



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS



CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

MAGALY VIEIRA COSTA DOS SANTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM PEQUENO AQUÍFERO ALUVIAL
NA BACIA EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA: SEMI-ÁRIDO
ALAGOANO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Maceió/AL, abril de 2009

MAGALY VIEIRA COSTA DOS SANTOS

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM PEQUENO AQUÍFERO ALUVIAL
NA BACIA EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA: SEMI-ÁRIDO
ALAGOANO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento à banca examinadora da Universidade Federal de Alagoas, sob a orientação da Profa. Dra. Cleuda Custódio Freire e co-orientação do Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza.

Orientadora: Cleuda Custódio Freire.

Co-orientador: Vladimir Caramori Borges de Souza

MACEIÓ – AL

2009

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

S237e Santos, Magaly Vieira Costa dos.
Estudo do comportamento de um pequeno aquífero aluvial na bacia experimental de Santana do Ipanema : semi-árido alagoano / Magaly Vieira Costa dos Santos, 2009.
xii, 125 f. : il.

Orientadora: Cleuda Custódio Freire.
Co-Orientador: Vladimir Caromori Borges de Souza.
Dissertação (mestrado em Engenharia : Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2009.

Bibliografia: f. 101-106.
Apêndices: f. 107-125.

1. Aquífero aluvial – Santana do Ipanema (AL). 2. Águas subterrâneas.
3. Regiões semi-áridas. 4. Modelagem matemática. I. Título.

CDU: 556.18(813.5)



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Centro de Tecnologia – CTEC
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamentos – PPGRHS
Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas
Tel/Fax: (82) 3214-1279
E-mail: ppgrhs@ctec.ufal.br
Homepage: www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs



**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE UM PEQUENO AQUIFERO
ALUVIAL NA BACIA EXPERIMENTAL DE SANTANA DO IPANEMA:
SEMI-ÁRIDO ALAGOANO**

MAGALY VIEIRA COSTA DOS SANTOS

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 17 do mês de abril do ano de 2009.

Banca Examinadora:

Profª Drª Cleuda Custódio Freire
Orientadora-CTEC/UFAL

Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza
CTEC/UFAL

Prof. Dr. Roberaldo Carvalho de Souza
CTEC/UFAL

Profª Drª Rochana Campos de Andrade Lima Santos
IGDEMA/UFAL

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão
UFMG

*Dedico a todos que me incentivaram, nessa caminhada;
em especial a Deus, razão de meu viver...*

“Tudo posso naquele que me fortalece” (Filipenses 4:13)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e as minhas irmãs pelo amor incondicional.

Aos demais familiares, parentes e amigos, em especial aos meus avós (Ismênia Vieira e Pedro Justino), por toda a força e incentivo, mesmo quando me fiz tão distante, e hoje diante desse momento difícil, quero transmitir toda a força recebida, através de meu carinho e oração.

A minha orientadora e “psicóloga”, Cleuda Custódio Freire, por quem tenho uma imensa gratidão, por toda força e confiança em mim depositada, as quais foram fundamentais para se chegar ao final desta etapa.

Ao co-orientador, e coordenador do Projeto BEER, Vladimir Caramori Borges de Souza, por toda a assistência dada na execução do projeto além de toda a força e incentivo dados durante a estadia no Projeto BEER.

Aos demais componentes do Projeto BEER, em especial àqueles que me ajudaram durante as campanhas de campo (Sebastião Falcão, Sérgio Renato, Luiz Henrique, Simone Maria e Natalino Rasquinho), pelas vezes que me auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores do PPGRHS, pelo constante apoio e incentivo. Meu agradecimento especial ao Prof. Roberaldo Carvalho de Souza, que desde a graduação foi um grande incentivador durante a minha jornada acadêmica.

Ao professor Antônio Nazaré, pela colaboração no desenvolvimento do instrumento utilizado para o monitoramento do aquífero.

À Fundepes e à Finep pelo apoio financeiro à pesquisa.

À Fapeal pela concessão da bolsa de estudos.

A todos os colegas adquiridos nessa caminhada, pela amizade, pelo o apoio, que foi fortalecido ainda mais durante o mestrado (Joceline Costa, Thais Tonin, Josiane Holz, Valeska Cavalcante entre outros). Em especial agradeço a João de Lima e a Claudionor Oliveira, que foram pessoas maravilhosas tanto nos momentos fáceis quanto nos mais difíceis.

A Marcos Vanderley e a Antônio Colatino, pelo apoio técnico no Laboratório de Solos.

Aos proprietários das terras, nas quais foram instaladas a Bacia Experimental de Santana do Ipanema: Sr. Antônio Francisco, Sr. José Francisco e Sr. Amâncio.

À COHIDRO, em especial a Evaldo Correia, pela força nessa caminhada.

Enfim, agradeço sobretudo a DEUS por ter me rodeado de pessoas que não me deixaram desanimar em meio às adversidades da vida.

A todos os meus sinceros agradecimentos...

Resumo

A importância de estudos em aquíferos aluviais no semi-árido se evidencia quando se leva em consideração que, muitas vezes, estes são a base do desenvolvimento de regiões constantemente afetadas pelos fenômenos climáticos, em especial as secas. Na Bacia Experimental de Santana do Ipanema foi instalado um aparato experimental, composto de uma bateria de quinze piezômetros, visando conhecer a dinâmica dos aquíferos aluviais na região. O local apresenta-se com características típicas do semi-árido brasileiro, onde a variabilidade do regime pluviométrico, associado às altas taxas de evaporação, faz com que a seca seja o principal fator limitante para o desenvolvimento sócio-econômico da região. A partir do monitoramento contínuo dos componentes do sistema, foi feita uma caracterização global referente ao aquífero em estudo. Além disso, análises realizadas em campanhas de campo permitiram fazer uma caracterização simplificada dos parâmetros bem como a estimativa de suas potencialidades. Foi desenvolvido também um modelo baseado em técnicas estatísticas com o objetivo de explicar o comportamento do aquífero durante o período de observação. O resultado encontrado foi bastante representativo no que se refere à situação mensal observada, ressalta-se, no entanto, a necessidade de ampliação do período de observação de dados. Por fim, foi utilizado o MODFLOW, para fazer a calibração dos dados no regime permanente, verifica-se que as linhas de fluxo se mostraram coerentes com as outras observações realizadas. Como resultado geral, verifica-se que basicamente a alimentação do aquífero processa-se pela recarga direta, proveniente da precipitação, e que há evidências da contribuição lateral na área em estudo, provavelmente pelo açude situado ao lado. Outra constatação importante é que precipitações mensais inferiores a 100 mm não são capazes de saturar o solo para favorecer a alimentação do aquífero. Tais resultados, verificados por meio de técnicas estatísticas e de modelos matemáticos, além de constatações de campo, surgem como estratégias comuns, mas que podem ser capazes de avaliar suficientemente o comportamento de aquíferos aluviais, de forma a subsidiar ações que permitam obter conhecimentos mais detalhados sobre tais sistemas.

Palavras - chave: Aquífero aluvial, semi-árido, modelos matemáticos

Abstract

The importance of studies in alluvial aquifer in the semi-arid is evidenced when it is taken in consideration that, a lot of times, these are constantly the base of the development of areas affected for the climatic phenomena, especially the droughts. In the Experimental Basin of Santana of Ipanema was installed an experimental apparatus, composed of a battery of fifteen piezometer, seeking to know the dynamics of the alluvial aquifer in the area. The place comes with typical characteristics of the semi-arid Brazilian, where the variability of the regime pluviometer, associated to the discharges evaporation rates, does with that the drought is the main factor limiting for the socioeconomic development of the area. Starting from the continuous monitoring of the components of the system, it was made a global characterization regarding the aquifer in study. Besides, analyses accomplished in field campaigns they allowed to do a simplified characterization of the parameters as well as the estimate of your potentialities. It was also developed a model based on statistical techniques with the objective of explaining the behavior of the aquifer during the observation period. The result of this was quite representative in what refers the observed monthly situation, being this committed, for the little period of observation of data. Finally, MODFLOW was used, to do calibration of the data in the permanent regime, it is verified that the flow lines were shown coherent with the other accomplished observations. As general result, is verified that basically the feeding of the aquifer is processed by recharge direct, originating from the precipitation, and that there is you evidence of the lateral contribution in the area in study, probably for the located dam beside the area in study. Another important verification is that inferior monthly precipitations to 100 mm aren't capable to saturate the soil to favor the feeding of the aquifer. Such results, verified through statistical techniques and of mathematical models, beyond field verifications, appear as common strategies, but that can be capable to evaluate the behavior of alluvial aquifer sufficiently, in way to subsidize actions that allow to obtain more detailed knowledge on such systems.

Key-words: Alluvial aquifer, semiarid, mathematical model

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Estrutura geral da dissertação</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Semi-árido brasileiro. Fonte: IBGE (2007).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3: Etapas do desenvolvimento de um modelo. Fonte: Adaptado de Tucci (2005).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4: Fotos do semi-árido alagoano no município de Santana do Ipanema</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5: Região hidrográfica do Rio Ipanema em Alagoas. Fonte: IICA (2007).....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6: Localização das estações pluviométricas da Bacia do Rio Ipanema.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7: Tipos de aquífero da região da Bacia do Rio Ipanema. Fonte: IICA (2007).</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8: Classificação do uso e ocupação do solo da bacia do Rio Ipanema</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9: Município de Santana do Ipanema no sertão alagoano. Fonte: IICA (2005).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 10: Média histórica pluviométrica de 83 anos para o município de Santana do Ipanema. Fonte: Hidroweb (2008).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 11: Rio Ipanema no Município de Santana do Ipanema no período chuvoso e seco, respectivamente.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 12: (a) Criação de caprinos na região; (b) Afloramentos de rochas; (c) Desmatamento e queimadas e (d) Plantação de milho</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13: (a) Barreiro da região. (b) Poço tubular da região.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 14: Localização da bacia experimental e da instalação do aparato experimental</i>	<i>39</i>
<i>Figura 15: Pluviógrafo da microbacia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16: Estação meteorológica da bacia experimental</i>	<i>40</i>
<i>Figura 17: Calha Parshall e linígrafo da sub-bacia</i>	<i>41</i>
<i>Figura 18: Piezômetros da sub-bacia</i>	<i>41</i>
<i>Figura 19: Açude monitorado na região em estudo</i>	<i>42</i>
<i>Figura 20: (a) Fossa de sedimentos e (b) Amostrador de sedimentos de nível ascendente</i>	<i>42</i>
<i>Figura 21: (a) Primeira, (b) Segunda e (c) Terceira linha de piezômetros</i>	<i>44</i>
<i>Figura 22: Levantamento topográfico da área em estudo.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 23: Visualização espacial dos 15 piezômetros na bacia</i>	<i>46</i>
<i>Figura 24: Área de instalação dos piezômetros, antes da limpeza para a escavação.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 25: Furos, realizados nos tubos, para a execução dos piezômetros.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 26: (a) Revestimento com geotêxtil e (b) Cravação dos tubos dos piezômetros.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 27: Proteção dos piezômetros</i>	<i>48</i>
<i>Figura 28: (a) Sensor de nível confeccionado para (b) Medição nos piezômetros</i>	<i>49</i>

<i>Figura 29: Desenho esquemático do slug test, com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev(1951). Adaptado de Oliva et al (2005).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 30: Histograma de valores da condutividade hidráulica pelo Método de Hvorslev (1951).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 31: Correlação entre as precipitações mensais observadas para o ano de 2007-2008.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 32: Representação do balanço hídrico a partir dos dados da PCD da área.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 33: Meses com deficiência hídrica para a área em estudo.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 34: Análise do comportamento hídrico mensal.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 35: Representação dos níveis piezométricos para a área em estudo.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36: Superfície potenciométrica para o mês de agosto. (Coordenadas em metros).....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 37: Superfície potenciométrica para o mês de setembro. (Coordenadas em metros)</i>	<i>76</i>
<i>Figura 38: Superfície potenciométrica para o mês de outubro. (Coordenadas em metros).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 39 Superfície potenciométrica para o mês de novembro. (Coordenadas em metros)</i>	<i>76</i>
<i>Figura 40: Superfície potenciométrica para o mês de dezembro. (Coordenadas em metros).....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 41: Superfície potenciométrica para o mês de janeiro. (Coordenadas em metros)</i>	<i>77</i>
<i>Figura 42: Superfície potenciométrica para o mês de fevereiro. (Coordenadas em metros)</i>	<i>77</i>
<i>Figura 43: Superfície potenciométrica para o mês de março. (Coordenadas em metros)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 44: Superfície potenciométrica para o mês de abril. (Coordenadas em metros)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 45: Superfície potenciométrica para o mês de maio. (Coordenadas em metros).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 46: Comparação do comportamento dos modelos, com relação ao número de variáveis explicativas.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 47: Comparação do comportamento dos modelos, com relação ao número de variáveis explicativas.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 48: Comparação entre os valores obtidos em campo e os calculados, para os poços rasos.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 49: Comparação entre os valores obtidos em campo e os calculados, para os poços mais profundos</i>	<i>87</i>
<i>Figura 50: Resultado da calibração do modelo, para os piezômetros do grupo A.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 51: Resultado da calibração do modelo, para os piezômetros do grupo B.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 52: Simulação do rebaixamento do aquífero para três períodos distintos: precipitação observada em 25%, 50% e 100% do tempo observada na área em estudo (poços rasos).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 53: Simulação do rebaixamento do aquífero para três períodos distintos: precipitação observada em 25%, 50% e 100% do tempo observada na área em estudo (poços profundos).....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 54: Verificação do rebaixamento médio do aquífero após a simulação.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 55: Etapas da modelagem do fluxo do aquífero.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 56: Resultado gráfico da calibração do modelo.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 57: Linhas de fluxo do aquífero</i>	<i>96</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Precipitação média (mm) – período: 1935-1983</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 2: Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Ipanema.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 3: Valores representativos da porosidade efetiva de alguns materiais geológicos.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 4: Classificação dos perfis piezométricos da primeira linha</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 5: Classificação dos perfis piezométricos da segunda linha</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 6: Classificação dos perfis piezométricos da terceira linha.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 7: Classificação dos perfis piezométricos da quarta linha</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 8: Classificação dos perfis piezométricos da quinta linha.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 9: Valores da condutividade hidráulica calculada para cada piezômetro</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 10: Classes de variação da condutividade hidráulica</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 11: Valores da porosidade efetiva para cada piezômetro.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 12: Resumo das principais características geométricas da área em estudo</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 13: Características da PCD de Santana do Ipanema.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 14: Precipitação mensal observada para o ano de 2007-2008.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 15: Dados hidroclimatológicos observados para a PCD no ano de 2007-2008</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 16: Balanço hídrico para a área em estudo.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 17: Matriz de correlação dos piezômetros.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 18: Grupo A , análise da hipótese de regressão dos dados.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 19: Grupo B, análise da hipótese de regressão dos dados.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 20: Valores comparativos do comportamento do modelo ajustado com relação ao acréscimo de variáveis.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 21: Valores comparativos do comportamento do modelo ajustado com relação ao acréscimo de variáveis.....</i>	<i>85</i>

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>Equação 1: Equação da regressão linear simples.....</i>	<i>16</i>
<i>Equação 2: Equação de regressão linear múltipla.....</i>	<i>17</i>
<i>Equação 3: Sistema de equações da regressão linear múltipla</i>	<i>17</i>
<i>Equação 4: Notação matricial da regressão linear múltipla</i>	<i>17</i>
<i>Equação 5: Equação do F total</i>	<i>18</i>
<i>Equação 6: Hipótese de aceitação da regressão linear múltipla, através do teste do F total</i>	<i>18</i>
<i>Equação 7: Hipótese de rejeição da regressão linear múltipla, através do teste do F total.....</i>	<i>18</i>
<i>Equação 8: Equação de t student</i>	<i>18</i>
<i>Equação 9: Coeficiente de determinação</i>	<i>19</i>
<i>Equação 10: Equação do fluxo subterrâneo</i>	<i>21</i>
<i>Equação 11: Equação da continuidade para o balanço de fluxo em uma célula</i>	<i>22</i>
<i>Equação 12: Equação da porosidade</i>	<i>23</i>
<i>Equação 13: Equação da condutividade.....</i>	<i>23</i>
<i>Equação 14: Equação da transmissividade</i>	<i>24</i>
<i>Equação 15: Equação do coeficiente de armazenamento.....</i>	<i>24</i>
<i>Equação 16: Equação de determinação de K, através do “slug test”</i>	<i>50</i>
<i>Equação 17: Equação de determinação da porosidade efetiva</i>	<i>51</i>
<i>Equação 18: Equação de determinação da CAD, através das características físico-hídrica.....</i>	<i>54</i>
<i>Equação 19: Equação de determinação da CAD, através das características gerais do solo</i>	<i>54</i>
<i>Equação 20: Equação de determinação da CAD, através das características gerais da cultura.....</i>	<i>54</i>
<i>Equação 21: Equação ajustada para os poços mais rasos</i>	<i>83</i>
<i>Equação 22: Equação ajustada para os poços mais profundos.....</i>	<i>85</i>

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

BEER – Bacias Experimentais e Representativas

BHC – Balanço Hídrico Climatológico

CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais

DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuária

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IICA – Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

OMS – Organização Mundial de Saúde

PCD – Plataforma de Coleta de Dados

REHISA – Rede de Hidrologia do Semi-Árido

SUDENE – Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste

WMO – World Meteorological Organization

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE EQUAÇÕES	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES	x
CAPÍTULO 1	1
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - APRESENTAÇÃO	1
1.2 - JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 - OBJETIVOS	3
1.3.1 - <i>Objetivo Geral</i>	4
1.3.2 - <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.4 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
CAPÍTULO 2	6
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 - O SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO E O FENÔMENO DAS SECAS	6
2.2 - AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CONTEXTO DO SEMI-ÁRIDO NORDESTINO	9
2.3 - INTERAÇÃO DOS PROCESSOS HÍDRICOS COM OS NÍVEIS D'ÁGUA EM AQUÍFEROS ALUVIAIS.....	10
2.4 - UTILIZAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS COMO FORMA DE AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS PROCESSOS HÍDRICOS.....	11
CAPÍTULO 3	14
3 - MODELAGEM MATEMÁTICA	14
3.1 - OS MODELOS MATEMÁTICOS	14
3.2 - A MODELAGEM ATRAVÉS DAS TÉCNICAS ESTATÍSTICAS	16
3.2.1 - <i>Testes a serem realizados para aceitação do modelo proposto</i>	17
3.2.2 - <i>Hipóteses para a validação do modelo</i>	19
3.3 - A MODELAGEM ATRAVÉS DO VISUAL MODFLOW	20
3.3.1 - <i>Propriedades físicas de caracterização do aquífero</i>	22
3.3.2 - <i>Condições de contorno para resolução do problema</i>	25
CAPÍTULO 4	26
4 - ÁREA EM ESTUDO, MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 - O SEMI-ÁRIDO ALAGOANO	26
4.1.1 - <i>A Bacia do Rio Ipanema</i>	27
4.1.2 - <i>A pluviometria da bacia do Rio Ipanema</i>	29
4.1.3 - <i>Hidrogeologia da bacia do Rio Ipanema</i>	30
4.1.4 - <i>Uso e Ocupação do Solo</i>	32
4.2 - MUNICÍPIO DE SANTANA DO IPANEMA NO CONTEXTO DO SEMI-ÁRIDO	33
4.3 - A BACIA EXPERIMENTAL DO RIACHO GRAVATÁ	38
4.4 - IMPLANTAÇÃO DA BATERIA DE PIEZÔMETROS NA ÁREA EM ESTUDO.....	43
4.4.1 - <i>Posicionamento da bateria de piezômetros</i>	43

4.4.2 - Perfuração dos poços.....	46
4.4.3 - Colocação dos tubos de PVC nos piezômetros	47
4.4.4 - Medição do nível estático nos piezômetros	48
4.5 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DO AQUIFERO.....	49
4.6 - MODELAGEM ESTATÍSTICA DO AQUIFERO ALUVIAL.....	51
4.6.1 - A escolha das variáveis explicativas.....	52
4.6.2 - Ajuste de um modelo para analisar o comportamento do nível de água no aquífero	52
4.6.3 - Obtenção das variáveis explicativas do sistema em estudo	53
4.7 - SIMULAÇÃO E MODELAGEM ATRAVÉS DO MODFLOW	55
CAPÍTULO 5.....	57
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
5.1 - CARACTERIZAÇÃO GERAL DO AQUIFERO.....	57
5.1.1 - Granulometria do solo	57
5.1.2 - Condutividade hidráulica	60
5.1.3 - Porosidade efetiva	63
5.1.4 - Estimativa das reservas de água no aquífero em estudo	63
5.2 - ANÁLISE DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS	64
5.3 - BALANÇO HÍDRICO NO SISTEMA EM ESTUDO.....	67
5.4 - MONITORAMENTO DO NÍVEL DO AQUIFERO	71
5.5 - SIMILARIDADE NO COMPORTAMENTO DOS POÇOS.....	73
5.6 - POTENCIOMETRIA RESULTANTE DO MONITORAMENTO DO SISTEMA	74
5.7 - ELABORAÇÃO DE UMA FUNÇÃO EXPLICATIVA DO NÍVEL DE ÁGUA E OUTROS FATORES CLIMATOLÓGICOS.....	79
5.7.1 - A escolha dos possíveis fatores intervenientes no sistema	79
5.7.2 - A obtenção da função explicativa do nível de água.....	80
5.7.3 - O modelo obtido através da análise de dados.....	81
5.7.4 - Comparação entre os valores obtidos com o modelo e os valores observados em campo ...	86
5.7.5 - Simulação do comportamento do aquífero para diferentes cenários	89
5.8 - APLICAÇÃO DO MODFLOW PARA A SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO FLUXO NO AQUIFERO.....	92
5.8.1 - Fases da modelagem e definição dos dados para calibração do modelo.....	92
5.8.2 - O resultado da calibração do modelo.....	93
5.8.3 - Análise das linhas de fluxo para o modelo calibrado.....	94
CAPÍTULO 6.....	97
6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	97
CAPÍTULO 7.....	101
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS A: CURVAS GRANULOMÉTRICAS PARA OS PIEZÔMETROS.....	107
ANEXOS B: VARIAÇÕES DOS NÍVEIS PIEZOMÉTRICOS.....	111
ANEXOS C: SÉRIE HISTÓRICA OBSERVADA PARA A ÁREA EM ESTUDO	120

Capítulo 1

1 - Introdução

1.1 - Apresentação

A necessidade do suprimento de água durante todo o ano é uma realidade em todas as partes do mundo. Essa necessidade aumenta em regiões com características específicas, como é o caso do semi-árido, principalmente nas épocas de estiagem, que faz com que esse bem seja ainda mais escasso. Para que haja melhores condições de vida e um maior desenvolvimento sócio-econômico da região são necessários estudos aprofundados sobre os processos hidrológicos. Nesse sentido, torna-se necessária a caracterização destes, tanto em relação ao manancial superficial quanto ao subterrâneo, que se faz a partir da obtenção em campo de uma série de variáveis, hidrológicas, meteorológicas e hidrogeológicas, de modo a auxiliar na sua quantificação e análise de tendências e comportamento através, principalmente, de modelos computacionais e/ou matemáticos.

Na região do semi-árido, em virtude da baixa potencialidade hidrogeológica, devido principalmente à predominância de rochas cristalinas, aliados a algumas características próprias do solo, tais como baixa capacidade de infiltração e armazenamento (Cabral *et al*, 2004), faz com que as águas subterrâneas estejam limitadas a fraturas e fissuras nas rochas, sendo os aquíferos aluviais (aquífero poroso e livre), uma importante forma de reserva de água subterrânea, principalmente nos períodos de estiagens, por suas condições de ocorrências e formação naturais.

A área em estudo está localizada no município de Santana do Ipanema/AL, um dos municípios que compõem a Bacia Leiteira do Estado de Alagoas, no qual as atividades agropecuárias são à base do desenvolvimento sócio-econômico local. No entanto, este município insere-se no semi-árido alagoano, região que sofre continuamente com as conseqüências das severas secas. Devido a essas características

naturais, nas pequenas comunidades rurais, o desenvolvimento da agricultura fica limitado ao período chuvoso, o que muitas vezes provoca o êxodo rural.

De forma a fixar o homem do campo nas suas terras e evitar o êxodo rural, surge a utilização dos aquíferos aluviais, principalmente na forma de barragem subterrânea, como uma maneira de acumulação de água no terreno do próprio agricultor, de forma a auxiliar ao homem do campo a conviver com a realidade local (Cabral *et al*, 2004). Essa técnica além de sua importância no contexto hídrico ainda possui um baixo custo, sendo esta alternativa bastante eficiente e eficaz, para os períodos de estiagens.

Em vista dessa realidade e para o conhecimento da dinâmica do ciclo hidrológico em regiões com tais características, evidencia a necessidade da implantação de bacias experimentais no semi-árido nordestino, visando obter informações que possam contribuir para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Nesse sentido, a Rede de Hidrologia do Semi-Árido (REHISA) foi formada em 2001 e hoje conta com nove instituições desenvolvendo pesquisas em bacias experimentais do semi-árido. Esta dissertação de mestrado se insere no contexto do projeto Bacias Experimentais e Representativas da REHISA (BEER/REHISA/UFAL), cujo objeto de estudos é a bacia do Riacho Gravatá, afluente do Rio Ipanema, no Estado de Alagoas. Os projetos BEER/REHISA contam com financiamento da FINEP através do edital MCT/FINEP/CT-HIDRO – Bacias Representativas – 04/2005.

1.2 - Justificativa

O uso dos aquíferos aluviais no semi-árido representa um importante potencial no que se refere aos recursos hídricos, principalmente para o desenvolvimento da agricultura de pequena escala. Estes propiciam uma melhor adaptação às condições naturais que tais regiões estão submetidas.

Em grande parte da área a recarga fica condicionada apenas à ocorrência de chuvas, as quais são notadamente escassas e concentradas. Além dos baixos índices pluviométricos, a predominância de Planossolos e Solos Litólicos facilitam o escoamento superficial, diminuindo conseqüentemente a quantidade de água infiltrada que iria alimentar esse sistema (ATLAS NORDESTE, 2005).

De acordo com Davis e De Wieste (1966) *apud* Vieira (2002) existem cinco razões básicas que explicam o interesse em explorar a água subterrânea destas formações aquíferas:

- i. São fáceis de escavar ou perfurar, tornando a exploração rápida e barata;
- ii. Frequentemente estas formações se encontram depositadas nos fundos dos vales, onde o nível freático se encontra próximo à superfície do terreno;
- iii. Quase sempre estão em localização que favorecem as recargas provenientes dos rios, riachos ou lagos;
- iv. Os sedimentos apresentam uma porosidade efetiva maior que das outras formações hidrogeológicas.
- v. Quase sempre, os valores das condutividades hidráulicas apresentam-se maiores que nas outras formações hidrogeológicas.

Assim sendo, a justificativa para o desenvolvimento dessa pesquisa, refere-se ao interesse em se conhecer os processos hidrológicos de forma detalhada, em especial neste estudo, o comportamento da piezometria do aquífero aluvial na região, em relação a outros fatores intervenientes do sistema, de forma que se possa compreender melhor a variação de nível potenciométrico durante os períodos de chuva e de estiagem. Este tipo de análise é fundamental no que se refere ao conhecimento dos recursos hídricos do semi-árido, visando estimular o desenvolvimento de ações que melhorem as condições de sobrevivência em regiões com tais características.

1.3 - Objetivos

No contexto do projeto BEER/REHISA/UFAL estão sendo desenvolvidos estudos dos processos hidrossedimentológicos na Bacia Experimental do Riacho Gravatá, em Santana do Ipanema/AL. A partir de 2005, quando o processo de implantação do aparato experimental teve início, buscou-se analisar os processos hidrológicos a partir de características regionais e de dados de campo. Neste contexto, o presente trabalho de mestrado se relaciona com o estudo do comportamento de pequenos aquíferos aluviais da região e sua relação com os demais processos

hidrológicos. Assim sendo, o tema proposto para esse trabalho tem os seguintes objetivos:

1.3.1 - Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o conhecimento do comportamento de pequenos aquíferos aluviais e suas relações com a precipitação e com outros fatores que possam interferir no comportamento desse tipo de sistema. Este estudo restringe-se à análise de um trecho da bacia hidrográfica do riacho Gravatá, afluente da margem direita do rio Ipanema localizado na região semi-árida do Estado de Alagoas.

1.3.2 - Objetivos Específicos

- Determinar os principais parâmetros hidrogeológicos para caracterização das propriedades do aquífero;
- Analisar as relações entre precipitação-recarga-nível piezométrico nos poços de observação;
- Aplicar um modelo matemático para a simulação do comportamento do aquífero na área em estudo.

1.4 - Estrutura da dissertação

A Figura 1 mostra a metodologia adotada para se chegar aos resultados pretendidos. Para tanto, este trabalho se baseou nas seguintes questões:

- i. Quais são as principais características da área em estudo?
- ii. Em se considerando a região em estudo representativa do semi-árido, quais seriam os aquíferos existentes e quais as possibilidades de sua exploração?
- iii. Por que estudar os aquíferos aluviais?
- iv. Como se dá a dinâmica do fluxo em tais aquíferos ao longo do ano?

- v. Como se dá o processo de recarga desse aquífero na área em estudo? Existem contribuições importantes de outras fontes no processo de recarga?

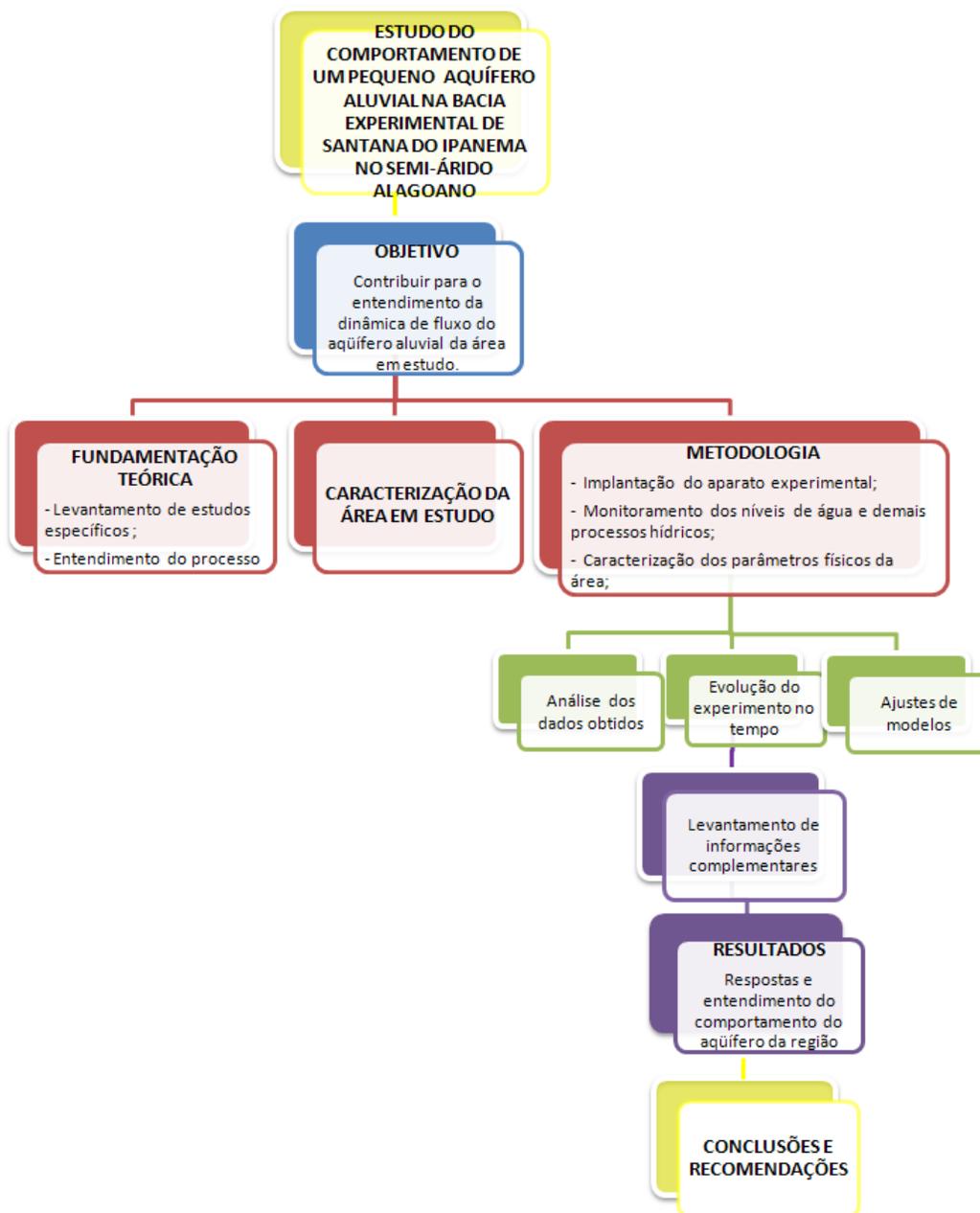


Figura 1: Estrutura geral da dissertação

Capítulo 2

2 - Revisão Bibliográfica

Um dos fatores limitantes para o desenvolvimento de qualquer região e em especial na região Nordeste, chama-se “água”, ela interfere principalmente no fator sócio-econômico. Daí surge a necessidade urgente de ações mais consistentes e contínuas no que se refere a esse recurso de forma que possa aumentar sua oferta, garantir a qualidade e permitir a formação de uma infra-estrutura que ajude o nordestino a conviver, principalmente, com os efeitos das secas, que assolam constantemente a região.

Em decorrência da baixa potencialidade das rochas cristalinas, predominante em grande parte da região semi-árida, as formações aluviais passam a ser extremamente importantes no contexto hídrico local. Por outro lado, estes sistemas são frágeis devido às condições naturais de ocorrência e às ações antrópicas. No entanto, têm a vantagem de serem alimentados principalmente pela infiltração lateral das águas dos rios, pela contribuição de aquíferos adjacentes e a partir da infiltração de águas meteóricas.

Estima-se que a reserva explorável dos aquíferos aluviais do Nordeste é de cerca de 1 a 2 bilhões m³/ano, chegando a atingir uma área de 35.000 km² (Montenegro *et al*, 2002a). Estas reservas são de grande importância no Nordeste brasileiro, principalmente quando consideramos que nesta região se concentra uma alta densidade demográfica, com grande parte da população situada no semi-árido e sobrevivendo da agricultura em pequena escala.

2.1 - O Semi-Árido Brasileiro e o Fenômeno das Secas

O semi-árido brasileiro é uma região caracterizada por uma precipitação média anual é inferior a 800 mm (oitocentos milímetros) e evaporação em torno de 90% do total precipitado (CPRM, 2003). Essa pluviosidade é relativamente baixa e com distribuição espacial e temporal bastante irregular. As temperaturas elevadas (entre 23 e

27°C), fortes taxas de evaporação e elevado número de horas de exposição solar (aproximadamente 3000 horas de sol por ano) fazem com que o balanço hídrico seja negativo durante boa parte do ano (Bezerra, 2002).

Em 2005, o Ministério da Integração Nacional foi levado a rever a delimitação da região semi-árida brasileira devido à identificação de novas áreas com características semelhantes, o qual levou a adoção uma nova delimitação. Desta forma, o semi-árido brasileiro teve sua área aumentada de 892.309,4 km² para 969.589,4 km² englobando os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e parte de Minas Gerais, sendo um acréscimo de 8,66%, na área atual.

De acordo com essa nova delimitação Minas Gerais foi o Estado que mais teve inclusões de municípios, passando de quarenta para oitenta e cinco. Segundo os critérios adotados para a nova delimitação a principal característica dessa região foi a apresentação de reservas de água insuficientes em seus mananciais, resultando assim no conhecido fenômeno das secas (BRASIL, 2005).

A região do semi-árido brasileiro engloba o que chamamos de “Polígono das Secas” ocupando, total ou parcialmente, oito estados nordestinos (todo o Estado do Ceará e parcialmente os estados do Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia), além de ocupar uma área de 121.490,9 km² no norte de Minas Gerais (Figura 2). Algumas das principais características dessa região são a distribuição irregular da precipitação no tempo, as altas taxas de evaporação, os solos rasos, os rios intermitentes e a escassez dos recursos hídricos, conseqüentemente sujeita a repetidas secas (SUDENE, 2005).

Antes mesmo da ocupação da região já havia ocorrência de secas no nordeste brasileiro, a milhares de anos. As causas das secas têm proporção planetária e são influenciadas por diversos fatores, dentre os quais vale destacar: diferença de temperatura superficial das águas do Atlântico Norte, que são mais quentes, e do Sul, frias; deslocamento da Zona de convergência intertropical para o Hemisfério Norte, em épocas previstas para permanência no Sul; e o aparecimento do fenômeno conhecido como El Niño, caracterizado pelo aumento da temperatura no Oceano Pacífico Equatorial Leste. Do ponto de vista local, a topografia acidentada do Nordeste e alta

refletividade da crosta são os principais fatores locais inibidores da produção de chuvas (Silva, 2004).



Figura 2: Semi-árido brasileiro. Fonte: IBGE (2007)

Do ponto de vista hidrológico, a seca se caracteriza pela escassez de água das chuvas e ausência das águas de superfície e de sub-superfície. É agravada pela sua ocorrência por longos períodos de baixa pluviosidade, como é o caso do Semi-Árido, e pela alta densidade populacional, provocando impactos econômicos sociais e ambientais com efeitos desastrosos para o homem (Ribeiro, 2007).

