realizada somente para a série de dados de carga hidráulica apresentada na Tabela 4.3. Devido aos baixos valores de R<sup>2</sup> encontrados na calibração das Áreas da Fazenda Ressacada quando se inseriu a recarga e à dificuldade em ajustar o domínio de simulação de forma paralela ao fluxo da água subterrânea gerado pelo SCBR, realizou-se apenas um tipo de calibração para o Parque SUAPE. A Tabela 4.6 apresenta as características do tipo de calibração realizado para esta área.

Tabela 4.6: Características da calibração realizada para o Parque SUAPE.

Tipo de calibração	Domínio da simulação sem considerar a direção do fluxo	Domínio da simulação paralelo ao fluxo	Recarga (mm/ano)	Área do DS (m <sup>2</sup> )	D.P. (n.º de poços/1.000m <sup>2</sup> )
1	Sim	Não	Não	0	295.650
					0,05

D.P. – Densidade de poços de monitoramento.

Através da calibração do Parque SUAPE procurou-se demonstrar que o modelo SCBR apresenta resultados satisfatórios tanto na simulação de pequenas áreas (a Área 01 da Fazenda Ressacada possui uma área<sup>3</sup> aproximada de 4.100m<sup>2</sup>) como na simulação de grandes áreas (o Parque SUAPE apresenta uma área<sup>3</sup> em torno de 295.000m<sup>2</sup>).

#### 4.4. Verificação do modelo SCBR

A verificação do modelo SCBR foi realizada somente para as Áreas Experimentais da Fazenda Ressacada, uma vez que para o Terminal Parque SUAPE só foi adquirido uma série de dados de carga hidráulica. Para a verificação do SCBR foi adotado o seguinte procedimento:

a) Com exceção dos valores de carga hidráulica, os dados de entrada no modelo (posição do DS, condutividade hidráulica, recarga e porosidade efetiva)

<sup>3</sup> Este valor corresponde à área do domínio de simulação configurado no modelo SCBR.

foram os mesmos utilizados no procedimento de calibração. Foram mantidos os dados de entrada obtidos nos melhores tipos de calibração, isto é, os dados de entrada obtidos nas calibrações que obtiveram os maiores  $R^2$ . Nas calibrações realizadas para a Área 01 o maior  $R^2$  obtido foi de 0,9974 para a calibração tipo 1 com os valores da L.P. 69. Para a Área 02 o maior  $R^2$  obtido foi de 0,8156 com os dados da L.P. 20, também para a calibração tipo 1;

b) Para os valores de carga hidráulica foram utilizadas novas série de dados, uma para cada Área Experimental. Para a Área 01 utilizou-se a coleta 50 (L.P. 50) realizada no dia 17/01/2002. Já para a Área 02 fez-se uso da coleta 22 (L.P. 22) executada no dia 18/04/2007. A Tabela 4.7 apresenta os dados de carga hidráulica utilizados no procedimento de verificação;

c) Rodou-se então o modelo;

d) Os resultados obtidos com o SCBR para carga hidráulica de cada Área foram então comparados com os dados de carga hidráulica medida inseridos no modelo (L.P. 50 e 22). A verificação do modelo também foi avaliada através do modelo de regressão linear, pela obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos pontos medidos em campo versus os resultados da simulação. O modelo foi considerado verificado com a obtenção de um  $R^2$  maior que 0,80.

Tabela 4.7: Dados de carga hidráulica das Áreas 01 e 02 da Fazenda Ressacada inseridos no modelo SCBR para o procedimento de verificação.

<b>Área 01</b>	<b>Carga hidráulica medida (m)</b>	<b>Área 02</b>	<b>Carga hidráulica medida (m)</b>
<i>Piezômetros</i>	<i>L.P. 50</i>	<i>Piezômetros</i>	<i>L.P. 22</i>
PZ-5	4,827	PE01	3,604
PZ-6	4,857	PE02	3,665
PZ-7	4,779	PE03	3,936
PZ-8	4,872	PE04	4,422
PZ-9	4,739	PE06	3,81
		PE07	3,651
		PM01	3,914
		PM02	3,665
		PM03	3,696
		PM04	3,542
		PM05	3,884
		PM06	3,776
		PM18	3,601
		PZ01	3,747
		PZ02	3,765
		PZ03	3,946
		PZ05	4,566
		PZ07	3,811
		PZ08	3,716
<i>Data</i>	<i>17/01/02</i>	<i>Data</i>	<i>18/04/07</i>

#### ***4.5. Análise de sensibilidade***

A análise de sensibilidade do modelo SCBR foi realizada para determinar a influência dos parâmetros de entrada do modelo sobre os resultados de simulação da carga hidráulica. Os parâmetros de entrada de dados no modelo analisados foram a condutividade hidráulica e a recarga. Para a realização desse procedimento foram utilizadas a série de dados L.P. 72 da Área 01 e a série L.P. 20 da Área 02.

Para cada Área da Ressacada foram então utilizados dois poços de monitoramento com o objetivo de avaliar a influência exercida pelos parâmetros condutividade hidráulica e recarga sobre os resultados obtidos com o modelo para a carga hidráulica destes dois poços. Para a Área 01 utilizou-se os piezômetros PZ-5 e PZ-6. Na Área 02 foram utilizados os piezômetros PE-01 e PM-01. Foram adotadas três metodologias para a análise de sensibilidade. Na primeira análise de sensibilidade mantiveram-se todos os parâmetros de entrada da calibração tipo 1 constantes exceto a condutividade hidráulica. Variou-se a condutividade hidráulica em 10 e 50% para mais e para menos, e também se avaliou a interferência de uma condutividade hidráulica 200 vezes maior. Na segunda análise de sensibilidade mantiveram-se fixos todos os parâmetros de entrada da calibração tipo 1 menos a recarga. Foram utilizados para a recarga os valores de 50, 100 e 320 mm/ano. Já na terceira análise de sensibilidade mantiveram-se fixos os parâmetros de entrada da calibração tipo 1a, variando-se apenas a condutividade hidráulica. Nesta terceira análise procurou-se verificar a influência da condutividade hidráulica em cenários com recarga. A influência da recarga e da condutividade hidráulica na simulação da carga hidráulica foram avaliadas através da construção de gráficos do incremento percentual na carga hidráulica versus o incremento percentual na condutividade hidráulica ( $K$ ) e gráficos do incremento percentual na carga hidráulica versus o incremento na recarga em mm/ano.

#### ***4.6. Comparação dos resultados de simulação do SCBR com os resultados de simulação do modelo Flowpath***

Nos cenários simulados neste trabalho com o modelo SCBR foi observado que quando se inseriu a recarga os resultados de simulação sofreram grande variação, resultando em uma acentuada redução nos valores de  $R^2$  à medida que se aumentavam os valores da recarga. Este efeito pode ser facilmente observado através da Tabela 5.1 que apresenta os valores de  $R^2$  obtidos nas calibrações realizadas para as Áreas da Fazenda Ressacada. Então, para verificar se o modelo SCBR está respondendo satisfatoriamente em cenários que possuem recarga, comparou-se os resultados de simulação do SCBR obtidos para a Área 02 da Fazenda Ressacada com os resultados obtidos pelo modelo Flowpath (versão 1.3.2) para esta Área. Foram comparados os mapas potenciométricos gerados por cada modelo e os valores de carga hidráulica simulada obtidos nas calibrações tipo 1 com recarga de 0, 5, 25, 50, 100 e 200 mm/ano com esses modelos para as coletas L.P. 20 e 21. Os valores de carga hidráulica simulada obtidos com os dois modelos foram comparados pelo modelo de regressão linear, através da obtenção do  $R^2$  da reta determinada pela construção de um gráfico dos valores simulados pelo Flowpath versus os resultados de simulação do SCBR. A configuração do modelo Flowpath com os dados da Área Experimental 02 da Fazenda Ressacada é apresentada a seguir.

a) Primeiro, construiu-se no Flowpath uma área de simulação com as mesmas medidas e coordenadas do domínio de simulação utilizado no SCBR para Área 02 da Fazenda Ressacada. Além disso, a malha de cálculo foi configurada com o mesmo número de linhas e de colunas. A Tabela 4.8 apresenta as coordenadas da área de simulação e a configuração da malha de cálculo;

b) Em seguida os 19 poços de monitoramento da Área Experimental 02 foram inseridos na área de simulação. Os valores de carga hidráulica para estes piezômetros foram os mesmos utilizados na calibração da Área Experimental 02 através do SCBR (L.P. 20 e L.P. 21 contidas na Tabela 4.4);

c) A próxima etapa foi introduzir no Flowpath os valores dos parâmetros de entrada condutividade hidráulica ( $K=1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ), porosidade efetiva média ( $n_e=0,2$ ) e recarga (0, 5, 25, 50, 100 e 200 mm/ano);

d) Por último, determinaram-se as condições de contorno da área de simulação. Para que as condições de contorno definidas no Flowpath fossem idênticas às condições de contorno especificadas no SCBR, criaram-se nos cenários simulados pelo SCBR para Área Experimental 02, inspetores<sup>4</sup> de polilinha nas fronteiras do domínio de simulação (Figura 4.13). Por meio destes inspetores obtiveram-se os valores de carga hidráulica nos limites do domínio de simulação (Figura 4.14). Os inspetores de polilinha foram criados nos cenários configurados nas calibrações tipo 1 para as L.P. 20 e 21. A Figura 4.15 apresenta a Área Experimental 02 configurada no modelo Flowpath.

O modelo Flowpath foi escolhido para realizar este procedimento de comparação por também ser um modelo numérico, bidimensional, que permite o cálculo do mapa potenciométrico tanto para aquíferos confinados como para aquíferos não-confinados. O Flowpath também permitiu ajustar o domínio de simulação na Área 02 da Ressacada de maneira idêntica ao ajuste especificado para esta Área no modelo SCBR. Além disso, o Flowpath é um modelo que já é utilizado internacionalmente desde 1989.

Tabela 4.8: Coordenadas da área de simulação e configuração da malha de cálculo do modelo Flowpath para realização do procedimento de comparação com o SCBR.

Origem da área de simulação		Largura	Altura	Rotação	Malha de cálculo	
X (m)	Y (m)	(m)	(m)	(°)	i	j
743240,556	6935715,276	219,135	180,111	0	80	66

<sup>4</sup> Inspetor é uma ferramenta que possibilita a obtenção de informações sobre um ponto ou uma região específica do domínio (concentração, velocidade, propriedades do aquífero, etc.). O SCBR apresenta três tipos de inspetores: inspetores de área, inspetores de ponto e inspetores de polilinha (GUIA DO USUÁRIO, 2006).

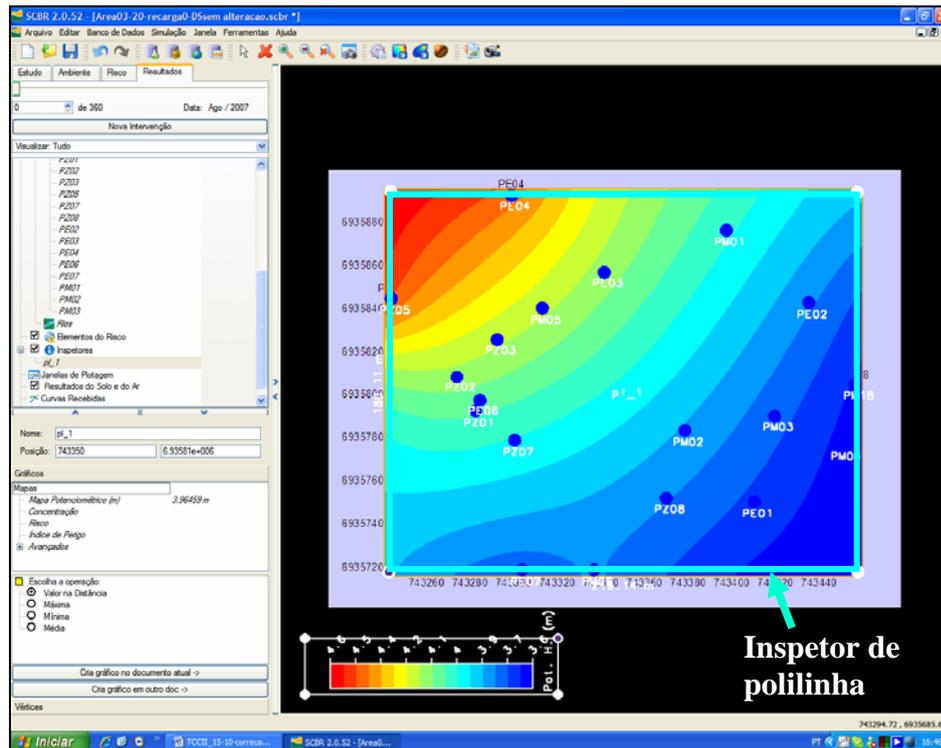


Figura 4.13: Inspetor de polilinha criado no limite do domínio de simulação da Área 02 da Fazenda Ressacada.

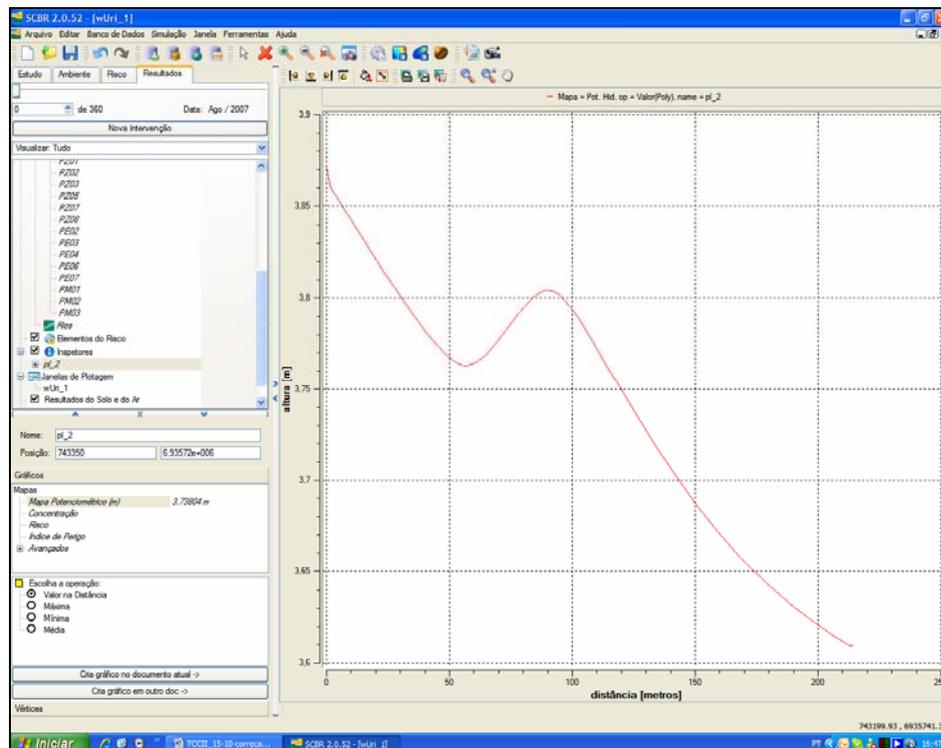


Figura 4.14: Gráfico dos valores de carga hidráulica (m) versus a distância (m) obtido através do inspetor de polilinha.

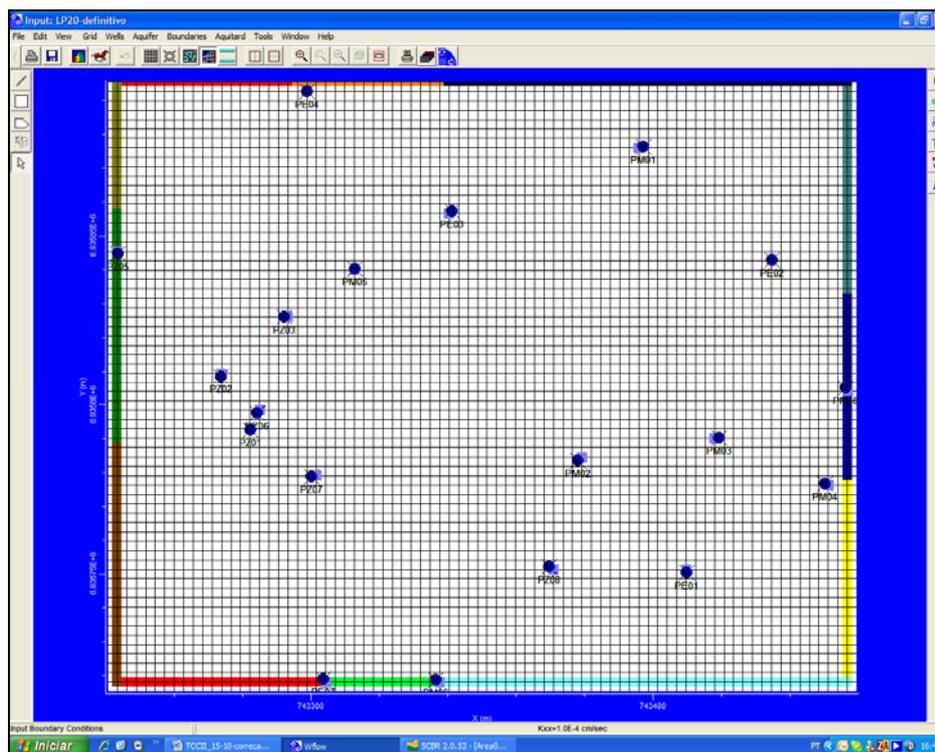


Figura 4.15: Área Experimental 02 configurada no modelo Flowpath.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de  $R^2$  obtidos nos seis tipos de calibração realizados para as quatro séries de dados utilizadas para a Fazenda Ressacada encontram-se na Tabela 5.1. Pode-se observar que tanto para a Área 01 como para a Área 02 os melhores  $R^2$  foram obtidos para a calibração tipo 1 (domínio de simulação simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros sem considerar a influência da recarga). Para a Área 01, os maiores  $R^2$  obtidos foram de 0,9974 para a L.P. 69 e de 0,9941 para a L.P. 72. Na Área 02 os melhores  $R^2$  foram 0,8156 e 0,8054 para as L.P. 20 e L.P. 21, respectivamente. As avaliações das calibrações realizadas encontram-se nas Figuras 5.43 a 5.66 (Anexos).