A maior seca da história do Nordeste matou mais de 500 mil pessoas de fome e de sede entre o período de 1877 e 1879. De acordo com Ribeiro (2007), alguns estudos sobre as secas na região mostraram que as mesmas ocorrem de acordo com uma certa ciclicidade, e com a probabilidade de ocorrência a cada 26 anos. Nesta lógica, com a ocorrência de secas severas em 1979/83, deverá ocorrer nos períodos 2005/2011, 2031/2037. Ainda segundo Ribeiro (2007), a cada 13 anos ocorrem também secas mais curtas, embora de grande intensidade.

2.2 - As Águas Subterrâneas no contexto do Semi-Árido Nordestino

A região do semi-árido é formada por um sistema de aquíferos cristalinos de baixa potencialidade hidrogeológica. Do ponto de vista de sua qualidade, muitas vezes estas águas são salobras e os teores de sais chegam a ultrapassar os valores permitidos pela Organização Mundial da Saúde.

No que se refere às grandes formações geológicas, no nordeste é predominante duas formas principais: os sedimentares (aluviais) e o cristalino, sendo que os primeiros apresentam-se como os mais produtivos e de melhor qualidade em termos de água subterrânea (IICA, 2007). As rochas cristalinas nesta região alcançam um melhor grau de fraturamento até 60 metros, possibilitando assim acumulação de água nas suas fraturas. Já as formações sedimentares (aluviões) são geralmente de pouca espessura (2 a 6 metros). Além disso, as formações sedimentares têm alta capacidade de infiltração, baixo escoamento superficial e boa drenagem natural, o que possibilita a existência de bons suprimentos de água no lençol freático.

Devido à sua constituição, o aquífero aluvial é basicamente formado por materiais heterogêneos, variando de pedregulhos e areias grossas a siltes e argilas. Estes

possuem largura e espessura muito variáveis, em função de vários fatores de constituição (Carvalho, 2004).

A importância das aluviões dentro do semi-árido para o suprimento de água das populações é indiscutível, principalmente pelas alternativas de uso que estes oferecem, tais como barragens subterrâneas, poços amazonas e/ou cacimbas, de modo a proporcionar que os impactos decorrentes das secas sejam ao menos minimizados. De acordo com Cabral *et al* (2004), as barragens subterrâneas são denominadas como “pequenas grandes obras”, pequenas no que se refere ao custo e a facilidade de execução e grandes pela sua imensa contribuição no que se refere ao cunho social, pela sua grande contribuição com relação aos flagelos provocados nos períodos de estiagens. Já a exploração das águas subterrâneas por meio de poços de pouca profundidade e de grandes diâmetros (cacimbas e poços amazonas), escavados por processos, na maioria das vezes, manuais até o contato com a rocha que originou o manto de intemperismo é outra forma de abastecimento bastante significativa para a região. Esse tipo de uso é muito comum nas pequenas comunidades urbanas ou propriedades rurais (IICA, 2007).

Do ponto de vista das reservas disponíveis, os aquíferos aluviais são considerados uma das mais importantes formações para a região semi-árida no contexto hídrico, devido ao seu suprimento de água. Montenegro e Monteiro (2004) destacaram a importância dos aquíferos aluviais como elementos de regularização hídrica no Nordeste semi-árido.

Em 1995, a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS), através de pesquisas no semi-árido, constatou que o volume de água subterrânea explorável anualmente é de 20 bilhões de metros cúbicos. Entretanto o valor extraído até então era de menos de 1 bilhão, daí a importância em se estudar esse potencial.

2.3 - Interação dos processos hídricos com os níveis d'água em aquíferos aluviais

A precipitação é o processo pelo qual a água chega à superfície terrestre, existindo uma íntima ligação entre esta e os processos superficiais e subterrâneos. Para uma análise mais consistente dessa interação, principalmente precipitação-aquífero,

algumas análises vêm sendo aplicadas, e muitas vezes estas funcionam como um fator de tomada de decisões. Alguns trabalhos que mostram esta interação são apresentados a seguir.

Khazaei *et al* (2003) estudando um modelo para a estimativa da recarga pela interação precipitação-fluxo subterrâneo, na região semi-árida do Sudeste do Irã, mostrou que em termos espaciais os processos de recarga sofrem uma diminuição do total precipitado em torno de 42 a 87%, com relação às áreas de aquíferos aluviais, ou seja, as áreas aluviais são mais favoráveis à recarga proveniente da precipitação.

Lousada e Campos (2006) propuseram um estudo para a avaliação piezométrica nos diversos ambientes intergranulares associada às condições climáticas, verificando relação quanto ao tempo de resposta de cada tipo de solo em função da precipitação, bem como a intensidade e amplitude de oscilações dos níveis freáticos. Para cada tipo de solo obteve uma correlação, para o solo com condutividade hidráulica semelhantes aos solos aluviais, concluiu-se que estes tipos de solos respondem rapidamente à precipitação, tendendo a secar em épocas de recessão de chuvas e ascender rapidamente no período chuvoso do ano para níveis próximos à superfície.

Montenegro *et al* (2002b) aplicou um modelo de simulação computacional para verificar a disponibilidade hídrica em um aquífero aluvial no agreste pernambucano, após a calibração do modelo verificou-se que a contribuição na recarga do aquífero é de cerca de 20% do total precipitado.

O conhecimento dos processos hidrológicos se torna extremamente importante para o entendimento global destes, em função das respostas disponíveis para essa determinada localidade, principalmente quando a região não dispõe de dados hidrológicos suficientes que permitam tirar conclusões significativas.

2.4 - Utilização de modelos matemáticos como forma de avaliação do comportamento dos processos hídricos

Atualmente, os modelos matemáticos são ferramentas de grande auxílio para o processamento das informações e análises para a tomada de decisão em estudos

relacionados ao presente tema, no entanto o que varia significativamente é a quantidade de informação sobre uma determinada variável e as características da região em estudo, o que faz com que haja uma limitação quanto ao emprego de um ou de outro método.

Lopes *et al* (1999) elaborou um modelo através de técnicas estatísticas, visando estudar o comportamento hidrológico em nove pequenas bacias. Ele utilizou as análises de regressão múltipla, para concluir que a variabilidade do comportamento na bacia, para a região em estudo foi devido às características geomorfológicas e numa menor extensão, devido aos padrões climáticos.

Rennolls (1980) apud Barreto (2006) utilizou um método auto-regressivo linear para relacionar precipitação com o nível da superfície freática, ele concluiu que o modelo utilizado, não considerava fatores fundamentais tais como: precipitação efetiva, evapotranspiração e interceptação o que altera os resultados, afirmando que parâmetros lineares não correspondem à realidade, no aquífero estudado. Como a quantidade de água evaporada varia de região para região e que em regiões, como é o caso do semi-árido, no qual o total evaporado chega a atingir cerca de 90% do total precipitado, esse fator torna-se de extrema importância no entendimento do comportamento do aquífero.

Zacharias (2007) desenvolveu um modelo agrometeorológico, para relacionar os fatores climáticos com uma determinada cultura. Nesse trabalho, a autora também faz uso de técnicas estatísticas e ela concluiu que o modelo que levava em consideração a evapotranspiração, apresentou melhores resultados em relação aos demais analisados.

Menescal e Castro (2004) aplicaram o modelo computacional (MODFLOW) para a simulação do comportamento das águas subterrâneas em aquíferos livres. Nesta pesquisa foram simulados quatro cenários diferentes visando caracterizar o fluxo de água subterrânea em dois períodos distintos (chuvoso e seco), com simulações de fluxo em regime transiente e permanente. Verificou-se coerência entre o sistema simulado e o comportamento real do aquífero, durante a diminuição da precipitação durante o período seco e a solicitação contínua de poços de bombeamento.

Silva (1998), dando continuidade a estudos anteriores, fez a investigação e o modelamento de um aquífero aluvial no semi-árido da Paraíba analisando as variações dos níveis de água e as variações das taxas pluviométricas ao longo da área em estudo

constituída por barragens. Os resultados obtidos através desse modelo reproduziram satisfatoriamente os dados observados no campo e serviu para estimar os principais parâmetros hidrológicos, como também a quantidade de água disponível em cada trecho selecionado.

Monteiro (1997) utilizou um modelo matemático bidimensional para a simulação da evolução do nível freático do aquífero com o tempo, levando-se em consideração os efeitos de recarga e evaporação. Como resultados foi possível concluir que os níveis freáticos dependem sensivelmente da morfologia e profundidade do embasamento cristalino e, ainda, que a principal dificuldade em se calibrar o modelo foi a pequena quantidade de dados para se estudar o aluvião.

Vieira (2002) utilizou um modelo de fluxo subterrâneo para definir alternativas de exploração de um aquífero aluvial em Sumé (PB). Foram simuladas 8 (oito) situações distintas, para o período hidrológico seco e chuvoso. Com o resultado foi possível definir a disponibilidade hídrica do aquífero e indicar formas alternativas de sua exploração.

De um modo geral, as ferramentas computacionais e/ou matemáticas aliadas às informações do balanço hídrico, hidrogeologia e níveis piezométricos permitem obter importantes informações sobre o comportamento do aquífero de uma determinada região, o que por sua vez permite desenvolver e planejar o uso racional das águas subterrâneas, principalmente em regiões tão carentes em estudos como é o caso do semi-árido.

Capítulo 3

3 - Modelagem Matemática

Em virtude da variabilidade da dinâmica dos processos hidrológicos e devido às condições naturais da área em estudo, procurou-se analisar as variações dos níveis de água de um aquífero aluvial, em função de alguns fatores climatológicos, bem como o comportamento global do sistema em estudo, com o objetivo de reproduzir o comportamento do aquífero em termos matemáticos. Assim foram aplicadas duas formas de entendimento deste processo, uma através de técnicas estatísticas e outra utilizando um modelo matemático de simulação de fluxo subterrâneo (MODFLOW), conforme serão apresentados adiante.

3.1 - Os modelos matemáticos

O modelo constitui uma tentativa do entendimento de um processo real, através de equações matemáticas. De acordo com Wendland (2003), um modelo pode ser definido como:

- Reprodução das idéias de algumas ou todas as características físicas de um processo natural em escala adequada;
- Sistema que consegue representar em parte um comportamento de um processo natural;
- Reprodução de um objeto, com o objetivo de um entendimento melhor do processo, em resposta a diferentes estímulos.

De acordo com Tucci (2005), no processo de gerenciamento de recursos hídricos, existem vários tipos de modelos a depender do problema que pretende ser analisado, permitindo assim a escolha da melhor metodologia para tal problema. Assim sendo este mesmo autor classifica os modelos utilizados no gerenciamento como sendo:

- *Modelos de comportamento*: São utilizados para descrever o comportamento de um determinado sistema. Estes sistemas geralmente estão sujeitos a modificações de suas características ao longo do tempo.
- *Modelos de Otimização*: Preocupa-se com as melhores soluções, obtidas para um sistema específico.
- *Modelos de Planejamento*: Simulam as condições globais de um sistema maior. Normalmente, este tipo de modelo engloba não somente soluções hidráulicas, hidrológicas ou econômicas, mas também a social e a ambiental.

Este mesmo autor descreve uma seqüência de etapas para o desenvolvimento de um modelo matemático, apresentada na Figura 3.

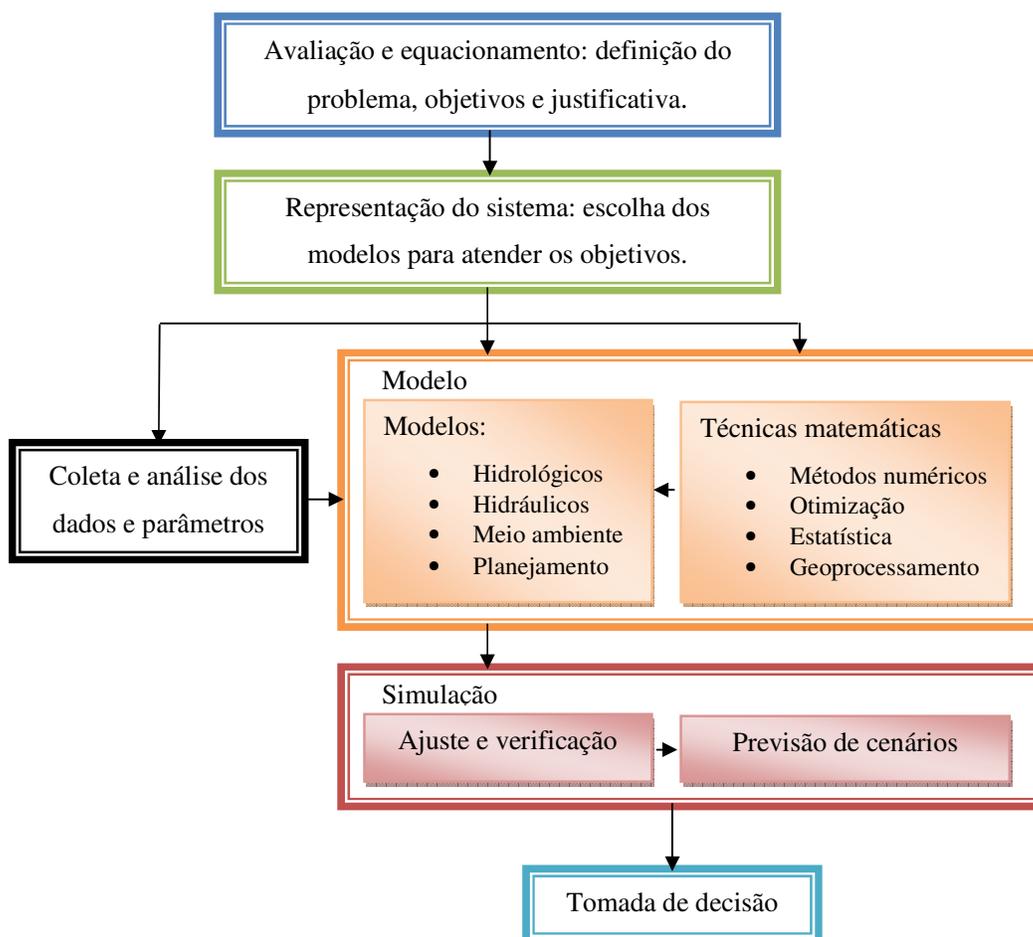


Figura 3: Etapas do desenvolvimento de um modelo. Fonte: Adaptado de Tucci (2005)

Assim sendo, com o objetivo de descrever o comportamento do aquífero foi feito o uso de algumas técnicas que serão apresentadas a seguir.

3.2 - A modelagem através das técnicas estatísticas

A grande variação dos processos hidrológicos requer o uso de ferramentas que permitam obter respostas significativas para determinada variável em análise. Em função do grande número de fatores envolvidos e da quantidade de dados observados, esse processo torna-se mais complexo, algumas técnicas permitem obter respostas significativas a depender dos fatores envolvidos, uma delas mais utilizada na hidrologia é a análise de correlação e de regressão linear, por ser de uso mais difundido. A análise de regressão é uma técnica estatística cujo escopo é investigar e modelar a relação entre as variáveis (Naghetini e Pinto, 2007).

No processo de análise através da regressão linear, inicialmente deve-se ser verificadas as hipóteses de regressão, ou seja, a linearidade entre as variáveis envolvidas, a independência dos resíduos e se estes dados obedecem a condição de normalidade, a depender do número de variáveis explicativas (variáveis dependentes e independentes) de um determinado conjunto de dados, o ajuste dos dados poderá ser de uma regressão linear simples, ou de uma regressão linear múltipla.

Admitindo-se uma regressão linear simples (Draper e Smith, 1966), a linha teórica de regressão é uma função entre X e Y, que toma a forma apresentada na Equação (1):

$$Y = \alpha + \beta X \tag{1}$$

Onde: Y é a variável dependente,

X é a variável independente,

α e β são os coeficientes do modelo e,

No caso de uma regressão linear múltipla, o comportamento de uma variável dependente Y é em função de duas ou mais variáveis independentes X. De um modo geral o modelo apresenta-se conforme apresentado na Equação (2):

Esse teste é conhecido pelo “teste do F total”, o qual é utilizado para testar a razão entre duas variâncias apresentado na Equação (5). É a relação entre a variância decorrente da regressão linear múltipla e variância dos resíduos, ou seja:

$$F = \frac{QMReg}{QMRes} \quad (5)$$

Onde: QMReg é o quadrado médio da regressão, e
QMRes é o quadrado médio dos resíduos.

A hipótese nula será aceita se satisfizer a Equação (6):

$$F < F(\alpha, p, n - p - 1) \quad (6)$$

Onde: α é o nível de significância,

p e $n-p-1$ são os graus de liberdade da distribuição F de Snedecor, sendo p o número de variáveis independentes.

Numa regressão linear múltipla, é realizada a verificação da contribuição de cada variável no modelo, pelo critério do teste do “teste F de Snedecor”, apresentado na Equação (7), com 1 e $n-p-1$ graus de liberdade. Rejeita-se H_0 se;

$$F > F(\alpha, 1, n - p - 1) \quad (7)$$

Onde: n é o tamanho da amostra, e;

p é o número de variáveis explicativas;

α é o nível de significância.

Outro critério, que também deve ser avaliado numa regressão linear, é a estatística do teste t Student, na qual a hipótese nula H_0 , é rejeitada se satisfizer a Equação (8):

$$|t| > t_{1-\alpha/2, n-2} \quad (8)$$

Onde: $t_{1-\alpha/2, n-2}$ é o valor do t de Student para um nível de significância α (bilateral) e (n-2) graus de liberdade.

De acordo com Naghettini e Pinto (2007) existem outros parâmetros a serem analisados em uma análise de regressão linear, tais como:

- Erro padrão é a variância dos resíduos, mede a dispersão dos resíduos em torno da reta de regressão.

- Intervalo de confiança é o intervalo observado em torno da reta de regressão, na qual o nível de confiança $1 - \alpha$, está contido dentro da região da reta teórica de regressão.

- Coeficiente de determinação (R^2), determina a parcela da variabilidade amostral do modelo. Assim o coeficiente de determinação é dado pela relação entre a soma dos quadrados devido a regressão (SQReg) e a soma total dos quadrados (SQT), conforme apresentado na Equação (9). Esse valor é sempre positivo, e é interpretado como a proporção da variância total da variável dependente Y que é explicada pelo modelo de regressão, variando de 0 a 1.

$$R^2 = \frac{SQReg}{SQT} \quad (9)$$

3.2.2 - Hipóteses para a validação do modelo

As principais hipóteses a serem analisadas neste tipo de modelo são:

i. Linearidade, a hipótese de linearidade define uma relação linear entre os valores observados;

ii. Normalidade, a normalidade consiste em estabelecer que os valores de Y são normalmente distribuídos para cada valor de X;

iii. Homoscedasticidade dos resíduos, esta estabelece que os resíduos ou erros, são realizações de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância constante (Naghettini e Pinto, 2007).

Geralmente os modelos de regressão múltipla requerem a transformação de variáveis de modo a permitir a linearização de uma relação não linear. A transformação

é necessária para alcançar o critério de homoscedasticidade (a dispersão dos resíduos aleatoriamente). As transformações mais utilizadas são a de raiz quadrada e a logarítmica.

Com o objetivo de estabelecer uma relação entre os parâmetros referentes à área em estudo, de modo particular para análise das relações entre o nível d'água no aquífero aluvial e os demais processos hidrológicos, as técnicas estatísticas para a modelagem do aquífero se apresentam como uma ferramenta de análise de dados e tomada de decisão.

3.3 - A modelagem através do Visual MODFLOW

Um dos modelos de simulação mais utilizados atualmente para a modelagem de fluxo subterrâneo é o MODFLOW (A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model, McDonald e Harbaugh, 1988).

O modelo MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988) foi desenvolvido pelo United States Geological Survey (U.S.G.S.) e trata-se de um aplicativo largamente usado pelos profissionais que atuam na modelagem do fluxo de água subterrânea. Simula o fluxo tridimensional em meios porosos por aproximação por diferenças finitas, atribuindo a variável no centro do bloco. O modelo pode considerar simulações em aquíferos confinados, não confinados, ou uma combinação de confinados e não confinados. O modelo simula o fluxo através da solução da equação diferencial parcial em condições estacionárias ou transientes em meio anisotrópico e heterogêneo.

O modelo consiste de um programa principal mais pacotes ou módulos. Os pacotes são grupos de subrotinas independentes que têm a função de tratar especificamente cada condição de contorno (rio, dreno, recarga, etc.), dando, portanto, grande flexibilidade ao aplicativo. Os algoritmos de simulação disponíveis incluem dois tipos de técnicas de iteração, o Strongly Implicit Procedure (SIP) e o método Slice-Successive Overrelaxation (SSOR).

A estrutura modular permite uma base lógica para organizar o código atual com elementos de programas, ou funções similares, necessários para melhorar a capacidade do aplicativo. Além disso, simplifica a entrada de dados para a simulação. Os dados são lidos por uma subrotina dentro dos pacotes permitindo assim que, para problemas

simples, onde são usados apenas poucos pacotes, a entrada de dados torne-se mais simples (Domenico e Schwartz, 1997).

No MODFLOW a equação geral do fluxo subterrâneo é dada conforme apresentada na Equação (10).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (10)$$

Onde: K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} - são valores de condutividade hidráulica nas coordenadas x, y e z ($L T^{-1}$);

h - é a carga potenciométrica (L);

W- representa fontes ou sumidouros de água ($L^3 \cdot T^{-1} \cdot L^{-3}$);

S_s - é o armazenamento específico do material poroso (L^{-1});

t - é o tempo (T).

Esta equação descreve o fluxo de água subterrânea sob condições de não equilíbrio, contanto que os eixos de condutividade hidráulica estejam alinhados com as direções das coordenadas.

A resolução da equação diferencial acima é feita pelo MODFLOW, através do método das diferenças finitas, que é um dos métodos numéricos mais conhecidos. Este método envolve o processo de discretização, que substitui o problema físico contínuo, com um número infinito de incógnitas, por um problema discreto com um número finito de incógnitas. A região estudada é aproximada por uma malha uniformemente espaçada de nós. Em cada nó, cada derivada da expressão matemática do problema é aproximada por uma expressão algébrica com relação aos nós adjacentes.

O desenvolvimento da equação do fluxo de diferenças finitas segue a aplicação da equação da continuidade: a soma de todos os fluxos que entram e saem da célula deve ser igual à taxa de armazenamento dentro da mesma. Assumindo que a densidade da água subterrânea é constante, a equação da continuidade expressando o balanço de fluxo para uma célula é dada pela Equação (11), a seguir:

$$Q_i = S_S \cdot (\Delta h / \Delta t) \cdot \Delta V \quad (11)$$

Onde: Q_i - é a taxa de fluxo dentro da célula (L^3T^{-1});

S_S - foi introduzido como uma notação para indicar o armazenamento na formulação de diferenças finitas; sua definição é equivalente àquela de S_s , i. e., o volume de água que pode ser injetado por unidade de volume do aquífero por unidade de mudança da carga (L^{-1});

ΔV - é o volume da célula (L^3);

$\Delta h / \Delta t$ - é a mudança na carga sobre um intervalo de duração (LT^{-1}).

O modelo utiliza métodos iterativos para obter a solução para o sistema de equações em cada intervalo de tempo. Nesses métodos o cálculo do valor da carga para o fim de um dado intervalo de tempo é iniciado assumindo arbitrariamente um valor estimado para a carga de cada nó no fim daquele período. Como critério de parada do processo iterativo, definido pelo usuário do modelo, analisa-se o erro entre duas iterações sucessivas ou o número máximo de iterações a desenvolver.

Em relação ao gasto de memória computacional e ao tempo de execução, o MODFLOW é altamente eficiente graças a sua estrutura modular. Esta característica viabiliza a inclusão de novos módulos sem causar conflito com as opções preexistentes. O esquema de discretização temporal é implícito, sendo que o tempo de simulação pode ser dividido em períodos de estímulos, nos quais as condições impostas são mantidas constantes (tal como uma determinada taxa de recarga ou de bombeamento). Cada período de estímulo pode ser também subdividido em intervalos menores, de acordo com as necessidades da simulação (Cota, 2000).

3.3.1 - Propriedades físicas de caracterização do aquífero

Para iniciar o processo de modelagem, utilizando o MODFLOW, é necessário a determinação de algumas propriedades que caracterizam o aquífero, sendo as principais: Porosidade, Condutividade Hidráulica e Coeficiente de armazenamento.

i. Porosidade

De acordo com Feitosa e Manoel (1997), a porosidade pode ser definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total, conforme apresentada na Equação (12). A porosidade depende do tamanho dos grãos, quanto mais uniformes forem os tamanhos dos grãos, maior tende a ser a porosidade.

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (12)$$

Onde: η = porosidade total

V_v = volume de vazios

V = volume total

ii. Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica depende das características do meio (porosidade, tamanho e distribuição das partículas, forma e arranjo das partículas) e das propriedades do fluido (viscosidade e massa específica). Esta se refere à facilidade da formação aquífera de exercer a função de condutor hidráulico e pode ser determinada pela Equação (13).

$$K = \frac{\kappa \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (13)$$

Onde: K = condutividade hidráulica (L/T);

k = permeabilidade intrínseca do meio poroso (L²);

ρ e μ = características do fluido, massa específica e viscosidade absoluta, respectivamente (L²/T);

g = aceleração da gravidade (LT²).

iii. Transmissividade

Corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. O conceito de transmissividade é utilizado em estudos bidimensionais. Para aquíferos confinados a transmissividade é dada conforme apresentada na Equação (14):

$$T = K b \quad (14)$$

Onde: T = transmissividade (L²/T)

K = condutividade hidráulica (L/T)

b = espessura do aquífero (L).

Para aquíferos freáticos, a espessura muda com o tempo, de acordo com a recarga ou descarga (Feitosa, 1997) sendo, portanto, de difícil determinação.

iv. Coeficiente de Armazenamento

Este é definido por Caicedo (2000) como sendo a quantidade de água que pode ser drenada naturalmente de um aquífero (ΔV) por unidade de área (A) do mesmo, por unidade de variação na carga hidráulica (Δh). Esta é representada na Equação (15).

$$S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta h} \quad (15)$$

Onde: S = coeficiente de armazenamento (adimensional);

ΔV = variação do volume armazenado ou liberado (L³);

A = área do aquífero (L²);

Δh = variação na carga hidráulica (L³).

Para aquíferos livres, objeto deste estudo, o coeficiente S não depende da compressibilidade da água e do aquífero (aquífero confinado), mas depende da capacidade de drenar água nos poros do sistema em estudo, também chamado de porosidade efetiva.

3.3.2 - Condições de contorno para resolução do problema

Como já mostrado anteriormente, o modelo computacional utilizado faz uso dos métodos de diferenças finitas para a resolução da equação de fluxo subterrâneo. Trata-se de uma equação diferencial parcial cuja solução demanda o estabelecimento das condições de contorno do sistema. De acordo com Feitosa e Manoel (1997) as condições de contornos podem ser:

- Contorno Físico: devido às características físicas da área, que influenciam o escoamento, tais como falhas geológicas, rochas impermeáveis, etc;
- Contorno Hidráulico: é formada devido às condições do escoamento, sendo os mais comuns os divisores de água e as linhas de fluxo, nestes casos o fluxo perpendicular ao contorno é nulo.

Estas condições de contorno, do ponto de vista matemático, são definidas como:

- Condição de Dirichlet - neste caso a carga hidráulica é especificada, ou seja a carga é conhecida, podendo ser identificada através de uma conexão entre aquífero e um lago, por exemplo;
- Condição de Neumann – Nesse caso o fluxo é especificado, podendo este ser nulo (contorno impermeável, numa linha de simetria ou numa linha de corrente) ou não nulo quando através do gradiente hidráulico têm-se condições de avaliar o fluxo. Porém é necessário que, ao longo do contorno do sistema, ao menos uma condição seja diferente do tipo de Neumann, para que o problema não fique indeterminado;
- Condições de Robin ou de Cauchy - também conhecida como condições mistas, na qual o contorno é semipermeável de forma a se obter uma expressão que é linear, da carga hidráulica e do fluxo.

Este passo é por sua vez considerado o passo mais crítico no processo de modelagem, já que condições de contorno mal estabelecidas pode levar a erros na solução do problema (Feitosa, 1997).

Capítulo 4

4 - Área em estudo, Materiais e Métodos

A metodologia adotada foi determinada em função das condições necessárias para a caracterização do comportamento do aquífero aluvial visando, sobretudo, a interação dos processos hidrológicos com o aquífero em estudo. A outra etapa consiste na análise da dinâmica de fluxo do aquífero em estudo ao longo do período monitorado. A fase inicial contou ainda com a implantação do aparato experimental, *in loco*, que possibilitou a caracterização da área em estudo, conforme mostrado a seguir.

4.1 - O semi-árido alagoano

De acordo com o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA-2007), 40% do território alagoano está inserido na área considerada como o "Polígono das Secas". Contudo esse problema não teve uma solução definitiva por parte do poder público, ou até mesmo uma solução que venha a minimizar tais impactos na região. O que agrava mais a situação é que estas áreas estão localizadas em regiões mais elevadas em relação às demais, o que dificulta o abastecimento de água através de outras fontes devido ao alto consumo de energia para o bombeamento. Além do problema causado pela estiagem (Figura 4), a preservação dos mananciais hídricos é complexa, pois além deste, outros problemas comprometem a quantidade e a qualidade das águas, tais como a salinização e o desmatamento, que antes favorecia a preservação do manancial.



Figura 4: Fotos do semi-árido alagoano no município de Santana do Ipanema

4.1.1 - A Bacia do Rio Ipanema

O rio Ipanema é um tributário do rio São Francisco e sua bacia está inserida na porção oeste dos Estados de Alagoas e Pernambuco. Abrange uma área de 6.174,3 km² no Estado de Pernambuco e 1.886,29 km² no Estado de Alagoas. Limita-se ao norte com a bacia do rio Ipojuca, no Estado de Pernambuco; ao sul com o rio São Francisco, na divisa com o Estado de Sergipe; a oeste com as bacias dos rios Capiá, riacho Grande e rio Moxotó e a leste com a bacia do rio Traipú (IICA, 2007).

Na fração alagoana da Bacia, esta ocupa parte dos municípios de Batalha, Belo Monte, Cacimbinhas, Carneiros, Dois Riachos, Jacaré dos Homens, Jaramataia, Major Isidoro, Maravilha, Olho d'Água das Flores, Olivença, Ouro Branco, Poço das Trincheiras, Santana do Ipanema e Traipú (Figura 5). A porção alagoana da bacia tem seus usos principais na pecuária e agricultura de subsistência.

4.1.2 - A pluviometria da bacia do Rio Ipanema

A caracterização pluviométrica da região se baseia nos dados registrados em 21 postos pluviométricos com dados disponíveis (Hidroweb, 2008), sua distribuição espacial na bacia encontra-se representada na Figura 6. A região é caracterizada por baixos índices de precipitação. O trimestre mais chuvoso acontece entre maio e julho, com exceção da parte alta da bacia na sua porção leste, onde se verifica a antecipação do trimestre úmido em dois meses. O número médio de dias chuvosos no ano está em torno de 75 dias (IICA, 2007).

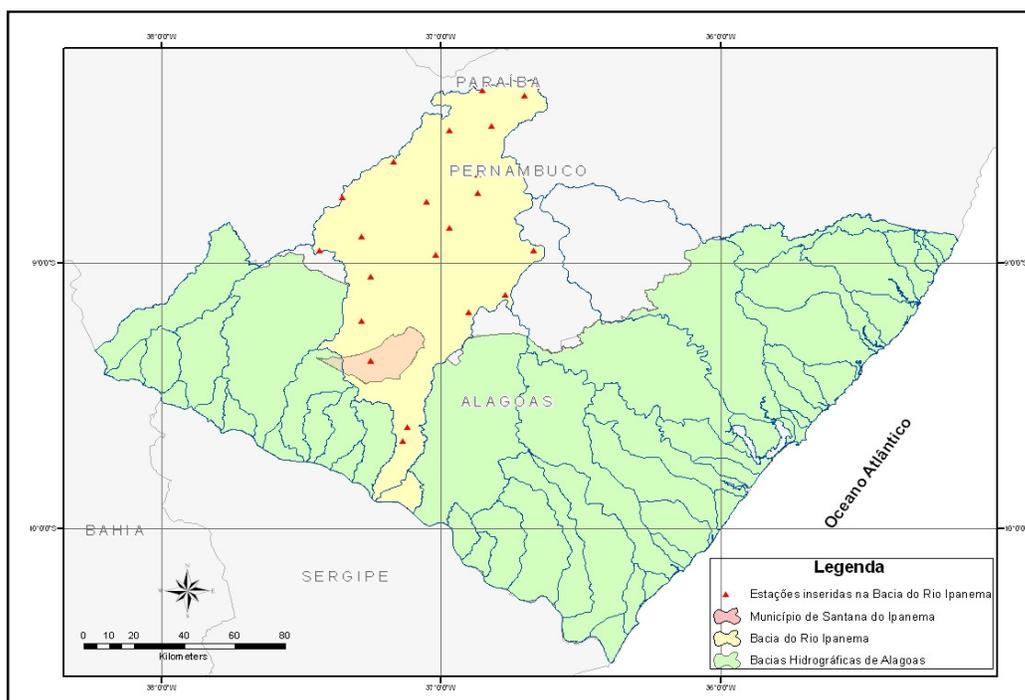


Figura 6: Localização das estações pluviométricas da Bacia do Rio Ipanema

A Tabela 1 apresenta os valores das precipitações médias, em escala mensal, dos postos utilizados na caracterização pluviométrica da Bacia do Rio Ipanema, bem como o total anual médio para cada posto em análise.

Tabela 1: Precipitação média (mm) – período: 1935-1983

Estação	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
S. J. Tigre	32.8	65.7	136.7	91.4	38.2	30.9	21.6	7.5	5.4	5.8	15.4	18.8	470.20
Pesqueira	32.8	64.6	92.4	100.4	94.6	80.9	65.3	33.7	17.5	16.1	22.5	31.6	652.40
Buique	68.2	92.3	138.5	132.9	168.6	155.4	143.8	94.0	40.2	29.4	31.6	46.9	1141.80
Quati	33.7	72.1	81.0	95.4	87.1	85.4	78.0	31.0	20.0	30.9	12.7	27.5	654.80
M. Isidoro	31.8	40.5	62.7	79.4	108.5	101.3	85.7	53.3	26.4	17.7	26.3	34.4	668.00
A. Belas	32.9	48.2	81.9	69.7	97.4	93.7	80.7	47.8	21.5	13.1	22.9	30.9	640.70
Poços da Trincheira	35.5	52.9	73.2	72.7	118.3	115.3	106.5	67.8	28.6	14.4	26.0	33.5	744.70
<i>S. Ipanema</i>	<i>41.2</i>	<i>53.5</i>	<i>71.9</i>	<i>92.4</i>	<i>138.2</i>	<i>140.0</i>	<i>121.8</i>	<i>77.3</i>	<i>28.2</i>	<i>16.7</i>	<i>30.5</i>	<i>41.0</i>	<i>852.70</i>
P. Açúcar	27.2	29.1	62.3	52.8	73.1	72.8	63.1	37.9	20.4	8.9	21.2	28.0	496.80
P. Folha	17.6	14.6	28.8	40.8	54.9	68.3	57.3	37.0	22.4	11.4	12.0	14.9	380.00
MÉDIA	35.4	53.4	82.9	82.8	97.9	94.4	82.4	48.7	23.1	16.4	22.1	30.8	670.21

Fonte: Adaptado de IICA, 2007

4.1.3 - Hidrogeologia da bacia do Rio Ipanema

A área em estudo encontra-se inserida no domínio das rochas cristalinas (aquífero fissural) cujo principal parâmetro utilizado para distinção desses domínios foi o tipo de porosidade relativo a cada formação Figura 7. Este meio é comumente designado por “cristalino” ou ainda maciço rochoso, é caracterizado pela inexistência ou presença muito reduzida de espaços intergranulares na rocha. Assim sendo, as águas subterrâneas encontra-se limitada aos espaços fendilhados e/ou fraturados, daí ser toda a circulação da água subterrânea efetuada através das fraturas e/ou fissuras, resultando na denominação de aquífero fissural ou fraturado (IICA, 2007). Foram então definidos nesta área os Domínios Aquíferos Poroso e Fraturado, com porosidade intergranular e com porosidade secundária fissural respectivamente. O Domínio Poroso é representado pelos depósitos recentes (aluviões) e o Domínio Fraturado é denominado de Aquífero Fissural e/ou cristalino.

A alimentação destes aquíferos processa-se por infiltração direta das águas de chuva ou por processos indiretos por meio dos leitos dos cursos de água. Neste caso, há uma maior possibilidade de recarga e, conseqüentemente, um maior armazenamento. Está comprovado que na maioria dos casos há uma íntima conexão entre as fraturas e o manto aluvial, acarretando uma recarga a partir das águas superficiais ou infiltradas nas aluviões (IICA, 2007).

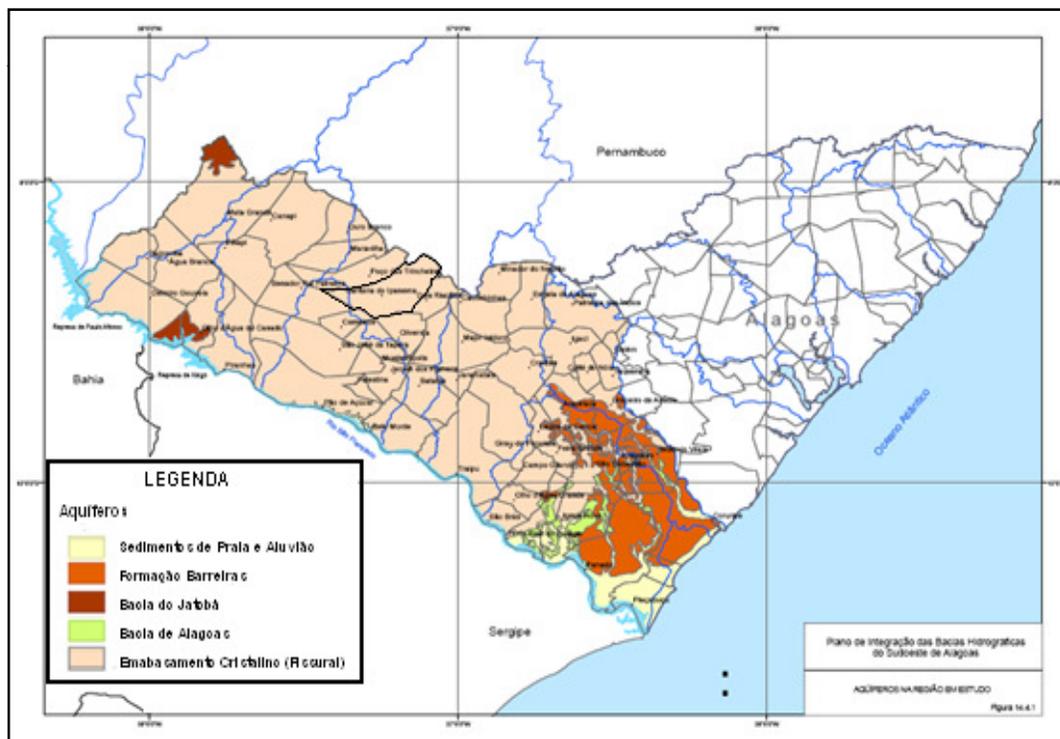


Figura 7: Tipos de aquífero da região da Bacia do Rio Ipanema. Fonte: IICA (2007).

O volume médio anual precipitado em toda área de ocorrência do aquífero é de 10.056,4 m³/ano, uma parcela muito pequena deste volume alcança as reservas subterrâneas, cerca de 1581,20 m³/ano, sendo a evapotranspiração consumidora da maior parte, enquanto o restante contribui para o escoamento superficial.

Já para o caso do aquífero Intersticial formado pelas aluviões que compõem a bacia do Rio Ipanema, este possui uma maior potencialidade com relação ao armazenamento, constituindo-se, assim, em uma importante reserva para os períodos de estiagem. Estima-se que a potencialidade desse aquífero na bacia seja de 163.445.400,00 m³/ano, cobrindo uma área de 1.816,06 km², sendo considerada uma área aluvial com 60% de aproveitamento (IICA, 2007).

4.1.4 - Uso e Ocupação do Solo

De acordo com o IICA (2007), foi possível identificar e mapear 7 classes de uso da terra, nas quais a área agrícola são as maiores observadas na bacia (Figura 8).

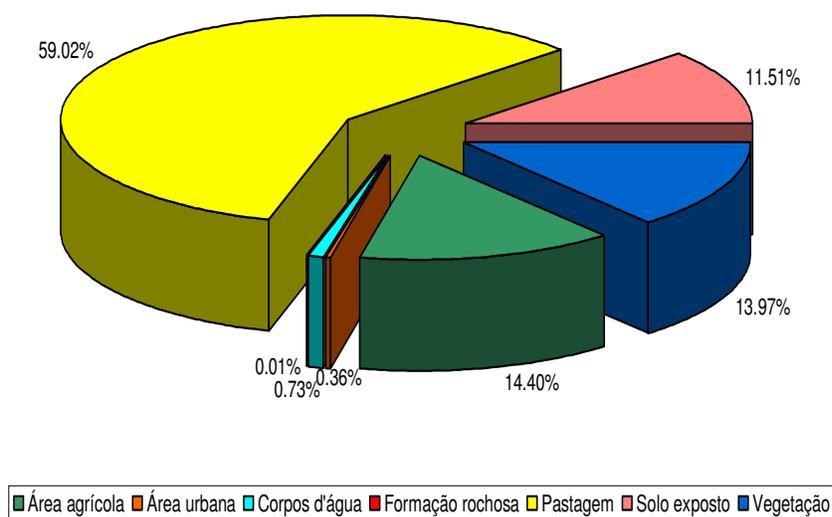


Figura 8: Classificação do uso e ocupação do solo da bacia do Rio Ipanema

O intenso desmatamento a que esta região vem sendo submetida é consequência do predomínio das atividades agropecuárias na região, principalmente as pastagens ocupando espaços onde originalmente existia vegetação nativa. As áreas que de alguma forma sofreram a ação antrópica (pastagem, área agrícola e cana-de-açúcar) correspondem a 80% da bacia.

De acordo com a Tabela 2, a vegetação nativa corresponde a 13,97% da área total, sendo considerado o fator mais importante para a preservação das espécies, por proteger as nascentes e/ou os recursos hídricos, de modo geral.

Tabela 2: Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Ipanema

<i>Classes de usos da terra</i>	<i>Porcentagem (%)</i>	<i>Área (km²)</i>
Área agrícola	14.4	263.01
Área urbana	0.36	6.52
Corpos d'água	0.73	13.37
Formação rochosa	0.01	0.26
Pastagem	59.02	1077.8
Solo exposto	11.51	210.14
Vegetação nativa	13.97	255.19

Fonte: IICA (2007)

4.2 - Município de Santana do Ipanema no contexto do semi-árido

O município de Santana do Ipanema localiza-se no semi-árido alagoano, na microrregião de mesmo nome do município, ocupa uma área de 437,8 km²(Figura 9). Tem uma população de aproximadamente 41 mil habitantes sendo que 58% reside no meio urbano e 42% no meio rural. Limita-se ao norte com o Estado de Pernambuco e com o município de Poço das Trincheiras; ao sul com os municípios de Carneiros, Olivença e Olho D'água; a leste com o município de Dois Riachos; e a oeste, com os municípios de Senador Rui Palmeira e Poço das Trincheiras. A sede do município está distante 207 km da capital Maceió, com as seguintes coordenadas geográficas: 9°22'12" de latitude sul e 37°14'24" de longitude oeste de Greenwich (IICA, 2007).

Seu clima é influenciado pelos sistemas meteorológicos e pelos efeitos orográficos provocados pelo conjunto de maciços e cristas residuais do planalto da Borborema, que também exercem influência no balanço hidrotérmico da região.

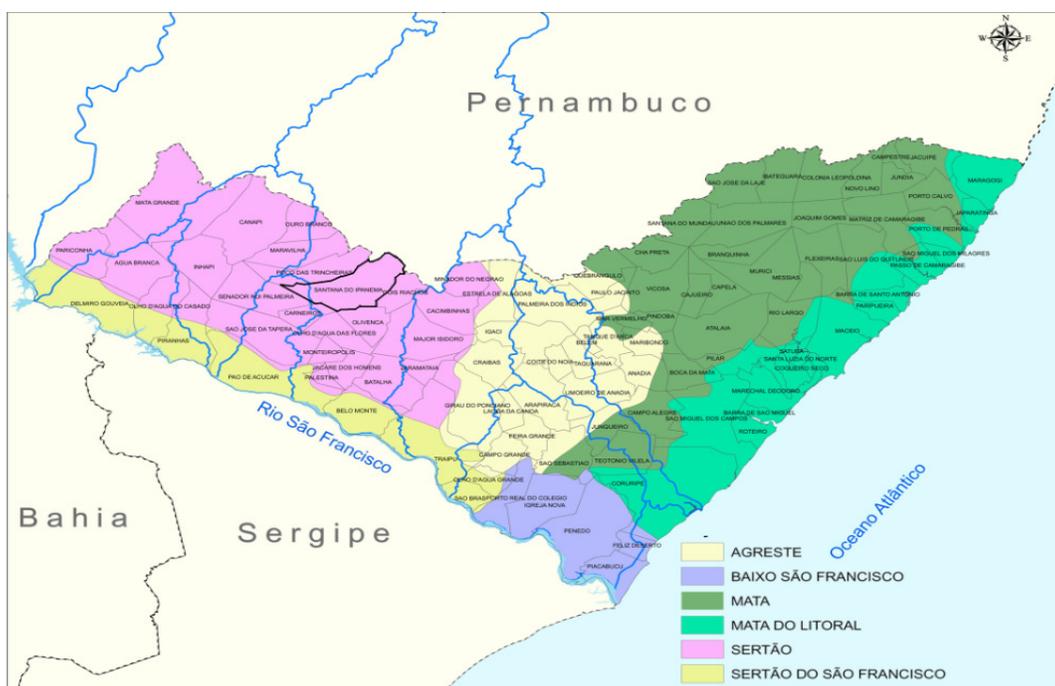


Figura 9: Município de Santana do Ipanema no sertão alagoano. Fonte: IICA (2005)

Do ponto de vista hidrológico os dados pluviométricos do Município mostram um período chuvoso principal com duração de quatro a cinco meses, temperaturas anuais médias de 24°C a 26°C, mínimas entre 18°C e 21°C e máximas entre 27°C e 33°C (Lopes, 2005). As precipitações totais anuais variam de aproximadamente 300 mm nos anos mais secos a 1.800 mm nos anos mais chuvosos, com valores médios em torno de 900 mm. Conforme pode ser observado na Figura 10 os três meses mais chuvosos são maio, junho e julho e os três meses mais secos são outubro, novembro e dezembro.

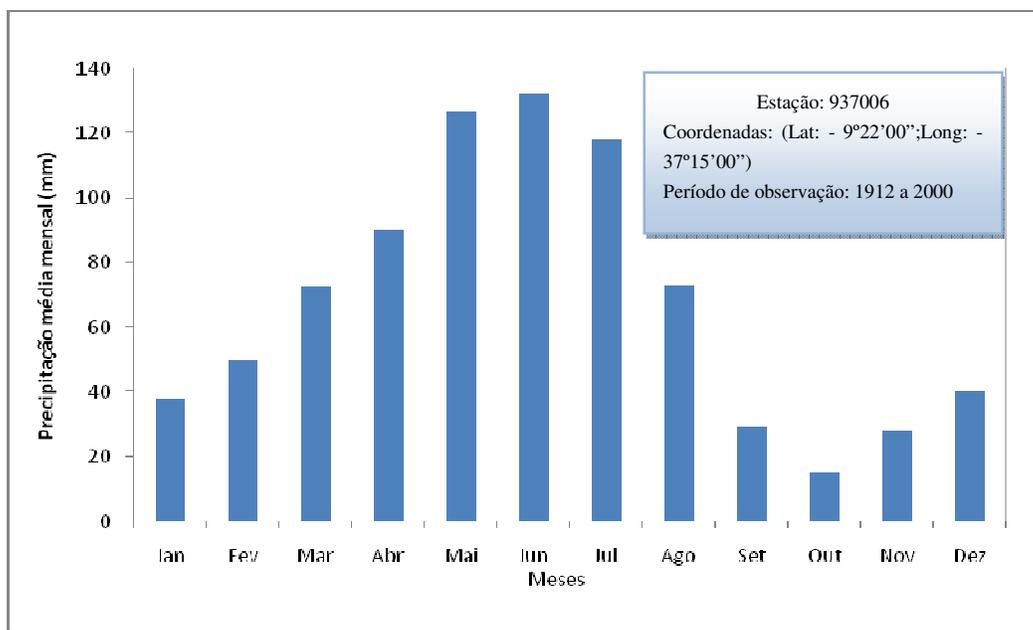


Figura 10: Média histórica pluviométrica de 83 anos para o município de Santana do Ipanema. Fonte: Hidroweb (2008).

A hidrografia do Município é representada principalmente pelo rio Ipanema. Como todos os rios alagoanos da vertente do rio São Francisco, o rio Ipanema é um rio intermitente (Figura 11). Outro rio que também banha o Município é o Dois Riachos, localizado no extremo nordeste da área, apresenta menor importância, uma vez que atravessa somente uma pequena porção do seu território. Também é um rio temporário com fluxo d'água corrente apenas no período chuvoso.



Figura 11: Rio Ipanema no Município de Santana do Ipanema no período chuvoso e seco, respectivamente.

A vegetação do município de Santana do Ipanema é típica das regiões semi-áridas do nordeste brasileiro, basicamente composta de caatingas dos tipos hipoxerófila, várzea e hiperxerófila. Esta vegetação se encontra bastante devastada restando somente alguns remanescentes mais restritos aos ambientes de serras.

A vegetação Caatinga hipoxerófila abrange praticamente todos os tipos de solos do município com exceção dos Neossolos Flúvicos, onde ocorre um tipo particular de vegetação denominada caatinga de várzea (Lopes, 2005).

A ocorrência deste tipo de caatinga é bastante restrita, estando limitada a pequenas áreas nos extremos sudoeste e nordeste do município. Este tipo de vegetação ocorre associado com as seguintes classes de solos: Planossolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos.

O uso e ocupação atual do solo de Santana do Ipanema é composto basicamente pela agropecuária, com a criação de bovinos, ovinos e caprinos constituindo-se a mais importante atividade econômica do município (Figura 12-a). Em função dos usos predominantes (pecuária e agricultura de subsistência), a vegetação é quase que totalmente desmatada e bastante antropizada, com poucas áreas onde há a preservação ambiental, mesmo nas áreas montanhosas e com afloramentos de rochas (Figura 12-b). A queimada é uma prática constante e bastante utilizada na região, o que provoca uma perda da qualidade do solo, desfavorecendo o cultivo (Figura 12-c). Pratica-se também na região, a agricultura familiar de subsistência, sendo feijão, algodão, mandioca, milho e amendoim, as culturas mais comuns principalmente em anos em que as precipitações pluviométricas são favoráveis ao cultivo (Figura 12-d).



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 12: (a) Criação de caprinos na região; (b) Afloramentos de rochas; (c) Desmatamento e queimadas e (d) Plantação de milho

Verifica-se também na região que as barragens e as minações de água (como são chamados os barreiros), servem para a dessedentação de animais, desenvolvimento agrícola e, muitas vezes, até mesmo para o próprio consumo em épocas de secas muito intensas (Figura 13-a). Também, podemos encontrar na área alguns poços artesianos, mas que quase sempre são desativados devido aos altos teores de sais (Figura 13-b).



(a)

(b)

Figura 13: (a) Barreiro da região. (b) Poço tubular da região.

4.3 - A Bacia Experimental do Riacho Gravatá

A presente dissertação é parte do projeto BEER/REHISA/UFAL, que tem como principal objetivo estudar o comportamento dos processos hidrológicos em regiões do semi-árido nordestino. Neste trabalho analisou-se um pequeno aquífero aluvial na bacia do riacho Gravatá, afluente do rio Ipanema. A bacia está localizada no município de Santana do Ipanema e possui uma área de drenagem da ordem de 125 km² (Figura 14).

Para o desenvolvimento do trabalho foram definidas as áreas de interesses de instalação do aparato experimental, cuja função é monitorar os processos hidrossedimentológicos da bacia. Assim foram definidas 3 sub-bacias (sub-bacia 1, sub-bacia 2 e sub-bacia 3) e uma microbacia, conforme pode ser observado na Figura 14.

Na sub-bacia 1 selecionou-se um trecho do leito aluvial do corpo d'água para instalação de uma bateria de piezômetros para estudo do comportamento deste aquífero. Esta sub-bacia 1 possui uma área de drenagem de aproximadamente 2,5 km².

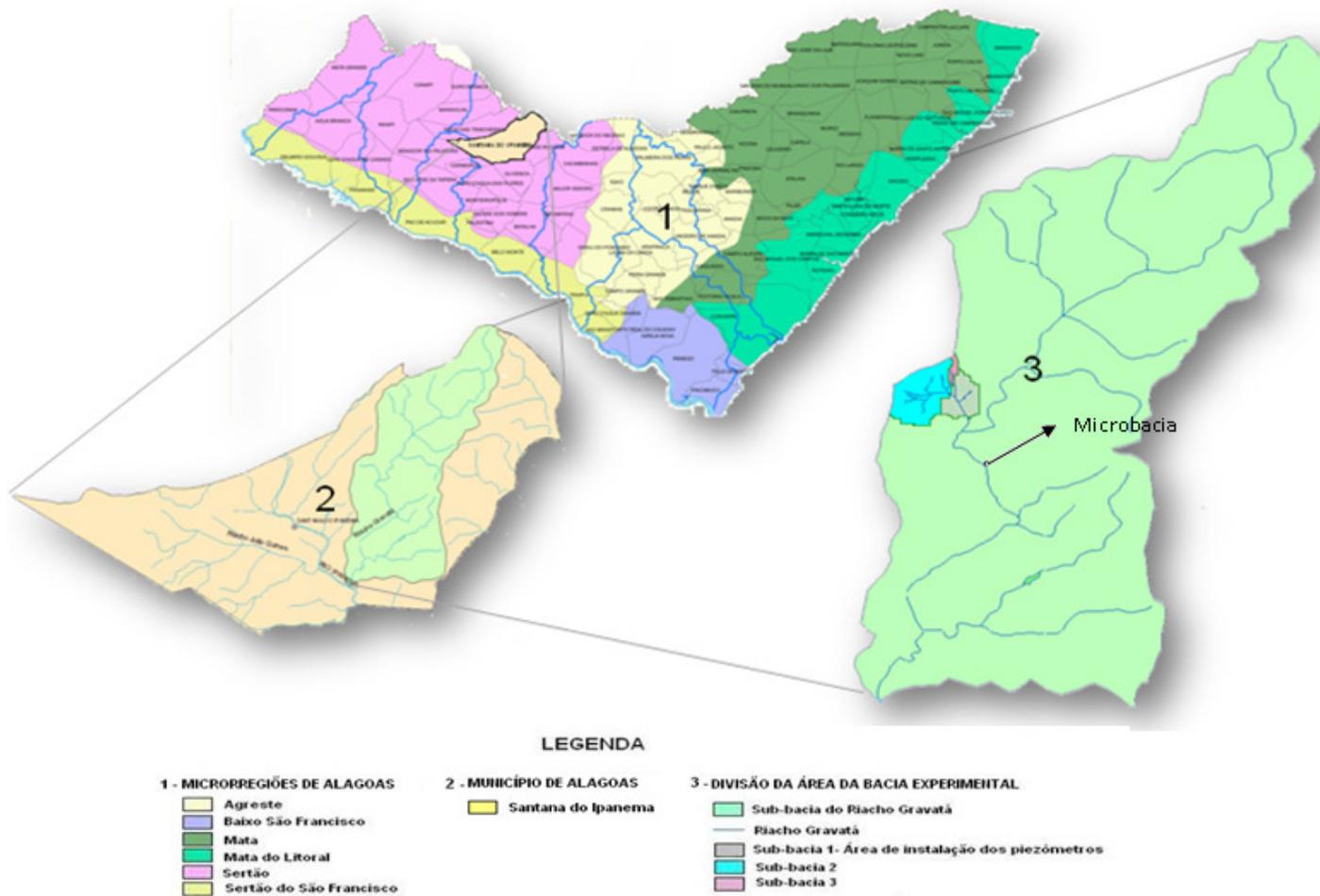


Figura 14: Localização da bacia experimental e da instalação do aparato experimental

Para os dados de precipitação foram instalados 2 pluviógrafos, sendo um na microbacia(Figura 15) e outro na sub-bacia 2. O princípio de funcionamento destes equipamentos é o acionamento de uma balança que faz a captação da quantidade de chuva através de cada basculada. Esses equipamentos são dotados de *dataloggers* para armazenamento dos dados.



Figura 15: Pluviógrafo da microbacia

Na sub-bacia 2 também foi instalada uma Estação Meteorológica (Figura 16) para o registro de variáveis climatológicas: temperatura, umidade do ar, velocidade do vento, entre outros. Ainda há nesta sub-bacia um tanque evaporimétrico confeccionado em material alternativo, que consiste em um tanque circular de aço com 56,9 cm de diâmetro interno e 44,5 cm de profundidade, instalado sobre um estrado de madeira, de acordo com as características apresentadas por Lima *et al* (2005).



Figura 16: Estação meteorológica da bacia experimental

Nesta sub-bacia, também foi instalada uma calha Parshall equipada com um sensor de pressão para as medições de vazão (Figura 17). O dimensionamento da calha foi feito para vazões inferiores a 937 L/s. A coleta de dados na calha é feita através de *dataloggers*, que registram automaticamente os níveis no linígrafo.



Figura 17: Calha Parshall e linígrafo da sub-bacia

Para o monitoramento do aquífero aluvial, foi instalada na sub-bacia 1 uma bateria composta por 15 piezômetros (Figura 18). A área foi escolhida de forma que estivesse concentrada nas proximidades das demais áreas de interesse na bacia e a sua instalação foi feita de forma a se obter uma melhor caracterização da dinâmica de fluxo do aquífero local.



Figura 18: Piezômetros da sub-bacia

Ainda nesta área é muito comum a utilização de pequenos açudes, que são de grande importância no contexto hídrico local devido às secas que assolam a localidade

nos períodos de estiagens. Juntamente com os aquíferos aluviais, muitas vezes, se tornam as únicas alternativas para o homem do campo, no que diz respeito aos recursos hídricos. Na área da sub-bacia 1, especificamente na área de instalação dos piezômetros, foi instalado também um sensor de pressão junto a um açude (Figura 19), objetivando verificar a influência dos demais componentes do ciclo hidrológico, com o nível deste.



Figura 19: Açude monitorado na região em estudo

Para o monitoramento dos parâmetros hidrossedimentológicos a bacia experimental conta com instrumentação em diferentes escalas, tais como: parcelas de 3,0 m² para ensaios de produção de sedimentos, uma fossa de sedimentos na área da microbacia (Figura 20-a), área com aproximadamente 0.5 ha, e amostradores automáticos de nível ascendente na área da sub-bacia 2 (Figura 20-b), que engloba uma área de drenagem de aproximadamente 3 km².



Figura 20: (a) Fossa de sedimentos e (b) Amostrador de sedimentos de nível ascendente

Para a instrumentação da bacia experimental, foram necessárias diversas atividades de campo para caracterização local, tais como: levantamento topográfico da microbacia e da sub-bacia, análises de solos ensaios de infiltração nas áreas de estudo, além de outros trabalhos que estão em continuidade no projeto BEER.

4.4 - Implantação da bateria de piezômetros na área em estudo

Depois de definida a área de interesse para monitoramento do aquífero aluvial, a instalação do aparato experimental consistiu na instalação de poços de monitoramentos (piezômetros) na sub-bacia 1. Foram instalados 15 piezômetros, em 5 linhas transversais ao talvegue com 3 piezômetros cada linha. O espaçamento médio entre linhas foi de aproximadamente 30 m entre piezômetros de uma mesma linha e de 50 m, o espaçamento entre essas linhas. Desta forma, a área de abrangência foi de aproximadamente 13.000 m².

Os piezômetros foram confeccionados em tubos de PVC de 100 mm, perfurados para permitir a entrada da água e envoltos em manta geotêxtil para evitar a entrada de material sólido e o entupimento dos furos.

Estes piezômetros foram então identificados de forma que todos os piezômetros da linha 1, inicia-se com o número 1 e o segundo número refere-se a ordem de execução de cada um deles, na respectiva linha, assim sendo o piezômetro 1.1, significa que ele está inserido na linha 1 e foi o primeiro a ser executado dessa linha. Essa interpretação deve ser adotada para todos os demais piezômetros, de forma que a última linha de piezômetros termina com o piezômetro 5.3, que significa que este pertence a quinta linha e foi o último a ser executado nessa linha.

4.4.1 - Posicionamento da bateria de piezômetros

Os piezômetros da área em estudo foram instalados de forma a se ter uma espacialização das informações do aquífero aluvial. A distribuição foi feita em cinco linhas com três poços em cada uma (Figura 21(a), (b) e (c)). A tentativa inicial seria instalá-los de forma equidistantes mas devido a outros fatores, tais como a presença de rochas aflorantes, procurou-se instalá-los da forma mais uniforme possível.

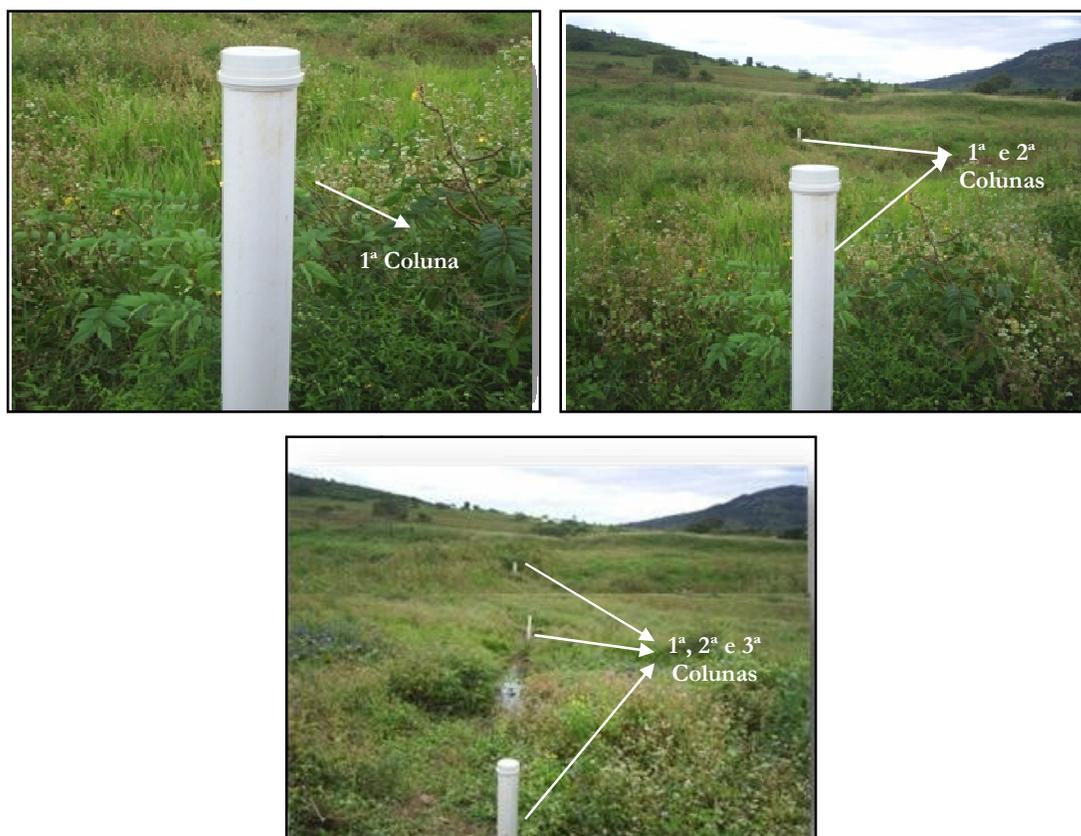


Figura 21: (a) Primeira, (b) Segunda e (c) Terceira linha de piezômetros

A distribuição espacial da bateria de piezômetros foi feita a partir de levantamento topográfico. Os dados obtidos pelo levantamento topográfico da área mostram uma topografia bastante uniforme, com variação de altitudes entre 196,0 m a 202,5 m, com um gradiente de aproximadamente 0,022 m/m. O resultado da topografia com a localização dos piezômetros é apresentado na Figura 22. O sistema de coordenadas utilizado foi definido a partir de um referencial local.

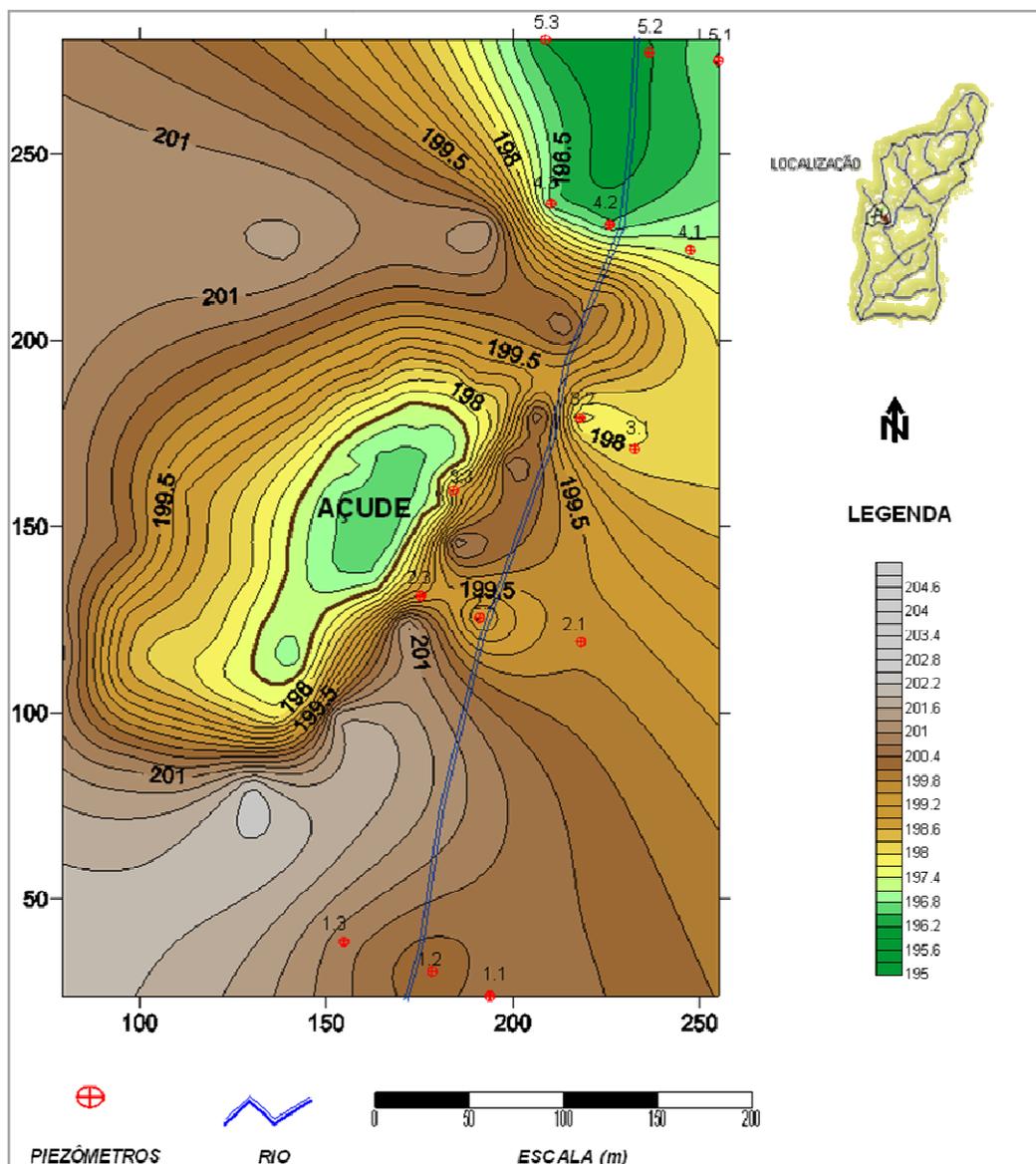


Figura 22: Levantamento topográfico da área em estudo

Para obter uma melhor visualização espacial desses piezômetros é apresentada a superfície da área em estudo bem como a localização dos piezômetros na Figura 23, com as suas respectivas numerações.

Cabe salientar, que para alguns piezômetros tiveram que ser alteradas a sua disposição preliminarmente idealizada, devido a algumas áreas com rochas aflorantes na região, como é o caso do piezômetro 3.3.

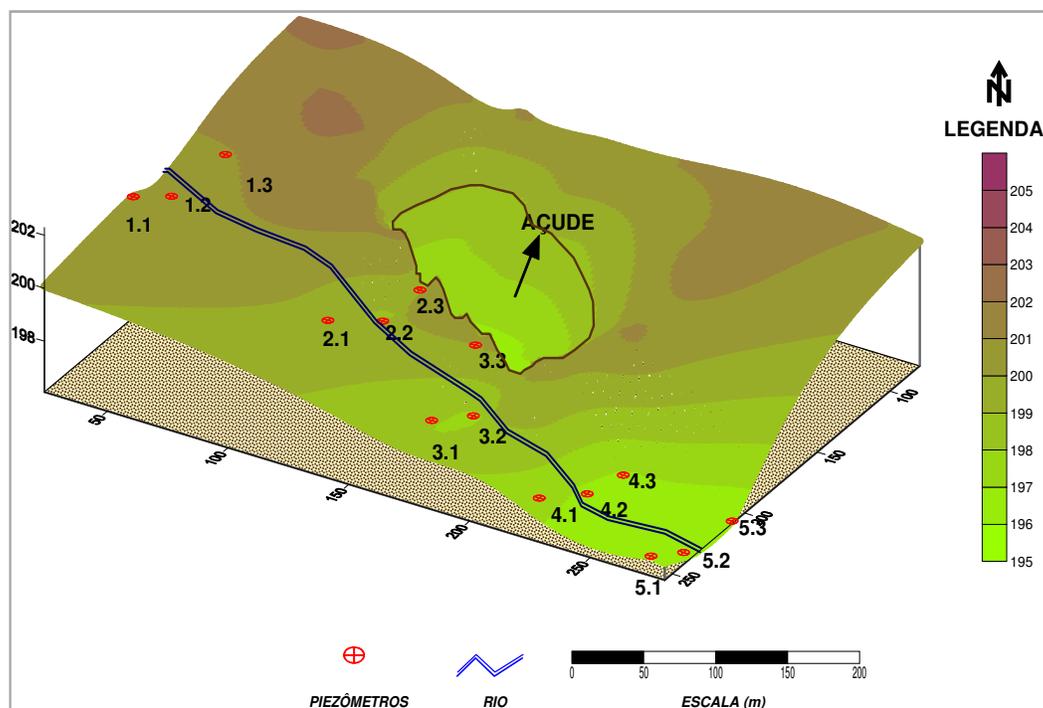


Figura 23: Visualização espacial dos 15 piezômetros na bacia

4.4.2 - Perfuração dos poços

Na etapa inicial de instalação dos piezômetros foi necessário fazer uma limpeza, para a remoção da vegetação do local onde seriam instalados os mesmos (Figura 24), já que o início da implantação do aparato experimental ocorreu no período chuvoso, quando a vegetação fica bastante densa.



Figura 24: Área de instalação dos piezômetros, antes da limpeza para a escavação

Os piezômetros foram perfurados com o auxílio de um trado manual de 4”, até que se atingisse material rochoso que impedisse a continuidade da perfuração. A cada metro perfurado, retirou-se amostra do solo para caracterização em laboratório. As análises foram realizadas no laboratório de solos da Universidade Federal de Alagoas (UFAL) e classificados de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Nesta etapa as maiores dificuldades ficaram por conta da matéria orgânica existente no terreno. No que se refere à execução em todos os piezômetros no primeiro metro perfurado não houve maiores dificuldades.

4.4.3 - Colocação dos tubos de PVC nos piezômetros

A colocação dos tubos de PVC de 100 mm de diâmetro nos poços passou, inicialmente, pela preparação dos tubos a serem instalados. Os tubos foram perfurados com o auxílio de uma furadeira manual, até a altura de 1 metro aproximadamente. Esses furos foram feitos com brocas de 5 mm de diâmetro e de forma equidistantes nas quatro direções como mostrado na Figura 25. Esse procedimento foi realizado para minimizar interferências nas leituras realizadas. Todos os piezômetros instalados foram realizados com tubos de PVC, de 100 mm de diâmetro.



Figura 25: Furos, realizados nos tubos, para a execução dos piezômetros

Para garantir o funcionamento dos piezômetros ao longo do estudo houve o cuidado de revesti-los com uma manta de geotêxtil, até a altura de aproximadamente 1 metro, para impedir a entrada de solo no tubo ou algo que viesse a obstruir o fluxo de

água nos piezômetros. A Figura 26-a e Figura 26-b mostram, respectivamente, a preparação e a cravação dos tubos nos poços.



Figura 26: (a) Revestimento com geotêxtil e (b) Cravação dos tubos dos piezômetros

Por fim, foi feita a proteção individual de cada piezômetro com arame farpado a fim minimizar danos provocados por animais da região. A Figura 27 mostra o poço após a proteção com arame farpado.



Figura 27: Proteção dos piezômetros

4.4.4 - Medição do nível estático nos piezômetros

O monitoramento dos piezômetros, com leitura do nível estático, foi realizado com uma frequência mínima mensal, utilizando o sensor de nível (Figura 28-a) confeccionado especificamente para este fim no Laboratório de Eletricidade da UFAL. O sensor de nível é baseado na corrente elétrica e dispara um ponteiro ao entrar em contato

com a água. Os dados do monitoramento (Figura 28-b) foram fundamentais para as análises da modelagem que serão apresentados adiante.



Figura 28: (a) Sensor de nível confeccionado para (b) Medição nos piezômetros

4.5 - Caracterização geral do aquífero

A caracterização geral do aquífero foi realizada de forma a determinar os parâmetros necessários para as análises posteriores. Esta caracterização foi feita a partir da determinação da granulometria do solo e da condutividade hidráulica.

Para as amostras coletadas durante a perfuração dos piezômetros foram realizados ensaios de análises granulométricas para a caracterização das propriedades do aquífero. As amostras para a caracterização dos piezômetros foram retiradas tão logo iniciado o processo de escavação dos piezômetros. Para as análises das amostras foram utilizados os procedimentos descritos na ABNT, para essa finalidade. A primeira etapa de realização consistiu em deixar a amostra secar ao ar livre para uma posterior desagregação dos grãos. Separou-se 1 kg da amostra para o ensaio, tomou-se cerca de 10% para o peneiramento fino e o restante para o peneiramento grosso. A análise para o peneiramento grosso consiste em quantificar o material retido em uma série de peneiras, de acordo com o que prediz a norma, bem como a série de peneiras indicada para o material fino para a sua devida caracterização de acordo com os métodos disponíveis.

Já para a determinação da condutividade hidráulica, em função das características do aquífero estudado (aquífero aluvial raso), não era viável a utilização de testes de bombeamento. Para a determinação deste parâmetro foi utilizado o método chamado de *slug test*. Este método é utilizado para a determinação da permeabilidade “*in situ*” e

apresenta algumas vantagens com relação ao teste de bombeamento por ser mais rápido e mais econômico, entretanto, os testes de bombeamentos são mais precisos, e estes só são indicados para aquíferos a pequenas profundidades e pequenas áreas.