Ainda se pode notar na Tabela 5.1 que um acréscimo nos valores de recarga acarretou na redução dos valores de  $R^2$ . Este efeito negativo da recarga sobre a calibração foi observado nos dois ajustes do domínio de simulação adotados, tipo 1 e tipo 2. Contudo, as calibrações tipo 2 em cenários com recarga, 2a e 2b, atingiram maiores valores de  $R^2$  comparado às calibrações tipo 1a e 1b, respectivamente.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 os valores de carga hidráulica medidos para a Área 01 nas coletas L.P. 69 e L.P. 72 são comparados com os valores de carga hidráulica obtidos com o modelo SCBR para as calibrações tipo 1 e 2. Por meio dos gráficos das Figuras 5.1 e 5.2 pode-se observar que quando se têm um baixo número de poços de monitoramento, uma alta densidade destes elementos, e desconsidera-se a recarga, a posição do domínio de simulação (DS) tem pouca interferência sobre os resultados obtidos com o modelo. Os valores de carga hidráulica obtidos na calibração tipo 1 (DS simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros) são muito próximos dos valores obtidos na calibração tipo 2 (DS paralelo ao fluxo).

Tabela 5.1: Valores de  $R^2$  obtidos na calibração das Áreas da Fazenda Ressacada.

Tipo de calibração	Domínio da simulação sem considerar a direção do fluxo	Domínio da simulação paralelo ao fluxo	Recarga mm/ano	$R^2$ Área 01		$R^2$ Área 02	
				L.P. 69	L.P. 72	L.P. 20	L.P. 21
1	Sim	Não	Não	0,9974	0,9941	0,8156	0,8054
1 <sup>a</sup>	Sim	Não	Sim	0,7028	0,8473	0,0769	0,0779
1b	Sim	Não	Sim	0,3363	0,5827	0,0001	0,0002
2	Não	Sim	Não	0,9928	0,9750	0,7875	0,7549
2 <sup>a</sup>	Não	Sim	Sim	0,7734	0,9004	0,1118	0,0786
2b	Não	Sim	Sim	0,4974	0,7056	0,0118	0,0042

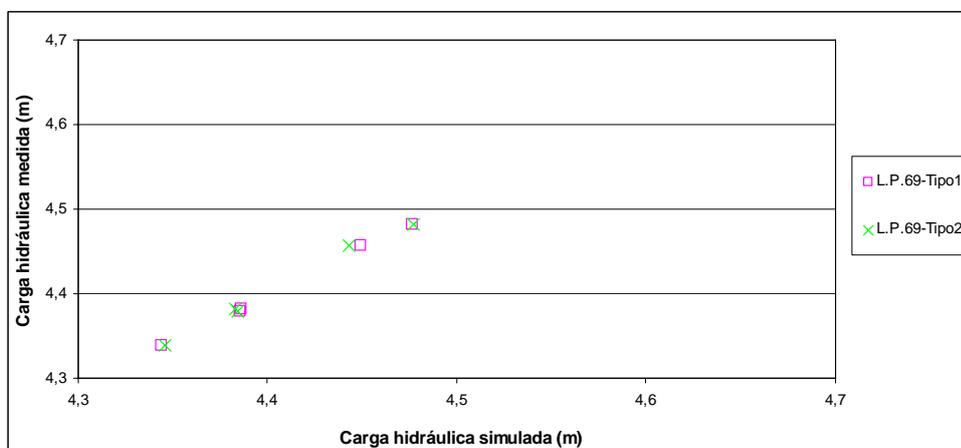


Figura 5.1: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 69 da Área 01.

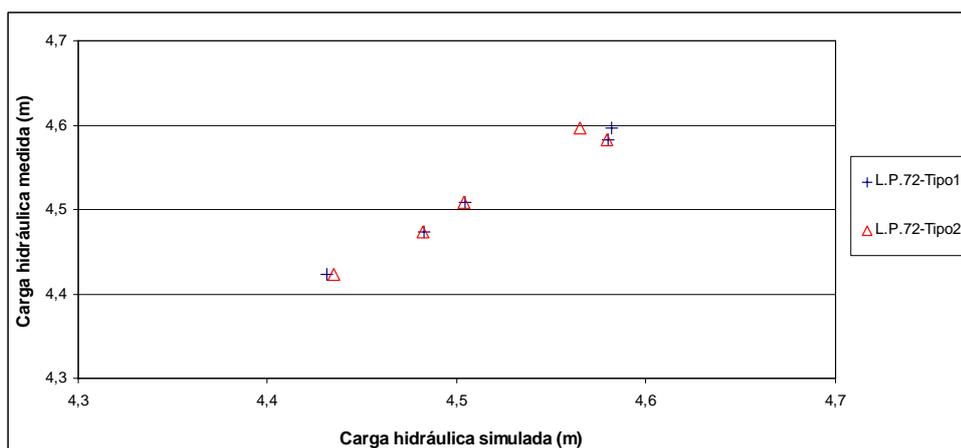


Figura 5.2: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 72 da Área 01.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 apresentam-se os gráficos dos valores de carga hidráulica medidos nas coletas L.P. 20 e L.P. 21 da Área 02 versus os valores de carga hidráulica simulados nas calibrações tipo 1 e 2. Por meio da Tabela 5.1 e das Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4, pode-se verificar que os valores de  $R^2$  obtidos para a Área 02 são sensivelmente menores do que os valores de  $R^2$  da Área 01. A Área Experimental 01 atingiu melhores calibrações do que a Área Experimental 02 provavelmente em

função da maior densidade de poços de monitoramento, associada à maior proximidade destes poços ao DS. Como pode ser observado nas Figuras 4.5 e 4.7, quatro dos cinco piezômetros da Área 01 foram definidos como condições de contorno para a simulação através do SCBR, bem diferente da Área 02, onde a grande maioria dos piezômetros não se encontra próximo ao DS (Figuras 4.6 e 4.8).

Ainda com relação aos cenários sem recarga, pode-se observar na Tabela 5.1 que as calibrações tipo 1 realizadas para as L.P. 20 e 21 da Área 02 apresentaram um  $R^2$  nitidamente maior do que as calibrações tipo 2. Isto ocorre possivelmente devido a dificuldade em se ajustar o DS paralelamente ao fluxo em toda a área de simulação quando esta possui grandes dimensões. A Área Experimental 02 possui uma área aproximadamente dez vezes maior do que a Área Experimental 01 (Tabela 4.5).

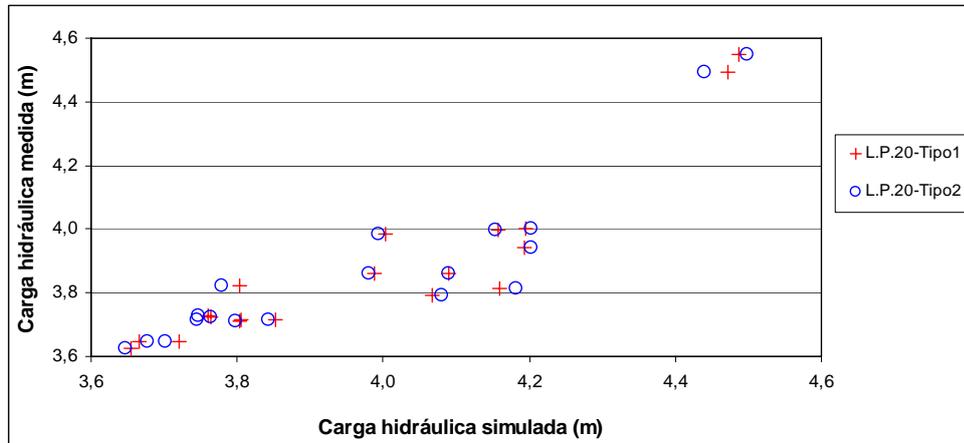


Figura 5.3: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 20 da Área 02.

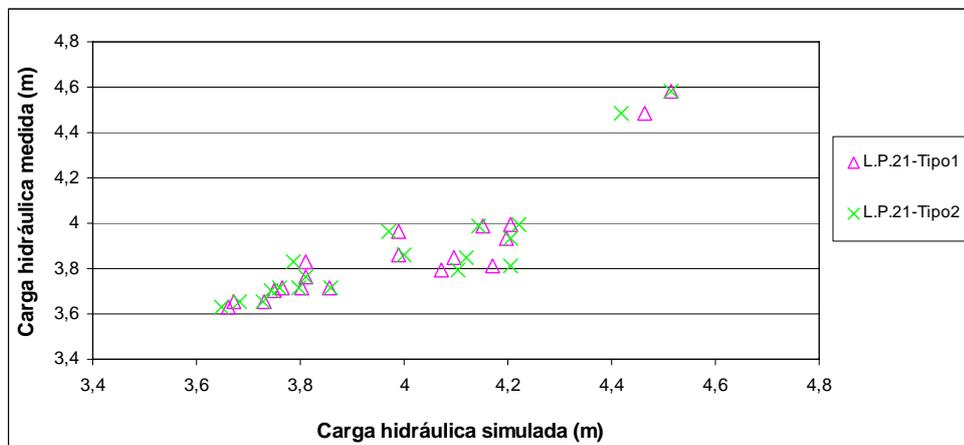


Figura 5.4: Calibrações tipo 1 e tipo 2 para a L.P. 21 da Área 02.

Na calibração do SCBR para a Área 01 com o DS simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros (calibrações tipo 1, 1a e 1b), observou-se que há uma relação entre a precipitação mensal e o valor de  $R^2$  quando se varia a recarga. Para a coleta L.P. 69, realizada em dezembro de 2003 (precipitação mensal de 226,4mm), a variação da recarga de 0 a 100mm/ano apresentou uma significativa redução no  $R^2$ , em torno de 66% (Tabela 5.2 e Figura 5.5). Por outro lado, para a coleta L.P. 72 executada em agosto 2004, período em que se registrou uma precipitação bem inferior àquela (precipitação mensal de 24,3mm), a variação da recarga entre 0 e 100mm/ano apresentou uma alteração do  $R^2$  consideravelmente menor, em torno de

41%, conforme a Tabela 5.2 e a Figura 5.6. Possivelmente a elevada precipitação verificada no mês de dezembro de 2003 influenciou na redução demasiada do  $R^2$  das calibrações realizadas com os dados da coleta L.P. 69, isto é, o solo já se apresentava saturado nessa época do ano, não permitindo o escoamento da infiltração para o  $K=6,6 \times 10^{-5}$  cm/s utilizado na simulação, elevando assim o valor da carga hidráulica.

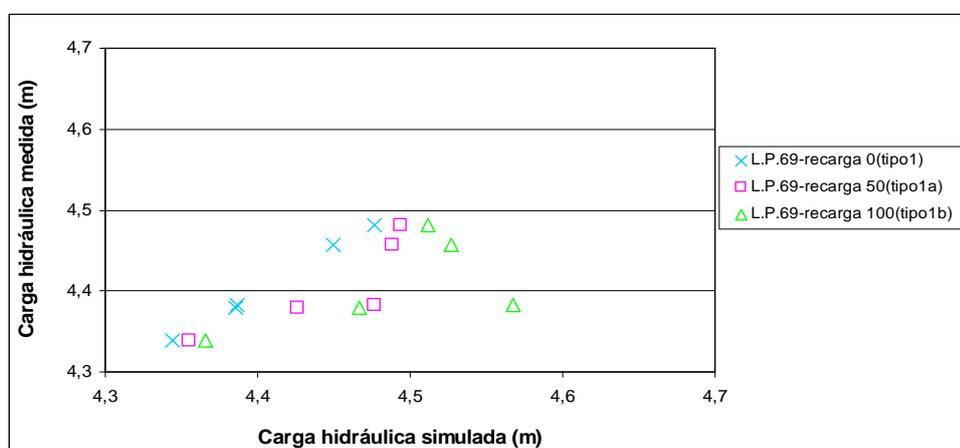


Figura 5.5: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 69 da Área 01.

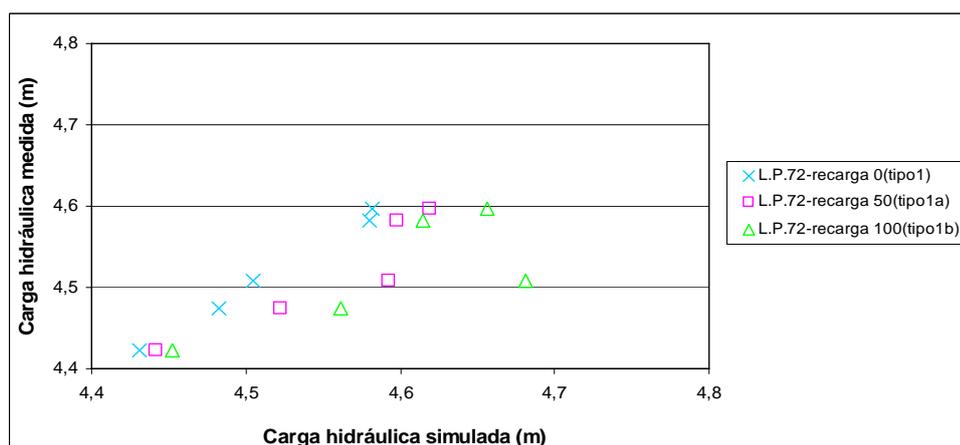


Figura 5.6: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.

Tabela 5.2: Redução percentual do  $R^2$  nos cenários com recarga em relação aos valores de  $R^2$  obtidos nas calibrações tipo 1 e 2 da Área 01 da Fazenda Ressacada.

Precipitação (mm/mês)	Área	L.P.	Tipo de calibração	Redução do $R^2$ (%)
226,4	01	69	1a	30
			1b	66
			2a	22
			2b	50
24,3	01	72	1a	15
			1b	41
			2a	8
			2b	28

Na Área 02, os valores obtidos para o  $R^2$  nas simulações tipo 1a e 1b foram muito baixos tanto para a L.P. 20 como para a L.P. 21 (Tabela 5.1, Figura 5.7 e 5.8), ambas realizadas em abril de 2007 (precipitação mensal de 110mm). Neste caso, não se pode justificar o valor reduzido do  $R^2$  apenas com a influência da precipitação, já que para a Área 01 uma precipitação de 226,4mm não alterou o  $R^2$  desta forma. Possivelmente as características hidrogeológicas do solo não puderam ser devidamente caracterizadas pelo modelo e com isso, não foi possível incorporar a variação da recarga na simulação mantendo um  $R^2$  aceitável.

É importante destacar para os cenários com recarga que ao diminuir os valores do parâmetro de entrada cota base do aquífero, os valores de  $R^2$  obtidos aumentaram. Entretanto, este aumento só foi significativo para valores reduzidos da cota base. Como não se dispunha de informações suficientes para este parâmetro, preferiu-se não considerá-lo na realização deste trabalho.

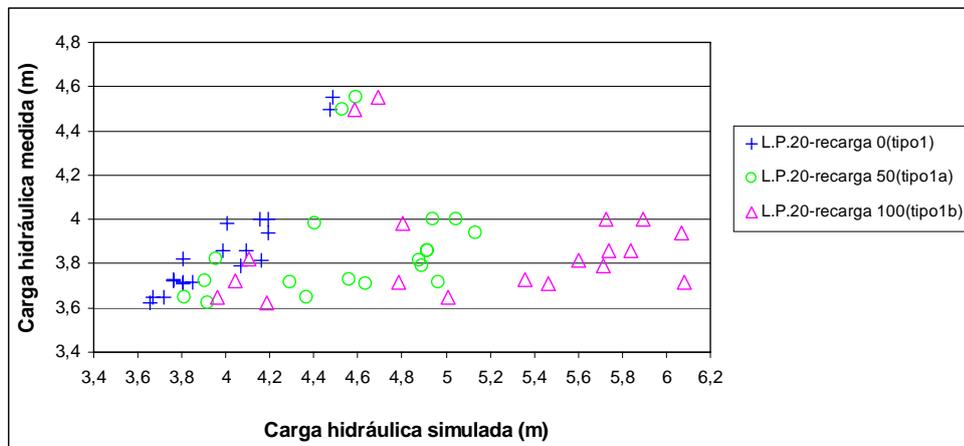


Figura 5.7: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.

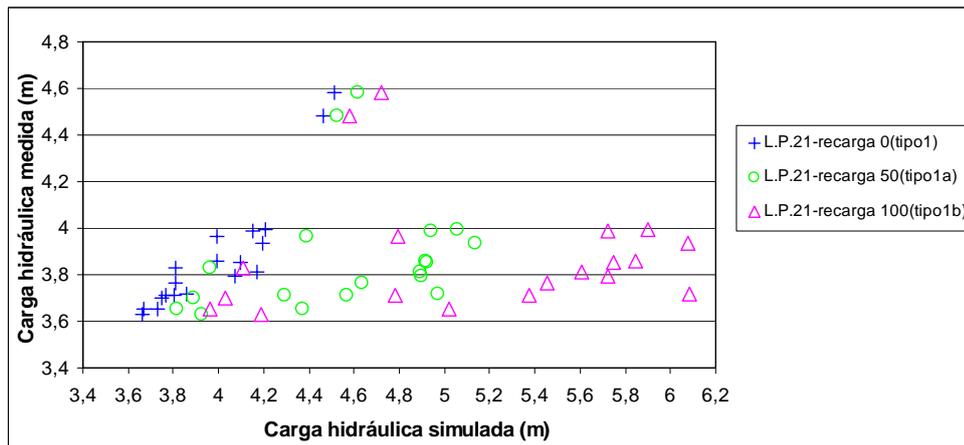


Figura 5.8: Calibração tipo 1, 1a e 1b para a leitura dos piezômetros 21 da Área 02.

Na calibração do modelo para a Área 01 com o DS paralelo ao fluxo da água subterrânea gerado pelo modelo SCBR e com influência da recarga (calibrações tipo 2a e 2b), os valores de  $R^2$  obtidos para as L.P. 69 e 72 foram sensivelmente maiores do que os valores de  $R^2$  obtidos com o DS simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros (Tabela 5.1). Como discutido anteriormente, para incorporar o efeito da

recarga o SCBR aparentemente responde melhor com o DS paralelo ao fluxo. As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam as calibrações tipo 2, 2a e 2b para a Área 01.