O *slug test* é um ensaio de permeabilidade que consiste em adicionar água ao poço, até que o nível seja estabilizado. A interpretação do nível da água x tempo do *slug test* pode ser obtida pelos métodos propostos por Hvorslev (1951).

De acordo com o método de Hvorslev (1951), a condutividade pode ser obtida pela Equação (16), com os parâmetros obtidos conforme a Figura 29.

$$K = \frac{r^2 \cdot \ln\left(\frac{L_e}{R}\right)}{2 \cdot L_e \cdot T_o} \quad (16)$$

Onde: K é a condutividade hidráulica em cm/s;

r é o raio do revestimento (cm);

R é o raio do poço (cm);

L_e é o comprimento do filtro (cm);

T_o é o tempo que leva para o nível de água cair a 37% da posição inicial (s).

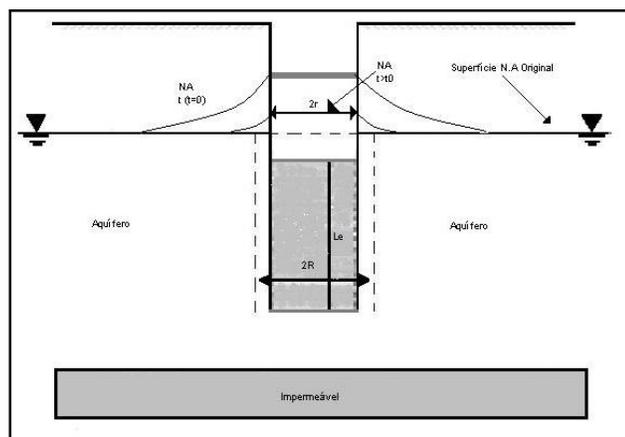


Figura 29: Desenho esquemático do slug test, com os parâmetros geométricos necessários para estimar a condutividade hidráulica pelo método de Hvorslev(1951). Adaptado de Oliva *et al* (2005)

Para a determinação da porosidade efetiva foi utilizada a Equação (17) proposta por Biecinski (Vasconcelos, 2005) a partir dos valores de condutividade hidráulica. Este

parâmetro foi definido por Feitosa e Manoel (1997) como sendo a quantidade de água fornecida por unidade de volume do material.

$$\eta_{ef} = 0,117\sqrt[3]{K} \quad (17)$$

Onde o valor da condutividade hidráulica (K), deve ser expresso em m/dia. Driscoll (1987) *apud* Bahia *et al* (2006) citou alguns valores representativos da porosidade efetiva de acordo com alguns materiais geológicos, conforme apresentado na Tabela 3

Tabela 3: Valores representativos da porosidade efetiva de alguns materiais geológicos

Litologia	Porosidade efetiva (%)
Argila	1-10
Areia	10-30
Cascalho	15-30
Areia e cascalho	15-25
Arenito	5-15
Folhelho/cascalho	0.5-5

Fonte: Adaptado de Bahia (2006)

4.6 - Modelagem estatística do aquífero aluvial

No estudo do comportamento das águas subterrâneas procura-se, em geral, a integração entre os dados hidrológicos e geológicos, porém essa não é uma prática simples, pois envolve diferentes fatores que intervêm na quantidade e na produtividade do aquífero.

Com o objetivo de verificar a interação do nível de água do aquífero em relação aos demais parâmetros climatológicos disponíveis, foram utilizadas as técnicas estatísticas para obter uma possível relação entre as variáveis.

O processo de análise das variáveis consistiu preliminarmente no tratamento dos dados e em seguida o desenvolvimento de modelos empíricos. Para isso foi utilizado o processo de regressão linear múltipla, o qual é avaliado através dos testes de hipóteses, testes estatísticos (t e F), além do erro padrão e dos coeficientes de determinação R² e R ajustados.

A qualidade do modelo pode ser verificada através da determinação do R^2 , parâmetro que determina o quanto a variável dependente em análise é explicada pelas variáveis independentes, também denominadas variáveis explicativas, em outras palavras, este é um coeficiente verificador do grau de precisão do modelo.

4.6.1 - A escolha das variáveis explicativas

A escolha das variáveis explicativas do sistema foi feita de forma a satisfazer duas necessidades existentes: a primeira no que se refere à influência da variável em contribuir para a explicação da variação do nível de água no aquífero e a segunda seria a disponibilidade de informações existentes para se realizar tal análise. Para reforçar a idéia é realizada uma matriz de correlação dos fatores, para assim poder decidir quais são aquelas variáveis que mais contribuem para a explicação do sistema. Assim foi definido que a variável dependente do modelo seria o nível de água no aquífero, como já definido preliminarmente, e as variáveis independentes seriam a precipitação, a evapotranspiração e um fator dependente do mês em análise.

4.6.2 - Ajuste de um modelo para analisar o comportamento do nível de água no aquífero

A precipitação é o principal fator que contribui para o processo de recarga dos aquíferos. A obtenção de uma formulação matemática que permita estimar a resposta do aquífero, ou mais precisamente o comportamento do nível da água no aquífero, a partir do conhecimento da precipitação e de outros fatores diretamente relacionados ao processo é almejada. Para tanto, torna-se necessário identificar as principais variáveis que possam contribuir para a modelagem do sistema. A etapa seguinte diz respeito ao tratamento das variáveis a serem submetidas na análise do modelo. Os dados observados devem satisfazer a três condições básicas, para a aplicação dos modelos de regressão, são estes:

- i. A linearidade dos dados;
- ii. A normalidade dos dados; e
- iii. A homoscedasticidade dos resíduos ou erros.

Assumindo as condições acima, aplica-se também o teste de hipóteses, para a verificação da possibilidade de regressão das variáveis.

O teste de hipóteses consiste em analisar a possibilidade de algum coeficiente (β) da equação de regressão ser nulo (Equação 2). Esta hipótese sendo verdadeira implica que não haverá regressão, ou seja, os dados observados não têm uma explicação para tal comportamento. Caso contrário aplica-se o procedimento de ajuste do modelo, com as variáveis envolvidas. Esse ajuste consiste em achar uma função F, com um intervalo de confiança variando entre 1 e 5%, que, de certa forma, possa representar o sistema em estudo com as variáveis envolvidas.

Após esta análise e constatada a hipótese de regressão das variáveis, aplica-se também os testes de partes para determinação de um modelo baseado na análise de regressão múltipla, devido ao número de variáveis explicativas do modelo. Entre esses testes estão:

- O teste F parcial
- O teste bilateral t (*student*)

4.6.3 - Obtenção das variáveis explicativas do sistema em estudo

Em função da disponibilidade de informações optou-se pela caracterização do sistema através dos dados de precipitação e evaporação devido à influência destes na região. Os dados hidroclimatológicos utilizados foram obtidos através da PCD (Plataforma de Coleta de Dados) monitorada pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) na cidade de Santana do Ipanema/AL. Isto é justificado pelo fato do monitoramento do aquífero aluvial ter sido iniciado antes da instalação da estação climatológica da Bacia Experimental.

Para a caracterização das variáveis hidroclimatológicas foi realizada a estimativa da disponibilidade hídrica, assim como a estimativa da quantidade de água infiltrada e excedente no processo, obtida através do método de Thornthwaite e Mather (1955, *apud* Rolim e Sentelhas, 1998). Neste método, a partir de uma seqüência de períodos, elaborou-se o que foi chamado de balanço hídrico seqüencial, o qual fornece as deficiências e os excedentes ao longo do período em questão. O método baseia-se nos dados de precipitação, temperatura e na capacidade máxima de água disponível no solo.

Para se elaborar o Balanço Hídrico com o procedimento descrito por Thornthwaite e Mather (1955) *apud* Rolim e Sentelhas (1998), além da precipitação e da

temperatura, é necessário a determinação da capacidade máxima de água disponível no solo (CAD). Esta depende da umidade da capacidade de campo (θ_{cc}), da umidade do ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), da massa específica do solo (dg) e da profundidade efetiva do sistema radicular (Z_r), onde se concentram cerca de 80% das raízes.

Há várias maneiras de se determinar a CAD, algumas destas podem definidas nas Equações (18) a (20), conforme citado por Pereira *et al* (2002):

a) A partir das características físico-hídricas do solo

$$CAD = [(CC\% - PMP\%)/100] * dg * Z_r \quad (18)$$

CC% = umidade da capacidade de campo, em %

PMP% = umidade do ponto de murcha, em %

dg = massa específica do solo

Z_r = profundidade específica do sistema radicular, em mm

b) A partir das características gerais do solo

$$CAD = CAD_{m\u00e9dia} * Z_r \quad (19)$$

CAD_{m\u00e9dia} = capacidade de água disponível média, em mm de água/cm de profundidade de solo

Z_r = profundidade específica do sistema radicular, em cm

CAD_{m\u00e9dia} p/ solos argilosos = 2,0 mm/cm

CAD média p/ solos de text. Média = 1,4 mm/cm

CAD_{m\u00e9dia} p/ solos arenosos = 0,6 mm/cm

c) A partir das características gerais da cultura

$$CAD = CAD_{m\u00e9dia} * Z_r \quad (20)$$

CAD_{m\u00e9dia} = 1,3 mm/cm

Z_r = profundidade específica do sistema radicular, em cm

Pereira *et al* (2002) recomendam que independente do tipo de solo, a CAD assumira valores entre 25 e 50 mm, para hortaliças; de 75 a 100 mm para culturas anuais, entre 100 e 125 mm para culturas perenes e entre 150 e 300 mm para espécies florestais. De acordo com os autores, para fins climatológicos, ou seja, para determinação do Balanço Hídrico Climatológico – (BHC) apenas para caracterização da disponibilidade hídrica regional, é muito comum a adoção de valores de CAD variando de 75 a 125 mm.

Portanto para o cálculo do balanço hídrico, foi adotado como valor da CAD de 100 mm, sugerida por Thornthwaite e Mather (1955, *apud* Rolim e Sentelhas, 1998), para a determinação do balanço hídrico em Palmeira dos Índios, município também pertencente ao semi-árido alagoano, e está dentro da faixa recomendável na literatura.

4.7 - Simulação e Modelagem através do MODFLOW

Para avaliar o comportamento do aquífero nesse estudo foi aplicado o modelo de simulação matemática MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), que soluciona a através da resolução numérica das equações diferenciais de fluxo subterrâneo por diferenças finitas. Este modelo permite que a simulação seja em 3-D, além de considerar principalmente as características hidrogeológicas da região.

A primeira etapa da modelagem do aquífero é a definição dos seus limites, para a aplicação das condições de contorno do sistema. Assim esta etapa pode ser analisada através da seguinte seqüência:

- i. Criação da malha representativa da área em estudo

Os limites do aquífero foram definidos de forma a limitar o domínio da área a ser modelada. Essa área é representada por células que irão representar as equações a serem resolvidas durante o processo de modelagem.

- ii. Determinação dos parâmetros hidrogeológicos

Nesta etapa do modelo, é aplicada as características física da área em estudo, tais como: Condutividade hidráulica, porosidade, transmissividade, tipo de aquíferos etc.

iii. Aplicação das condições de contorno

No MODFLOW as células podem ser agrupadas em categorias de carga constante ou inativas. As células de carga constante são aquelas para as quais não há variação ao longo da simulação. As inativas (fluxo zero) são aquelas para as quais dentro ou fora delas não é permitido fluxo, em nenhum período da simulação estas são utilizadas no modelo para a determinação das condições de contorno do problema. As células restantes da malha, cargas variáveis, são caracterizadas por cargas que podem variar ao longo do período de simulação.

iv. A calibração do modelo

O processo de calibração do modelo consiste no ajuste dos valores propostos para os parâmetros físicos do sistema, e os valores desse parâmetro que mais aproximasse o modelo as condições reais. Este processo é iterativo até obter um grau de precisão pré-definido para o ajuste do modelo.

Capítulo 5

5 - Resultados e Discussões

Esse capítulo destina-se a apresentação dos resultados obtidos com o estudo do comportamento de um pequeno aquífero aluvial localizado em um trecho da Bacia Experimental do Riacho Gravatá em Santana do Ipanema/AL. Os resultados obtidos dos modelos de representação do sistema foram bons apesar do curto período de monitoramento (10 meses). As variáveis do balanço hídrico que não foram possíveis de se obter em campo foram obtidas através da literatura e estas se apresentaram dentro de uma faixa possível para a região e para as variáveis envolvidas.

O local de implantação dos piezômetros foi realizado de forma a englobar uma área representativa de uma aluvião dentro de uma sub-bacia pertencente à bacia experimental do Riacho Gravatá em Santana do Ipanema.

5.1 - Caracterização geral do aquífero

5.1.1 - Granulometria do solo

Para cada um dos 15 piezômetros instalados e para cada metro escavado era colhida uma amostra do solo, até atingir o material rochoso. Para caracterização da constituição da superfície foi escolhida uma área do aquífero aluvial de forma que esta tivesse mais centralizada possível da área em estudo e o material levado para análises laboratoriais. Com essas amostras foram realizados ensaios de peneiramento para determinação da sua granulometria, de acordo com o procedimento descrito pela ABNT. Após essa análise, o solo foi classificado segundo o critério de classificação adotado pela Classificação Unificada dos Solos.

Para o material constituinte da superfície tomou-se uma amostra representativa da parte central e obteve-se a seguinte constituição:

12% de silte

10% de areia fina

45% de areia média

29% de areia grossa

4% de pedregulho

Classificação: Areia de média a grossa com pouco finos

A constituição do solo, bem como a sua classificação para os perfis dos piezômetros estão apresentadas nas Tabelas 4 a 8, e as curvas granulométricas de todos os piezômetros estão apresentadas nos Anexos A.

Tabela 4: Classificação dos perfis piezométricos da primeira linha

<i>Piezômetro 1.1</i>	<i>Piezômetro 1.2</i>	<i>Piezômetro 1.3</i>
36% de silte	28 % de silte	28% de argila
15% de areia fina	15% de areia fina	14% de silte
27% de areia média	31% de areia média	15% de areia fina
17% de areia grossa	22% de areia grossa	20% de areia média
5% de pedregulho	4% de pedregulho	18% de areia grossa
		5% de pedregulho
Classificação: Areia siltosa	Classificação: Areia siltosa	Classificação: Argila arenosa

Tabela 5: Classificação dos perfis piezométricos da segunda linha

<i>Piezômetro 2.1</i>	<i>Piezômetro 2.2</i>	<i>Piezômetro 2.3</i>
12% de argila	5% de argila	35% de argila
20% de silte	2% de silte	4% de silte
20% de areia fina	12% de areia fina	7% de areia fina
31% de areia média	40% de areia média	36% de areia média
14% de areia grossa	31% de areia grossa	21% de areia grossa
3% de pedregulho	7% de pedregulho	6% de pedregulho
Classificação: Areia média a fina com finos	Classificação: Areia média a grossa	Classificação: Areia argilosa

Tabela 6: Classificação dos perfis piezométricos da terceira linha

<i>Piezômetro 3.1</i>	<i>Piezômetro 3.2</i>	<i>Piezômetro 3.3</i>
26% de argila	26% de argila	20% de argila
14% de silte	8% de silte	18% de silte
18% de areia fina	18% de areia fina	14% de areia fina
25% de areia média	32% de areia média	16% de areia média
16% de areia grossa	16% de areia grossa	22% de areia grossa
1% de pedregulho	4% de pedregulho	6% de pedregulho
Classificação: Areia argilosa	Classificação: Areia argilosa	Classificação: Areia argilosa

Tabela 7: Classificação dos perfis piezométricos da quarta linha

<i>Piezômetro 4.1</i>	<i>Piezômetro 4.2</i>	<i>Piezômetro 4.3</i>
37% de argila	28% de argila	38% de argila
14% de silte	6% de silte	8% de silte
15% de areia fina	15% de areia fina	12% de areia fina
22% de areia média	15% de areia média	26% de areia média
11% de areia grossa	31% de areia grossa	14% de areia grossa
1% de pedregulho	5% de pedregulho	2% de pedregulho
Classificação: Argila arenosa	Classificação: Areia argilosa	Classificação: Argila arenosa

Tabela 8: Classificação dos perfis piezométricos da quinta linha

<i>Piezômetro 5.1</i>	<i>Piezômetro 5.2</i>	<i>Piezômetro 5.3</i>
25% de argila	18% de argila	39% de argila
16% de silte	13% de silte	8% de silte
15% de areia fina	15% de areia fina	12% de areia fina
20% de areia média	32% de areia média	20% de areia média
19% de areia grossa	16% de areia grossa	14% de areia grossa
2% de pedregulho	4% de pedregulho	3% de pedregulho
Classificação: Argila arenosa	Classificação: Areia média com finos	Classificação: Argila arenosa

De acordo com as análises laboratoriais e utilizando-se o critério do Sistema Unificado, a constituição do aquífero aluvial em estudo mostrou um comportamento bem uniforme com relação a sua constituição e granulometricamente heterogêneo. O material constituinte dos piezômetros é formado basicamente por:

- Superfície: Areia de média a grossa com pouco finos
- Ao longo do perfil dos piezômetros: aproximadamente 66% das análises é compostas por uma mistura de areia e argila; destes 33% classificada como areia argilosa e 33% classificada como argila arenosa; 17% formado por areias mal-graduadas e com alguns finos, o restante é constituído de uma mistura de silte com areia.

Verifica-se que a constituição é típica de áreas aluviais. Na superfície é composta por areia que possibilita recarga mais rapidamente tão logo seja iniciada a precipitação desde que o solo esteja em condições próprias para tal, e na parte intermediária 66%, do total de piezômetros são constituídos de areia argilosa, o que possibilita o armazenamento, sendo a sua distribuição de forma aleatória ao longo de sua extensão.

5.1.2 - Condutividade hidráulica

Apesar da literatura oferecer métodos para a determinação da condutividade hidráulica em função simplesmente da constituição granulométrica da área em estudo, optou-se por sua determinação em campo para uma melhor caracterização desse parâmetro. A estimativa através da análise granulométrica não foi aplicada, pois o método se baseia unicamente no diâmetro dos grãos, os quais se mostraram sem significativas alterações ao longo da área podendo, em função disso, superestimar os valores da condutividade hidráulica. A Tabela 9 apresenta os valores determinados para cada piezômetro em estudo.

Tabela 9: Valores da condutividade hidráulica calculada para cada piezômetro

<i>Piezômetros</i>	<i>T₀(s)</i>	<i>Le</i>	<i>R(cm)</i>	<i>r(cm)</i>	<i>K(cm/s)</i>
1.1	6960	100	6	5	5.05E-05
1.2	9000	100	6	5	3.91E-05
1.3	9060	100	6	5	3.88E-05
2.1	5040	100	6	5	6.98E-05
2.2	1200	100	6	5	2.93E-04
2.3	10680	100	6	5	3.29E-05
3.1	5700	100	6	5	6.17E-05
3.2	4020	100	6	5	8.75E-05
3.3	4560	100	6	5	7.71E-05
4.1	4320	100	6	5	8.14E-05
4.2	4560	100	6	5	7.71E-05
4.3	3420	100	6	5	1.03E-05
5.1	3960	100	6	5	8.88E-05
5.2	3600	100	6	5	9.77E-05
5.3	4320	100	6	5	8.14E-05

A frequência de observação dos valores de condutividade hidráulica para a distribuição de cada linha de piezômetros está apresentada na Figura 30, de acordo com os resultados, obtidos durante o ensaio. Observa-se, no entanto, que a maior variação nos valores calculados está na 2ª linha de piezômetros, que possui uma variação de materiais diferentes em cada piezômetro, inclusive no piezômetro 2.2, que é constituído basicamente por areia média a grossa, justificando assim uma maior condutividade hidráulica para este, o que não é observado nos demais piezômetros que contém uma porcentagem significativa de materiais finos. E de acordo com a classificação proposta por Fetter (1988) *apud* Feitosa e Manoel (1997) mostra que estes se encontram na faixa de valores, descrita por este autor. Sendo indicado valores entre 10^{-6} e 10^{-4} (cm/s), para areias argilosas, 10^{-5} e 10^{-3} (cm/s), para areias siltsosas e areias mal-distribuídas. O que está coerente com as análises granulométricas realizadas.

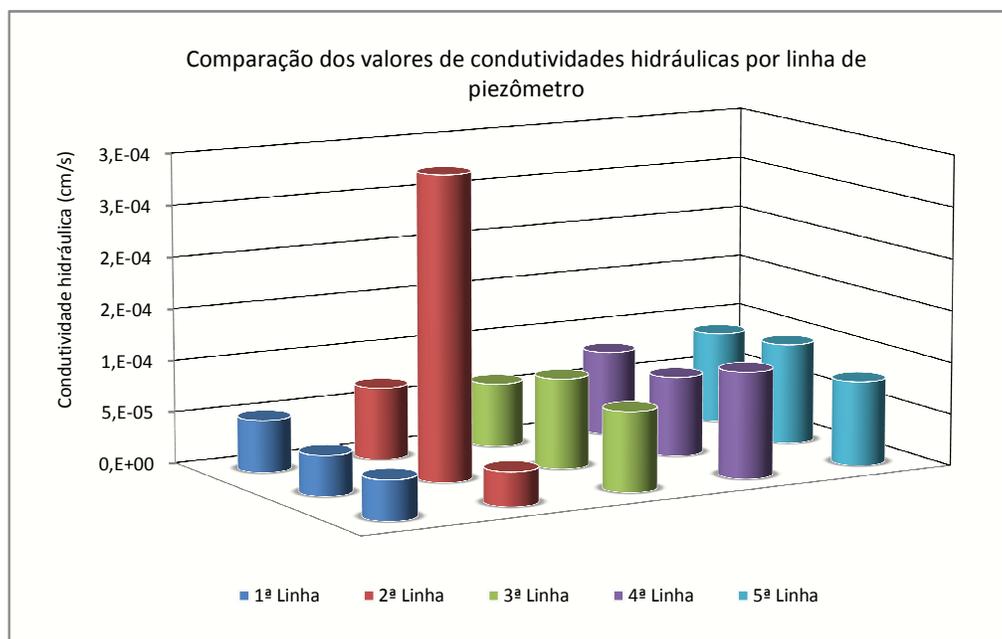


Figura 30: Histograma de valores da condutividade hidráulica pelo Método de Hvorslev (1951)

Para uma melhor caracterização do escoamento, foi considerado a classificação proposta pela *U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering*, (apud Mobus 2007), nesta pré-definidas, sete classes de comportamento hidrogeológico do aquífero, sob o ponto de vista da condutividade hidráulica, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Classes de variação da condutividade hidráulica.

Classes	Sigla	Cond. Hidráulica (cm/h)
Muito Lenta	MLL	< 0.13
Lenta	L	0.13 a 0.51
Moderadamente Lenta	ML	0.51 a 2.00
Moderada	M	2.00 a 6.30
Moderadamente Rápida	MR	6.30 a 12.70
Rápida	R	12.70 a 25.40
Muito rápida	MRR	>25.40

Fonte: U.S. Bureau of Plant Industry and Agricultural Engineering, (apud Mobus 2007)

Assim de acordo com os resultados do *slug test*, os valores encontrados classificam o escoamento predominantemente como um escoamento lento (L), com exceção do piezômetro 2.2, que tem o escoamento classificado como moderadamente lento (ML), o que também é reforçado pelo fato de o material constituinte da maioria dos piezômetros conterem quantidades significativa de argilas.

5.1.3 - Porosidade efetiva

Os valores calculados a partir da Equação 4 estão apresentados na Tabela 11 na qual mostra uma porosidade efetiva baixa, mas, de acordo com Driscoll (1987) *apud* Bahia *et al* (2006), para materiais que contenham argilas (como é a constituição da maioria dos piezômetros) os valores giram em torno de 1-10%, o que está coerente com os valores encontrados, considerando as condições locais.

Tabela 11: Valores da porosidade efetiva para cada piezômetro

<i>Piezômetro</i>	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
η_{ef} (%)	7	7	7	8	10	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8

5.1.4 - Estimativa das reservas de água no aquífero em estudo

Com os resultados obtidos é possível fazer uma aproximação das disponibilidades hídricas em termos de volumes passíveis de serem explorados. Como se trata de um aquífero livre, o parâmetro mais significativo para a determinação da disponibilidade de água, de acordo com Mobus *et al* (2007), é o Coeficiente de Armazenamento Efetivo (S_y) o qual pode ser definido como sendo a soma entre o Coeficiente de Armazenamento (S) e a porosidade efetiva.

De acordo com Feitosa e Manoel (1997) a parcela correspondente ao coeficiente de armazenamento é muito pequena em relação à contribuição da porosidade efetiva e, em função desta constatação, em termos práticos o valor do armazenamento efetivo do aquífero é adotado como sendo constituída apenas pela parcela correspondente a porosidade efetiva.

Para a estimativa da sua disponibilidade foi feito uma separação por linhas de piezômetros de acordo com a sua distribuição na área em estudo. Além disso, considerando-se que esses apresentem um formato genérico de um prisma de base retangular, a área contribuinte para cada coluna de poço foi tomada como o valor equidistante para cada linha de poços. A Tabela 12 apresenta um resumo com as características principais do aquífero.

Tabela 12: Resumo das principais características geométricas da área em estudo

Parâmetros Calculados	Separação dos piezômetros por linhas					
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	Total
Comprimento (m)	50	48	40	40	40	
Largura (m)	100	46	45	50	50	
Espessura média (m)	2.30	2.00	2.80	2.00	2.30	
Área (m ²)	5.000	2.160	1.800	2.000	2.000	12.960
Volume (m ³)	11.500	4.320	5.040	4.000	4.600	30.099

Em se tratando de disponibilidades, os volumes passíveis de serem armazenados e os volumes passíveis de serem extraídos podem ser obtidos considerando a porosidade total e a porosidade efetiva respectivamente, do material constituinte. Para um volume aproximado de 31.000 m³, obtido considerando apenas a área correspondente a instalação dos piezômetros e uma espessura média do aquífero e, de acordo com as características do material constituinte analisadas anteriormente com uma porosidade efetiva média de 8%, obtemos um volume médio passível de ser extraído de 2500 m³, para o caso de saturação total da área.

Segundo Davis 1978 *apud* Mobus 2007, o valor da porosidade total para aluvião varia de 41 a 50%, este volume refere-se ao valor passível de ser armazenado. Assim sendo o volume médio passível de ser armazenado é aproximado de 14.300 m³ para essa mesma área.

5.2 - Análise dos dados climatológicos

Para a análise dos dados climatológicos foram utilizadas as informações da PCD instalada no município de Santana do Ipanema, conforme as características apresentadas na Tabela 13, bem como os dados registrados na estação instalada na Bacia Experimental (com registros a partir de novembro/2007). Nos meses em que foi possível a obtenção dos dados climatológicos da estação da Bacia Experimental, observou-se que há uma boa correlação entre os dados das duas estações.

Tabela 13: Características da PCD de Santana do Ipanema

Nome da PCD	Município	Usuário	Tipo	Código	Latitude	Longitude
Santana Ipanema	Santana Ipanema - AL	CTENERG	Agrometeorológica	31934	-9.37	-37.23

Os resultados para o período de monitoramento são apresentados na Tabela 14. Observa-se que pela distribuição mensal, caracterizam-se duas estações bem distintas: uma chuvosa e uma seca. Na estação chuvosa, os valores precipitados correspondem aos meses de fevereiro a agosto, e a estação seca corresponde aos meses de setembro a janeiro, do período em análise. Para a estação seca verifica-se uma média de 10,15 mm/mês de precipitação. Já para o período chuvoso essa média mensal foi superior a 100 mm. Deve-se levar em consideração que esse período de estudo foi caracterizado por anormalidades com relação aos fenômenos climáticos da região, com valores precipitados muito superiores aos que ocorrem tipicamente.

Tabela 14: Precipitação mensal observada para o ano de 2007-2008

<i>Meses de observação</i>	<i>Pluviógrafo da B.E</i>	<i>Pluviógrafo da PCD</i>
jan/07	S.I	5,00
fev/07	S.I	189,00
mar/07	S.I	180,50
abr/07	S.I	47,75
mai/07	S.I	133,25
jun/07	S.I	95,75
jul/07	74,2	135,00
ago/07	116,3	85,75
set/07	59,2	37,75
out/07	8,9	6,25
nov/07	1,8	1,75
dez/07	4,1	1,75
jan/08	57,4	5,00
fev/08	124,7	134,50
mar/08	263,1	230,00
abr/08	45	52,00
mai/08	206,3	150,25

S.I: sem informação de dado

A Figura 31 apresenta a correlação entre os totais observados mensalmente para o pluviógrafo da PCD (instalada a aproximadamente 10 km da área em estudo) e da Estação Climatológica (instalada dentro da sub-bacia em estudo), bem como o erro padrão correspondente a análise. Observa-se que as estações apresentam uma boa correlação mensal, em torno de 93%, para o período de observação disponível.

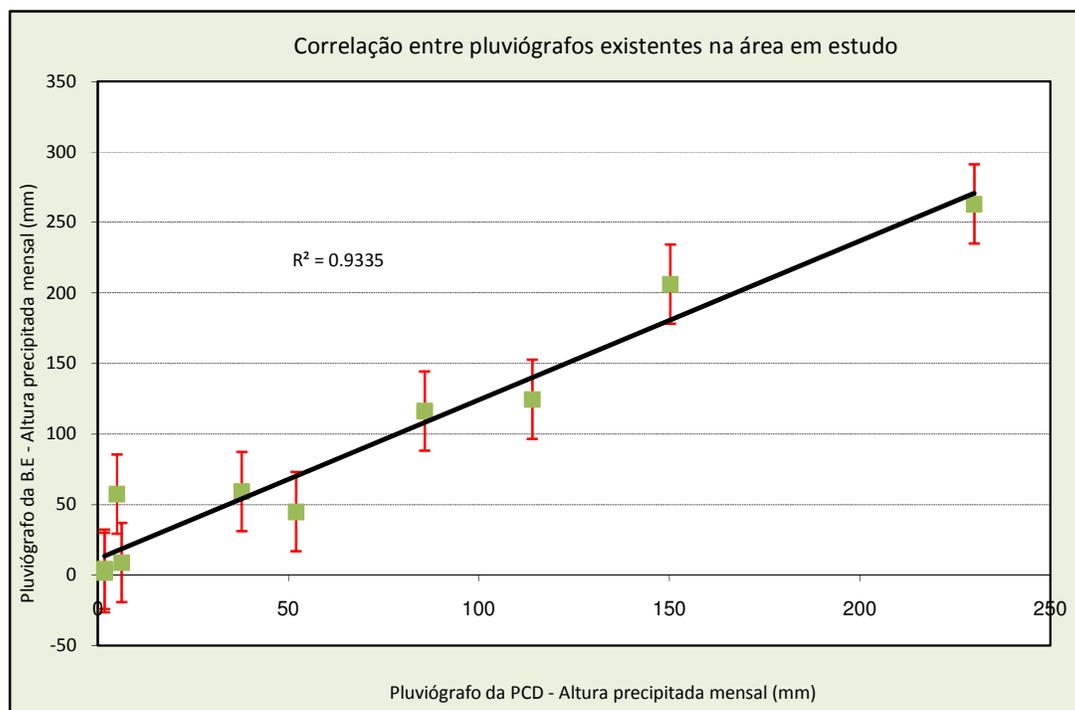


Figura 31: Correlação entre as precipitações mensais observadas para o ano de 2007-2008

De acordo com Lopes *et al* (2005), a precipitação anual média varia de 450 mm para os anos mais secos a 1.500 mm nos anos mais chuvosos. Analisando os dados obtidos, verifica-se que o total precipitado para o ano de 2007, foi de 919.50 mm, sendo assim caracterizado como um ano chuvoso. É importante observar que quase 40% do total precipitado para 2007 concentraram-se entre os meses de fevereiro e março. Já para o período seco deste mesmo ano (meses setembro a janeiro), a porcentagem anual da precipitação observada foi de apenas 5,71%.

Para o início do ano de 2008 verifica-se que comportamento da precipitação é semelhante ao do ano de 2007, para o mesmo período de análise. As variáveis hidroclimatológicas de interesse no estudo foram obtidas através da PCD, instalada nesse município e apresentada na Tabela 15. Verifica-se que a precipitação é um fator de grande variabilidade mensalmente, enquanto que a temperatura apresenta pequenas variações.

Tabela 15: Dados hidroclimatológicos observados para a PCD no ano de 2007-2008

<i>Anos</i>	<i>Meses</i>	<i>Precipitação Acumulada</i>	<i>Temperatura do Ar</i>	<i>Temperatura Média Máxima</i>
<i>2007</i>	<i>Janeiro</i>	<i>5,00</i>	<i>27,90</i>	<i>29,01</i>
	<i>Fevereiro</i>	<i>189,00</i>	<i>22,89</i>	<i>28,05</i>
	<i>Março</i>	<i>180,50</i>	<i>23,24</i>	<i>27,48</i>
	<i>Abril</i>	<i>47,75</i>	<i>22,89</i>	<i>27,05</i>
	<i>Mai</i>	<i>133,25</i>	<i>23,48</i>	<i>28,73</i>
	<i>Junho</i>	<i>95,75</i>	<i>22,81</i>	<i>27,67</i>
	<i>Julho</i>	<i>135,00</i>	<i>22,05</i>	<i>27,37</i>
	<i>Agosto</i>	<i>85,75</i>	<i>22,05</i>	<i>27,37</i>
	<i>Setembro</i>	<i>37,75</i>	<i>21,81</i>	<i>26,93</i>
	<i>Outubro</i>	<i>6,25</i>	<i>24,49</i>	<i>27,91</i>
	<i>Novembro</i>	<i>1,75</i>	<i>28,47</i>	<i>28,99</i>
	<i>Dezembro</i>	<i>1,75</i>	<i>28,72</i>	<i>29,11</i>
<i>2008</i>	<i>Janeiro</i>	<i>5,00</i>	<i>28,06</i>	<i>29,11</i>
	<i>Fevereiro</i>	<i>134,50</i>	<i>23,05</i>	<i>29,27</i>
	<i>Março</i>	<i>230,00</i>	<i>23,90</i>	<i>28,96</i>
	<i>Abril</i>	<i>52,00</i>	<i>28,03</i>	<i>28,94</i>
	<i>Mai</i>	<i>150,25</i>	<i>28,15</i>	<i>28,67</i>

5.3 - Balanço hídrico no sistema em estudo

O balanço hídrico de uma determinada região visa contabilizar os ganhos e as perdas de água pelo solo, bem como avaliar a quantidade de água armazenada ao longo do período em estudo.

Neste trabalho o balanço hídrico foi utilizado para estimar mensalmente o comportamento das variáveis que compõem o processo hídrico, tais como as taxas de evaporação real e a quantidade de água armazenada, observando a variação desse sistema com relação ao nível do aquífero. O período utilizado para a análise do balanço hídrico para o monitoramento do aquífero em estudo foi de agosto de 2007 a maio de 2008. O resultado do balanço hídrico para o ano de 2007 pode ser visualizado na Tabela 16, sendo verificado que a precipitação média anual atingiu 919,5 mm, distribuída irregularmente durante o ano, com uma média mensal de 76,6 mm precipitado. O déficit hídrico é mais acentuado nos meses de outubro a janeiro nos quais ocorreu quase 98% do déficit anual.

Tabela 16: Balanço hídrico para a área em estudo

<i>Meses</i>	<i>T (°C)</i>	<i>P (mm)</i>	<i>ETP (mm)</i>	<i>P-ETP (mm)</i>	<i>NEG-AC (mm)</i>	<i>ARM (mm)</i>	<i>ALT (mm)</i>	<i>ETR (mm)</i>	<i>DEF (mm)</i>	<i>EXC</i>
jan-07	27,9	5,0	117,93	-112,9	-466,1	0,95	-1,98	7,0	111,0	0,0
fev-07	22,9	189,0	72,32	116,7	0,0	100,00	99,05	72,3	0,0	17,6
mar-07	23,2	180,5	80,54	100,0	0,0	100,00	0,00	80,5	0,0	100,0
abr-07	22,9	47,8	74,12	-26,4	-26,4	76,82	-23,18	70,9	3,2	0,0
mai-07	23,5	133,3	79,71	53,5	0,0	100,00	23,18	79,7	0,0	30,4
jun-07	22,8	95,8	71,72	24,0	0,0	100,00	0,00	71,7	0,0	24,0
jul-07	22,1	135,0	69,35	65,7	0,0	100,00	0,00	69,3	0,0	65,7
ago-07	22,1	85,8	70,05	15,7	0,0	100,00	0,00	70,0	0,0	15,7
set-07	21,8	37,8	67,58	-29,8	-29,8	74,21	-25,79	63,5	4,0	0,0
out-07	24,5	6,3	90,49	-84,2	-114,1	31,96	-42,25	48,5	42,0	0,0
nov-07	28,5	1,8	117,93	-116,2	-230,2	10,00	-21,96	23,7	94,2	0,0
dez-07	28,7	1,8	124,65	-122,9	-353,1	2,93	-7,07	8,8	115,8	0,0
TOTAIS	290,8	919,5	1036,39	-116,89	-1219,75	796,86	0,00	666,17	370,2	253,3
MÉDIA	24,2	76,6	86,37	-9,74	-101,65	66,41	0,00	55,51	30,85	21,11

T= temperatura; P=precipitação; ETP=Evapotranspiração; DEF= Deficiência hídrica; ETR= Evapotranspiração real. ARM = Disponibilidade de água no solo; ALT = Alteração do armazenamento de água no solo; NEG-AC = Valor a ser a ser acumulado ou retirado do sistema, a depender do valor (P-ETP).