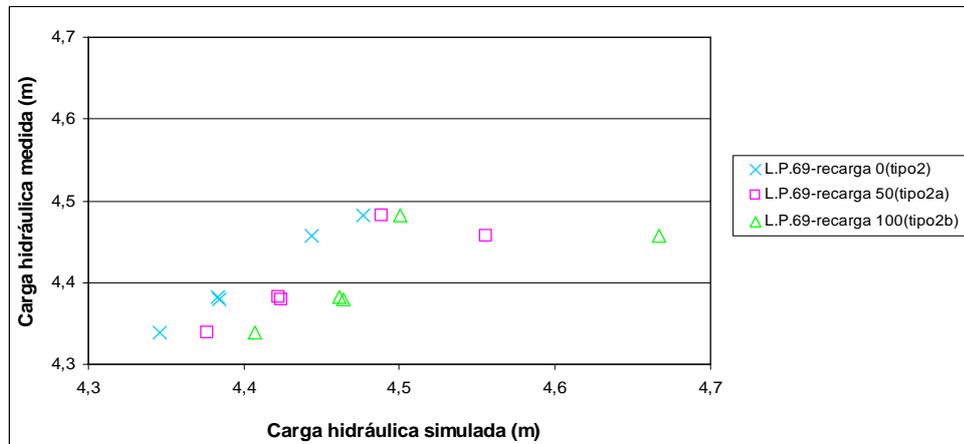


Figura 5.9: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 69 da Área 01.

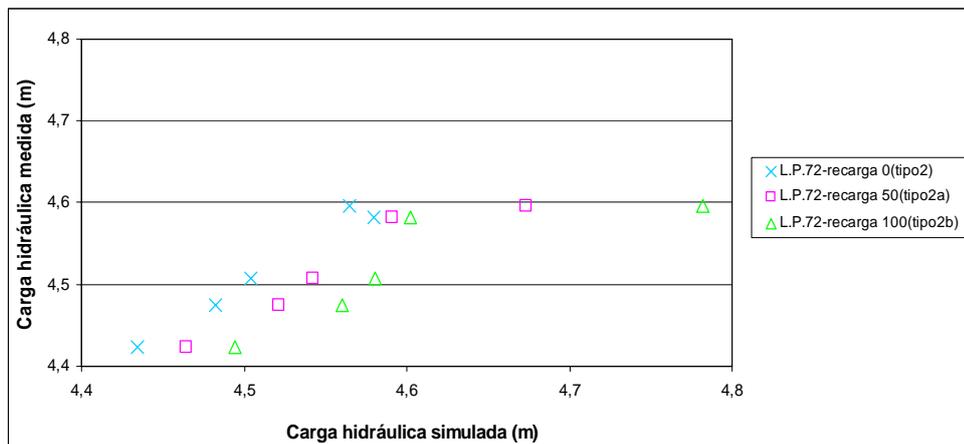


Figura 5.10: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.

Também foi possível observar para a Área 02 o efeito positivo do DS paralelo ao fluxo para incorporar a recarga. Mesmo assim, é importante destacar que os valores de  $R^2$  para a Área 02 continuaram extremamente baixos, e que possivelmente as características hidrogeológicas do solo não puderam ser devidamente caracterizadas pelo modelo e com isso, não foi possível incorporar a variação da recarga na simulação mantendo um  $R^2$  aceitável. As Figuras 5.11 e 5.12 apresentam as calibrações tipo 2, 2a e 2b para a Área 02.

Ressalta-se que as retas obtidas nos gráficos formados pelos dados de carga hidráulica medida, versus os valores de carga hidráulica simulada, para determinação do  $R^2$  não foram apresentadas nas Figuras 5.1 a 5.12 por dois motivos. Primeiro, algumas retas coincidiram dificultando a sua identificação. Segundo, essas retas estão apresentadas nas Figuras 5.43 a 5.66 (Anexo).

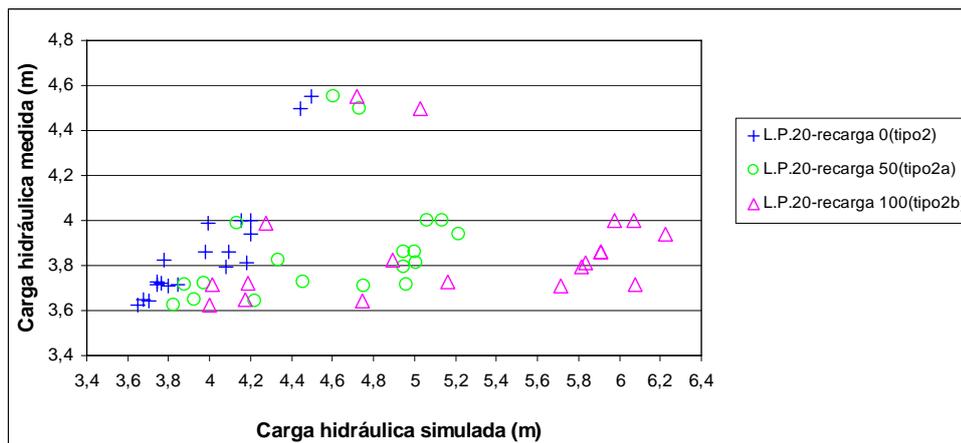


Figura 5.11: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.

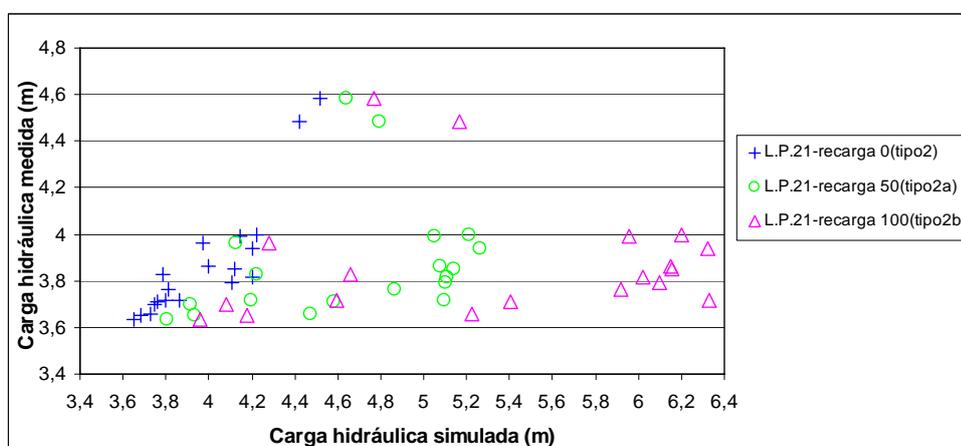


Figura 5.12: Calibração tipo 2, 2a e 2b para a leitura dos piezômetros 21 da Área 02.

Nas Figuras 5.13 a 5.24 os valores de carga hidráulica simulada obtidos com o Flowpath para Área 02 da Ressacada são comparados aos resultados de simulação do SCBR para esta Área através do modelo de regressão linear. Como se pode observar, os valores simulados pelos dois modelos apresentam um grau de correspondência elevado, isto é, as simulações resultantes de cenários configurados de maneira idêntica nos modelos SCBR e Flowpath são bastante próximas. Nos cenários sem recarga (Figuras 5.13 e 5. 19) os valores de  $R^2$  encontrados foram de 0,9990 para a L.P. 20 e 0,9992 para a L.P. 21. Para os cenários com recarga é possível identificar uma leve redução nos valores de  $R^2$  a medida que aumentam os valores de recarga inseridos. Entretanto os valores de  $R^2$  permaneceram elevados. Os valores de  $R^2$  obtidos para as L.P. 20 e 21 nos cenários configurados com recarga de 200mm/ano (Figuras 5.18 e 5.24) foram de 0,9739 e 0,9750, respectivamente.

Ao confrontar a Figura 5.25 à 5.26 e a Figura 5.27 à 5.28, é possível verificar que os mapas potenciométricos gerados pelo SCBR são bastante similares aos mapas potenciométricos simulados pelo Flowpath para cenários sem recarga. Da mesma forma, os mapas potenciométricos gerados pelo SCBR e pelo Flowpath para os cenários com recarga apresentaram-se bastante próximos, como se pode observar nas Figuras 5.29, 5.30, 5.31 e 5.32.

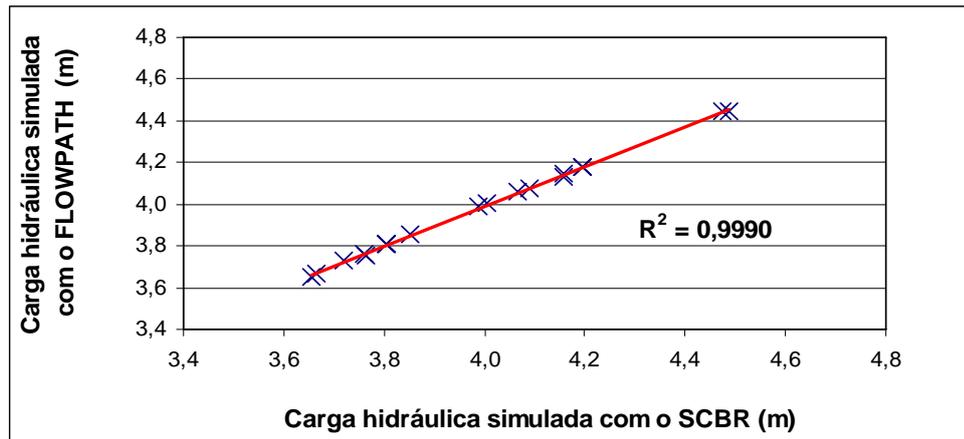


Figura 5.13: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=0mm/ano*).

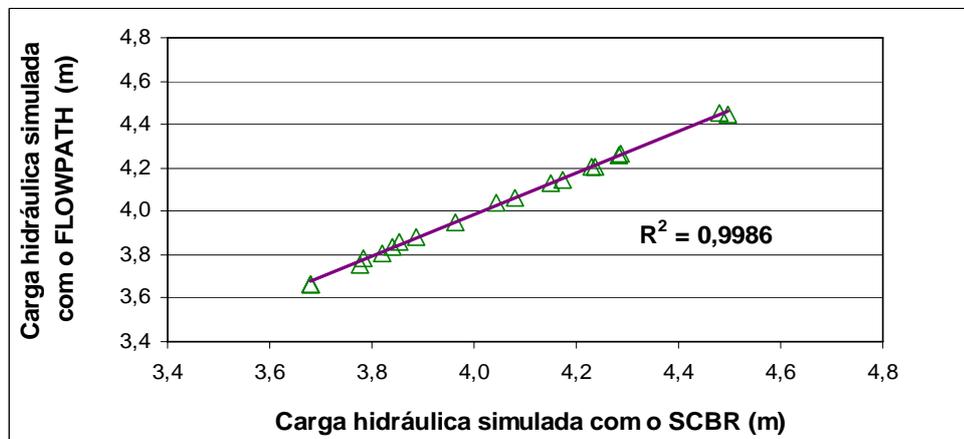


Figura 5.14: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=5mm/ano*).

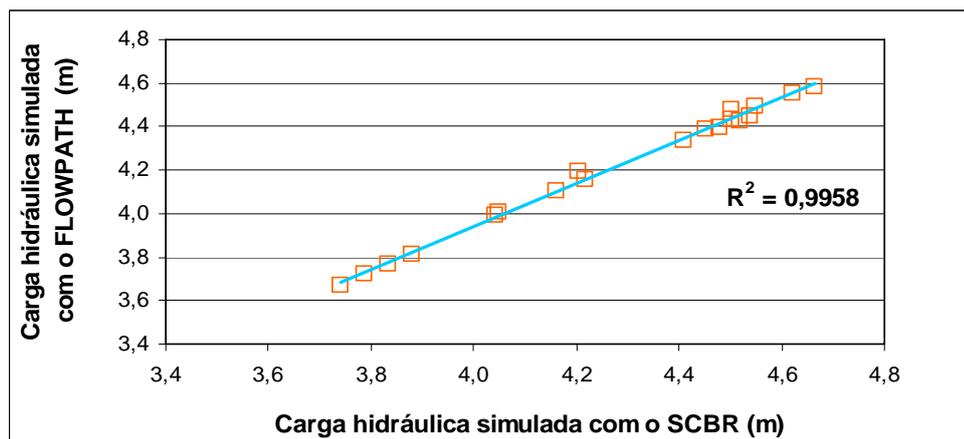


Figura 5.15: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=25mm/ano*).

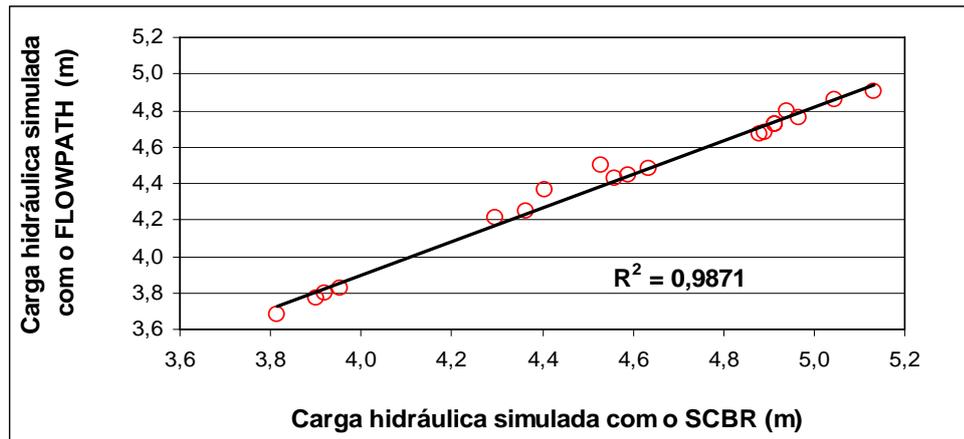


Figura 5.16: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=50mm/ano*).

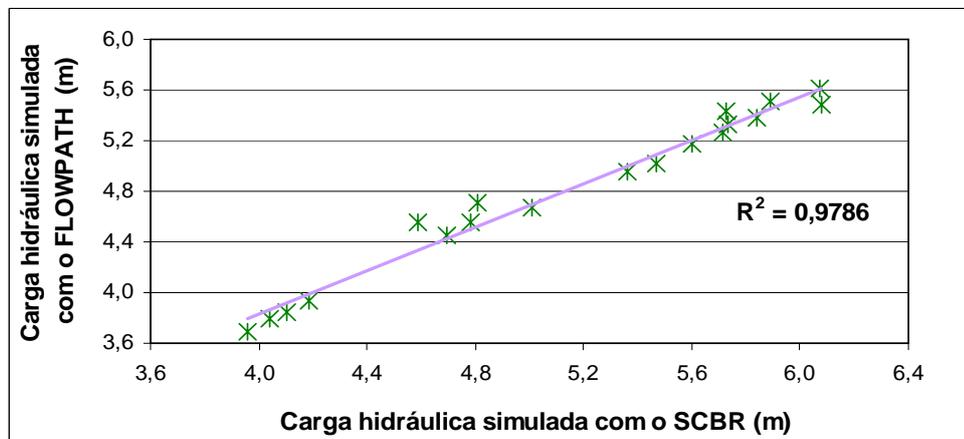


Figura 5.17: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=100mm/ano*).

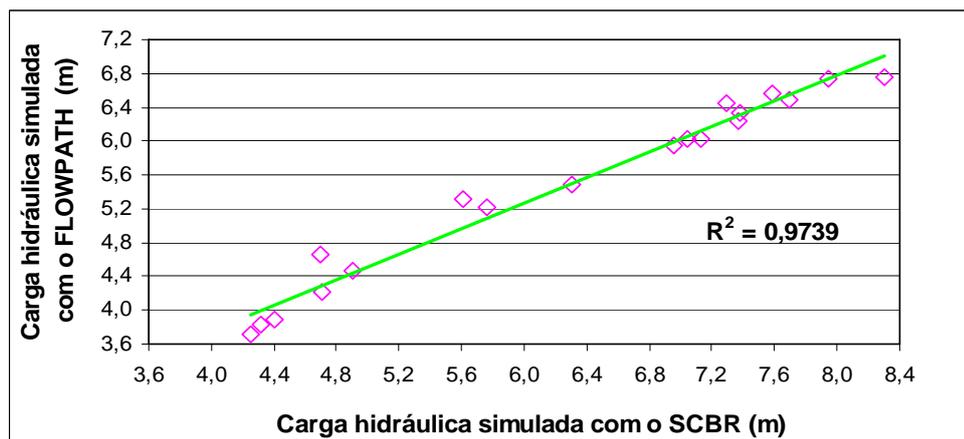


Figura 5.18: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 20; *recarga=200mm/ano*).

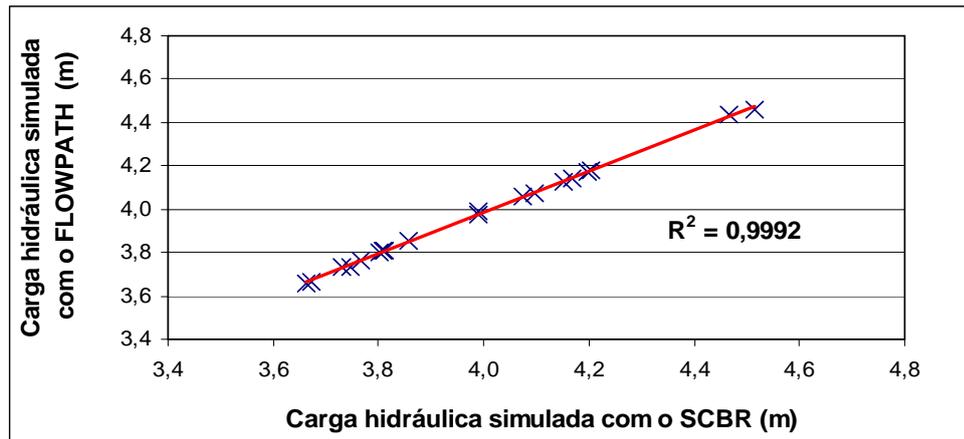


Figura 5.19: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=0mm/ano*).

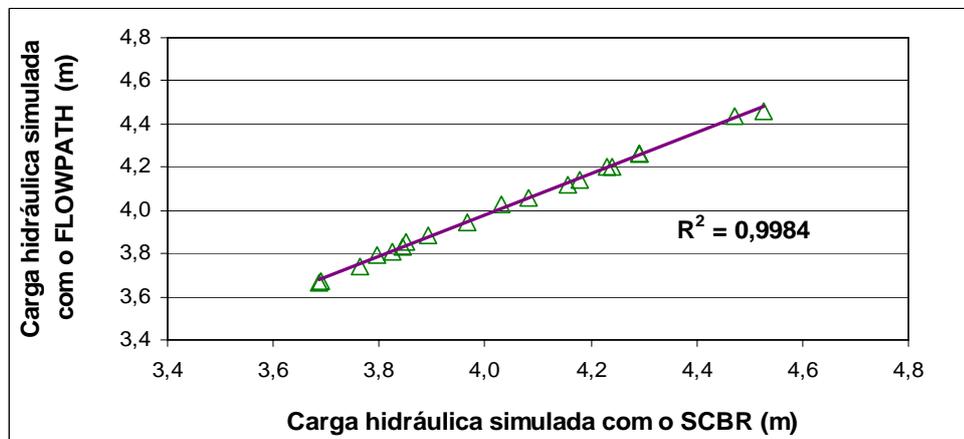


Figura 5.20: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=5mm/ano*).

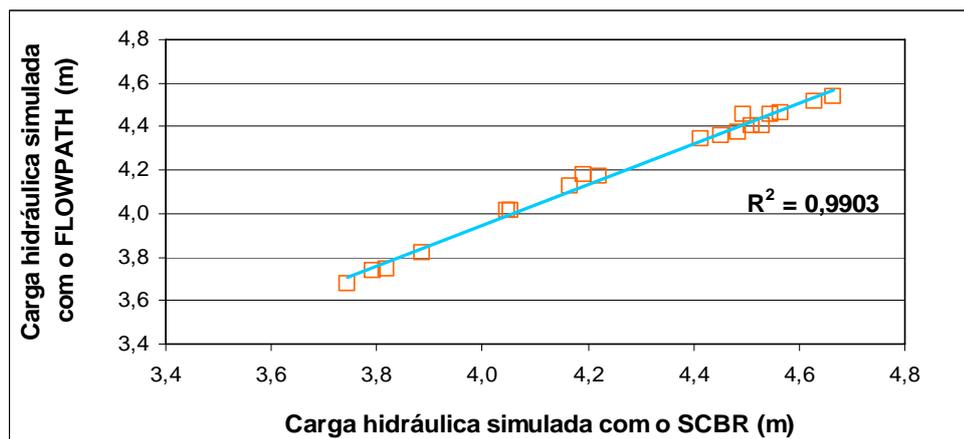


Figura 5.21: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=25mm/ano*).

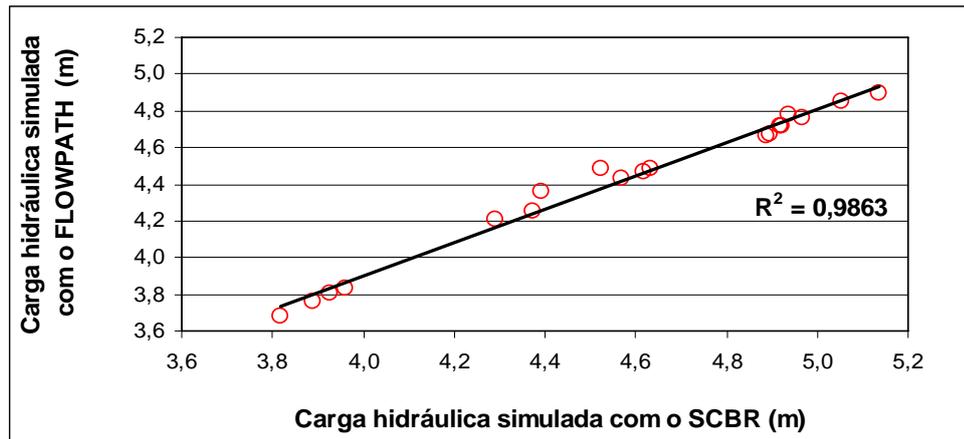


Figura 5.22: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=50mm/ano*).

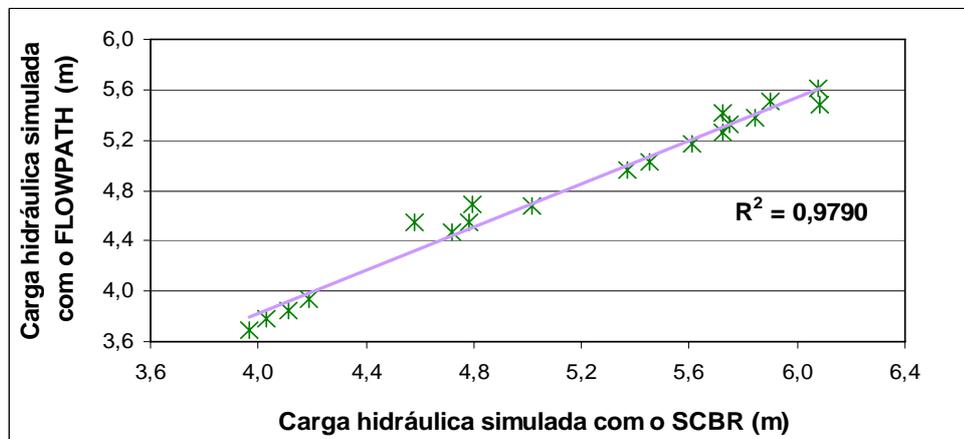


Figura 5.23: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=100mm/ano*).

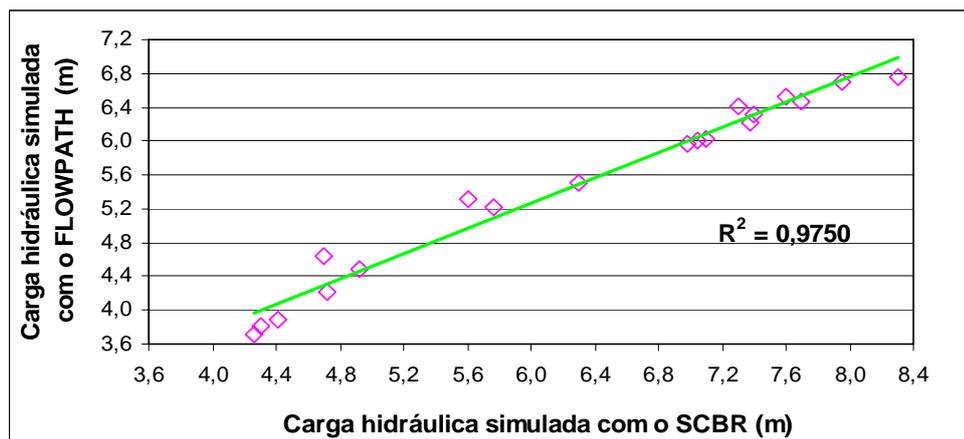


Figura 5.24: Comparação entre os resultados de simulação do Flowpath e os resultados de simulação do SCBR (L.P. 21; *recarga=200mm/ano*).

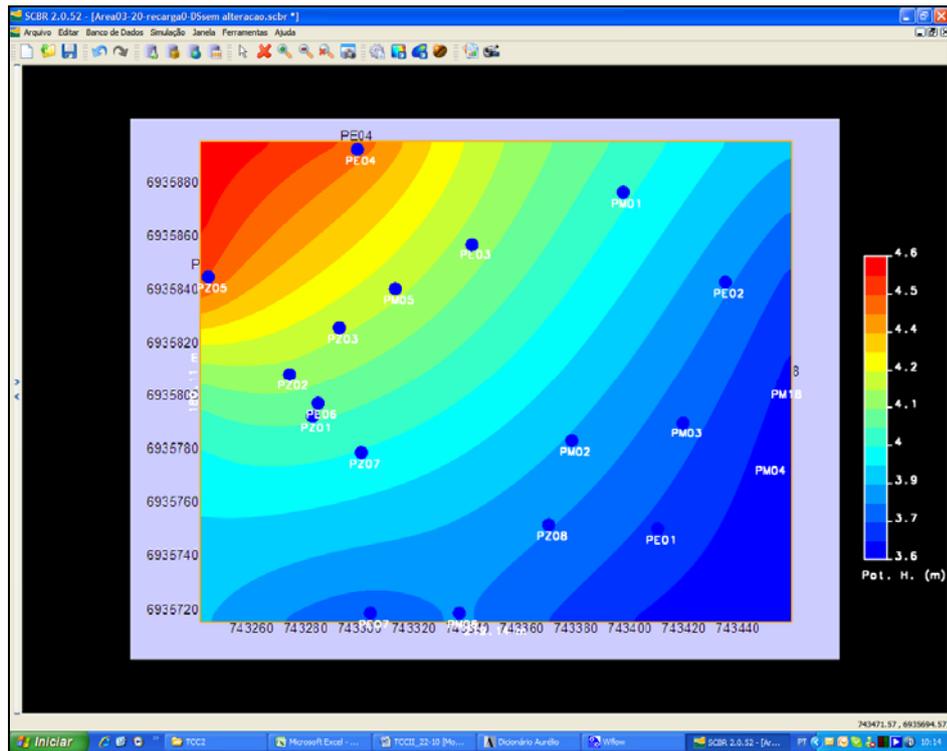


Figura 5.25: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga=0mm/ano*).

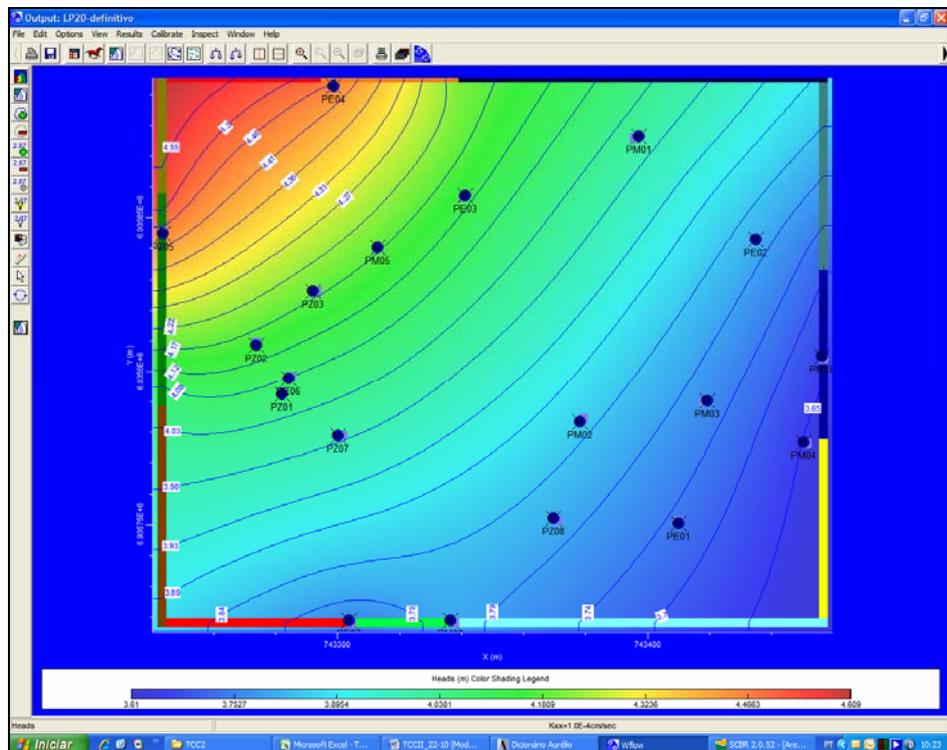


Figura 5.26: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga=0mm/ano*).

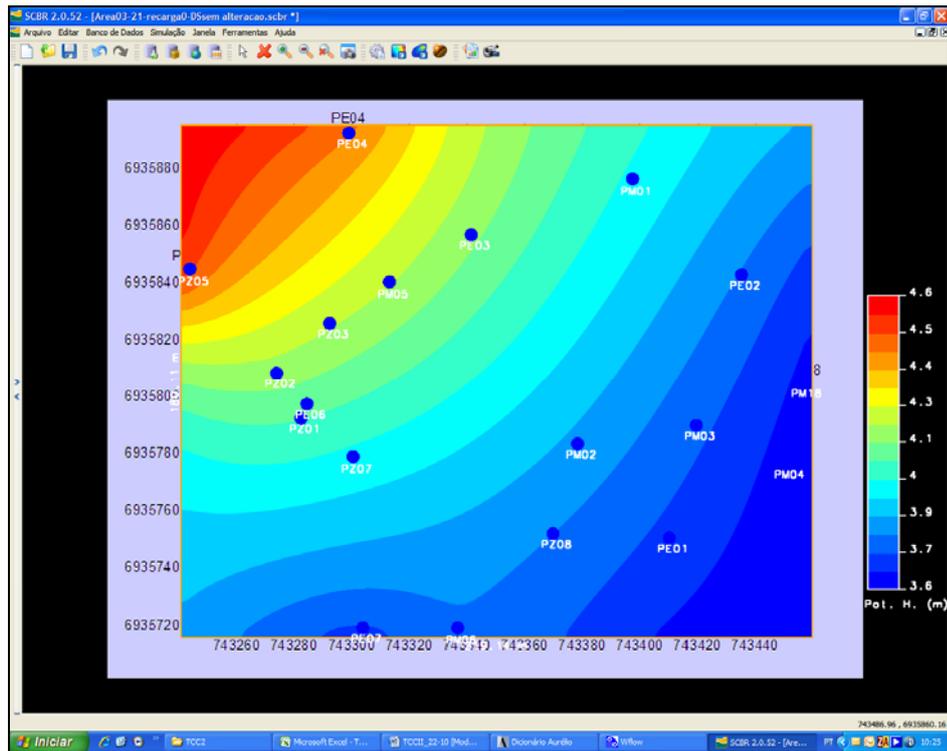


Figura 5.27: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 21; *recarga=0mm/ano*).

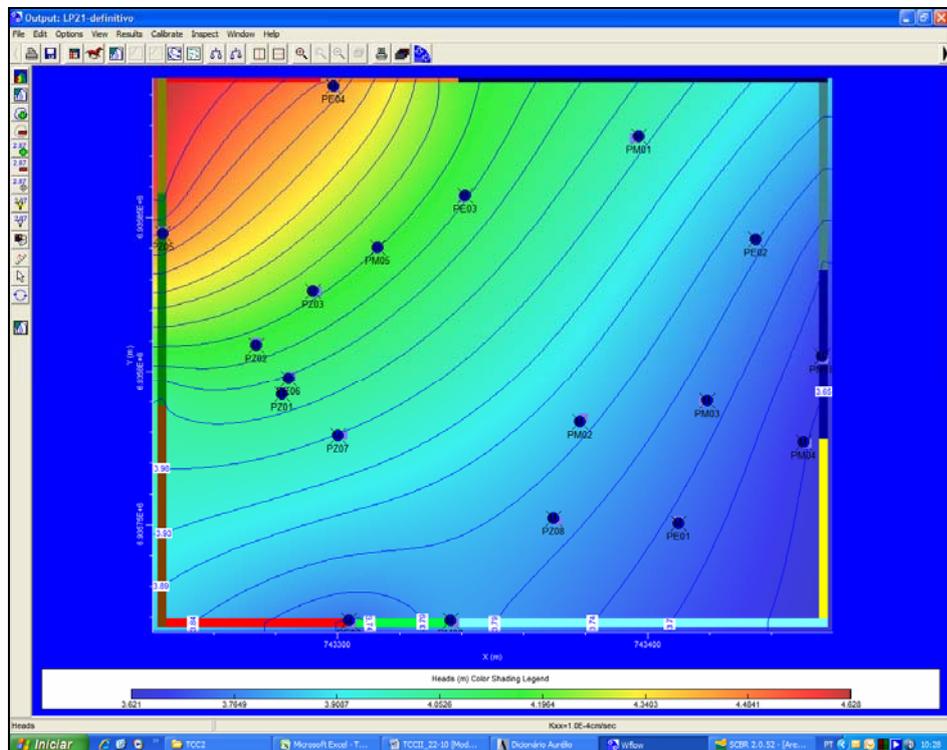


Figura 5.28: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1 da Área 02 (série de dados L.P. 21; *recarga=0mm/ano*).

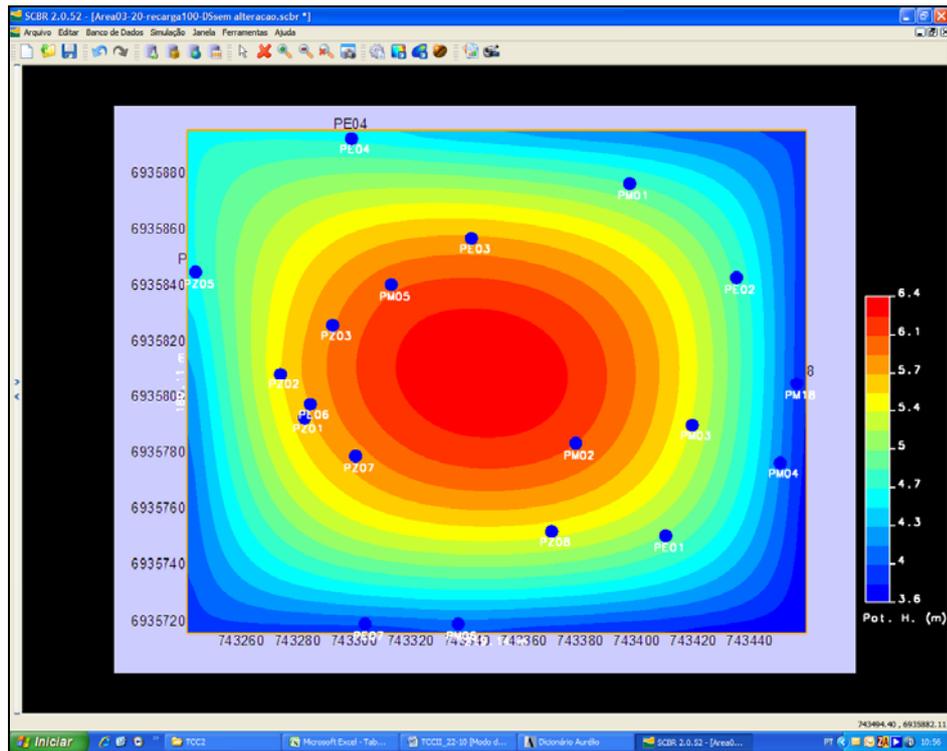


Figura 5.29: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga=100mm/ano*).