Para uma análise da quantidade de água que favorece a recarga considerou-se que nesta área a recarga era unicamente proveniente da precipitação, ou seja, foi considerado apenas a recarga direta. Pelo método do balanço hídrico, apenas o excedente contribui para o armazenamento gravitacional, neste caso a quantidade da precipitação que corresponde à recarga é cerca de 27,5% por ano. Neste caso considera-se que o resultado é aceitável, se considerarmos as altas taxas de evaporação da região, apesar de não estar dentro da faixa de variação encontrada por Barreto (2006), o qual verificou que em aluviões esse valor representa cerca de 42 a 87% do total precipitado.

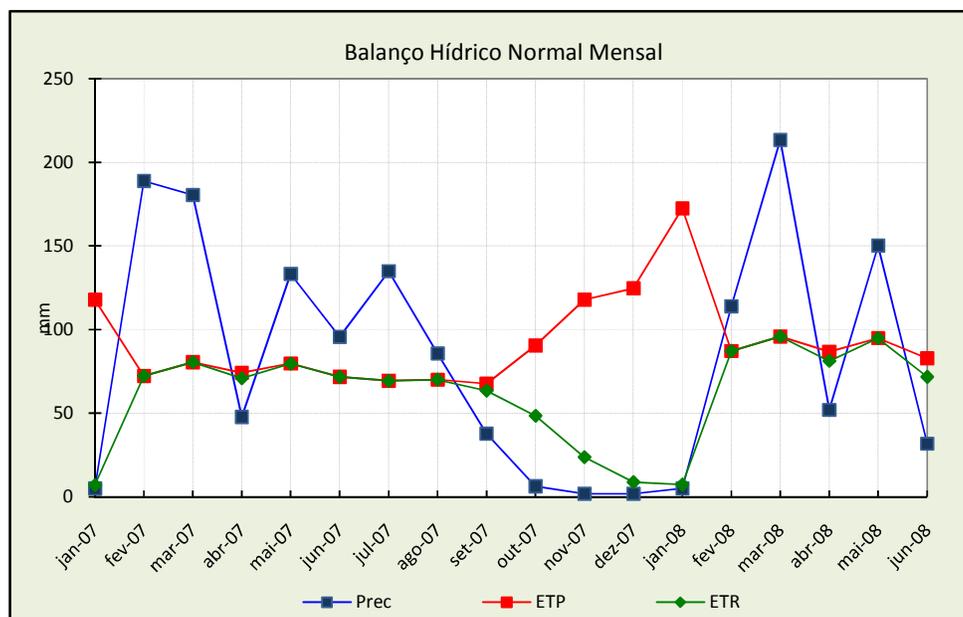


Figura 32: Representação do balanço hídrico a partir dos dados da PCD da área

Conforme mostrado na Figura 32, nota-se que a evapotranspiração potencial concentra-se nos períodos de setembro a janeiro, o que é próprio de regiões com características de semi-árido. Na Figura 33, observa-se que na maior parte do ano prevalece a deficiência hídrica chegando aos valores mais críticos no mês de janeiro.

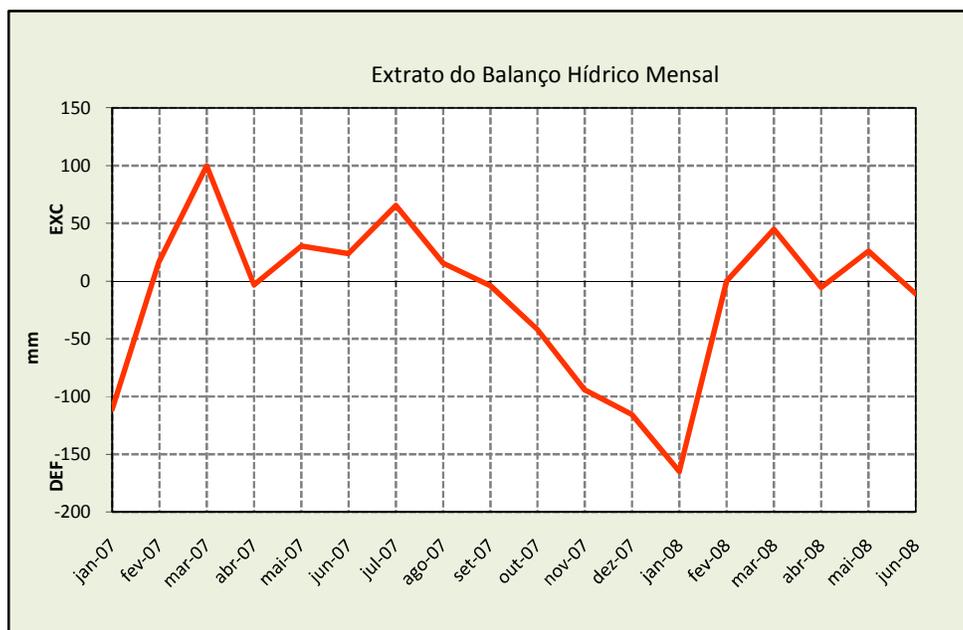


Figura 33: Meses com deficiência hídrica para a área em estudo.

Com o objetivo de realizar uma caracterização hídrica durante o tempo de realização da pesquisa foi calculado o balanço hídrico do sistema como mostrado na Figura 34. O balanço foi iniciado considerando o armazenamento de água no solo igual à capacidade de água disponível. A parte em azul (EXC) corresponde a quantidade de chuva excedente, ou seja é a quantidade de água que irá drenar em profundidade, e a parte em amarelo (REP) corresponde aqueles períodos nos quais há uma reposição de água no solo. A parte em vermelho (DEF) mostra os meses nos quais há deficiência hídrica, corresponde o quanto o sistema deixou de evapotranspirar se houvesse as condições necessárias para a ocorrência desse processo.

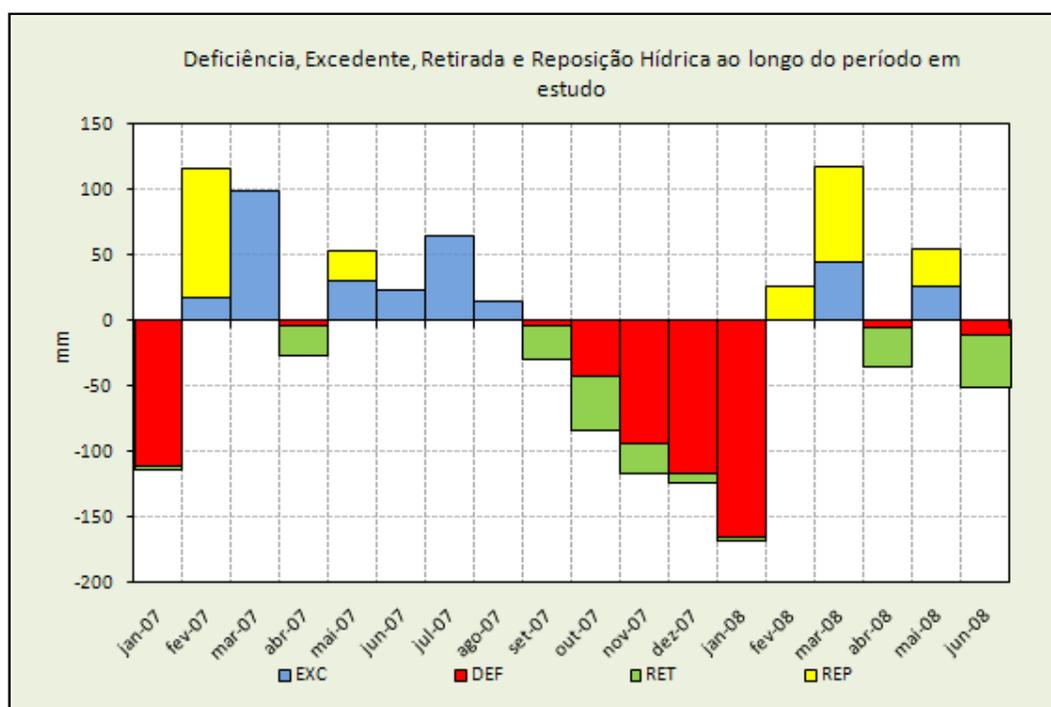


Figura 34: Análise do comportamento hídrico mensal

Conforme mostrado na Figura 34 apenas nos meses de março a agosto há um excedente hídrico, com uma irregularidade tanto para o mês de abril em 2007 quanto 2008. A quantidade excedente significa aquela quantidade que vai alimentar o aquífero, o que nesse caso significa que cerca de 253 mm anuais irá contribuir para a alimentação do aquífero. No geral os meses que apresentam deficiência hídrica, é bem superior à quantidade precipitada.

5.4 - Monitoramento do nível do aquífero

A área em estudo conta com 15 piezômetros, que foram monitorados com uma frequência de observação mensal, sendo as leituras do nível realizadas tendo como referência a boca do poço. O período de observação foi de 10 meses (entre agosto/2007 e maio/2008), sendo que destes mais da metade do tempo refere-se aos meses mais críticos com relação à precipitação, são eles: setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, o que pode ser verificado pelas descontinuidades observadas na Figura 35 onde são apresentadas a variação do nível de água, em resposta aos eventos de precipitação (representação apenas da primeira fila de piezômetros, os demais gráficos estão apresentados no Anexos B).

Observa-se que apesar da área em estudo apresentar características favoráveis à infiltração (própria das formações aluviais), a resposta dos eventos chuvosos sobre o nível dos poços é lenta. Além disso, percebe-se ainda que para haver variações que colaborem com a recarga do aquífero são necessárias precipitações acumuladas mensais superiores a 100 mm. Verifica-se também que este comportamento obedece a uma característica que se aproxima de uma função polinomial do 3º grau, obtendo-se um valor máximo de correlação de 0,999 e um valor mínimo de 0,787, no geral o valor médio ficou em torno de 0,972. Vale ressaltar que mesmo para aqueles piezômetros nos quais passou a maior parte do tempo seco, como é o caso da Figura 47, só foi possível obter 3 observações, por convenção com relação aos demais, o polinômio ajustado foi de 3º.

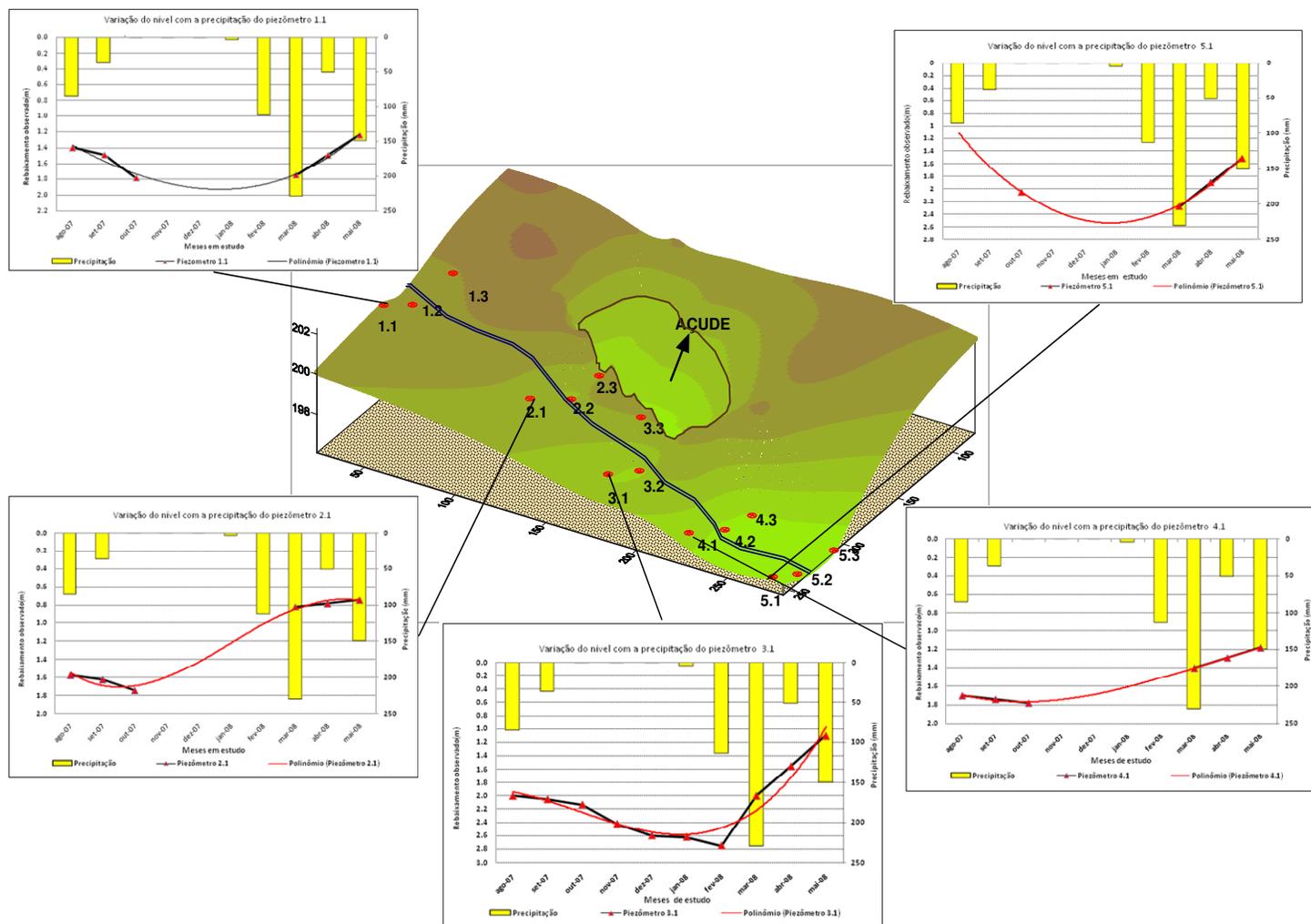


Figura 35: Representação dos níveis piezométricos para a área em estudo

5.5 - Similaridade no comportamento dos poços

O estudo em aquífero aluvial vem sendo realizado por vários pesquisadores que, dentre outras constatações, confirmaram que geralmente esses aquíferos possuem comportamento sazonal bem definido. O nível máximo basicamente ocorre no período chuvoso e diminui o nível na estação seca, muitas vezes chegando a secar, como os piezômetros em estudo.

Através das medidas piezométricas realizadas mensalmente durante um período de 10 meses de observação nos 15 piezômetros foi determinada a matriz de correlação entre essas variáveis, para verificar o padrão de comportamento dos poços conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17: Matriz de correlação dos piezômetros

Piezômetro	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
1.1	1														
1.2	0.66	1													
1.3	0.96	0.69	1												
2.1	0.28	0.89	0.61	1											
2.2	0.88	0.92	0.95	0.79	1										
2.3	0.68	0.93	0.61	0.66	0.86	1									
3.1	0.73	0.71	0.98	0.74	0.94	0.54	1								
3.2	0.93	0.80	0.99	0.72	0.96	0.70	0.97	1							
3.3	0.75	0.98	0.92	0.91	0.98	0.86	0.94	0.90	1						
4.1	0.43	0.87	0.76	0.98	0.87	0.64	0.87	0.85	0.94	1					
4.2	0.88	0.91	0.83	0.66	0.96	0.95	0.75	0.88	0.91	0.72	1				
4.3	0.94	0.78	0.99	0.70	0.96	0.68	0.98	0.98	0.89	0.83	0.87	1			
5.1	0.93	0.37	0.95	0.30	0.82	0.36	0.94	0.85	0.73	0.56	0.64	0.87	1		
5.2	0.98	0.82	0.99	0.78	0.99	0.81	0.99	0.99	0.96	0.92	0.96	0.99	0.90	1	
5.3	0.66	0.90	0.66	0.92	0.81	0.91	0.68	0.73	0.86	0.85	0.83	0.72	0.42	0.74	1

Verifica-se no geral, que o comportamento dos piezômetros obedece a um padrão bem definido (o nível sobe com os eventos chuvosos e o nível diminui nos períodos mais secos), com algumas exceções devido ao tempo de resposta do rebaixamento ser mais rápido ou mais demorado. As maiores correlações são obtidas pelo piezômetro 5.2, este se correlaciona muito bem quando se considera os demais. O que confirma que o comportamento dos piezômetros é bastante similar. Nos períodos chuvosos respondem rapidamente à recarga, enquanto que nos períodos secos a maioria chega a secar completamente. A superfície potenciométrica, para cada mês em estudo,

foi gerada a partir do Programa SURFER 8.0, de acordo com as coordenadas obtidas no levantamento topográfico em relação ao nível estático de cada piezômetro. A partir do monitoramento foram distribuídas essas informações mensalmente de forma que foi possível obter uma avaliação do comportamento em vários períodos distintos, conforme pode ser observado da Figura 36 a Figura 45.

5.6 - Potenciometria resultante do monitoramento do sistema

No início do monitoramento, ou seja, no mês de agosto de 2007, no final do período chuvoso, haviam apenas quatro poços perfurados, o que limitou as análises à leitura de nível da água nos mesmos.

Para o mês de setembro, já existiam 12 dos 15 poços instalados. Verifica-se que enquanto o aquífero está sendo rebaixado os sentidos das linhas de fluxo seguem a um mesmo padrão, com as variações potenciométricas variando de 193 a 199 m. A direção do fluxo se dá na direção sul-norte, no sentido da direção do rio principal. O rebaixamento nesse caso se dá principalmente em função das altas taxas de evapotranspiração e da interrupção do período chuvoso.

Já para os meses de novembro a fevereiro verifica-se que há uma depleção nos níveis e uma possível aleatoriedade com relação às linhas de fluxo, explicando assim o fato da maioria dos poços terem secado neste período, indicando algumas direções de alguns piezômetros preferências, ou seja, aqueles que permanecem com água durante todo o período (piezômetro 3.1 e 3.3), que foram aqueles poços que não secaram, podendo-se entender que estes são alimentados pelo o açude existente nas proximidades do aparato experimental. Também se verifica pelos mapas que há uma área (após a segunda linha de piezômetros) em que há uma possível separação entre a área de recarga e a área de descarga desse aquífero, ou seja um possível divisor.

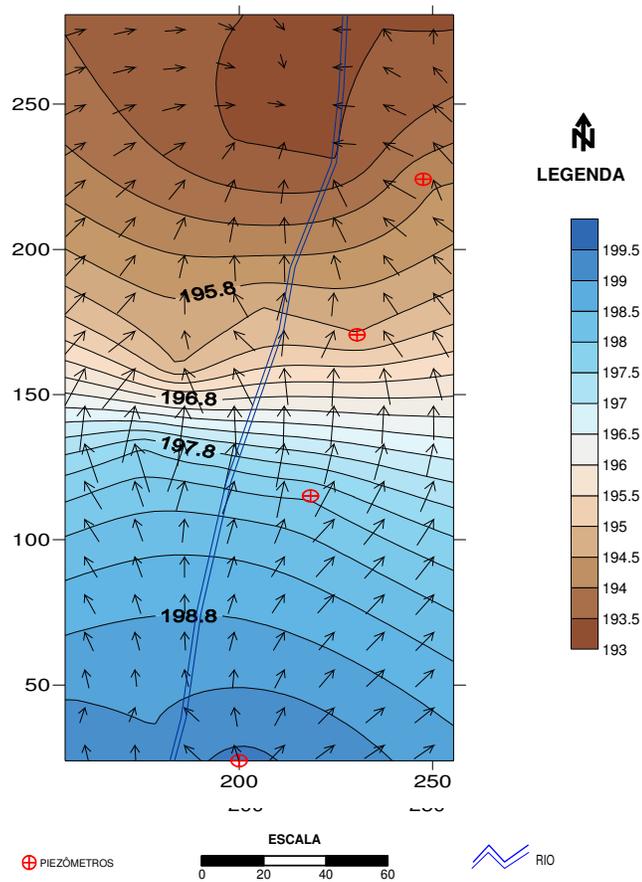
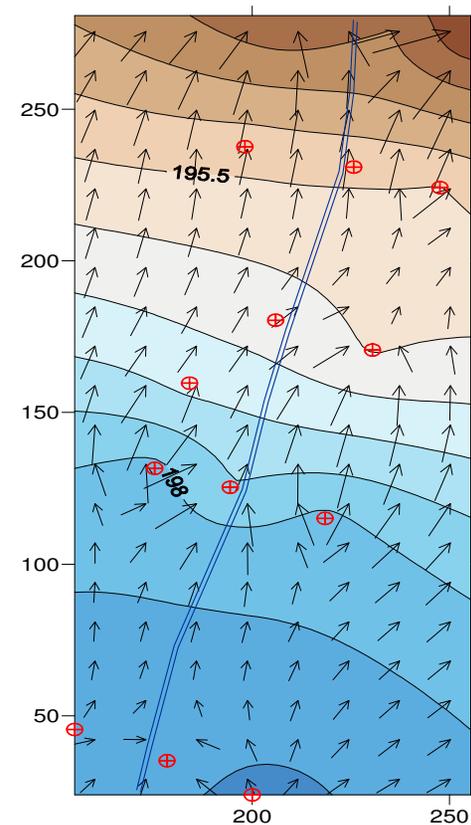
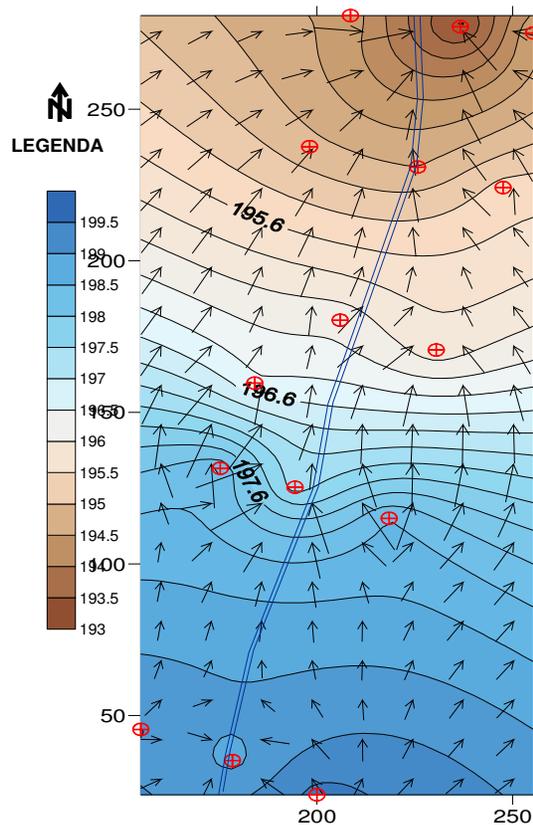


Figura 36: Superfície potenciométrica para o mês de agosto. (Coordenadas em metros)

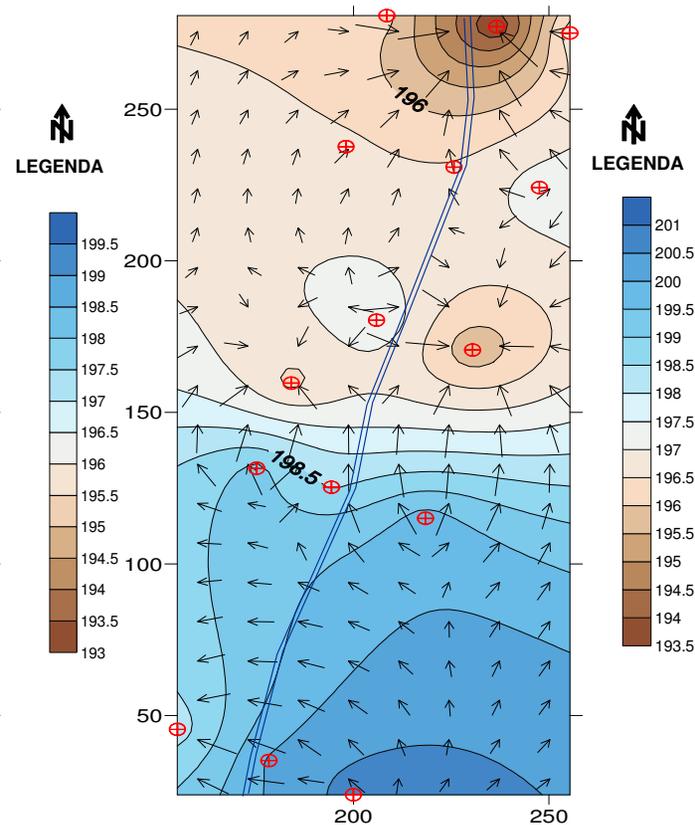
Verifica-se também, que nos meses de março a maio, há uma recuperação do aquífero, aumentando gradativamente o nível estático, saturando assim todos os poços. Esse comportamento é em consequência da chegada do período chuvoso na região, sendo verificado para esses meses uma superfície com linhas de fluxo contínua.



⊕ PIEZÔMETROS
ESCALA
0 20 40 60



⊕ PIEZÔMETROS
ESCALA
0 20 40 60
RIO



⊕ PIEZÔMETROS
ESCALA
0 20 40 60
RIO

Figura 37: Superfície potenciométrica para o mês de setembro. (Coordenadas em metros)

Figura 38: Superfície potenciométrica para o mês de outubro. (Coordenadas em metros)

Figura 39 Superfície potenciométrica para o mês de novembro. (Coordenadas em metros)

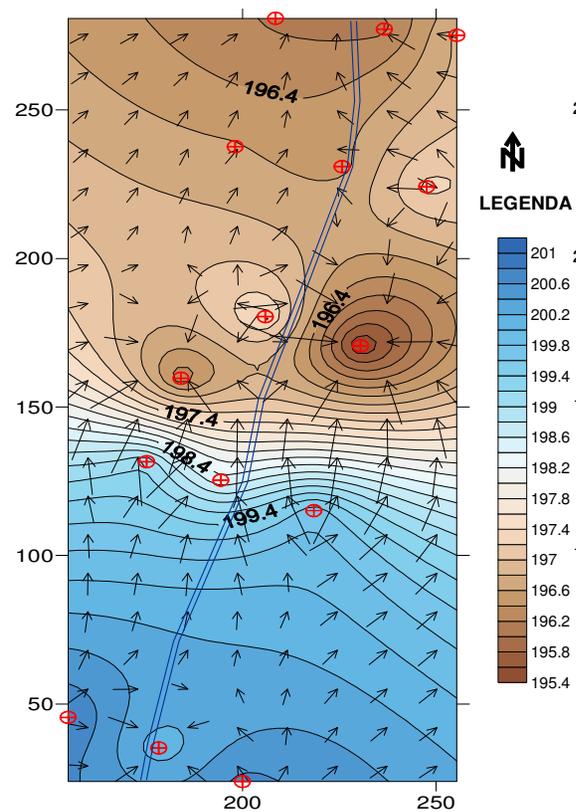


Figura 40: Superfície potenciométrica para o mês de dezembro. (Coordenadas em metros)

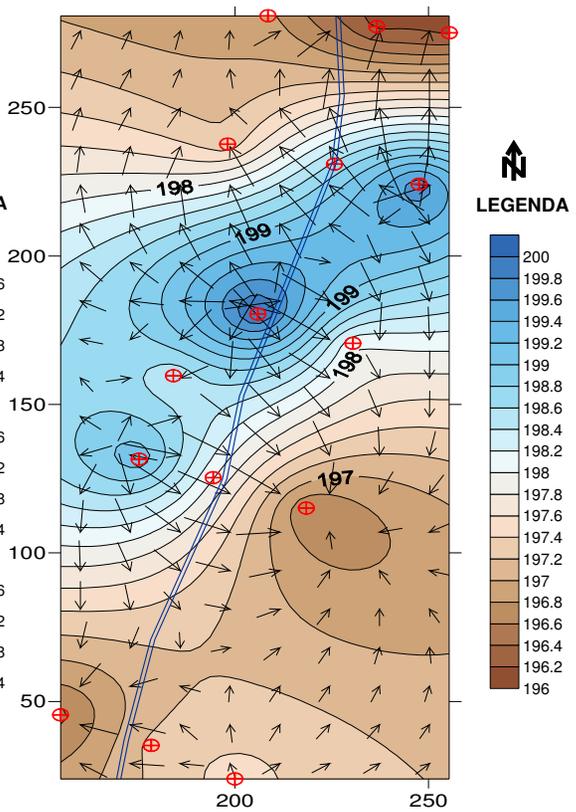


Figura 41: Superfície potenciométrica para o mês de janeiro. (Coordenadas em metros)

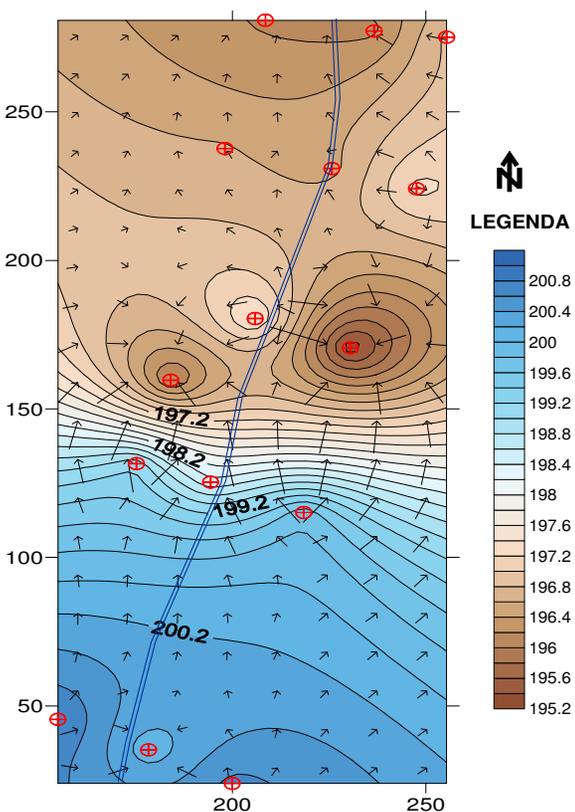
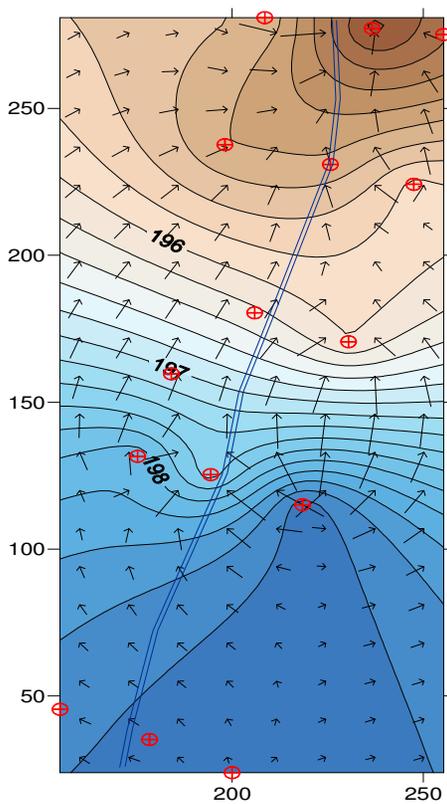
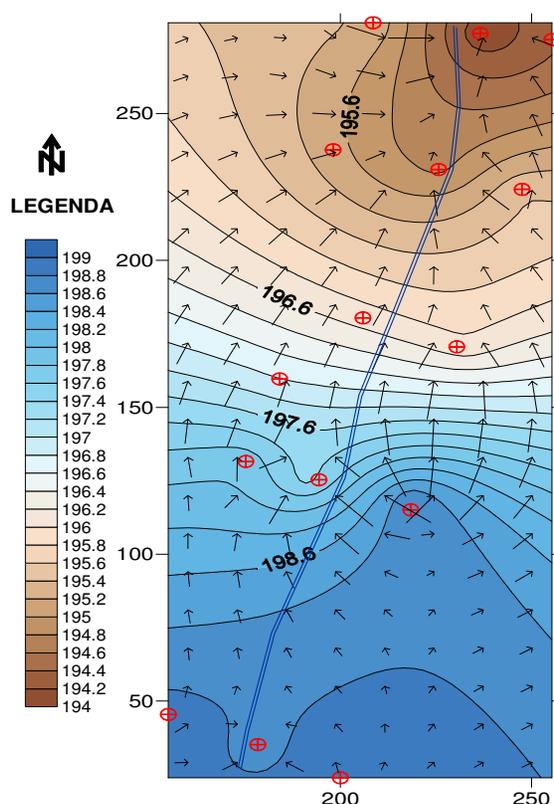


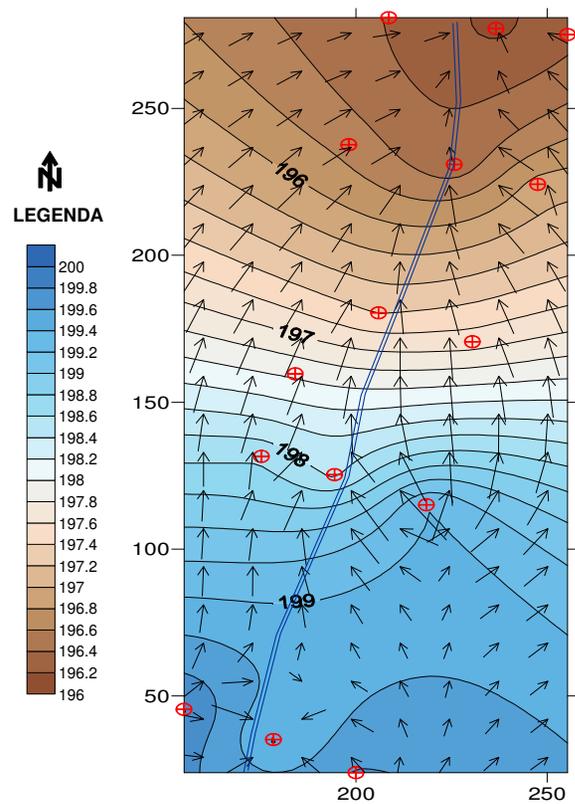
Figura 42: Superfície potenciométrica para o mês de fevereiro. (Coordenadas em metros)



⊕ PIEZÔMETROS
 ESCALA
 0 20 40 60



RIO ⊕ PIEZÔMETROS
 ESCALA
 0 20 40 60



RIO ⊕ PIEZÔMETROS
 ESCALA
 0 20 40 60

Figura 43: Superfície potenciométrica para o mês de março. (Coordenadas em metros)

Figura 44: Superfície potenciométrica para o mês de abril. (Coordenadas em metros)

Figura 45: Superfície potenciométrica para o mês de maio. (Coordenadas em metros).

5.7 - Elaboração de uma função explicativa do nível de água e outros fatores climatológicos

A seguir são apresentados os resultados relativos à tentativa da explicação do comportamento do aquífero aluvial através de análises matemáticas. Devido à quantidade de informações ser muito pequena, alguns critérios tiveram que ser adotados um deles é a aceitação da normalidade dos dados.

Após do critério acima mencionado, foi avaliado a existência de colinearidade entre as variáveis explicativas através de uma matriz de correlação, e esta serviu também para verificar o grau de importância de cada variável no modelo. Por meio de tentativas e erros foi ajustada uma função, cujo o objetivo era ajustar os dados obtidos a uma função, que representasse bem uma distribuição linear.

A função que mais se aproximou a uma distribuição linear para os dados obtidos foi à função exponencial. A partir daí aplicou-se os testes estatísticos para analisar alguns critérios sobre a hipótese de regressão dos dados.

Assim foi feita a definição sobre quais variáveis explicativas que compõem o modelo para analisar a variação do níveis de água durante aproximadamente um ano hidrológico, conforme mostrado a seguir.

5.7.1 - A escolha dos possíveis fatores intervenientes no sistema

A primeira etapa da calibração do modelo foi o levantamento do maior número de variáveis independentes que explicasse a variável dependente, que neste caso específico é o rebaixamento do nível de água no aquífero. Como a área de estudo é experimental, em que o processo de caracterização das variáveis componentes do sistema estava em fase inicial, a escolha das variáveis explicativas para o modelo foi bastante dificultada. Contudo após uma análise desses fatores e com as observações de campo foi possível obter uma função F , que explicasse de forma coerente o processo ocorrido. Para isso foi realizado um balanço hídrico do sistema, para uma maior caracterização das variáveis envolvidas, assim fez-se uma série de tentativas com as variáveis de forma a escolher aquelas que fossem mais significativas na explicação do

modelo (rebaixamento do nível de água x fatores climatológicos), assim sendo, após sucessivas tentativas de ajustes, as variáveis independentes para a explicação da variável dependente (rebaixamento do nível de água) são apresentadas a seguir:

- Precipitação (P): variável fundamental na recarga do aquífero na região;
- Evapotranspiração (E): através da temperatura e aplicando o processo do balanço hídrico seqüencial, obteve-se a estimativa deste parâmetro;
- Sazonalidade (M): esse fator foi de grande importância, pois considera os meses em estudo. Cada mês tem um valor que varia de 0 a 1. Esse é um coeficiente multiplicativo dependente da precipitação. Assumindo o valor 0 (zero), quando o período é considerado como seco, de acordo com o ano hidrológico da região, e 1 (um) para o período considerado chuvoso.

5.7.2 - A obtenção da função explicativa do nível de água

As poucas observações referentes ao período de estudo comprometeram, de certa forma, um maior aprofundamento sobre outras possíveis variáveis que pudessem contribuir para explicar melhor o comportamento do aquífero. A primeira tentativa de explicação das variáveis foi utilizando o processo de regressão linear múltipla. Nessa etapa foi analisada a possibilidade de regressão das variáveis através dos testes de hipóteses, rejeitando a possibilidade de regressão das variáveis se o coeficiente da função regressiva for nulo, ou seja:

$H_0: \beta=0$ – não há regressão (hipótese nula)

$H_0: \beta \neq 0$ – hipótese alternativa

Para o ajuste do modelo, separou-se os níveis de água dos piezômetros em dois grupos:

- Grupo A: Piezômetros com rebaixamento de até 2 metros;
- Grupo B: Piezômetros com rebaixamentos maiores que 2 metros

Sendo considerada a média da profundidade desses grupos para o ajuste do modelo. Essa aproximação é válida devido à similaridade dos poços em cada grupo. Cabe salientar, que para o primeiro grupo de poços, quando o rebaixamento chega a 2 metros, é na situação em que os piezômetros estão todos secos.

Para cada variável incorporada foi verificada a hipótese de regressão dos dados, estes foram analisados para cada grupo definido anteriormente. O resultado para cada teste é apresentado a seguir na Tabela 18.

Tabela 18: Grupo A , análise da hipótese de regressão dos dados

<i>Variáveis analisadas</i>	<i>Testes sobre a hipótese nula ($\beta=0$), será aceita se:</i>			
	<i>$F < F(\alpha, p, n-p-1)$</i>		<i>$t < t_{\alpha/2, n-p-1}$</i>	
	<i>Valor obtido no modelo (F)</i>	<i>Valor calculado $F(\alpha, p, n-p-1)$</i>	<i>Valor obtido no modelo t</i>	<i>Valor calculado $t_{\alpha/2, n-p-1}$</i>
P	6.56	5,32	108.83	2,036
P+E	6.02	4,74	82.10	2,365
P+E+P ² /E	5.23	4,76	84.42	2,447
P+E+M	6.44	4,76	94.65	2,447
P+E+ P ² /E+M	60.38	5,19	283.41	2,507

De acordo com estes testes, a hipótese de regressão das variáveis foi aceita para o primeiro conjunto de dados.

Tabela 19: Grupo B, análise da hipótese de regressão dos dados

<i>Variáveis analisadas</i>	<i>Testes sobre a hipótese nula ($\beta=0$), será aceita se:</i>			
	<i>$F < F(\alpha, p, n-p-1)$</i>		<i>$t < t_{\alpha/2, n-p-1}$</i>	
	<i>Valor obtido no modelo(F)</i>	<i>Valor calculado $F(\alpha, p, n-p-1)$</i>	<i>Valor obtido no modelo t</i>	<i>Valor calculado $t_{\alpha/2, n-p-1}$</i>
P	3.73	5,32	76.61	2,036
P+E	3.44	4,74	55.23	2,365
P+E+P ² /E	2.15	4,76	50.48	2,447
P+E+M	6.97	4,76	76.92	2,447
P+E+ +P ² /E+M	13.20	5,19	108.16	2,507

Neste segundo grupo verifica-se que apenas as variáveis em conjunto P+E+M ou P+E+P²/E+M são capazes de produzir um modelo que satisfaça a hipótese de regressão dos dados.

5.7.3 - O modelo obtido através da análise de dados

Conforme comentado anteriormente para o desenvolvimento do modelo separou-se os poços em dois grupos: aqueles nos quais o rebaixamento máximo era até 2 metros, e aqueles com rebaixamentos maiores que 2 metros, incluindo aqueles que

não secaram durante o período de monitoramento. Foi estimado o valor médio do rebaixamento do nível desses poços. Depois do tratamento das variáveis envolvidas, com o auxílio da estatística e das ferramentas matemáticas foram aplicados também os testes para verificar a validade da função, obtendo-se assim o seguinte ajuste:

a. Função para os piezômetros com os níveis mais rasos (com rebaixamento até 2 metros)

Nessa etapa, o ajuste do modelo foi feito observando a influência de cada variável explicativa associada e o grau de explicação dessa variável no modelo. Ao acréscimo de cada variável foi-se verificado a influencia desta no ajuste da função conforme Figura 46. Do ponto de vista matemático, a qualidade de um modelo pode ser verificado levando-se em consideração os valores de R^2 e do R-ajustado e também do valor do erro padrão. Os valores de R devem ser maximizados, ou seja aproximados de 1(um), e os valores do erro padrão, devem ser minimizados, ou seja aproximados de 0(zero).

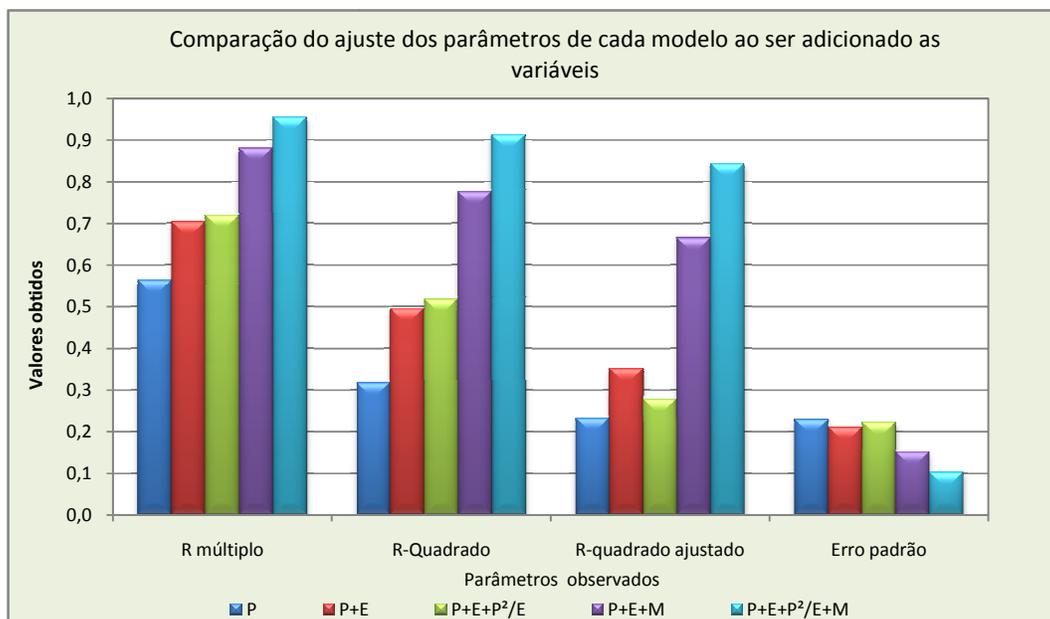


Figura 46: Comparação do comportamento dos modelos, com relação ao número de variáveis explicativas

Pode-se observar que ao ser adicionado um termo no modelo há um melhoramento na qualidade do ajuste e uma conseqüente diminuição do erro padrão quando comparado com o modelo adotado. Verifica-se que só a variável P é importante para a explicação do modelo, mas seu ajuste é melhorado ao ser acrescentado novos termos representativos da região. Observa-se também, que os termos (M) e o termo (P²/E) contribuem para uma melhora relevante para a explicação do modelo significando que os fatores dependentes da precipitação têm grande significância para a análise do comportamento do nível do aquífero, sendo esta considerada a principal fonte de recarga do aquífero. A variação dos indicadores da qualidade do ajuste, ao acréscimo das variáveis intervenientes ao sistema, em relação ao modelo adotado, está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20: Valores comparativos do comportamento do modelo ajustado com relação ao acréscimo de variáveis

<i>Variáveis</i>	<i>P</i>	<i>P+E</i>	<i>P+E+P²/E</i>	<i>P+E+M</i>	<i>Observação</i>
R múltiplo	-31%	-19%	-13%	-11%	Aumenta com acréscimo de variáveis explicativas
R-Quadrado	-52%	-33%	-24%	-20%	
R-quadrado ajustado	-57%	-42%	-36%	-29%	
Erro padrão	408%	356%	333%	308%	Diminui com acréscimo de variáveis explicativas

Assim, o modelo de melhor ajuste para os dados apresentados, é representado na Equação (21):

$$N.A = e^{7,4149 - 0,00306.M - 0,00556.P - 0,00032.E + 0,00334 \frac{P^2}{E}} \quad (21)$$

Onde: N.A é o rebaixamento do nível de água em mm;

P é a precipitação em mm;

E é a evapotranspiração em mm; e

M é o fator de contribuição da precipitação, dependente do mês em análise, variando de 0 (meses secos) a 1 (meses chuvosos).

Para o ajuste do modelo dos poços mais rasos obteve-se um valor do coeficiente de determinação, R², igual a 0.98 e um R² ajustado de 0.96 para um intervalo de

confiança de 95% e um erro padrão de 0,03. O que é considerado um bom ajuste do ponto de vista matemático.

b. Função para os piezômetros com os níveis mais fundos (rebaixamento maiores que 2 metros)

Da mesma forma anterior, para esse conjunto de piezômetros foi verificado a influência de cada variável no ajuste do modelo que relacionasse o nível de água com os fatores característicos da área em estudo. Assim verifica-se que ao ser acrescentadas as variáveis no modelo os fatores explicativos destes vão melhorando, conforme apresentado na Figura 47. Vale ressaltar que para este conjunto de dados, o modelo apenas com a precipitação ou a evaporação não passou na hipótese de regressão, portanto a análise aqui feita foi apenas para os modelos regressivos.

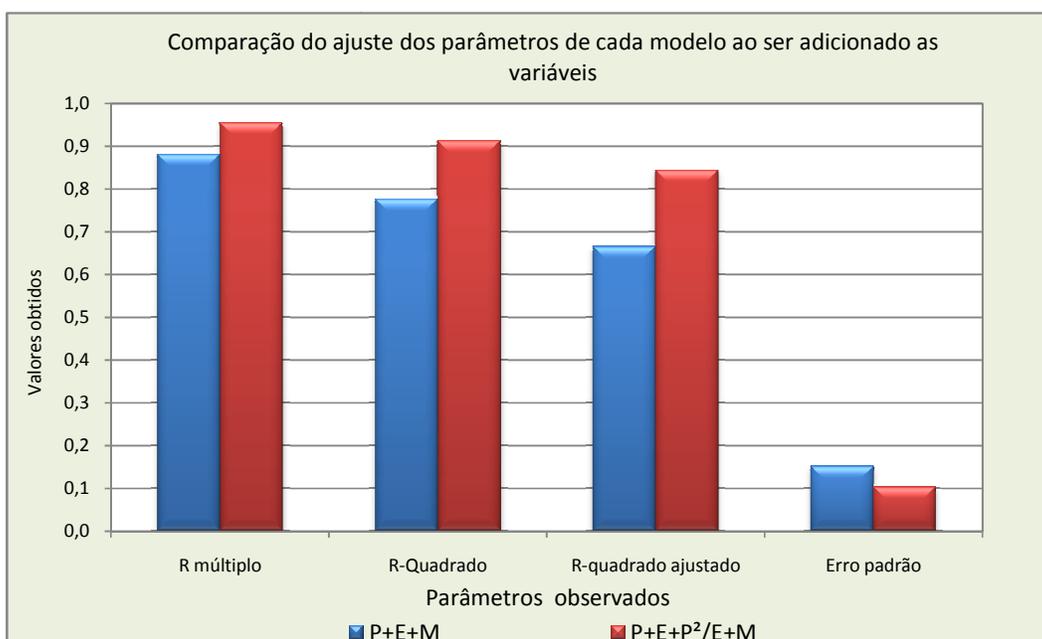


Figura 47: Comparação do comportamento dos modelos, com relação ao número de variáveis explicativas.

Verifica-se mais uma vez, que o fator mês tem maior influência no ajuste da função do que o termo que leva em consideração a relação entre o quadrado da precipitação e a evaporação, pois este modelo não passou no critério de regressão,

sendo neste caso entendido que, o acréscimo de tal termo não contribui para melhorar a explicação do modelo.

A contribuição de cada variável inserida na função também foi observado com relação ao melhor ajuste obtido para o modelo. Da mesma forma, verifica-se que quase sempre a qualidade do modelo fica relacionada com o número de variáveis explicativas inseridas. A variação dos indicadores da qualidade do ajuste com relação ao modelo adotado está apresentado na Tabela 21.

Tabela 21: Valores comparativos do comportamento do modelo ajustado com relação ao acréscimo de variáveis

<i>Variáveis</i>	<i>P+E+M</i>	<i>Observação</i>
R múltiplo	-3%	Aumenta com acréscimo de variáveis explicativas
R-Quadrado	-6%	
R-quadrado ajustado	-6%	
Erro padrão	136%	Diminui com acréscimo de variáveis explicativas (com exceção do termo P ² /E)

Assim, o modelo de melhor ajuste para os dados apresentados é representado pela Equação (22):

$$N.A = e^{7,965 - 0,00514.M - 0,0036.P - 0,00223.E + 0,00359.\frac{P^2}{E}} \quad (22)$$

Onde: N.A é o rebaixamento do nível de água em mm;

P é a precipitação em mm;

E é a evapotranspiração em mm; e

M é o fator de contribuição da precipitação dependente do mês em análise, variando de 0 (meses secos) a 1 (meses chuvosos).

Para este segundo ajuste o modelo dos poços mais fundos, obteve-se um valor de um R² igual a 0,91 e um R² ajustado de 0.84, um intervalo de confiança de 95% e um erro padrão de 0.1. O que, também foi um ajuste de certa forma razoável do ponto de vista matemático.

Com o ajuste do modelo foi verificado o comportamento de cada fator envolvido no sistema, com os fatores obtidos em campo, no geral verifica-se que a qualidade do ajuste do modelo, tende a ser melhorada, com a inserção de variáveis no modelo.

5.7.4 - Comparação entre os valores obtidos com o modelo e os valores observados em campo

Após o ajuste do modelo com as condições impostas em função das regras gerais da teoria utilizada e dos dados disponíveis foi verificado a calibração do modelo, em relação às observações de campo, para os piezômetros dos grupos A e B (acima apresentados) nas Figuras 48 e 49 respectivamente.

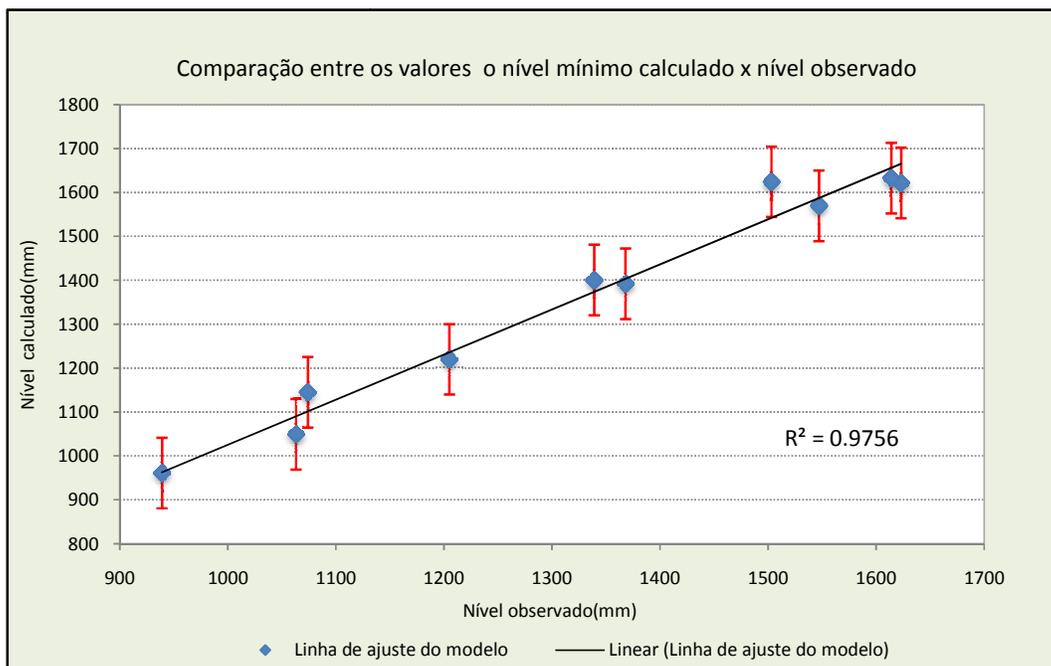


Figura 48: Comparação entre os valores obtidos em campo e os calculados, para os poços rasos

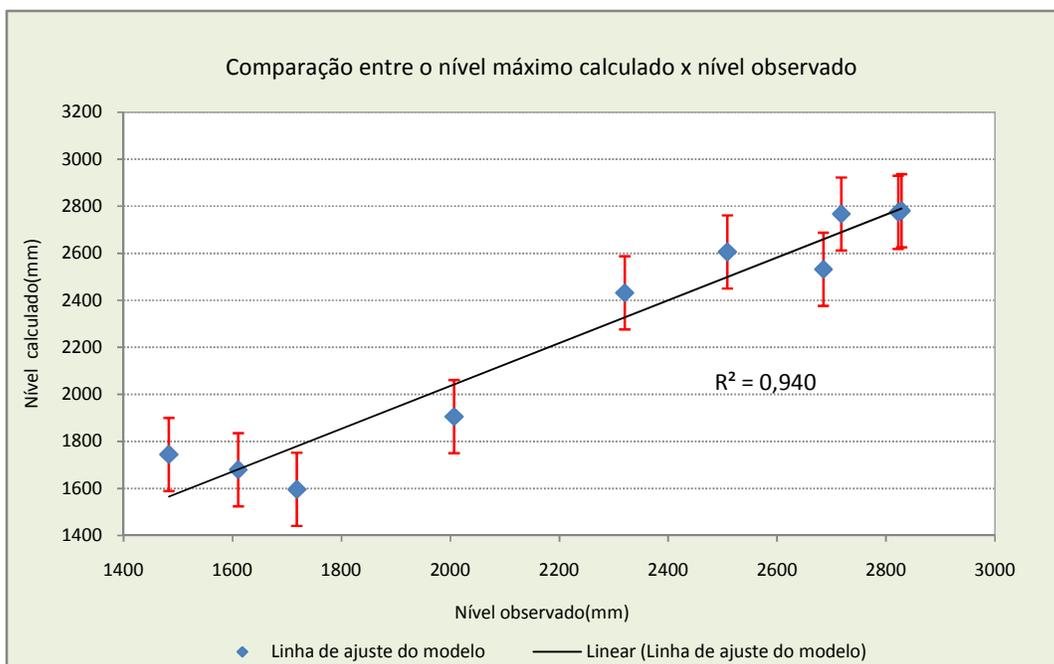


Figura 49: Comparação entre os valores obtidos em campo e os calculados, para os poços mais profundos

Em função da boa correlação obtida com o ajuste da função, verifica-se que as variáveis envolvidas na análise explicam coerentemente o processo, deixando evidente a dependência do nível do aquífero com relação à variável precipitação. Percebe-se que pela qualidade do ajuste, o comportamento ajustado segue a tendência observada no campo, ou seja, durante o ano hidrológico na área em estudo há um período de maior rebaixamento nos níveis freáticos no qual, muitos piezômetros chegam a secar. Logo após o período de rebaixamento máximo (mais seco), o aquífero volta a recuperar o nível, até a saturação completa da área, causando um alagamento total da área nos períodos mais chuvosos, nesse caso iniciando no mês de maio, conforme mostrado nas Figura 50 e Figura 51, para os dois grupos de poços analisados respectivamente. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o modelo obtido é bastante significativo para uma visão global do comportamento do aquífero, mesmo tendo em vista que o período estudado foi muito curto para o perfeito entendimento da dinâmica do fluxo na região.

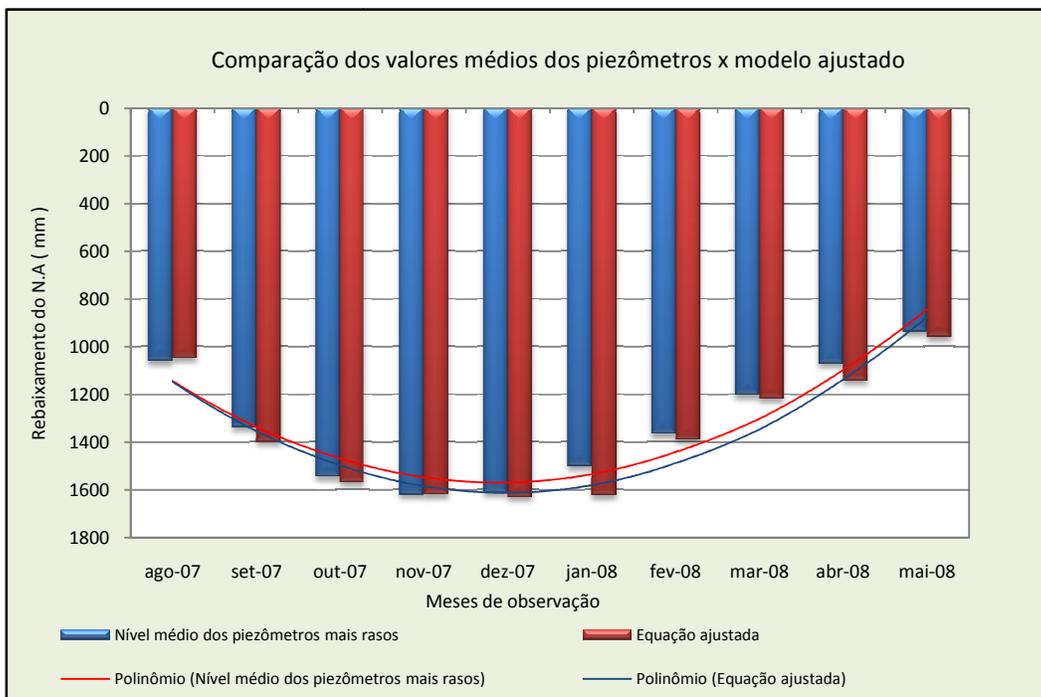


Figura 50: Resultado da calibração do modelo, para os piezômetros do grupo A.

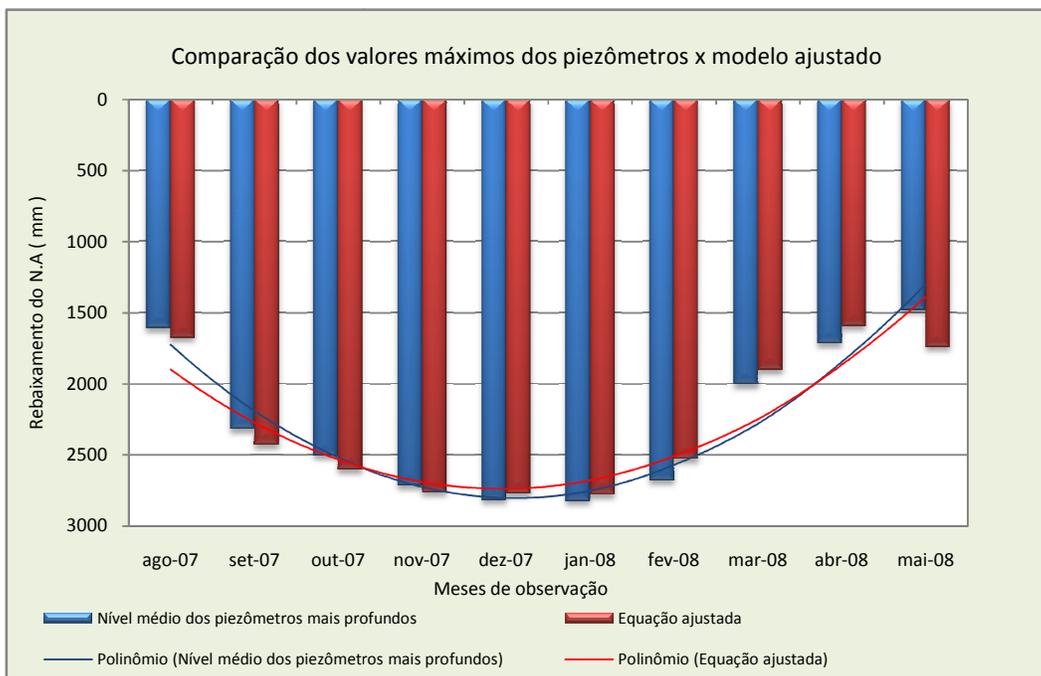


Figura 51: Resultado da calibração do modelo, para os piezômetros do grupo B.

5.7.5 - Simulação do comportamento do aquífero para diferentes cenários

A interação dos processos hidrológicos contribui para o entendimento da dinâmica do sistema. Com o objetivo de verificar o rebaixamento do aquífero, para outras precipitações característica da região, foram realizadas algumas análises para o entendimento global do sistema. A utilização da precipitação para a simulação dos cenários aqui propostos foi obtida através de uma série histórica composta por 83 anos de dados existentes e operada pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (ver Anexo C). Para os demais valores a ser inseridos nas equações, foi realizado um balanço hídrico, para cada período em análise. Assim, foram simulados três situações distintas para a análise das equações do modelo ajustado:

- i. Cenário observado (através do qual as equações foram ajustadas) – este corresponde a precipitação observada em 25% do tempo, considerando uma série histórica de 83 anos para a área em estudo. Esta precipitação foi observada no ano hidrológico de 2007-2008, correspondente a aproximadamente 947,6 mm acumulados;
- ii. Cenário previsto – para este cenário foram consideradas as precipitações observadas em 50% e 100% do tempo, considerando a mesma série histórica. Para a precipitação que ocorre em 50% do tempo na região este valor foi de 752,2 mm e para a precipitação observada em 100% do tempo, este valor foi de aproximadamente 250 mm. Esta foi a precipitação anual acumulada mais crítica para a região. O resultado pode ser verificado a seguir:

a. Simulação para equação A

Durante o período de monitoramento, foi verificado que para este conjunto de poços o aquífero tende a rebaixar durante o período de estio, até secar completamente e com a chegada das chuvas este tende a ascender o nível. Assim foi verificado que considerando a taxa de precipitação observada em 50% do tempo, o nível do aquífero tende a subir e durante os períodos mais secos esse conjunto de poços tendem a secar

completamente. Já considerando a precipitação observada em 100% do tempo, verifica-se que neste caso, há um rebaixamento total, para os quais a pequena quantidade de chuva, não daria para saturar o solo e contribuir com a recarga do aquífero. A presente constatação pode ser analisada na Figura 52.

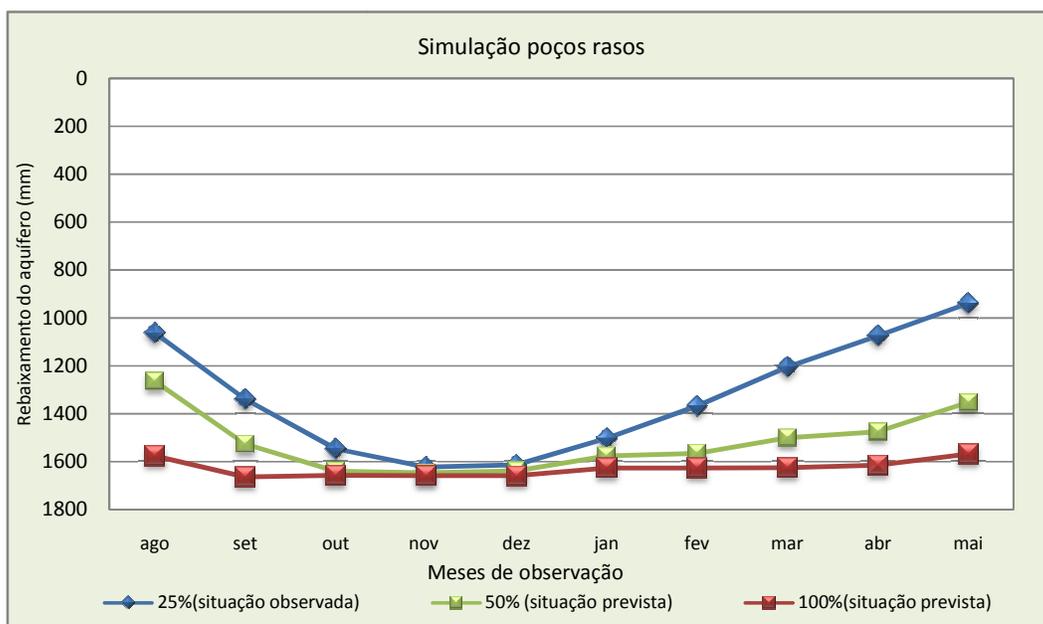


Figura 52: Simulação do rebaixamento do aquífero para três períodos distintos: precipitação observada em 25%, 50% e 100% do tempo observada na área em estudo (poços rasos).

b. Simulação para equação B

Da mesma forma anterior, foi analisada a equação obtida para este conjunto de poços, a diferença nesta análise consiste no fato de que durante o processo de calibração do modelo, mesmo durante os meses mais secos, há rebaixamento do aquífero, mas ainda assim é possível observar água durante todo o período analisado. Já para os eventos simulados, observa-se que para cada situação considerada, o rebaixamento observado é maior que para o conjunto de poços anterior. Observa-se também que para as menores taxas de precipitação, mais uma vez o aquífero tende a rebaixar por um maior período do ano, o que pode ser observado na Figura 53.

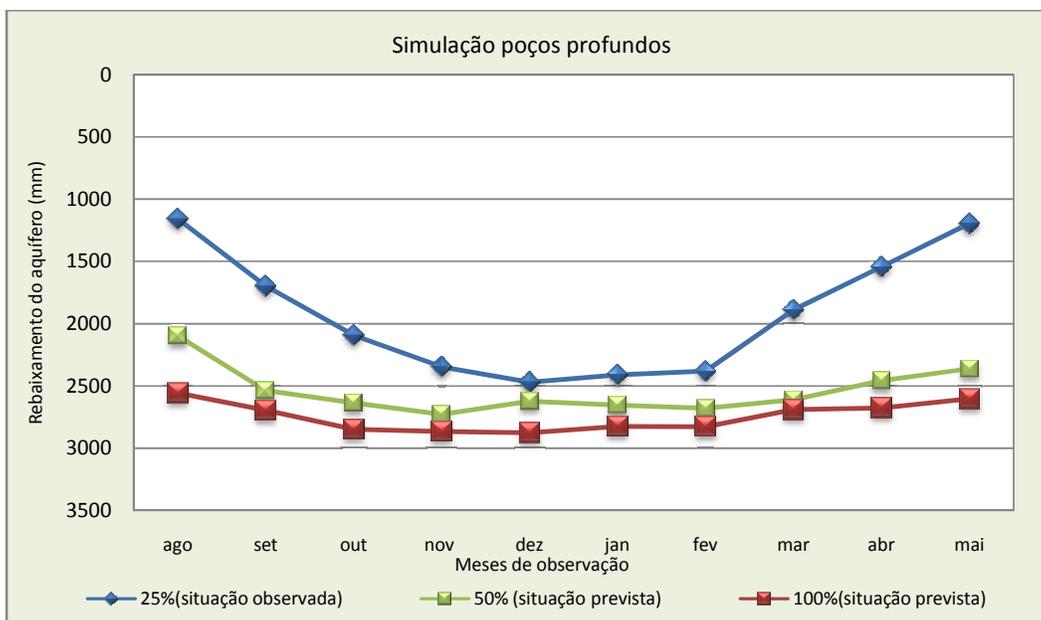


Figura 53: Simulação do rebaixamento do aquífero para três períodos distintos: precipitação observada em 25%, 50% e 100% do tempo observada na área em estudo (poços profundos).

Para uma análise global do sistema foi analisado o rebaixamento médio em função da precipitação observada em cada período considerado. Foi observado que para uma diminuição da precipitação em 21%, ou seja, de 947mm para 752 mm, há um rebaixamento de 13% para os poços rasos e 24% para os poços mais fundos. Já quando a precipitação é diminuída em 74%, ou seja de 947mm para 250 mm, esses valores chegam a 18% e a 30%, respectivamente, conforme a Figura 54. Verifica-se a importância da precipitação no processo de recarga deste tipo de aquífero, que é de grande importância para a população local.

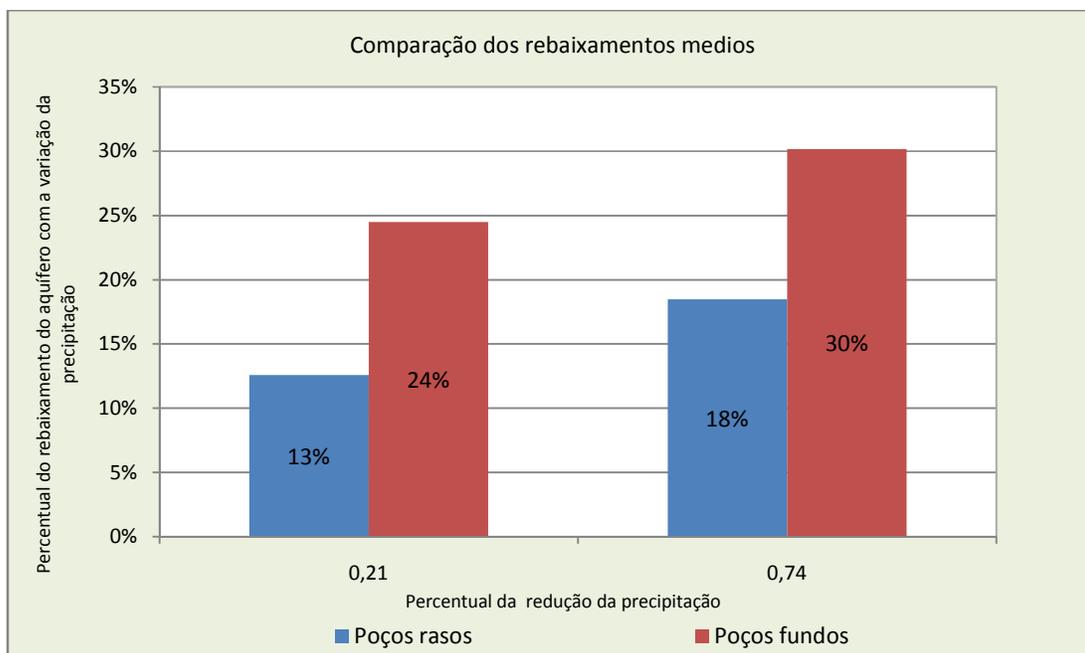


Figura 54: Verificação do rebaixamento médio do aquífero após a simulação.

5.8 - Aplicação do MODFLOW para a simulação do comportamento do fluxo no aquífero

Com o objetivo de simular o comportamento do fluxo no aquífero, em função das características hidrogeológicas e em função das leituras piezométricas, foi utilizado o modelo matemático MODFLOW. Assim a principal estratégia escolhida para se fazer tal análise é a calibração do modelo para o regime estacionário, devido ao curto período de observação dos dados, assim as análises aqui feita consistiu apenas na calibração do modelo, para um único período que tínhamos de dados para todos os poços de observação. A vantagem, deste procedimento é o da obtenção de uma análise global que facilitarão a calibração de análises futuras do modelo em regime transiente.

5.8.1 - Fases da modelagem e definição dos dados para calibração do modelo

Como já exposto anteriormente, as campanhas de monitoramento para o presente estudo ocorreu durante um período de 10 meses de observação. Durante este período,

podemos englobar quase todo o comportamento de um ano hidrológico para a região em estudo. Nesta etapa, verificamos que a maioria dos poços secaram durante o período de estiagem, voltando a ascensão do nível com a chegada do período chuvoso. Assim sendo, apenas para o mês de maio (que é o mês considerado como o início do ano hidrológico da região) é que conseguimos a obtenção dos dados referentes a todos os poços inseridos no estudo.

Logo após a escolha do mês utilizado na calibração do modelo, a fase seguinte consistiu no processo de modelagem propriamente dito. Esta obedeceu a seguinte seqüência: criação da malha para a representação da área, seguida da aplicação dos parâmetros observados durante as campanhas de campo, aplicação das condições de contorno ou seja, a definição das células que iriam permanecer ativas ou inativas durante a modelagem. A partir daí, iniciou-se o processo de calibração do modelo, no qual as únicas variáveis a serem ajustadas seriam os parâmetros físicos do aquífero, já que estes são os que apresentam um maior grau de incertezas. A seqüência desse processo é representado na Figura 55.



Figura 55: Etapas da modelagem do fluxo do aquífero

5.8.2 - O resultado da calibração do modelo

O modelo de fluxo foi calibrado inicialmente para os valores dos parâmetros físicos para o qual os valores da carga hidráulica calculadas pelo modelo se aproximassem dos valores obtidos nas campanhas.

Para a calibração do modelo, foi considerado que o fluxo existente na presença do açude era nulo, havendo assim a necessidade de desativar as células referentes ao açude. Outra consideração importante no processo de calibração foi a tomada de uma área de maiores proporções, para evitar as possíveis interferências das condições de contorno na situação estudada.

Após este processo de calibração, e para as condições adotadas, foi obtido um ajuste da função com um coeficiente de correlação de 0,91 para o período calibrado.

Verifica-se também que a maioria das observações está dentro do intervalo de confiança para a linha de regressão dos dados, o que é representado pela linha pontilhada em vermelho. Já quando se considera o intervalo de confiança dos valores previstos (linha pontilhada em azul), este número de observações aumenta para esta faixa considerada chegando a um total de 93,3% das observações estiveram dentro de um intervalo de confiança de 95%, conforme apresentado na Figura 56.