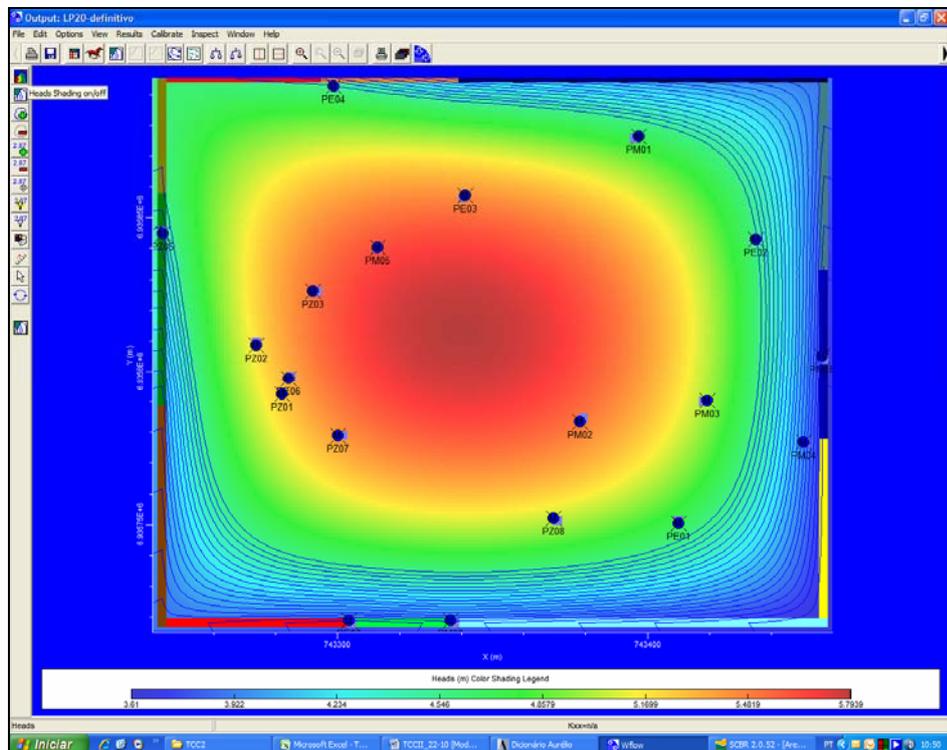


Figura 5.30: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 20; *recarga=100mm/ano*).

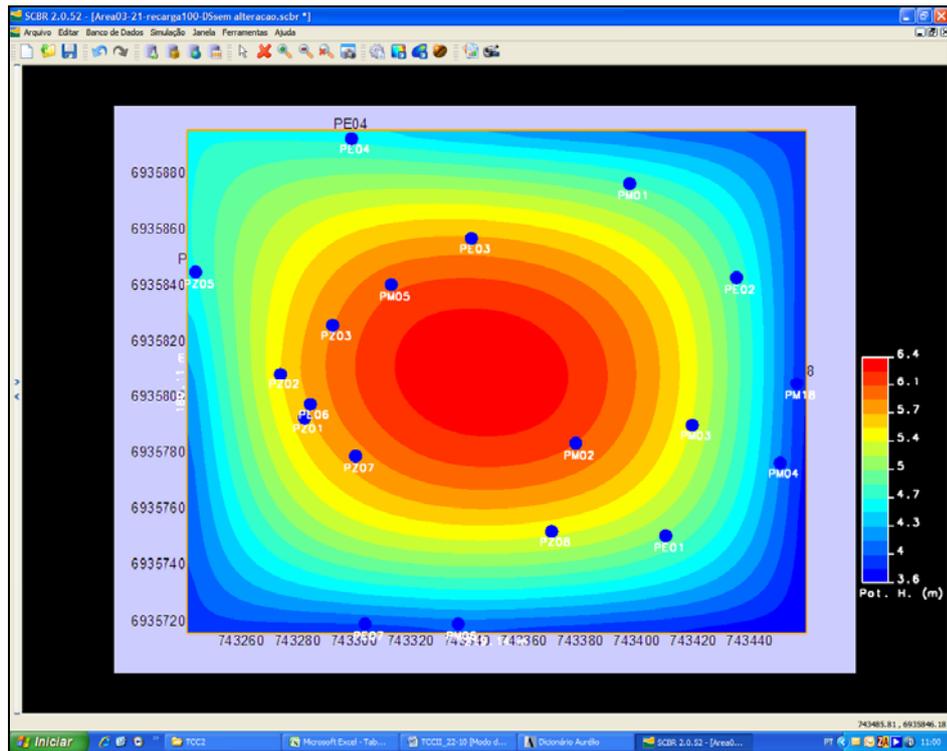


Figura 5.31: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 21; *recarga*=100mm/ano).

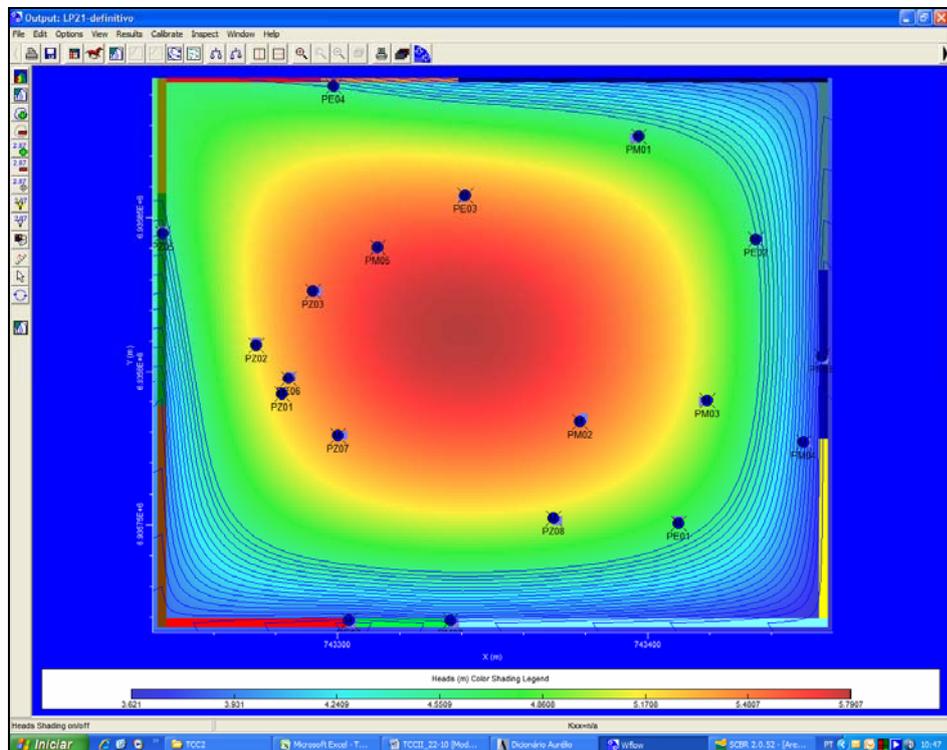


Figura 5.32: Campo potenciométrico gerado pelo modelo Flowpath para a calibração tipo 1b da Área 02 (série de dados L.P. 21; *recarga*=100mm/ano).

Os valores de carga hidráulica obtidos com o modelo matemático SCBR na calibração da área do Parque SUAPE estão na Tabela 5.3. Como se obteve um  $R^2$  de 0,80, o SCBR foi considerado calibrado para o Parque SUAPE. A Figura 5.33 apresenta a avaliação da calibração através do modelo de regressão linear. O campo potenciométrico obtido com o SCBR para o Parque SUAPE encontra-se na Figura 5.34. É importante destacar que o Parque SUAPE encontra-se localizado numa região que sofre influência da maré, e esta certamente interfere na calibração do SCBR para os valores de carga hidráulica desse Terminal.

Tabela 5.3: Valores de carga hidráulica obtidos com o SCBR na calibração do Parque SUAPE.

Piezômetro	C.H. <sup>1</sup> medida (m)	C.H. simulada (m)	Diferença <sup>2</sup> (m)	Diferença <sup>3</sup> (%)
PM 01	1,64	1,641980	+0,002130	+0,13
PM 02	1,62	1,578460	-0,041500	-2,56
PM 03	0,70	0,938963	+0,240239	+34,32
PM 04	1,76	1,785080	+0,027840	+1,58
PM 05	1,22	1,756950	+0,539260	+44,20
PM 06	1,39	1,385270	-0,004080	-0,29
PM 07	2,33	2,114210	-0,206610	-8,87
PM 08	2,10	1,969510	-0,130720	-6,22
PM 09	1,33	1,518210	+0,178980	+13,46
PM 10	2,56	2,057030	-0,503650	-19,67
PM 11	1,43	1,474240	+0,197030	+13,78
PM 12	1,50	1,731690	+0,298650	+19,91
PM 13	1,50	1,665240	+0,191270	+12,75
PM 14	2,53	1,990000	-0,508270	-20,09
PM 15	2,25	2,220240	-0,012450	-0,55
<b>R<sup>2</sup> obtido</b>				<b>0,80</b>

<sup>1</sup> C.H. – Carga hidráulica;

<sup>2</sup> Diferença entre os valores simulados e os valores medidos (C.H. simulada – C.H. medida)

<sup>3</sup> Diferença percentual dos valores simulados em relação aos medidos.

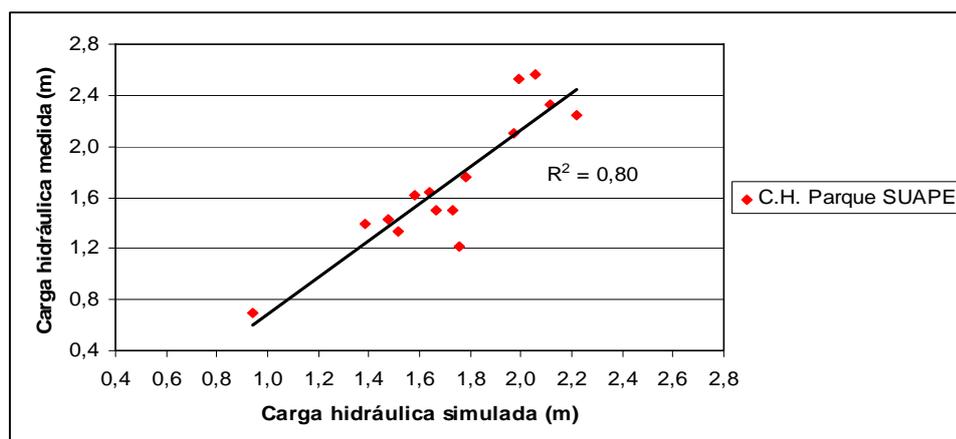


Figura 5.33: Avaliação da calibração do SCBR para os dados provenientes do Terminal Transpetro Parque SUAPE através do modelo de regressão linear.

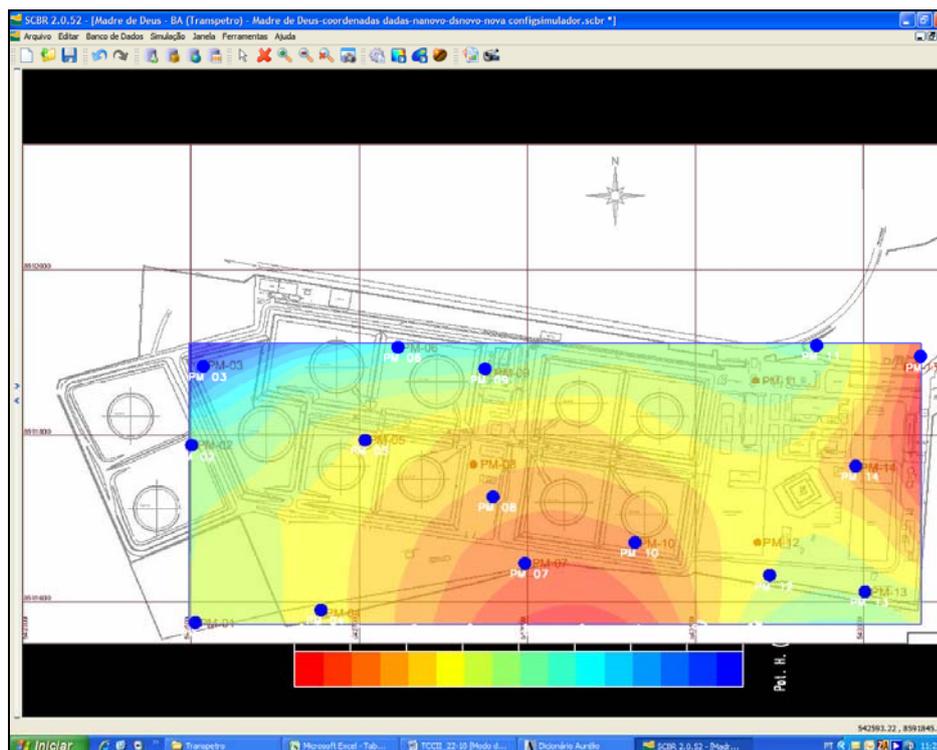


Figura 5.34: Campo potenciométrico gerado pelo modelo SCBR na calibração do Parque SUAPE.

Na primeira análise de sensibilidade realizada (Figuras 5.35 e 5.38), variações nos valores de condutividade hidráulica ( $K$ ) proporcionaram o mesmo incremento percentual na carga hidráulica (C.H.) que o valor de condutividade hidráulica medido ( $K = 6,6 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  para a Área 01 e  $K = 1,0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$  para a Área 02), isto é, incrementos no  $K$  não acarretaram em incrementos na carga hidráulica simulada. Isto se deve ao fato de a recarga ser zero, assim a carga hidráulica permanece constante. As Tabelas 5.4 e 5.7 apresentam os valores obtidos para a análise de sensibilidade 1. Para a Área 01, o incremento na carga hidráulica medida foi de -0,04% para o piezômetro PZ-5 e -0,32% para o PZ-6. Já para a Área 02, o incremento foi de 2,06% para o PE-01 e 0,46% para o PM-01.

As variações nos valores da recarga efetuadas na segunda análise de sensibilidade proporcionaram incrementos significativos nos valores de carga hidráulica medidos, principalmente nos valores da Área 02. Observou-se que quanto maior a recarga, maior o incremento na carga hidráulica. Para a Área 01, o incremento na carga hidráulica medida atingiu 4,90% para o PZ-6 (Figura 5.36), enquanto que para a Área 02, o incremento chegou a 115,32% para o PE-01 (Figura 5.39). Na análise de sensibilidade 2 foram obtidos os maiores incrementos na carga hidráulica. As Tabelas 5.5 e 5.8 apresentam os valores obtidos para a análise de sensibilidade 2.

Como se pode observar nas Figuras 5.37 e 5.40, a influência da condutividade hidráulica em cenários com recarga (análise de sensibilidade 3) apresentou a mesma tendência nos quatro piezômetros avaliados. Este comportamento similar nos quatro piezômetros também foi observado nas análises de sensibilidade 1 (Figuras 5.35 e 5.38) e 2 (Figuras 5.36 e 5.39). Para a Área 01 o incremento na carga hidráulica simulada chegou a 0,38% no PZ-05 e a 0,82% no PZ-6. Na Área 02 este acréscimo

atingiu 17,70% no PE-01 e 10,06% no PM-01. As Tabelas 5.6 e 5.9 apresentam os valores obtidos para a análise de sensibilidade 3.

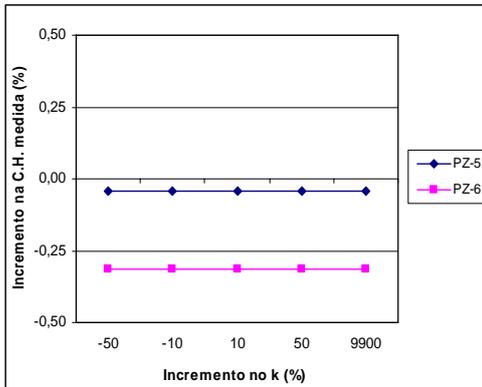


Figura 5.35: Análise de sensibilidade 1 para a Área 01.

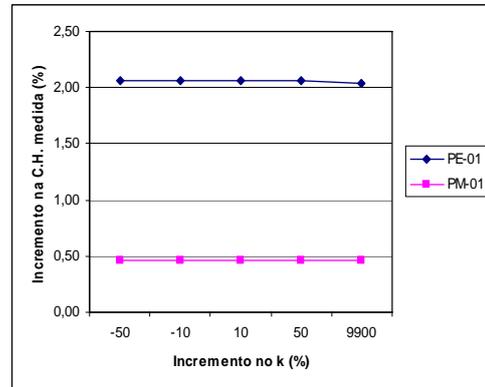


Figura 5.38: Análise de sensibilidade 1 para a Área 02.

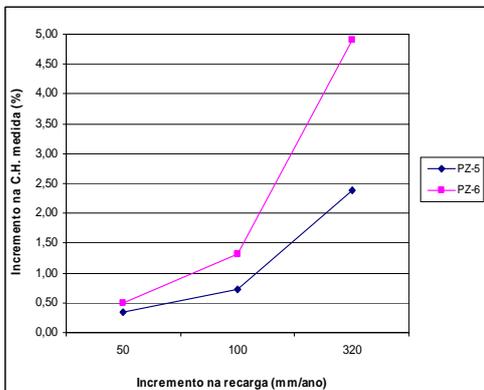


Figura 5.36: Análise de sensibilidade 2 para a Área 01.

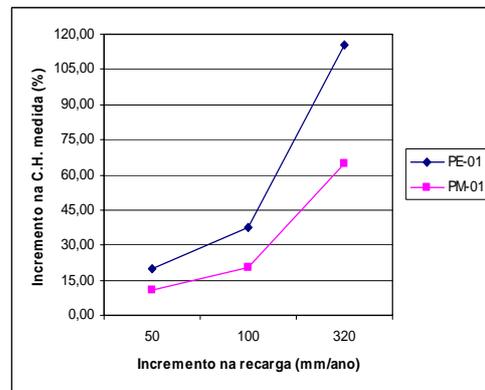


Figura 5.39: Análise de sensibilidade 2 para a Área 02.

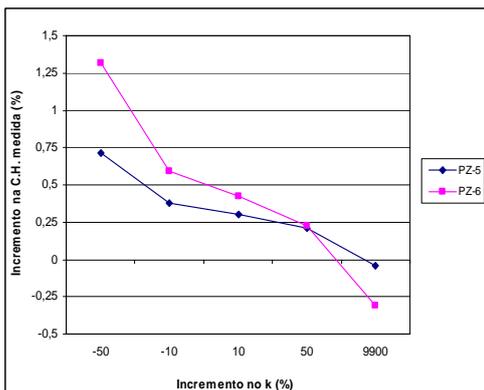


Figura 5.37: Análise de sensibilidade 3 para a Área 01.

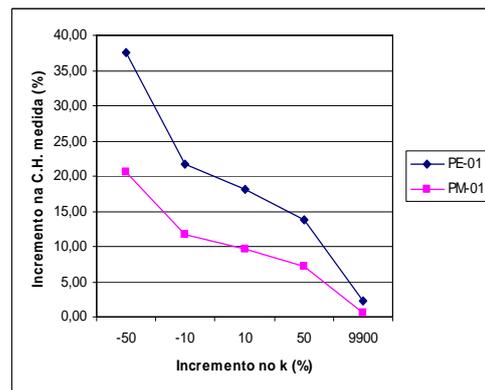


Figura 5.40: Análise de sensibilidade 3 para a Área 02.

Tabela 5.4: Análise de sensibilidade 1 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	K (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Variação do k (cm/s)	Incremento no K (%)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PZ-5	4,582	4,58001	1	-0,04	0,000066	0	0,0000726	10	4,58001	-0,04	0,00
							0,0000990	50	4,58001	-0,04	0,00
							0,0000594	-10	4,58001	-0,04	0,00
							0,0000330	-50	4,58001	-0,04	0,00
							0,0066000	9900	4,58001	-0,04	0,00
PZ-6	4,596	4,58147	1	-0,32	0,000066	0	0,0000726	10	4,58147	-0,32	0,00
							0,0000990	50	4,58147	-0,32	0,00
							0,0000594	-10	4,58147	-0,32	0,00
							0,0000330	-50	4,58147	-0,32	0,00
							0,0066000	9900	4,58147	-0,32	0,00

Tabela 5.5: Análise de sensibilidade 2 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	K (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Variação da Recarga (mm/ano)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PZ-5	4,582	4,58001	1	-0,04	0,000066	0	50	4,59740	0,34	0,38
							100	4,61480	0,72	0,76
							320	4,69135	2,39	2,43
PZ-6	4,596	4,58147	1	-0,32	0,000066	0	50	4,61895	0,50	0,82
							100	4,65642	1,31	1,63
							320	4,82131	4,90	5,22

Tabela 5.6: Análise de sensibilidade 3 para a leitura dos piezômetros 72 da Área 01.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	K (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Varição do K (cm/s)	Incremento no K (%)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PZ-5	4,582	4,5974	1a	0,34	0,000066	50	0,0000726	10	4,59582	0,30	-0,03
							0,0000990	50	4,59160	0,21	-0,13
							0,0000594	-10	4,59933	0,38	0,04
							0,0000330	-50	4,61480	0,72	0,38
							0,0066000	9900	4,58018	-0,04	-0,38
PZ-6	4,596	4,61895	1a	0,50	0,000066	50	0,0000726	10	4,61554	0,43	-0,07
							0,0000990	50	4,60646	0,23	-0,27
							0,0000594	-10	4,62311	0,59	0,09
							0,0000330	-50	4,65642	1,31	0,82
							0,0066000	9900	4,58185	-0,31	-0,81

Tabela 5.7: Análise de sensibilidade 1 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	K (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Varição do K (cm/s)	Incremento no K (%)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PE-01	3,645	3,72005	1	2,06	0,0001	0	0,000110	10	3,72005	2,06	0,00
							0,000150	50	3,72005	2,06	0,00
							0,000090	-10	3,72005	2,06	0,00
							0,000050	-50	3,72005	2,06	0,00
							0,010000	9900	3,71938	2,04	-0,02
PM-01	3,985	4,00341	1	0,46	0,0001	0	0,000110	10	4,00341	0,46	0,00
							0,000150	50	4,00341	0,46	0,00
							0,000090	-10	4,00341	0,46	0,00
							0,000050	-50	4,00341	0,46	0,00
							0,010000	9900	4,00340	0,46	0,00

Tabela 5.8: Análise de sensibilidade 2 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	$K$ (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Varição da Recarga (mm/ano)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PE-01	3,645	3,72005	1	2,06	0,0001	0	50	4,36518	19,76	17,70
							100	5,01032	37,46	35,40
							320	7,84856	115,32	113,27
PM-01	3,985	4,00341	1	0,46	0,0001	0	50	4,40432	10,52	10,06
							100	4,80532	20,59	20,12
							320	6,56955	64,86	64,39

Tabela 5.9: Análise de sensibilidade 3 para a leitura dos piezômetros 20 da Área 02.

Piezômetro	C.H. medida (m)	C.H. simulada (m)	Tipo de calibração	% de variação na C.H.	$K$ (cm/s)	Recarga (mm/ano)	Varição do $k$ (cm/s)	Incremento no $K$ (%)	C.H. simulada' (m)	Incremento na C.H. medida (%)	Incremento na C.H. simulada (%)
PE-01	3,645	4,36518	1a	19,76	0,0001	50	0,000110	10	4,30652	18,15	-1,61
							0,000150	50	4,15009	13,86	-5,90
							0,000090	-10	4,43687	21,72	1,97
							0,000050	-50	5,01032	37,46	17,70
							0,010000	9900	3,7257	2,21	-17,54
PM-01	3,985	4,40432	1a	10,52	0,0001	50	0,000110	10	4,36787	9,61	-0,91
							0,000150	50	4,27069	7,17	-3,35
							0,000090	-10	4,44888	11,64	1,12
							0,000050	-50	4,80532	20,59	10,06
							0,010000	9900	4,00739	0,56	-9,96

A Tabela 5.10 apresenta os valores de carga hidráulica obtidos no procedimento de verificação do modelo matemático SCBR para a Área 01 da Fazenda Ressacada. Os valores obtidos na verificação do SCBR para a Área 02 da Ressacada estão contidos na Tabela 5.11. Como os valores de  $R^2$  obtidos foram de 0,95 e 0,80 para as Áreas 01 e 02, respectivamente, o modelo SCBR foi considerado verificado para as Áreas da Fazenda Experimental Ressacada. A Figura 5.41 apresenta a avaliação do procedimento de verificação através do modelo de regressão linear para a Área 01, enquanto a Figura 5.42 mostra esta avaliação para a Área 02.

Tabela 5.10: Valores de carga hidráulica obtidos no procedimento de verificação do SCBR com os dados da L.P. 50 da Área 01 da Ressacada.

<b>Piezômetro</b>	<b>C.H.<sup>1</sup> medida (m)</b>	<b>C.H.<sup>1</sup> simulada (m)</b>	<b>Diferença<sup>2</sup> (m)</b>	<b>Diferença<sup>3</sup> (%)</b>
PZ-5	4,827	4,82817	0,00117	+0,02
PZ-6	4,857	4,85066	-0,00634	-0,13
PZ-7	4,779	4,78409	0,00509	+0,11
PZ-8	4,872	4,83853	-0,03347	-0,69
PZ-9	4,739	4,75068	0,01168	+0,25

<sup>1</sup> C.H. – Carga hidráulica;

<sup>2</sup> Diferença entre os valores simulados e os valores medidos (C.H. simulada menos C.H. medida);

<sup>3</sup> Diferença percentual dos valores simulados em relação aos medidos.

Tabela 5.11: Valores de carga hidráulica obtidos no procedimento de verificação do SCBR com os dados da L.P. 22 da Área 02 da Ressacada.

<b>Piezômetro</b>	<b>C.H.<sup>1</sup> medida (m)</b>	<b>C.H.<sup>1</sup> simulada (m)</b>	<b>Diferença<sup>2</sup> (m)</b>	<b>Diferença<sup>3</sup> (%)</b>
PE01	3,604	3,66780	+0,06380	+1,77
PE02	3,665	3,74765	+0,08265	+2,26
PE03	3,936	4,09929	+0,16329	+4,15
PE04	4,422	4,40492	-0,01708	-0,39
PE06	3,810	4,05480	+0,24480	+6,43
PE07	3,651	3,69909	+0,04809	+1,32
PM01	3,914	3,93715	+0,02315	+0,59
PM02	3,665	3,79984	+0,13484	+3,68
PM03	3,696	3,70247	+0,00647	+0,18
PM04	3,542	3,58595	+0,04395	+1,24
PM05	3,884	4,14835	+0,26435	+6,81
PM06	3,776	3,75743	-0,01857	-0,49
PM18	3,601	3,61210	+0,01110	+0,31
PZ01	3,747	4,03086	+0,28386	+7,58
PZ02	3,765	4,13065	+0,36565	+9,71
PZ03	3,946	4,16245	+0,21645	+5,49
PZ05	4,566	4,49152	-0,07448	-1,63
PZ07	3,811	3,94513	+0,13413	+3,52
PZ08	3,716	3,75615	+0,04015	+1,08

<sup>1</sup> C.H. – Carga hidráulica;

<sup>2</sup> Diferença entre os valores simulados e os valores medidos (C.H. simulada menos C.H. medida);

<sup>3</sup> Diferença percentual dos valores simulados em relação aos medidos.

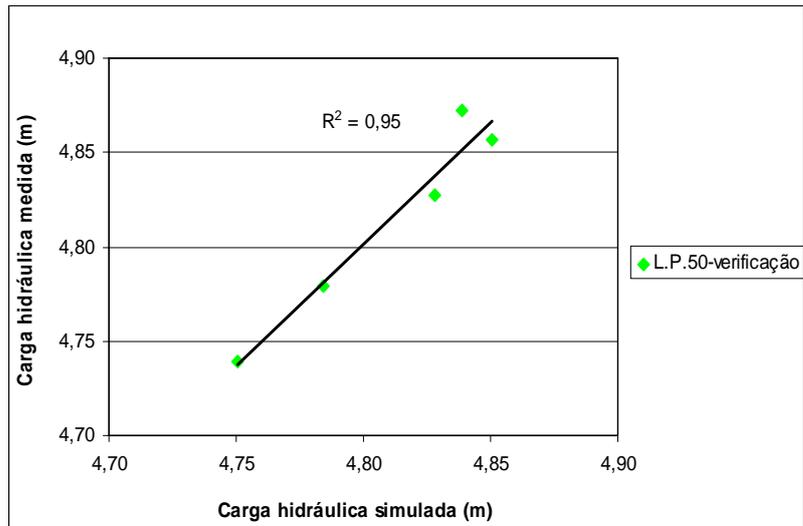


Figura 5.41: Verificação do modelo SCBR para a L.P. 50 da Área 01.

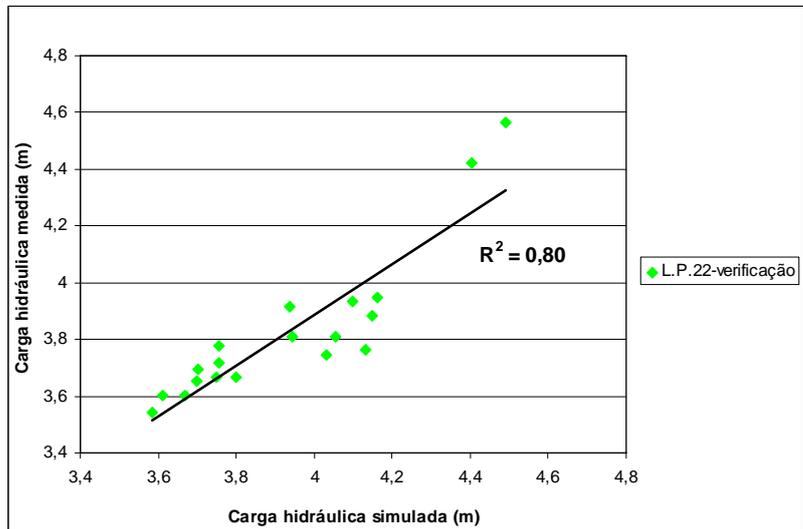


Figura 5.42: Verificação do modelo SCBR para a L.P. 22 da Área 02.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi realizar a avaliação do modelo SCBR – Solução Corretiva Baseada no Risco para os parâmetros de fluxo carga hidráulica, recarga e condutividade hidráulica. O SCBR foi considerado calibrado para as Áreas Experimentais 01 e 02 da Fazenda Ressacada com relação à carga hidráulica. Para a Área 01 o maior  $R^2$  obtido foi de 0,9974 (calibração tipo 1 – L.P. 69) e para a Área 02 este valor foi de 0,8156 (calibração tipo 1 – L.P.20). O modelo SCBR também foi considerado verificado para as Áreas 01 e 02 da Ressacada, encontrando-se para o  $R^2$  0,95 e 0,80, respectivamente. Na calibração realizada para o Terminal Transpetro Parque SUAPE o SCBR também foi considerado calibrado, obtendo-se para o  $R^2$  o valor de 0,80. Desta forma, pode-se concluir que o modelo SCBR permite simular adequadamente tanto cenários de pequenas dimensões (Áreas 01 e 02 da Ressacada), como cenários de vários hectares (Terminal Transpetro), com aceitável correlação entre os dados medidos em campo e os dados simulados para a carga hidráulica.

Os valores de  $R^2$  obtidos nos seis tipos de calibração realizados para as Áreas da Fazenda Ressacada indicam que o modelo SCBR obteve melhores calibrações quando não foi considerada a influência da recarga (*recarga = 0,0mm/ano*). Nestes casos, o domínio de simulação assumido nas calibrações tipo 1 apresentou melhores resultados.

Para áreas de estudo que apresentam uma alta densidade de poços de monitoramento, a posição do domínio de simulação, simplesmente ajustado no entorno dos piezômetros ou ajustado de maneira paralela ao fluxo da água subterrânea gerado pelo modelo SCBR, tem pouca interferência sobre a simulação quando a recarga for de 0,0mm/ano. Nessas áreas, para os cenários com variação da recarga também foi observado que existe uma relação entre os valores de  $R^2$  e a precipitação mensal verificada. Baixas precipitações resultaram em pequenas alterações nos valores de  $R^2$  com variação da recarga, em relação aos valores de  $R^2$  sem recarga. Já para precipitações mais intensas, as alterações nos valores de  $R^2$  com variação da recarga foram maiores. Nos cenários com recarga, o ajuste paralelo do domínio de simulação apresentou melhores  $R^2$ .

Em locais que possuem baixa densidade de poços de monitoramento, a posição do domínio de simulação somente ajustado no entorno dos piezômetros apresentou maiores valores de  $R^2$  para cenários sem recarga. Nestes locais, quando se considera a influência da recarga os valores de  $R^2$  reduzem significativamente. O ajuste do domínio de simulação paralelo ao fluxo também apresentou uma melhor resposta quando se incorporou a recarga, entretanto, os valores de  $R^2$  ainda permaneceram muito baixos.

Os baixos valores de  $R^2$  encontrados nos cenários com recarga podem indicar uma formulação incorreta do código computacional do SCBR para este parâmetro. Todavia, os resultados de simulação do modelo SCBR para a Área 02 da Ressacada foram muito próximos dos resultados obtidos com o modelo Flowpath, tanto nos cenários sem recarga como nos cenários com recarga. Possivelmente as características hidrogeológicas da Área 02 da Ressacada não puderam ser devidamente caracterizadas pelos modelos SCBR e Flowpath, e com isso, não foi possível incorporar a variação da recarga na simulação mantendo um  $R^2$  aceitável.

A recarga foi o parâmetro de entrada no modelo SCBR que exerceu a maior influência sobre os valores de carga hidráulica. Uma variação de 320mm/ano na recarga chegou a atingir um incremento de 115,32% nos valores de carga hidráulica medida.

O bom desempenho nas etapas de calibração e verificação do modelo SCBR para a carga hidráulica não garantem, ainda, a sua validação. É necessário também realizar a calibração do modelo para outros parâmetros. Além disso, o processo de validação de um modelo matemático envolve outras etapas, como por exemplo, aplicar o modelo nas mais diversas situações, realizando-se repetidas simulações em cada uma destas aplicações, verificando se as previsões realizadas pelo modelo para situações futuras realmente serão condizentes com os dados reais com um nível de confiança aceitável.

Recomenda-se calibrar o modelo SCBR para outros cenários que apresentem a influência da recarga para melhor conhecer os efeitos deste parâmetro de entrada sobre os resultados de simulação. Caso estas novas simulações continuem apresentando discrepâncias entre os valores simulados pelo SCBR e os dados de campo introduzidos, é aconselhável calibrar esses novos cenários com recarga em outros modelos de simulação do fluxo da água subterrânea e comparar os seus resultados com os valores obtidos através do SCBR para esses cenários.

A ampliação da utilização do SCBR para áreas reais será fundamental no processo de avaliação do modelo e na realização de melhorias necessárias para a sua aplicação como ferramenta no gerenciamento ambiental de áreas impactadas.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. D 6025 – 96: **Standard Guide for Developing and Evaluating Ground-Water Modeling Codes**. Philadelphia, 2002. 16 p.

BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S.; NEWELL, C.J. **GROUND WATER CONTAMINATION: Transport and Remediation**. 2 ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1997. 604 p.

BORGHETTI, N.R.B; BORGHETTI, J.R.; ROSA FILHO, E.F. **Aqüífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004. 214p.

BRAIN TECNOLOGIA LTDA. Relatório de Diagnóstico Geoambiental: Técnicas GPR 2D, tomografia elétrica associadas à hidrogeologia, sondagens, análises geoquímicas e hidroquímicas – Parque do Suape (Transpetro), Madre de Deus-BA. v. 1, 37p. 2004. Trabalho não publicado

CARDOSO, W.L.; BASTOS, I.N.; VASCONCELLOS, J.F.V.; NOGUEIRA, R.P. Análise de Sensibilidade em Modelos de Impedância Eletroquímica do Fe e do Pd. **Paper CRE04-MT17**. Instituto Politécnico, Nova Friburgo. 2004.

CAVALCANTI, M.A.M.P. **A modelagem matemática associada ao sistema de informação geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios**. 2002. 188f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Curso de Pós-Graduação em Recurso Minerais e Hidrogeologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CHIARANDA, H.S.; CORSEUIL, H.X. Avaliação da importância da rota inalação de vapores em locais contaminados com derivados de petróleo. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande, **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2005.

CORSEUIL, H.X.; HUNT, G.S.; SANTOS, R.C.F. dos & ALVAREZ, J.J. The influence of the gasoline oxygenate ethanol on aerobic and anaerobic BTX biodegradation. **Water Research**, v.32, n. 7, p. 2065-2072, 1998.

CORSEUIL, H.X. & FERNANDES, M. Efeito do etanol no aumento da solubilidade de compostos aromáticos presentes na gasolina Brasileira. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 4, n. 1 e 2, p. 71-75, 1999.

CORSEUIL, H.X.; KAIPPER, B.I.A. & FERNANDES, M. Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol. **Water Research**, v. 38, p.1449-1456, 2004.

CORSEUIL; H.X.; SCHNEIDER, M.R.; ROSÁRIO, M.; MALISKA JR., C. Solução Corretiva baseada no Risco (SCBR): Modelo Matemático de Tomada de Decisão para o Gerenciamento Ambiental de Águas Subterrâneas Contaminadas. In: XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006, Curitiba, **Anais...** São Paulo: ABAS, 2006.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994. 691 p.

FILHO, C.A.C.; COTA, S.D.S. Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do modelo Modflow. **Águas Subterrâneas**, n. 17, p. 23-30, maio 2003.

FITTS, C.R. **Groundwater Science**. San Diego: Academic Press, 2002. 450 p.