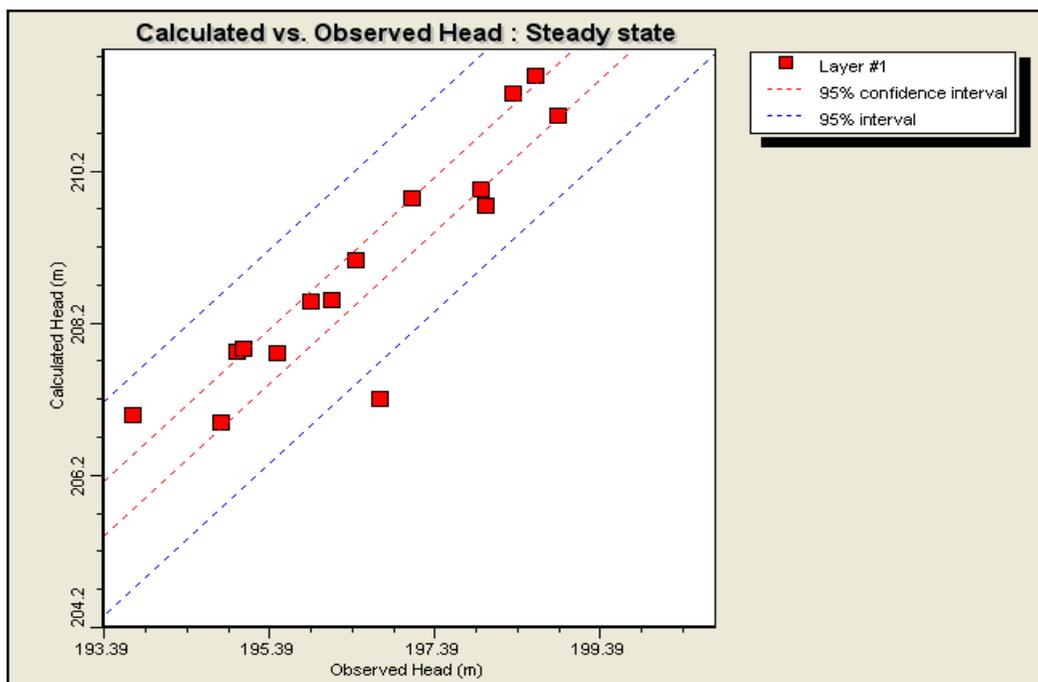


Figura 56: Resultado gráfico da calibração do modelo.

As maiores dificuldades encontradas durante a calibração foi a ausência de dados mais precisos referentes principalmente aos dados físicos do aquífero, já que estes parâmetros são de grande variabilidade. De qualquer forma, o resultado dessa calibração teve um bom nível de aceitação em termos matemáticos.

5.8.3 - Análise das linhas de fluxo para o modelo calibrado

Na Figura 57, pode observar o mapa referente a calibração do modelo em regime estacionário, bem como as linha de fluxo subterrâneo para a área em estudo. Nesta, é

mostrada as equipotenciais e os vetores de velocidade com as direções e sentidos de fluxo no aquífero para o mês que o modelo foi calibrado.

Com a calibração do modelo, verifica-se a predominância do fluxo no sentido sudeste-nordeste, convergindo este para o sentido do exultório da bacia. Verifica-se também que a direção regional do fluxo é compatível com o modelo idealizado para o sistema, ou seja, o traçado dos vetores velocidade mostra que o sentido do fluxo tende a seguir no sentido do rio principal o que está coerente com as linhas de fluxo obtidas com a confecção dos mapas potenciométricos elaborado para o mês para o qual foi calibrado o modelo (Figura 45). Como na região os rios são intermitentes, e conforme identificado com o monitoramento verifica-se que há uma recessão do nível do aquífero, até a secagem completamente de alguns poços, com a chegada do período chuvoso, o aquífero apresenta a configuração acima apresentada, podendo-se dizer que para este sistema é o rio que alimenta o aquífero.

Pode-se assim concluir que a calibração do sistema para o modelo permanente apresenta uma boa correlação nas análises do fluxo. No entanto, a análise também para o fluxo transiente deve ser analisada para uma melhor caracterização da área em estudo, necessita-se para isso de um maior período de monitoramento.

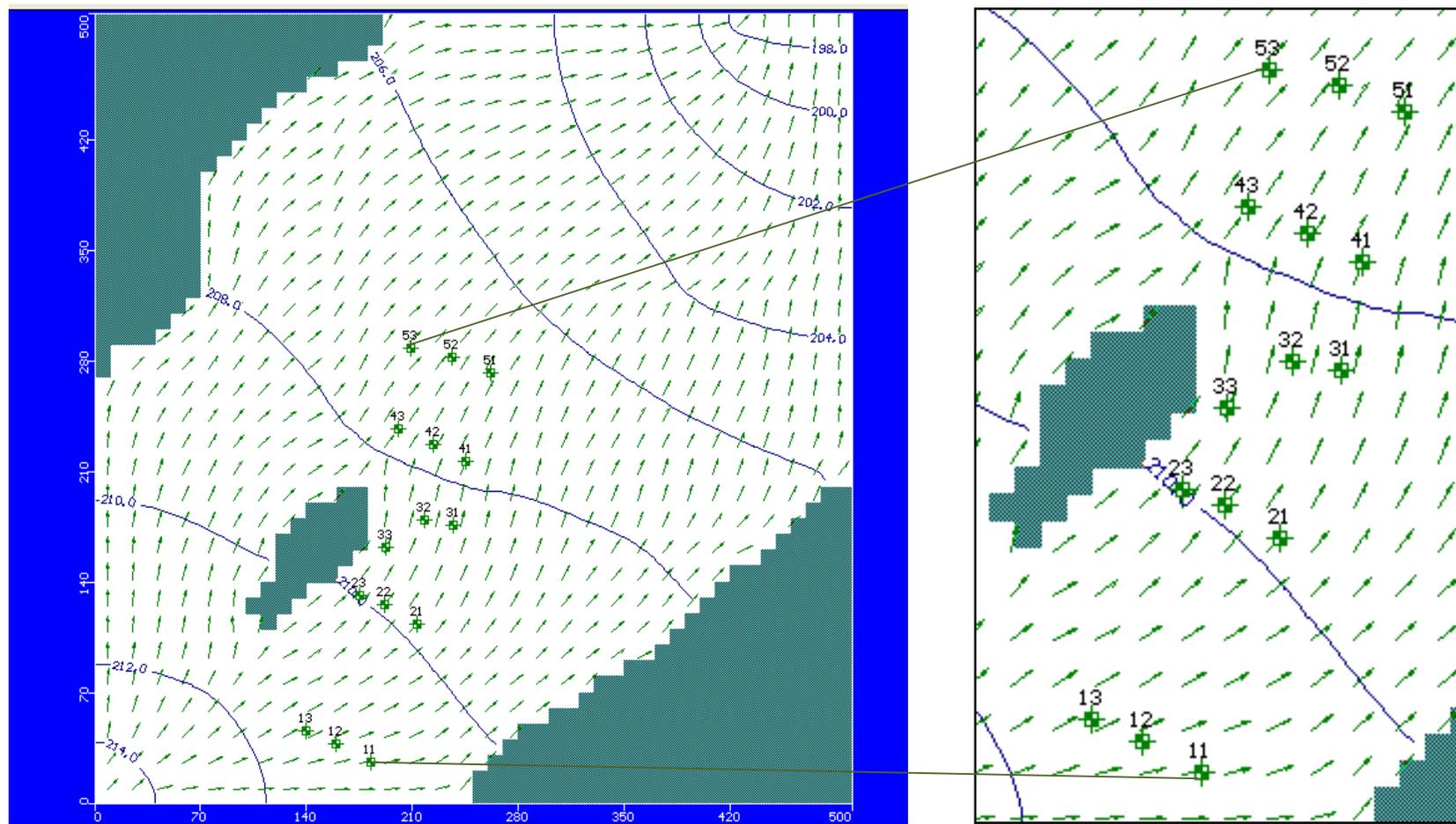


Figura 57: Linhas de fluxo do aquífero

Capítulo 6

6 - Conclusões e Recomendações

A partir dos resultados obtidos no monitoramento dos processos considerados nesse trabalho e das análises dos modelos desenvolvidos, foi possível fazer as seguintes considerações:

➤ Quanto ao Projeto BEER

Com relação aos objetivos propostos pelo BEER o monitoramento e modelagem dos pequenos aquíferos aluviais se apresenta como um importante elemento a ser analisado, considerando suas potencialidades e as importantes demandas que são verificadas no semi-árido.

➤ Quanto à composição granulométrica e características do aquífero estudado

Através da caracterização obtida verifica-se que trata-se de um aquífero livre, com características bastante heterogêneas no que se refere a sua constituição; a sua formação é típica de áreas aluviais, a sua espessura média situa-se em torno da espessura observada em outras áreas da bacia para este mesmo tipo de aquífero.

Embora a camada superior do aquífero favoreça a infiltração, o processo de recarga fica condicionado às taxas de precipitações que precisam ser bastante superior para vencer a deficiência de água existente no solo durante o período de estiagem.

Considerando a condutividade hidráulica obtida para cada piezômetro, verifica-se um fluxo de velocidade lenta e uma porosidade efetiva muito baixa, o que mostra que a área em que se situa este aquífero favorece ao armazenamento, sendo as barragens subterrâneas uma boa alternativa para o local.

➤ Quanto aos processos hidrológicos analisados

Na análise dos processos hidrológicos, verifica-se que os meses de setembro a fevereiro são os meses mais críticos para a região, com um déficit hídrico em alguns meses, chegando a 200 mm devido às altas taxas de evaporação. Contudo, apesar de ser um modelo empírico este reflete bem as condições locais, concordando com informações de outras fontes, como Ribeiro (2007), quando trata das características do semi-árido.

Nesse mesmo período verifica-se que a maioria dos piezômetros secaram. Apenas 2 permaneceram com água, o que pode, inicialmente, ser explicado pela existência de um açude nas proximidades desses dois poços, a esquerda da área em estudo. E pelo comportamento similar dos poços (através da matriz de correlação), esta hipótese fica ainda mais reforçada.

Ainda de acordo com o balanço hídrico realizado, verifica-se que a taxa média de recarga é cerca de 27,5% da precipitação, situação esta agravada pelas altas taxas de evaporação na região.

➤ Quanto à função explicativa do sistema em estudo

Quanto à função explicativa que relaciona os nível de água com a precipitação e demais fatores verifica-se que:

- De certa forma esta representa bem a realidade local, já que basicamente o fator primordial da recarga do aquífero é a precipitação. Esta mostrou que o nível de água rebaixa ao longo do período seco (setembro a fevereiro) e ascende no período tido como chuvoso (março a agosto).
- No caso simulado, fica evidente que a precipitação e a evaporação são os fatores que mais contribuem na dinâmica do fluxo do aquífero da região. Contudo, cabe salientar que não se pode desconsiderar as características hidrogeológicas do aquífero para um perfeito entendimento da dinâmica do comportamento deste aquífero.
- O agrupamento dos poços de acordo com o nível de rebaixamento para o ajuste do modelo foi devido à similaridade de comportamento observado

com o monitoramento dos piezômetros, visto que, basicamente, cada grupo tem comportamento e características semelhantes.

- O modelo foi desenvolvido numa faixa de rebaixamento e/ou ascensão de nível observado, em função das características do aquífero em estudo, não sendo, ainda, testado para valores fora desta faixa.

➤ Quanto a potenciometria da área em estudo

Com relação aos mapas potenciométricos, nota-se que nos meses mais secos, as linhas de fluxo se comportam de forma aleatória, com algumas tendências voltadas para aqueles poços que se mantiveram constantes ao longo do tempo. E, para os períodos mais chuvosos, o sentido do fluxo obedece ao sentido global da direção do sistema.

➤ Quanto ao modelo MODFLOW aplicado

Com base nas análises de seu comportamento verifica-se que o padrão de fluxo geral é basicamente derivada da influência das precipitações, sendo esta de forte influência na potenciometria da área em estudo. A falta de um período mais longo de observação foi a principal dificuldade encontrada durante a calibração do modelo.

Apesar das dificuldades observadas o modelo respondeu adequadamente com um intervalo de confiança de quase 95% obtido na calibração, para quase todos os valores analisados. Para uma melhor caracterização da dinâmica do fluxo da região em estudo seria necessária também a calibração do modelo para um regime transiente.

De um modo geral, o resultado obtido com a simulação mostra o comportamento do aquífero e a coerência entre as linhas de fluxo e a direção do rio principal da área em estudo.

Recomendações

Verifica-se a necessidade de um maior período de monitoramento de forma que se construa um conjunto de modelos que permitam a visualização global da dinâmica de fluxo subterrâneo para a região.

É necessário também uma área maior de abrangência para o monitoramento dos piezômetros numa área com uma maior distribuição espacial e em menor intervalo de tempo na região, aliado a instalação de outros instrumentos de monitoramento dos processos hídricos pela área em estudo.

Deve-se também realizar novas campanhas de campo para uma melhor e maior caracterização da constituição hidrogeológica do aquífero.

Diante da variabilidade dos processos hídricos, é conveniente que haja um maior período de monitoramento do açuete juntamente com os níveis piezométricos, para verificar a relação existente entre estes parâmetros, já que neste até o final dessa pesquisa, tínhamos poucos dados referentes a esse sistema, de modo que estes não puderam ser acrescentados ao estudo. Devido as condições naturais da região, essa interação deve ser verificada de forma mais detalhada, de modo que possa haver um maior aproveitamento de áreas com tais características na região.

De um modo geral salienta-se que esse estudo é apenas uma análise preliminar já que os processos hidrológicos são bastante variados no tempo e no espaço. Neste trabalho observa-se que as informações obtidas são poucas para qualquer conclusão de forma definitiva, sendo necessário um maior número de observações que não foram possíveis durante a pesquisa, devido ao tempo disponível para a finalização da mesma. Porém, o processo de monitoramento deste deve ser contínuo para dar embasamento a estudos futuros. Espera-se, no entanto que este trabalho possa servir de ponto de partida para o conhecimento das potencialidades dos recursos hídricos dos aluviões no semi-árido alagoano.

Capítulo 7

7 - Referências Bibliográficas

ATLAS DO NORDESTE 2005 – Disponível on-line em:
http://parnaiba.ana.gov.br/atlas_nordeste. Acesso no dia: 20/03/2007.

ARANTES, E. J. 2003 - Emprego de Infiltrômetros na Caracterização da Interação entre Rio e Aquífero. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 88p.

BAHIA, V. E; FENZL, N; MORALES, P. G. 2006 – Estudo hidrogeológico e hidrogeoquímico da área localizada entre depósito de Lixo Metropolitano de Belém (AURÁ) e o lago Água Preta. Revista Geochimica Brasiliensis. V.20, n.3, p.295-311,out/2006.

BARRETO, C. E. A. G. 2006 – Balanço Hídrico em Zona de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de Monitoramento em Bacia Representativa. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 271p.

BEZERRA, N. F. 2002 – Água no Semi-Árido Nordeste: Experiências e Desafios. Água e Desenvolvimento Sustentável no Semi-Árido. Fundação Konrad Adenauer, Série Debates, nº 24, dezembro de 2002.

BRASIL, 2005 - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. Nova Delimitação do Semi-Árido brasileiro. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional Brasília, DF.

- CABRAL, J. J. S. P; FERREIRA, J. P. C. L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COSTA, W. D. 2004. *Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento*. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2004. 447p.
- CAICEDO, N. L. 2000. *Água Subterrânea*, In: Tucci, C. E. M, (org.). *Hidrologia Ciência e aplicação*, Ed. Universidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ABRH, Porto Alegre.
- CARVALHO, T. L. L. 2004. *Aplicabilidade de Barragens Subterrâneas no Semi-Árido Alagoano*. Universidade Federal de Alagoas. Trabalho de Conclusão de Curso, Maceió-AL, 108p.
- COTA, S. D. S. 2000. *Modelagem da contaminação de aquíferos livres por NAPLs residuais na zona insaturada*. Tese (Doutor em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CPRM. 2003. *Programa de água subterrânea para o semi-árido brasileiro*. Disponível on-line em: <http://proasne.net/PARSNEFinal.pdf>. Acesso em 25/03/2007
- DOMENICO, P. A; SCHWARTZ F. W. 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology*, Ed. John Wiley & Sons., 2ª edição.
- DRAPER, N; SMITH, H. 1966. *Applied Regression Analysis*. Jonh Wiley & Sons, Inc. New York-London – Sydney.
- FEITOSA, F. A. C; MANOEL, F. J. 1997. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. Fortaleza, CPRM, Laboratório de Hidráulica -UFPE.
- HIDROWEB (2008) - Disponível online em: <http://hidroweb.ana.gov.br>. Acesso em 12/2008.

- HVORSLEV, M. J. 1951. Time lag and soil permeability in ground water observations. Buletin Army Corps of Engineers Waterway Experimentation Station, U.S. n. 36, 1951.
- IICA, 2007. Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura. Plano de Integração das Bacias Hidrográficas de Alagoas. Aproveitamento das infra-estruturas existentes, irrigação e abastecimento da zona semi-árida estadual. Estudos de consultoria HIDROCONSULT e COHIDRO. 03/ 2007.
- IBGE (2007). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível online em : http://www.ibge.gov.br/mapas_ibge/pol.php . Acesso em: 08/05/2008
- KHAZAEI, E, SPINK, A. E. F, WARNER, J. W. 2003. A catchment water balance model for estimating groundwater recharge in arid and semiarid regions of south-east Iran. Hydrogeology Journal.
- LIMA, H. M. F, MATA, I. P, LIMA, A. V. F. 2005. Aplicação e Validação de um Simulador Estocástico de Variáveis. O caso da precipitação. Ingenieria Del Agua. Vol.12, Nº1, Março 2005.
- LOPES, O. F, SANTOS, J. C. P, BARROS, A. H. C. 2005. Diagnóstico ambiental do Município de Santana do Ipanema, Alagoas – Rio de Janeiro. Embrapa Solos . Boletim de pesquisa e desenvolvimento n.76, 12/2005, 150 p.
- LOPES, V. L, ANDREASSIAN, V. P, ANDRADE, E. M. 1999. Análise Comparativa do Comportamento de Bacias sob Clima Tipo Mediterrâneo. – Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Vol.4, nº1, Jan/Mar. 1999, p.49-56.
- LOUSADA, E. O, CAMPOS, J. E. G. 2006. Correlação entre Precipitação e Piezometria em Aquíferos Freáticos: Implicações para o planejamento dos Recursos Hídricos da bacia do Rio Jardim – DF. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH). Vol.11, nº4, Out/Dez. 2006, pgs, 37-46.

- MCDONALD, M. C, HARBAUGH. A. W. 1988. MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey, Open-file report 91-536, Denver.
- MENESCAL, G. C, CASTRO, M. A. B. 2004. Aplicação de um Modelo Computacional no Estudo do Comportamento do Fluxo de Água Subterrânea em Aquíferos Livres. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz/MA. Novembro, 2004.
- MOBUS, G, LÚCIO, J. B, LIMA, Y. C. P, SILVA, R. G. 2007. Análise Regional de Aquíferos Aluviais. Um Estudo de caso: Região de Itapiuna-CE. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007.
- MONTEIRO, N. B, 1997. Modelamento Matemático para a Simulação do Fluxo Subterrâneo no Aquífero Aluvial no Semi-árido de Santa Luzia – PB. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de Ciências e Tecnologia. 75p.
- MONTENEGRO, A. A. & MONTEIRO, A. N. 2004. Avaliação Hídrica de Aquífero Aluvial Através de Simulação Computacional. VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz / MA, Novembro de 2004.
- MONTENEGRO, A. A. A, MONTENEGRO, S. M. G. L, LEAL, I.G, NASCIMENTO, J.J, ARAÚJO, T. C. 2002a. Análise da Recarga de Origem Pluviométrica e sua relação com a salinidade da Água de Aquífero Aluvial no Semi-Árido do Nordeste Brasileiro. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió/Al, Novembro de 2002.
- MONTENEGRO, A. A de A, MONTENEGRO, S. M. G. L, OLIVEIRA, O. F. 2002b – Salinidade da água de aquífero aluvial sob o uso agrícola no Agreste do Estado de Pernambuco: Variabilidade espacial e sazonal. VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Maceió/Al, Novembro de 2002.

- NAGHETTINI, M, PINTO, E. J. A. 2007. Hidrologia Estatística. Serviço Geológico do Brasil. CPRM. Belo Horizonte. 600 p.
- OLIVA, A., KIANG, C. H, CHANG, M. R. C. 2005. Determination of Hydraulic Conductivity of the Rio Claro Formation: Comparative Analysis Through Grain Size Analyses and Guelph Permeameter and Slug Tests. Revista de Águas Subterrâneas, Volume 19, nº2, p.1-17.2005
- PEREIRA, A. R, ANGELOCCI, L. R, SENTELHAS, P. C. 2002. Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas. Guaíba, 2002. 478p.
- RIBEIRO, M. B. 2007. A Potencialidade do Semi-árido Brasileiro. O rio São Francisco Transposição e Revitalização – Uma Análise. Editora Revan. Brasília 256p.
- ROLIM, G. S, SENTELHAS, P. C.1998. Balanço Hídrico Normal por Thornthwaite & Mather (1955), Piracicaba. ESALQ. 1998. CD-ROM.
- SILVA, F. F. 1998. Investigação e Modelamento do fluxo subterrâneo em aquífero aluvial no Semi-Árido da Paraíba. Universidade Federal da Paraíba. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências e Tecnologia. 99p.
- SILVA, O. J. 2004. Captação de Águas Pluviais Na Cidade De Campina Grande – PB: Alternativa para uma Política de Enfrentamento da Escassez de Água nas Escolas Públicas. Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual da Paraíba – UEPB. Dissertação de Mestrado,121p.
- SUDENE (2005) - O Semi-Árido do Nordeste e o Polígono das Secas. Disponível online em: <http://www.sudene.gov.br/nordeste/Semi-àrido.html> e Acesso em 15/03/2007.
- SURFER, 8.0. Contouring, Gridding, and Surface Mapping Package for Scientists and Engineers, 2002. Disponível online em: <http://www.goldensoftware.com>.

TUCCI, C. E. M. 1993. Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre. Ed. da UFRGS - ABRH - EPUSP. 1993 .Coleção ABRH de Recursos Hídricos. vol 4.

TUCCI, C. E. M. 2005. Modelos Hidrológicos. 2ª Edição. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre

VASCONCELOS, S. M. S. 2005. Avaliação da Recarga Subterrânea Através da Variação do Nível Potenciométrico no Aquífero Dunas/Paleodunas, Fortaleza, Ceará. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 10, nº2. Abr/Jun, 2005. p.49-57.

VIEIRA, L. J. S. 2002. Emprego de um Modelo Matemático de Simulação do Fluxo Subterrâneo para Definição de Alternativas de Exploração de um Aquífero Aluvial. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de Ciências e Tecnologia. 94p.

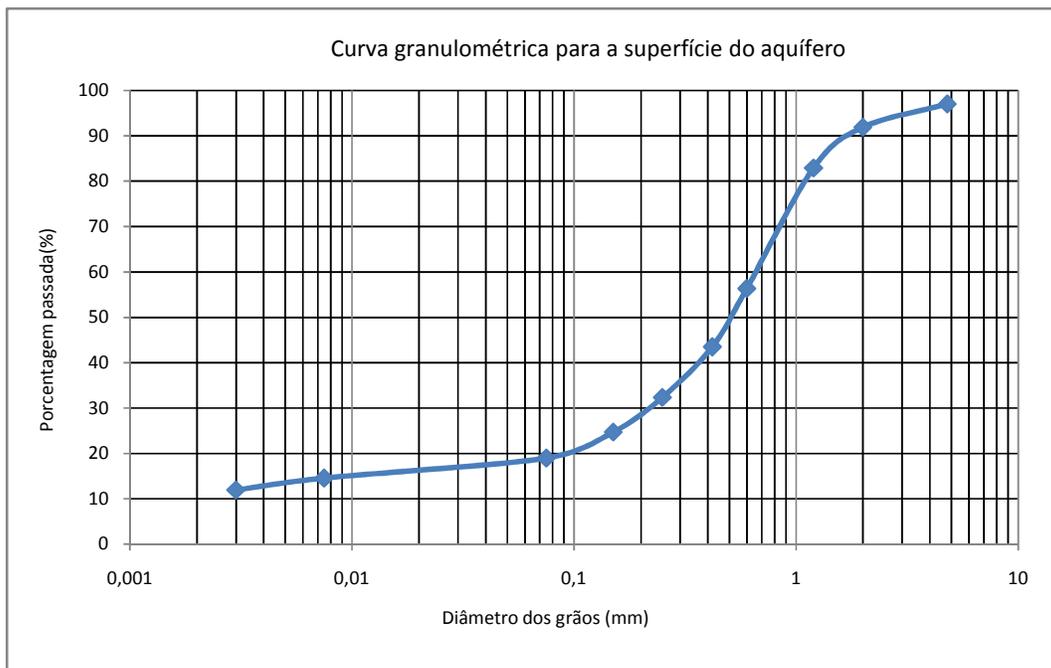
VILLELA, S. M, MATTOS, A. 1975. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw- Hill, 1975. 245p.

WENDLAND, E. 2003. Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas. Minicurso do XXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. São José do Rio Preto, SP.102p.

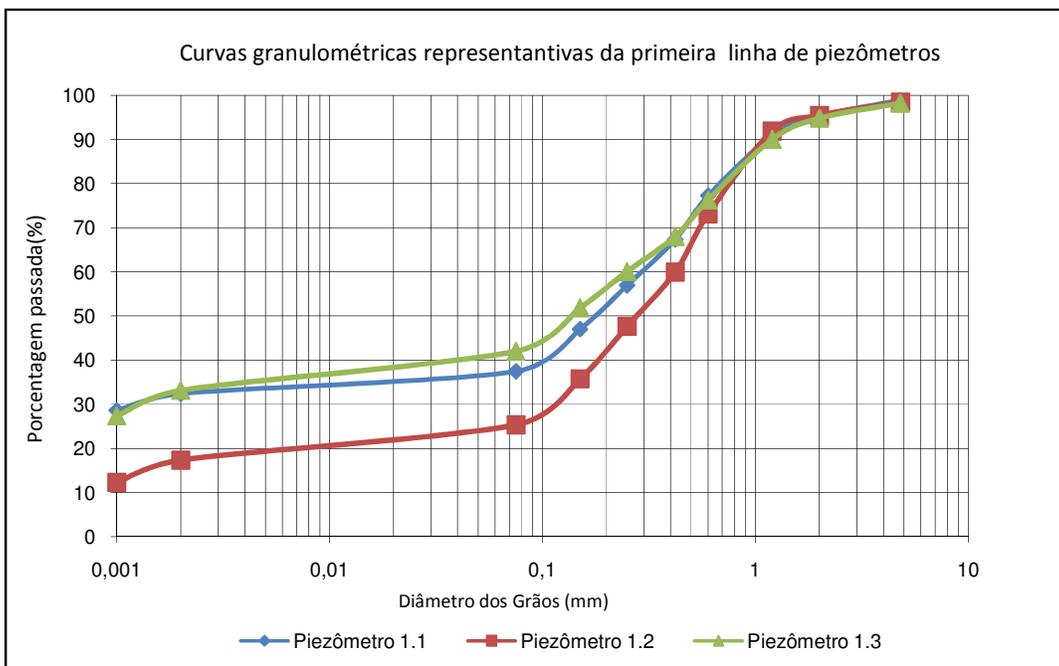
ZACHARIAS, A. O. 2007. Modelo Agrometeorológico de Estimativa do Início da Florada Plena do Cafeeiro (*Coffea arábica* L.). Dissertação de Mestrado. Instituto Agronômico. Campinas, SP. 217p.

ANEXOS A: Curvas granulométricas para os piezômetros

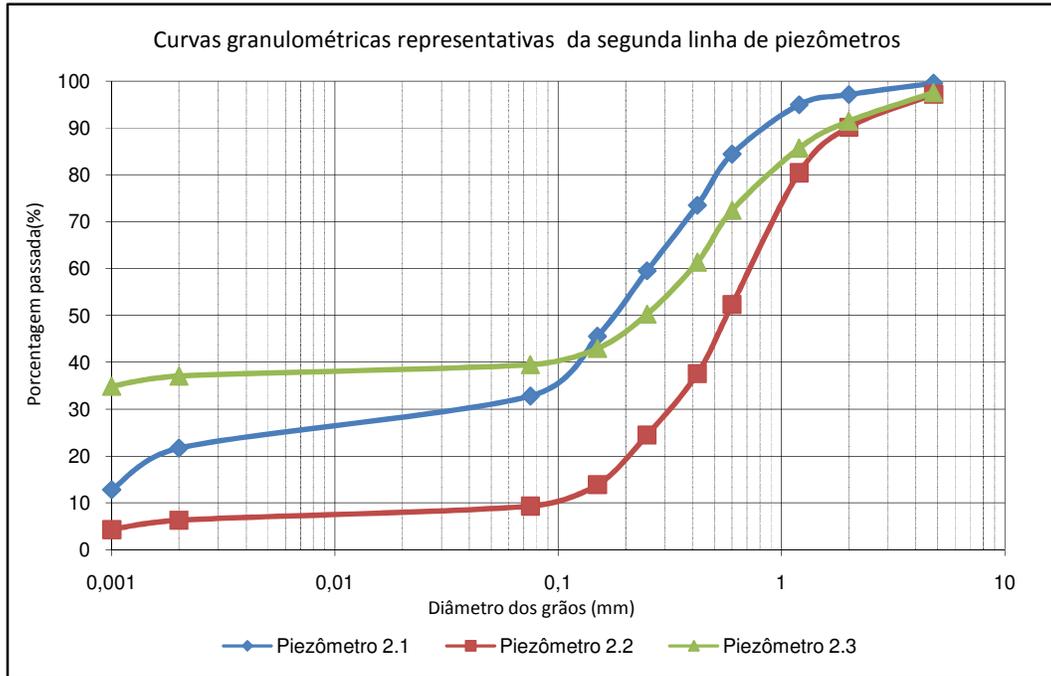
Constituição granulométrica da superfície do aquífero



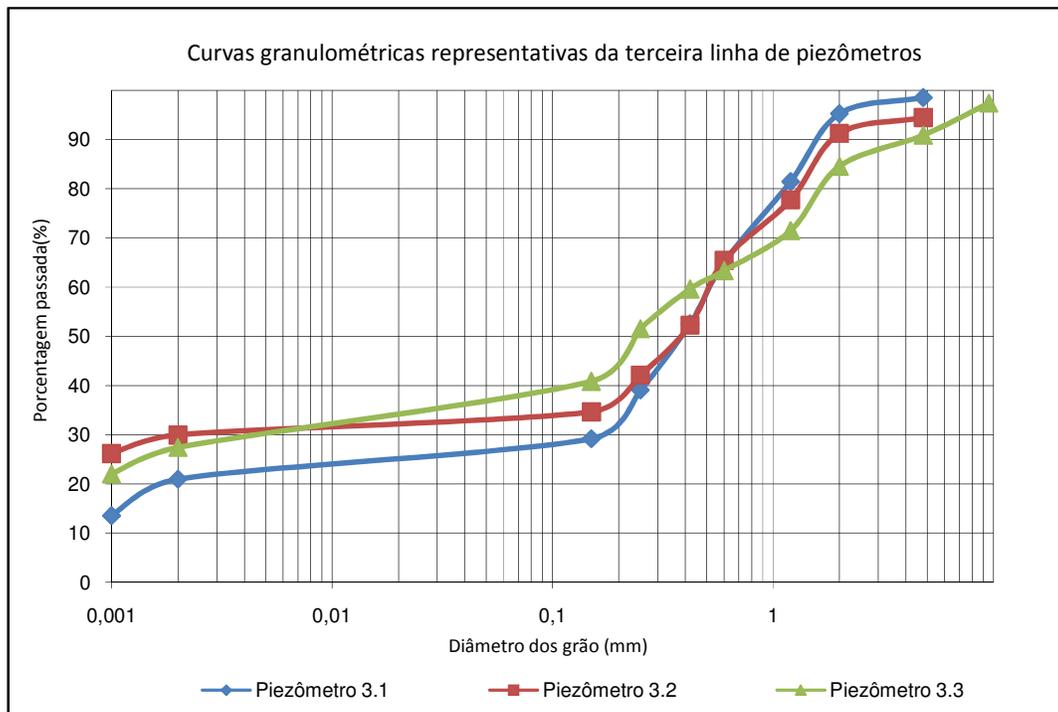
Curva granulométrica para a primeira linha de piezômetros



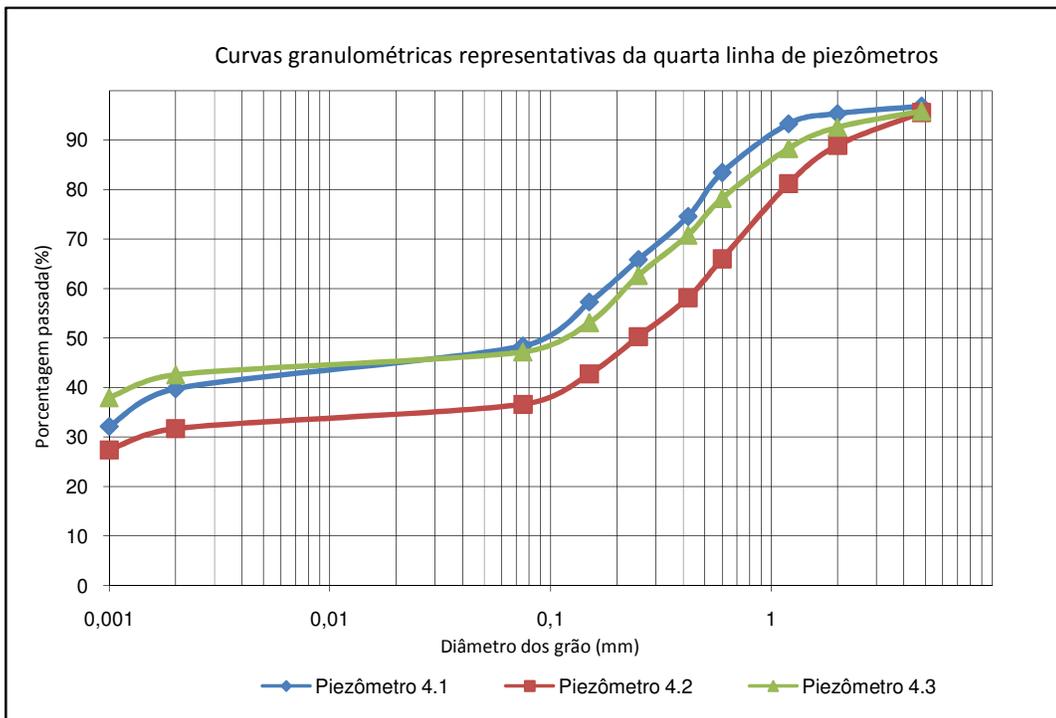
Curva granulométrica para a segunda linha de piezômetros



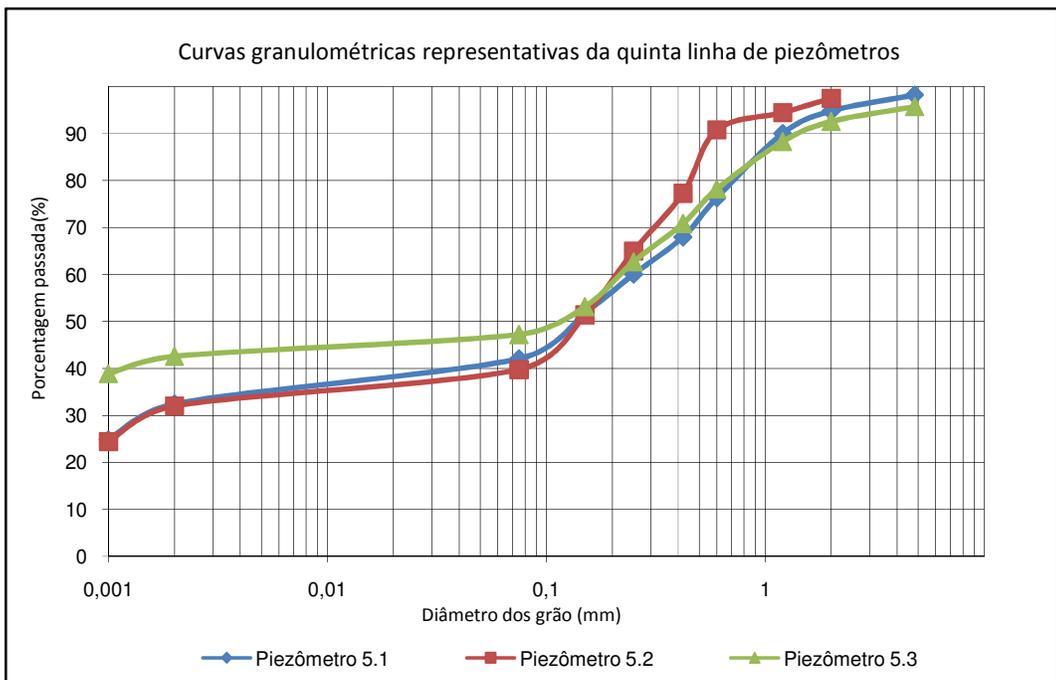
Curva granulométrica para a terceira linha de piezômetros