FRANZ, T.; GUIGUER, N. **FLOWPATH: Two-Dimensional Horizontal Aquifer Simulation Model. User's manual: version 4**. Groundwater flow and pathlines simulation model. Waterloo Hydrogeologic Software: Waterloo, 1990.

GROUND WATER SERVICES, Inc (GSI). **Tier 2 Guidance Manual for Risk-Based Corrective Action**. Houston, Texas, 1995.

HEATH, R.C. **Hidrologia Básica de Água Subterrânea**. Tradução de WREGE, M. & POTTER, P. Instituto de Pesquisas Hidráulicas: UFRGS, 1983. 84 p. Título original: United States Geological Survey Water Supply Paper 2220.

MALISKA, C.R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995. 453 p.

MANDLE, R. J. **Groundwater Modeling Guidance**. Ground Water Modeling Program. Michigan Department of Environmental Quality (MDEQ). 2002. 55 p.

PETROBRAS – Petróleo brasileiro S.A.; CENPES – Centro de pesquisas e desenvolvimento. **Solução Corretiva Baseada no Risco – versão 2.0: Manual do Usuário**. Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2005. 180 p.

PETROBRAS – Petróleo brasileiro S.A.; UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina; ESSS – Engineering Simulation and Scientific Software. **Solução Corretiva Baseada no Risco – versão 2.0: Guia do Usuário**. Laboratório de Remediação de Águas Subterrâneas. Universidade Federal de Santa Catarina: Florianópolis, 2006. 100 p.

SCHNOOR, J.L. **Environmental modeling: fate and transport of pollutants in water, air and soil**. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996. 682 p.

SPENCE, L. R.; WALDEN, T. **RISC4 - Risk-Integrated Software for Clean-Ups**. User's Manual. USA: BP Oil International, October, 2001. 439p.

TODD, D. K. **Groundwater Hydrology**. 2 ed. New York, 1980.

UNITED NATIONS. World Water Assessment Programme. **Water for People, Water for Life**. The United Nations World Water Development Report, March, 2003. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556e.pdf>>. Acesso em: 29 março 2007.

\_\_\_\_\_. World Water Assessment Programme. **Water for life**. The United Nations World Water Development Report, March, 2005. Disponível em: <<http://www.un.org/waterforlifedecade/waterforlifebklt-e.pdf>>. Acesso em: 29 março 2007.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ground Water and Ecosystems Restoration Research**. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/bioscrn.html>>. Acesso em: 11 junho 2007.

WIEDEMEIER, T.H., RIFAI, H.S., NEWEL, C.J. & WILSON, J.T. **Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 617p.

WIKIPÉDIA – A enciclopédia livre. Serviço de busca: artigo. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Boussinesq>>. Acesso em: 06 dezembro 2007.

## 8. ANEXOS

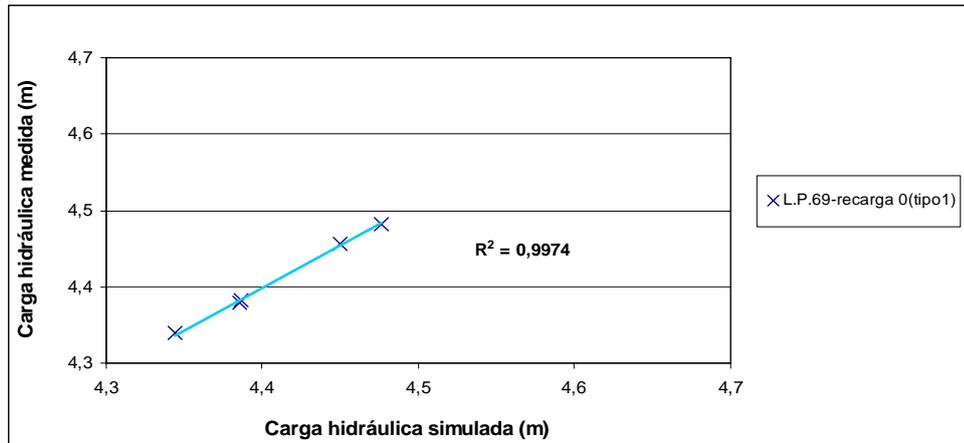


Figura 5.43: Calibração tipo 1 para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

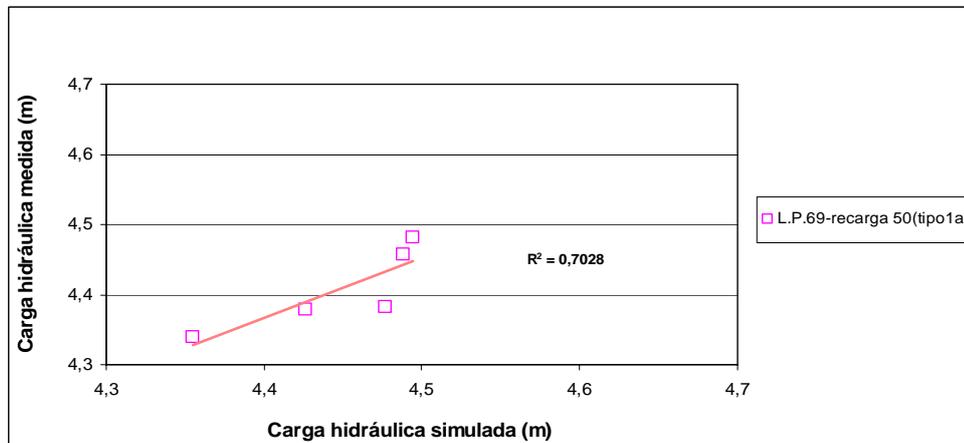


Figura 5.44: Calibração tipo 1a para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

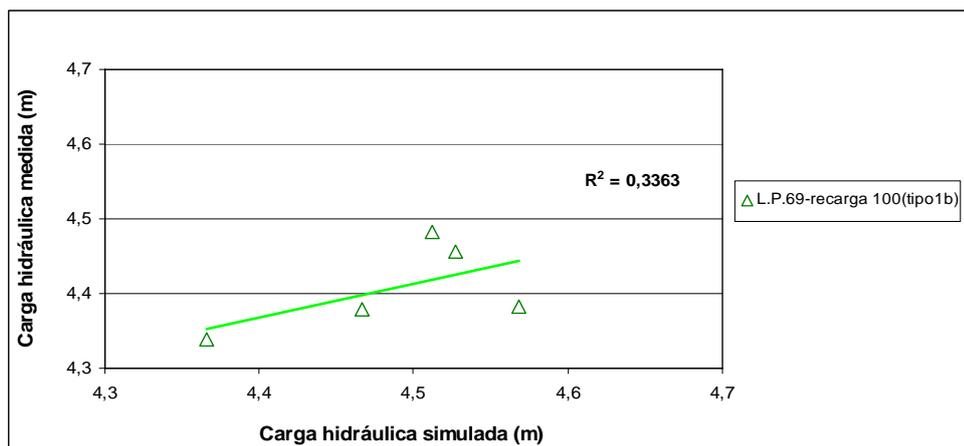


Figura 5.45: Calibração tipo 1b para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

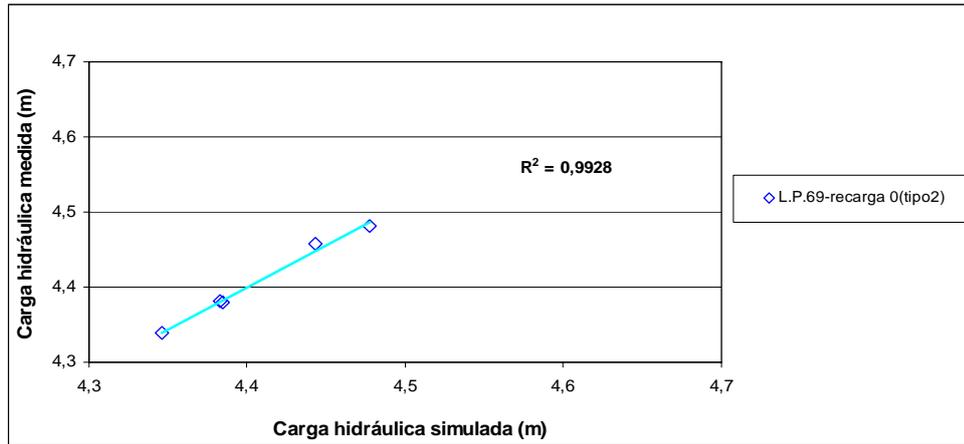


Figura 5.46: Calibração tipo 2 para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

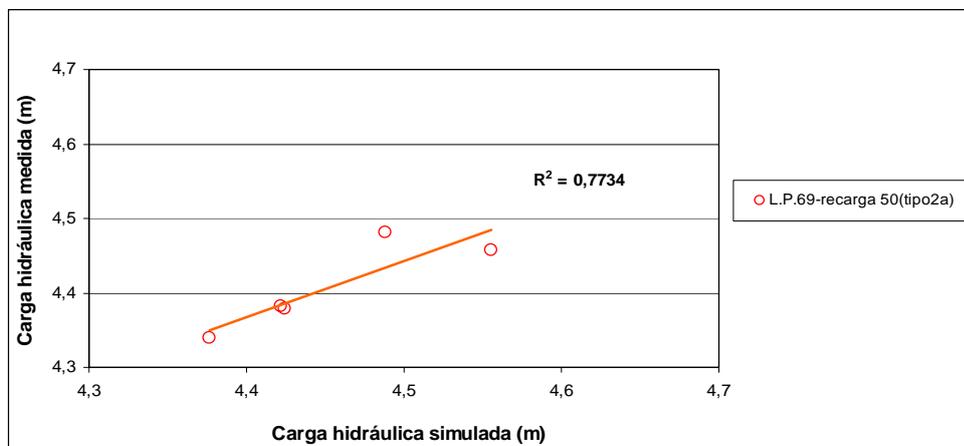


Figura 5.47: Calibração tipo 2a para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

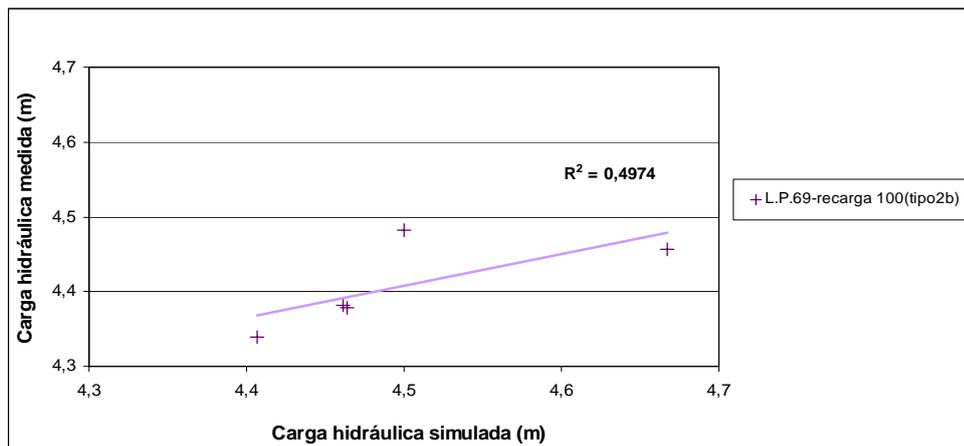


Figura 5.48: Calibração tipo 2b para a L.P. 69 da Área Experimental 01.

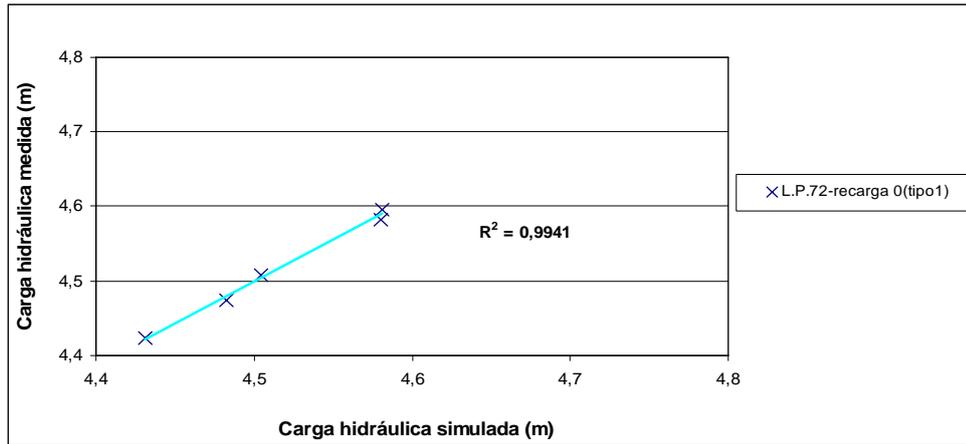


Figura 5.49: Calibração tipo 1 para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

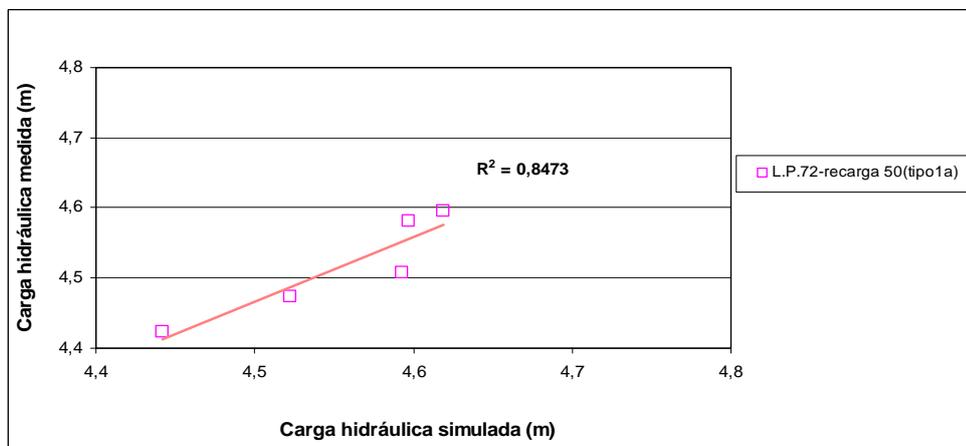


Figura 5.50: Calibração tipo 1a para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

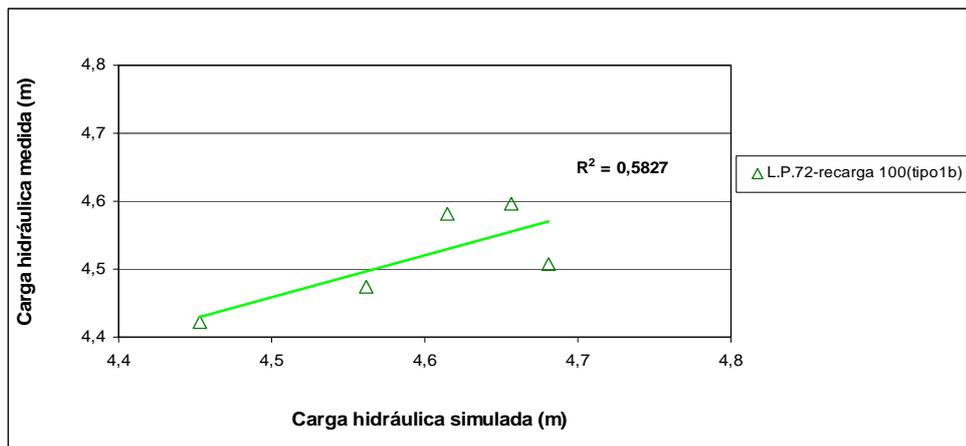


Figura 5.51: Calibração tipo 1b para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

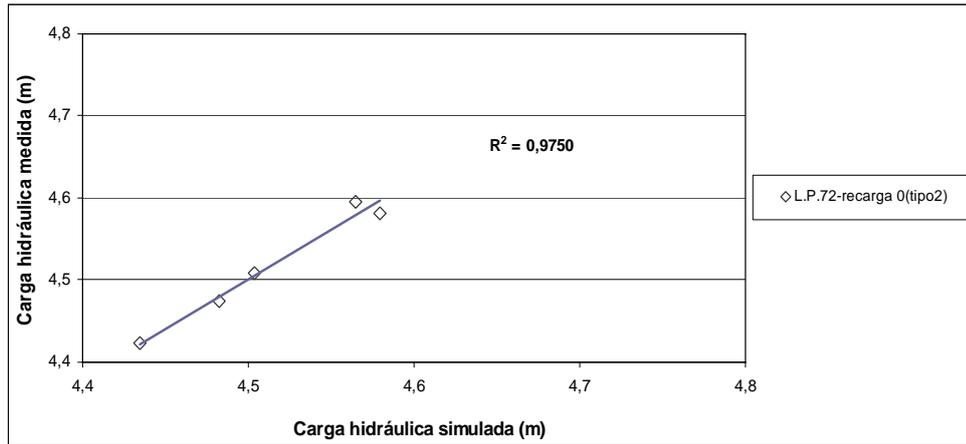


Figura 5.52: Calibração tipo 2 para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

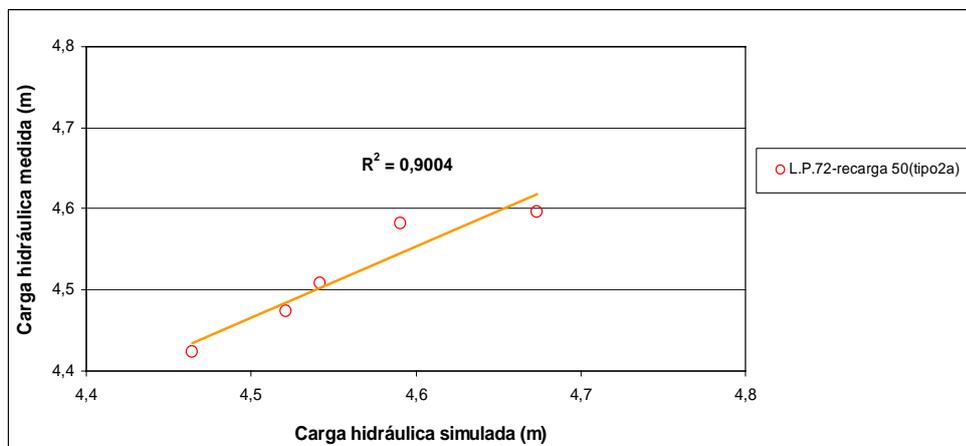


Figura 5.53: Calibração tipo 2a para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

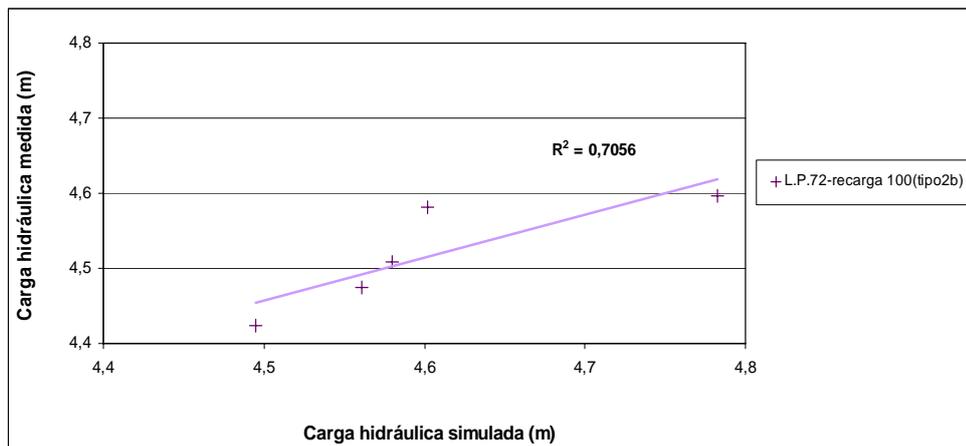


Figura 5.54: Calibração tipo 2b para a L.P. 72 da Área Experimental 01.

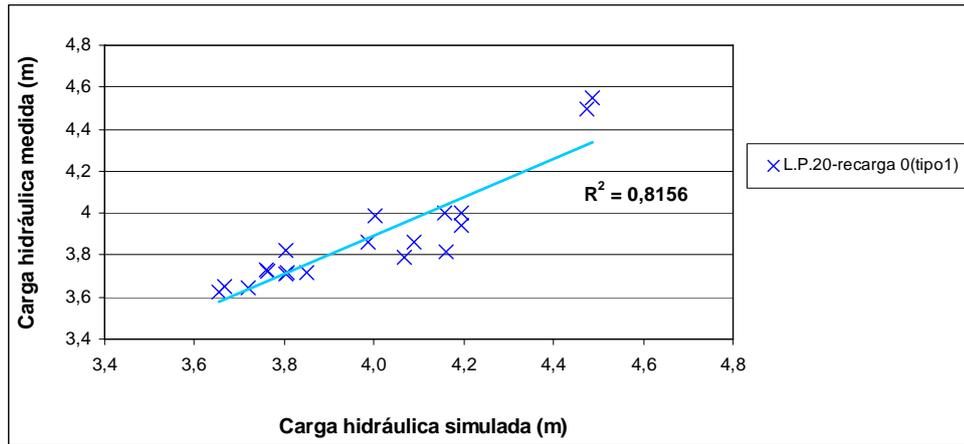


Figura 5.55: Calibração tipo 1 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

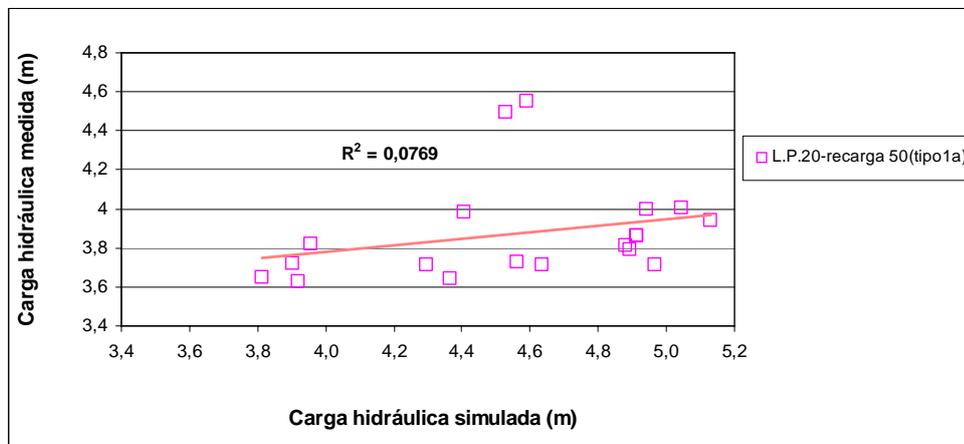


Figura 5.56: Calibração tipo 1a para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

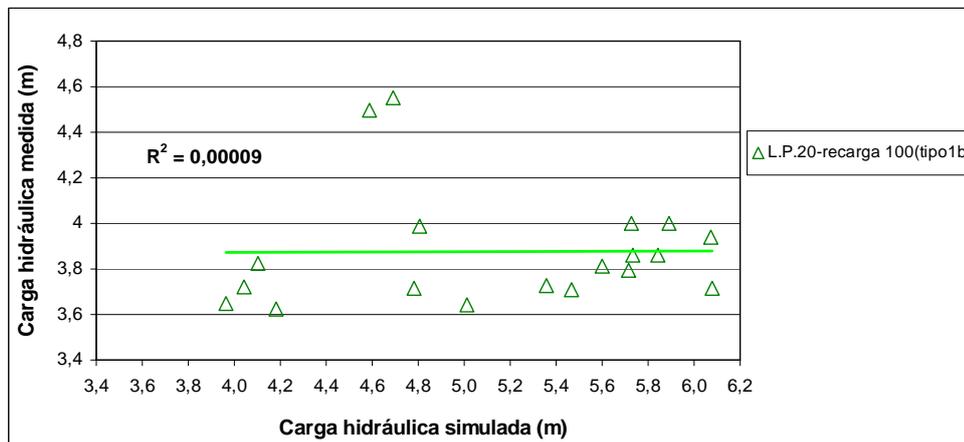


Figura 5.57: Calibração tipo 1 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

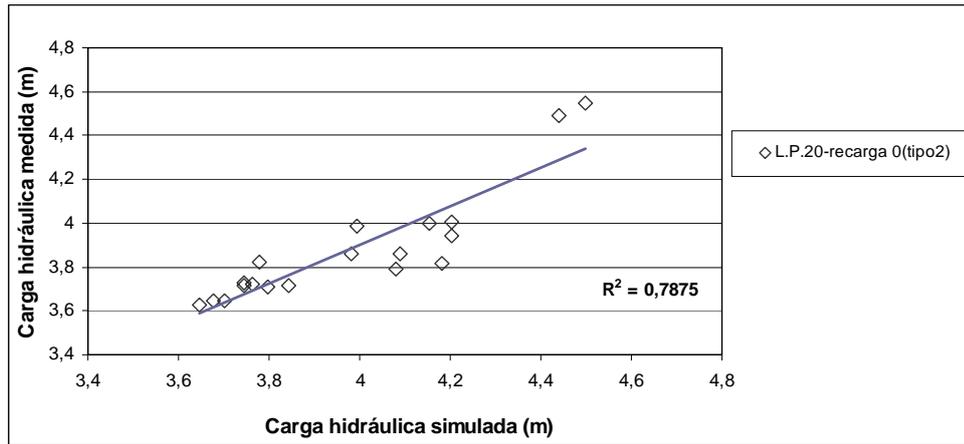


Figura 5.58: Calibração tipo 2 para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

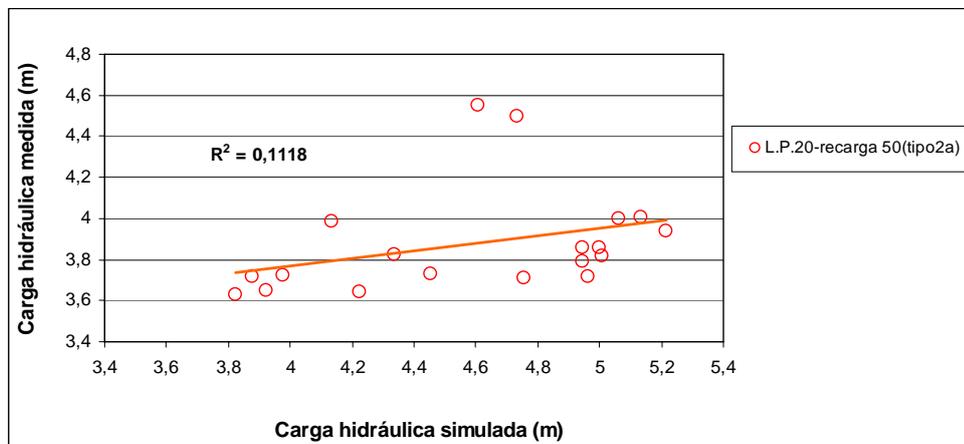


Figura 5.59: Calibração tipo 2a para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

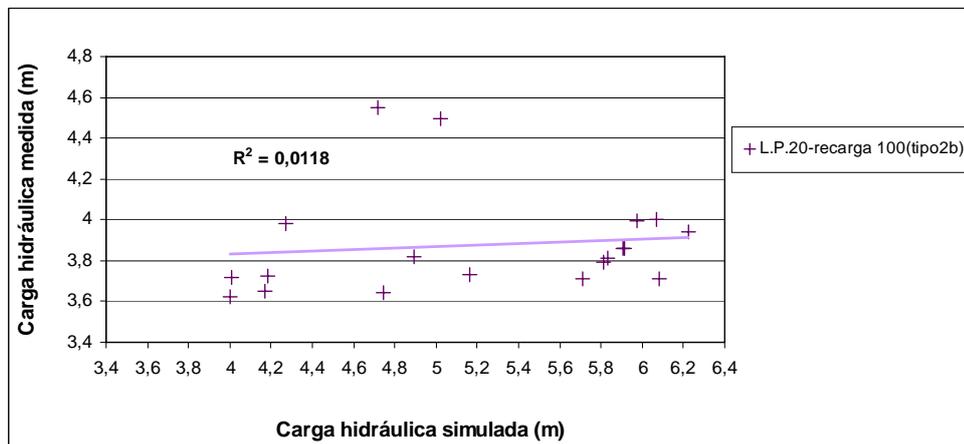


Figura 5.60: Calibração tipo 2b para a L.P. 20 da Área Experimental 02.

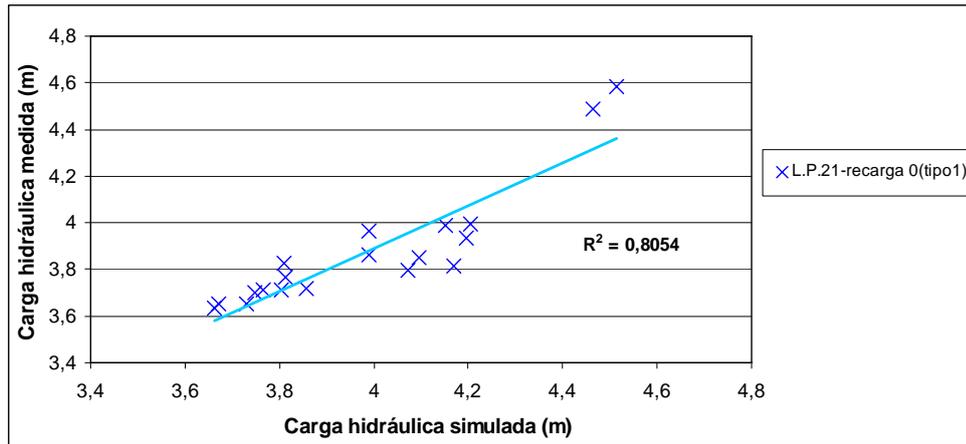


Figura 5.61: Calibração tipo 1 para a L.P. 21 da Área Experimental 02.

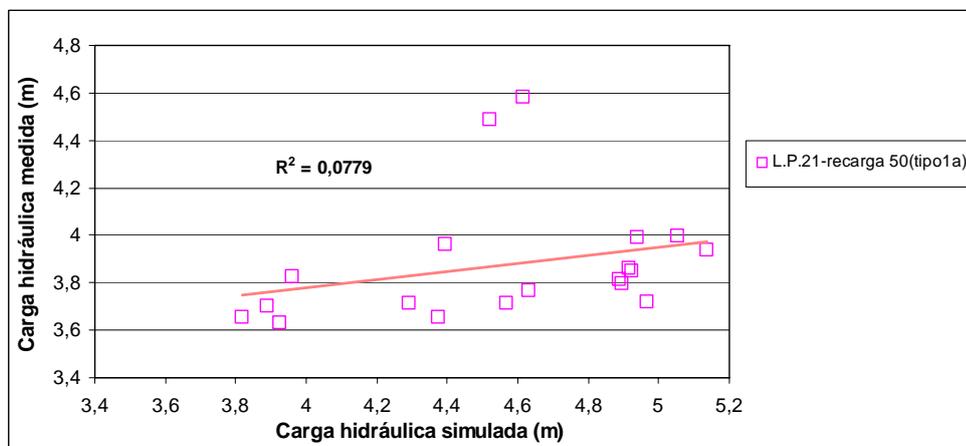


Figura 5.62: Calibração tipo 1a para a L.P. 21 da Área Experimental 02.

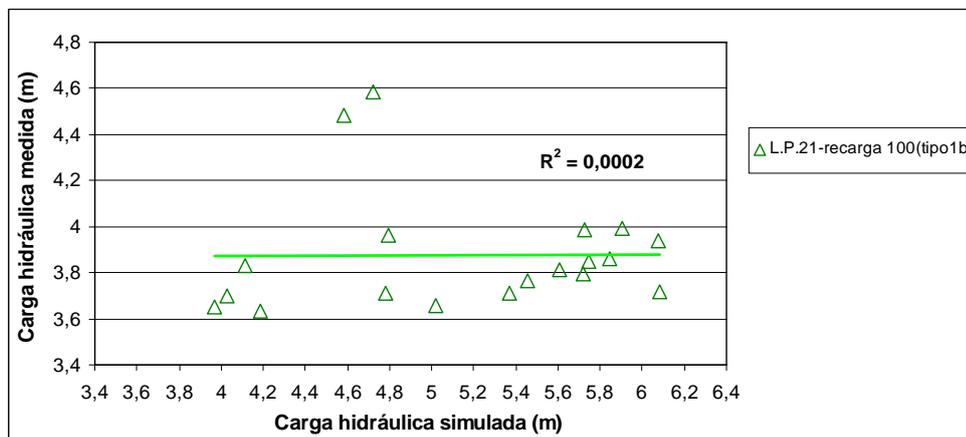


Figura 5.63: Calibração tipo 1b para a L.P. 21 da Área Experimental 02.

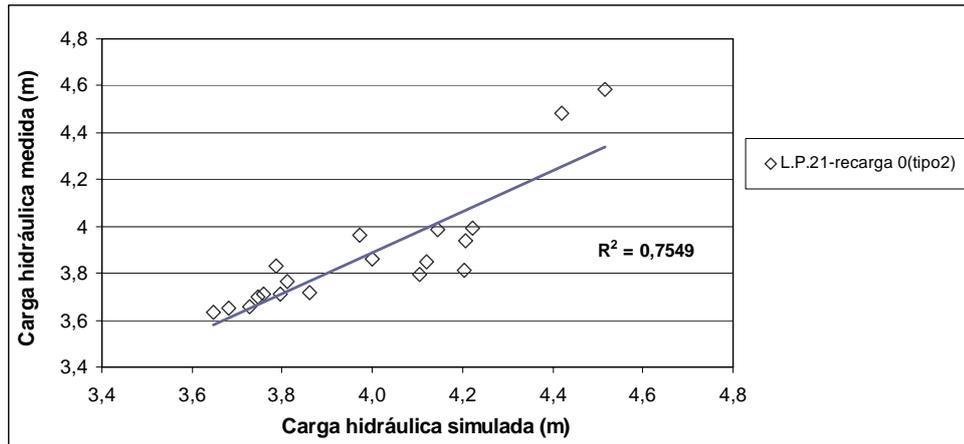


Figura 5.64: Calibração tipo 2 para a L.P. 21 da Área Experimental 02.

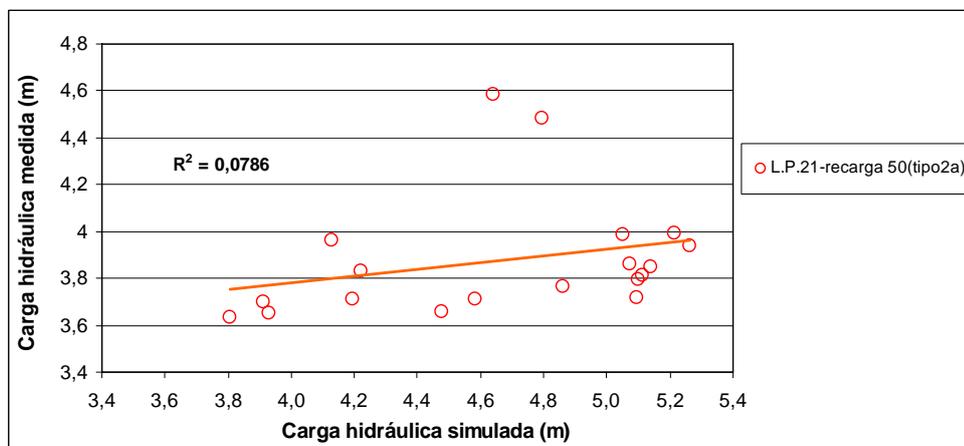


Figura 5.65: Calibração tipo 2a para a L.P. 21 da Área Experimental 02.

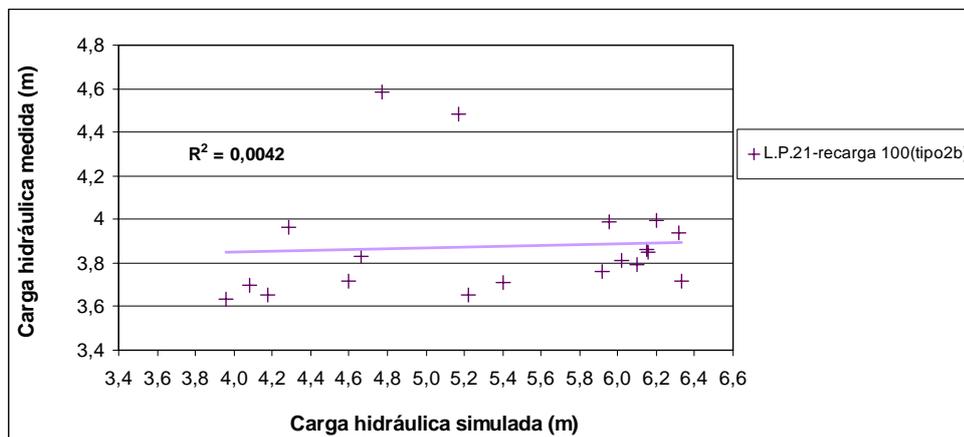


Figura 5.66: Calibração tipo 2b para a L.P. 21 da Área Experimental 02.