Curva granulométrica para a quarta linha de piezômetros

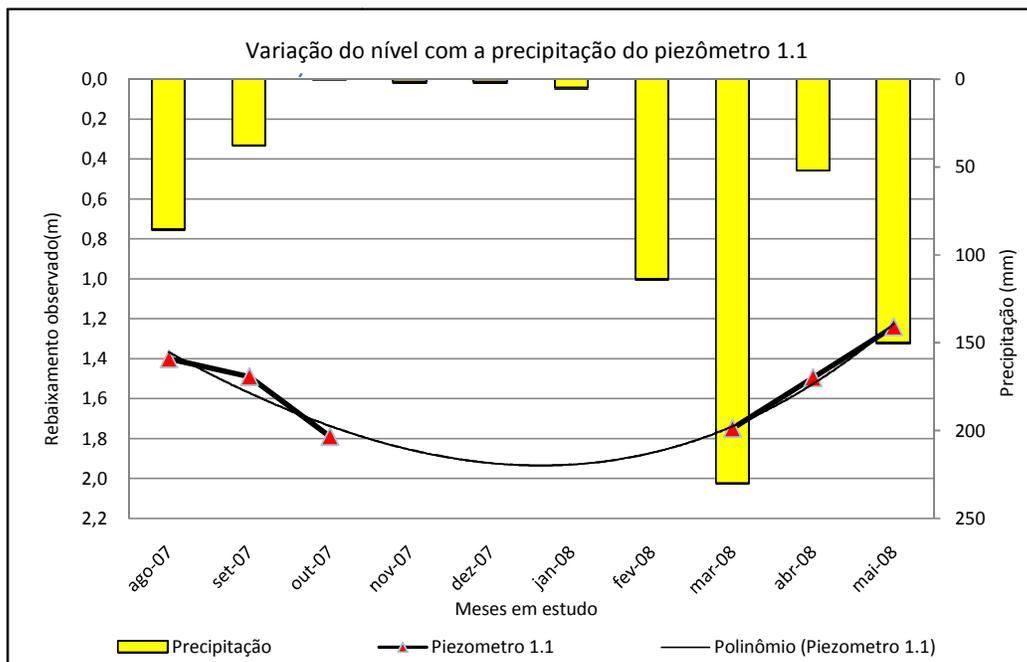


Curva granulométrica para a quinta linha de piezômetros

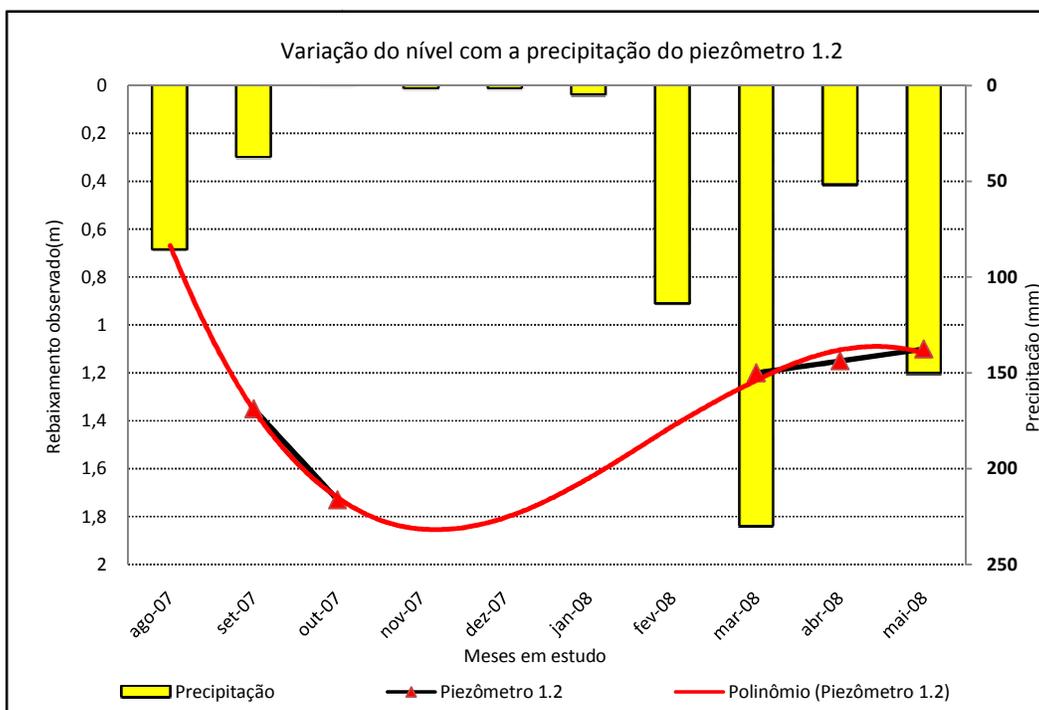


ANEXOS B: Variações dos níveis piezométricos

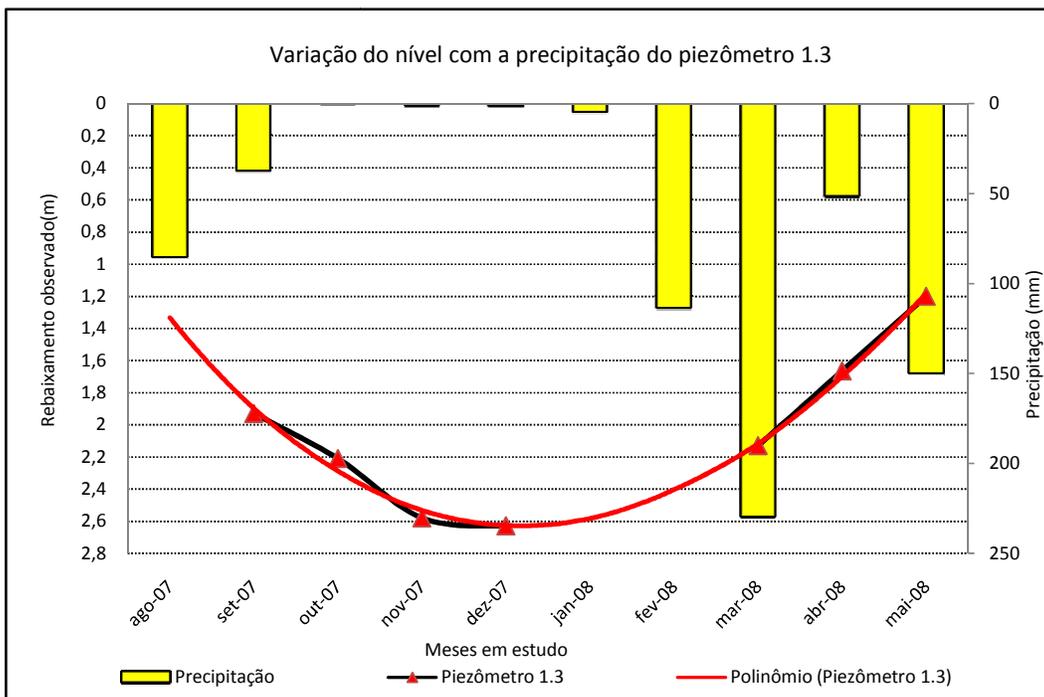
Variação do nível freático do piezômetro 1.1



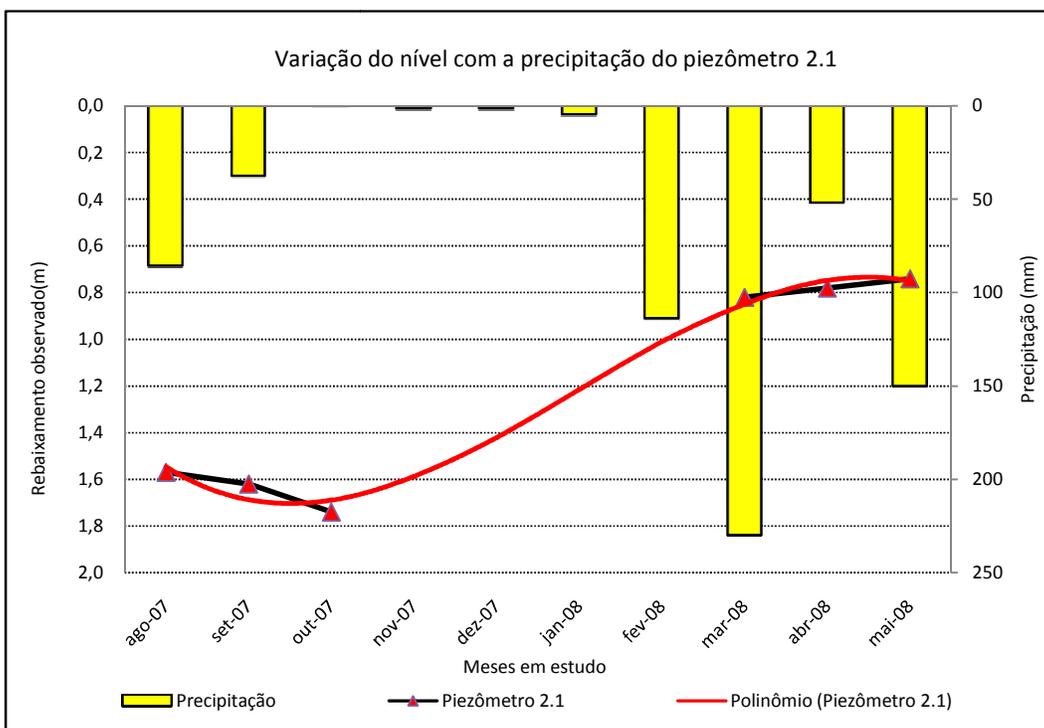
Variação nível freático do piezômetro 1.2



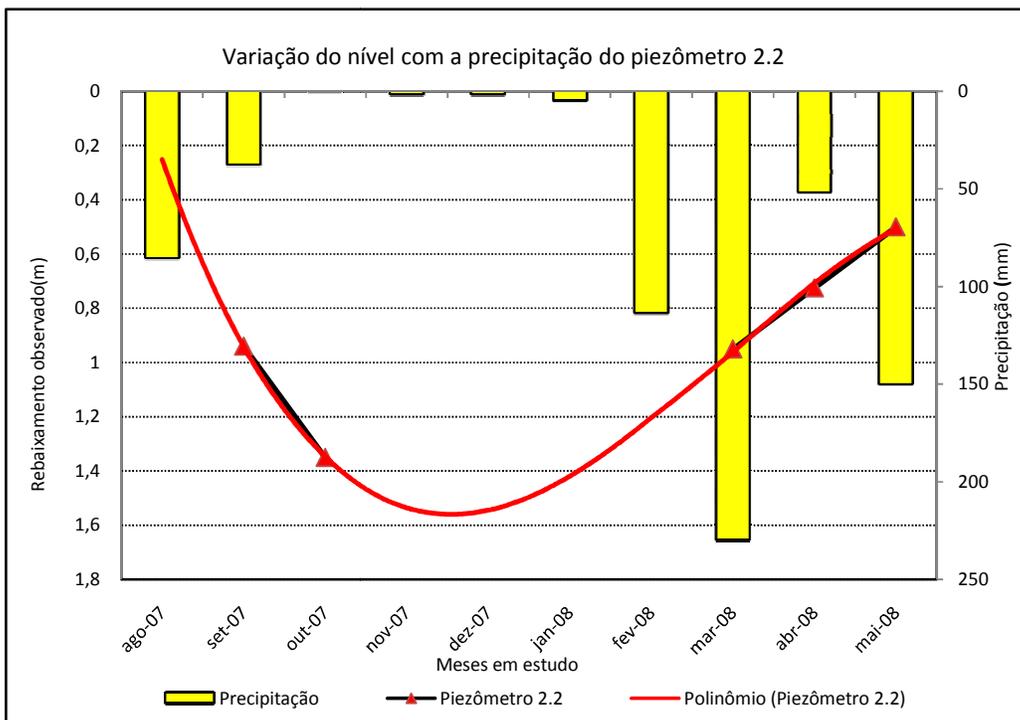
Varição nível freático do piezômetro 1.3



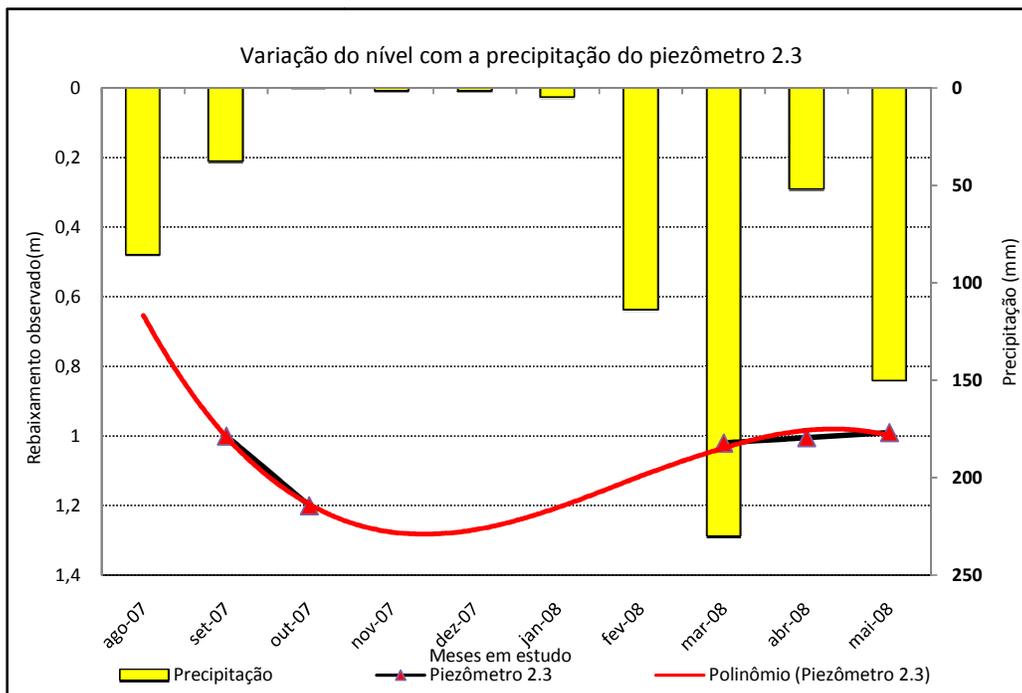
Varição nível freático do piezômetro 2.1



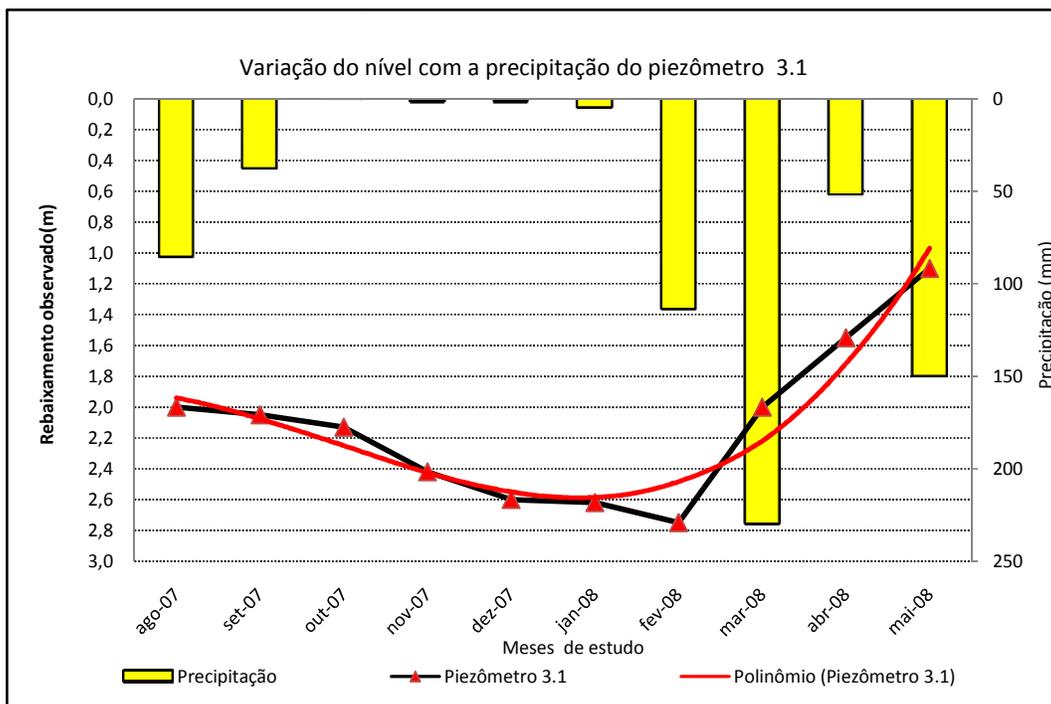
Varição nível freático do piezômetro 2.2



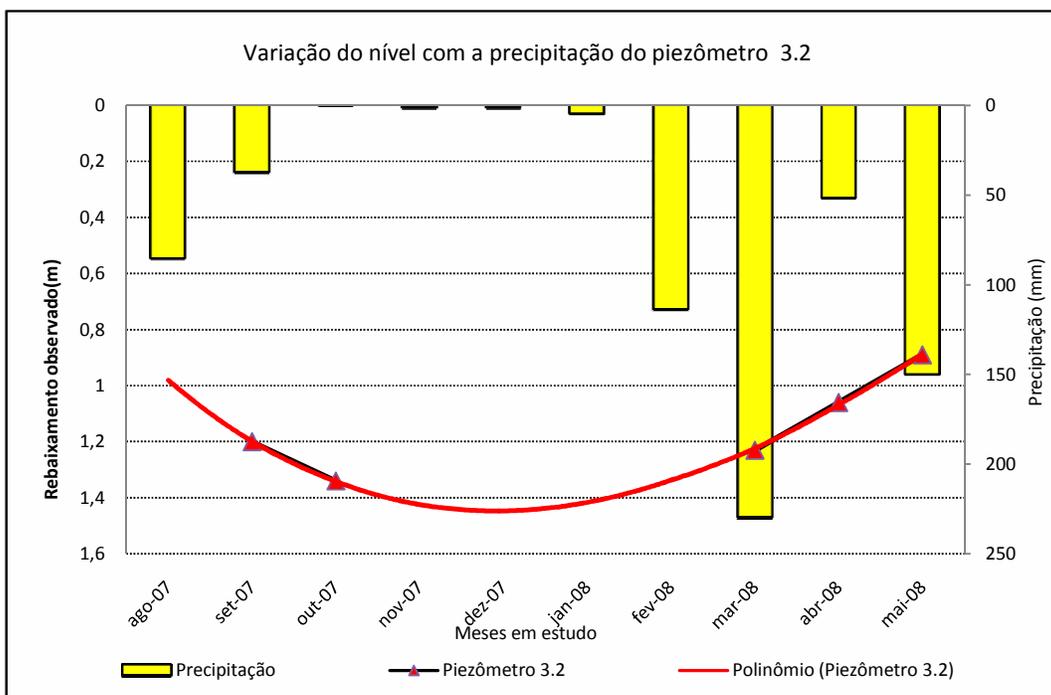
Varição do nível freático do piezômetro 2.3



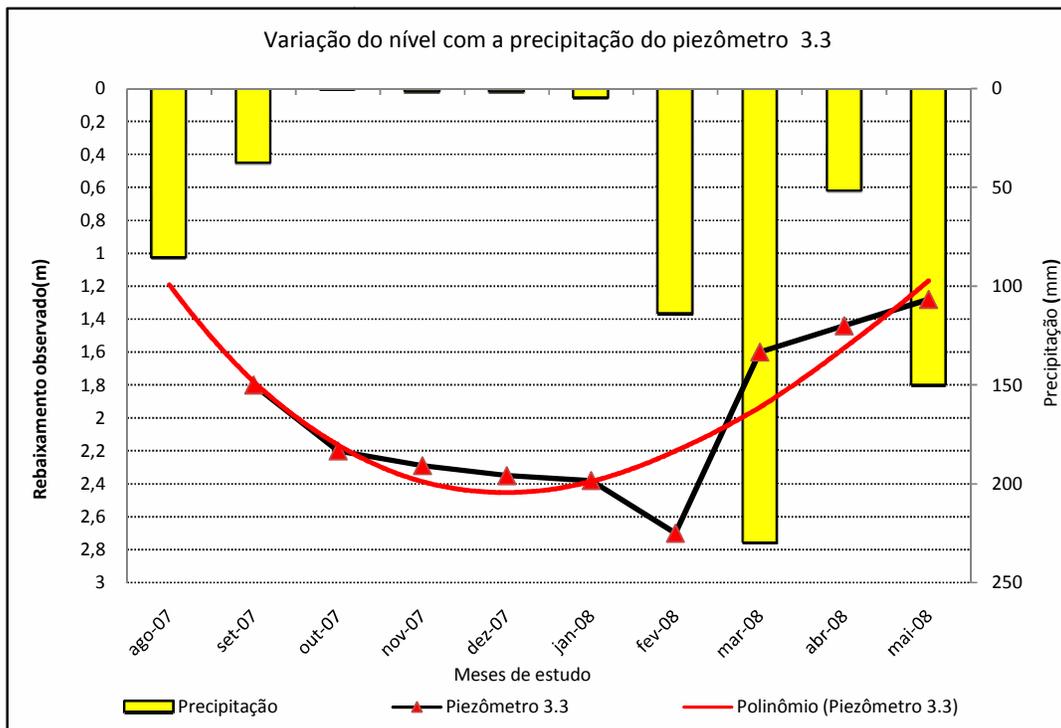
Varição nível freático do piezômetro 3.1



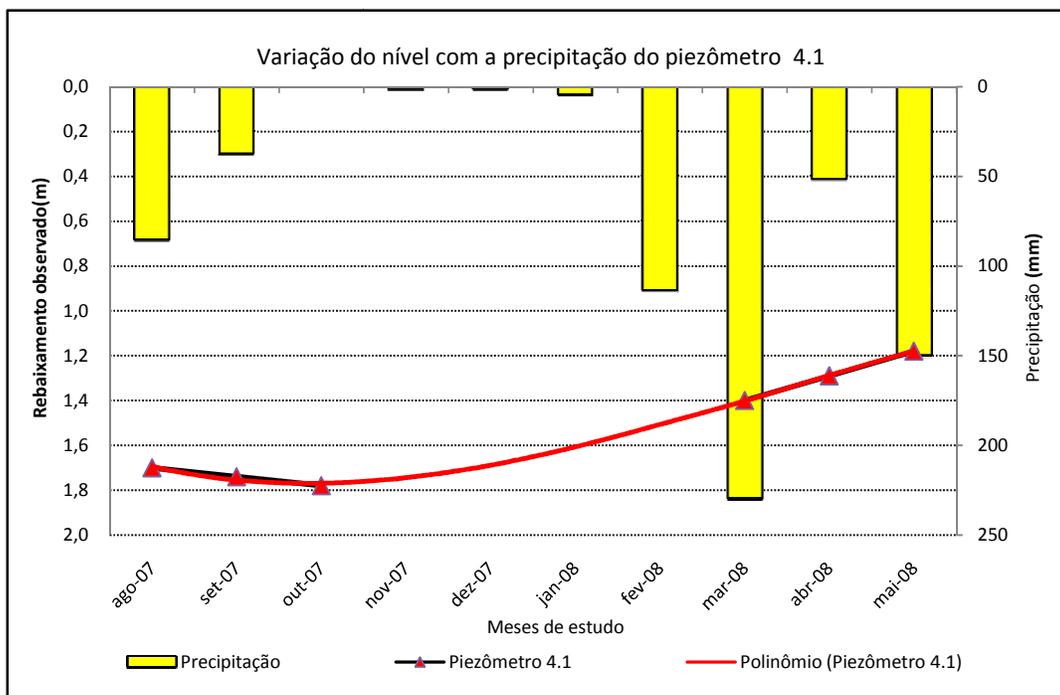
Varição nível freático do piezômetro 3.2



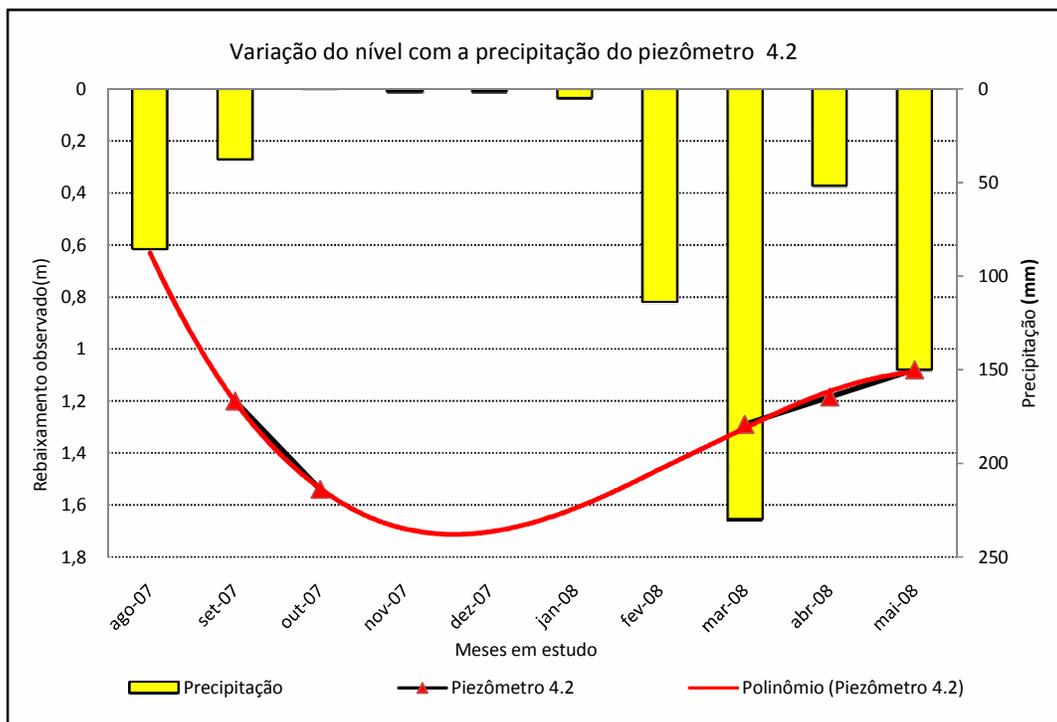
Varição nível freático do piezômetro 3.3



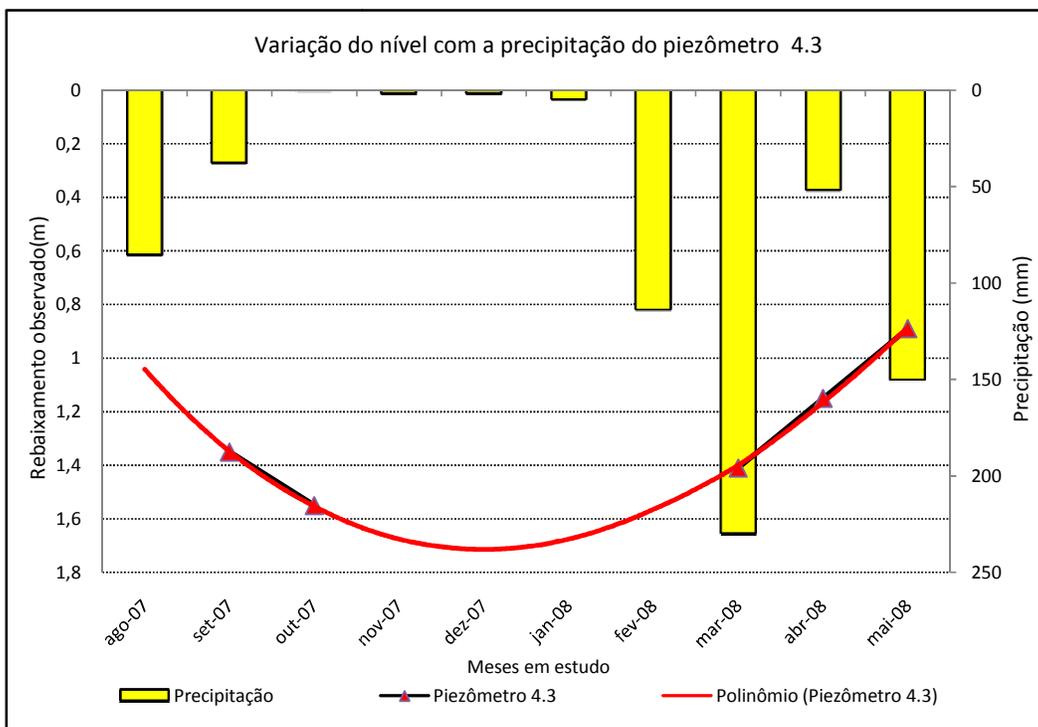
Varição nível freático do piezômetro 4.1.



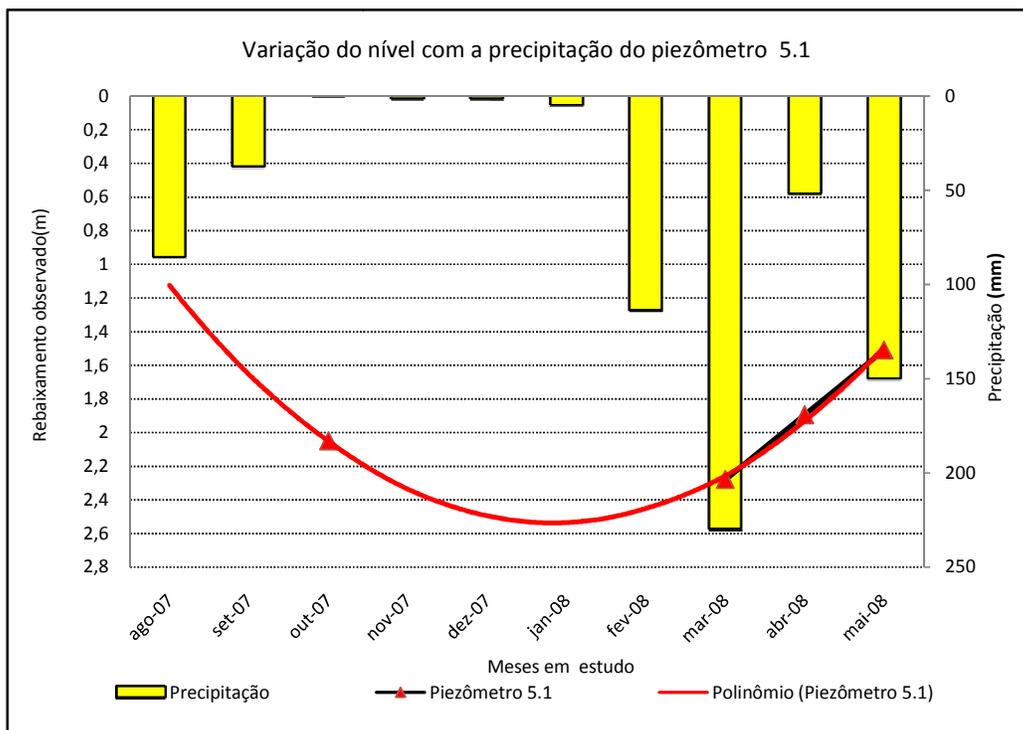
Variação nível freático do piezômetro 4.2.



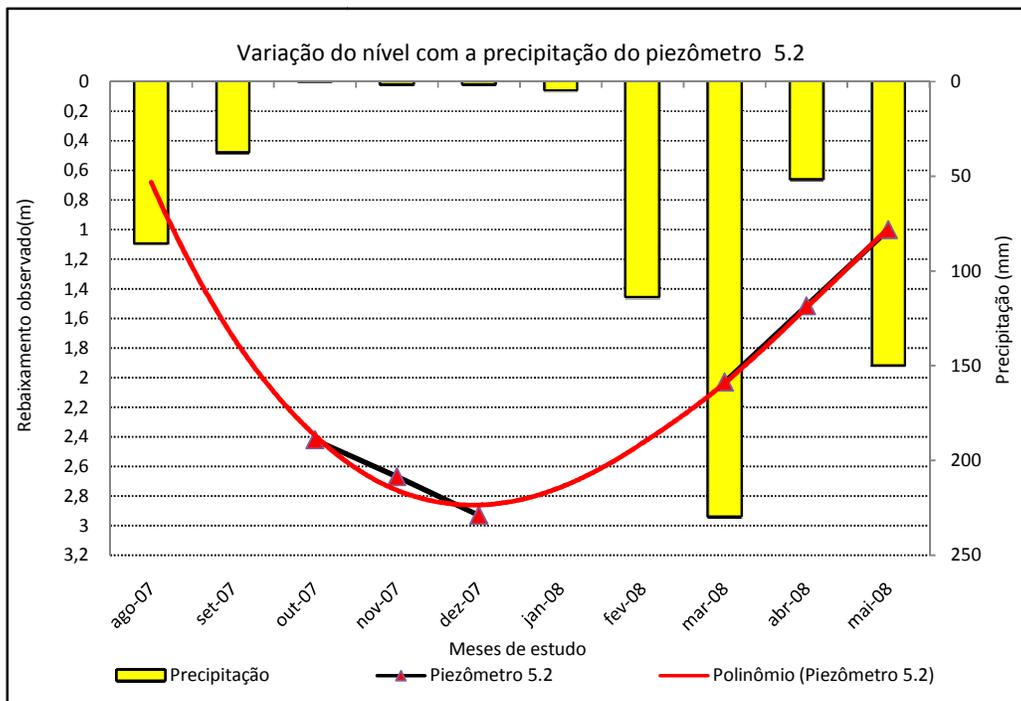
Variação nível freático do piezômetro 4.3.



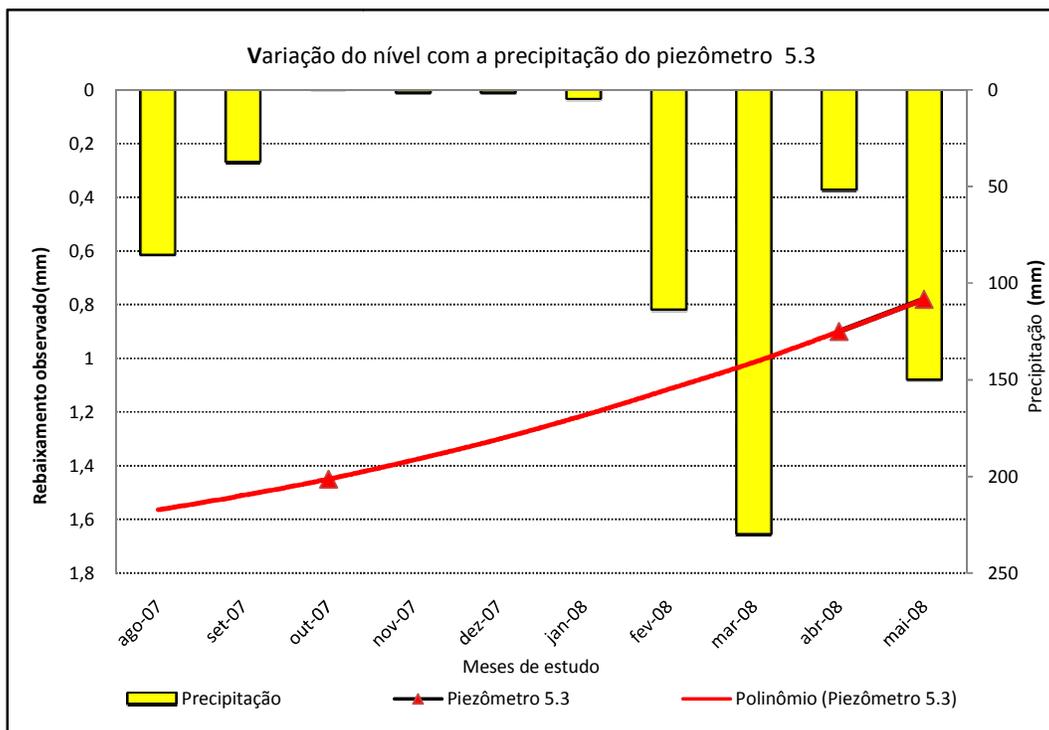
Varição nível freático do piezômetro 5.1



Varição nível freático do piezômetro 5.2.



Variação nível freático do piezômetro 5.3.



ANEXOS C: Série histórica observada para a área em estudo

Série histórica da estação 937006, localizada no município de Santana do Ipanema-AL

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	T. Anual
	mm												
1912						83.4	67.5	12.9	57.8	81.4	4	1.2	308.2
1913	0	66.1	37.4	68.2	212.9	116.9	112.2	23.8	0	89.8	16.4	127.1	870.8
1914	250	85.3	110.9	73.8	157.4	239.5	87.5	271.5	7.6	64.9	0	19.9	1368.3
1915	13.8	10.4	0	14.5	12.8	106.6	44.9	34.4	16	0	9.3	229.5	492.2
1916	1.2	1	43.7	138.5	229.6	122.7	92.9	45.8	6.5	41.3	146.1	66.7	936
1917	140	48.3	203.2	270	286.9	215.6	276.7	165.6	118.7	0	62	42.9	1829.9
1918	0	30.4	71.7	127.3	202.5	298.2	252.3	207.4	49.5	0	3.2	326.4	1568.9
1919	138.3	12.2	30.4	30.7	28.3	265.4	524.3	295.7	27.5	0	4.2	2.3	1359.3
1920	12	64.4	4.5	208.6	207.1	113.8	234.7	5.5	7.7	61.5	36.2	133.8	1089.8
1921	36.3	194.9	26.6	224.8	474.2	374.4	261.6	72.4	47.8	60.4	122.1	56.5	1952
1922	116.8	15.5	35	68.3	153.2	245.9	90	164.1	50.7	0	99.1	11.7	1050.3
1923	5.2	133.3	21.2	49.6	42.5	66.1	104.7	55.1	24.7	18.9	14.4	16	551.7
1924	216.6	104.8	141.8	149	240.9	149.8	131.4	129	22.1	2.3	2.2	9.8	1299.7
1925	69.6	52.9	30.7	30.9	29.6	29.4	60	60.5	19.9	7.2	0	18.6	409.3
1926	22.3	224.9	90.3	51.1	46.2	56.3	35.8	22.8	3.8	0	102.2	7.9	663.6
1927	8.3	179.4	15.7	24.8	170.3	118.4	142.1	34.8	35.2	0	0	55.9	784.9
1928	25.6	0	0	0.9	61.7	32.1	69.1	26.4	38.8	9.9	48.3	15.1	327.9
1929	34.1	167.6	35.8	180.9	88	27.8	76	0	2.1	1.4	68	212.7	894.4
1930	50.7	38.7	100.5	58.7	145.4	164.9	28.1	0	0	12.9	0	0	599.9
1931	0	79.4	58.6	16.2	60.1	66.4	113.8	129.9	58.6	13.2	39.2	6.2	641.6
1932	32.7	48	16.5	9.8	21.7	36.1	92.6	11.2	18	0	0	0	286.6
1933	8	8.1	7.4	175.5	164.9	128.7	132.6	24.8	5.6	8.8	2.1	58.7	725.2
1934	32.2	62.9	53.2	20.6	120.9	171.9	111	66.5	6.3	54.6	43	85.7	828.8
1935	44.3	94.1	114.9	70.1	265.7	161.7	53.9	241.3	14.9	0	7.5	0	1068.4
1936	8.6	31.7	14.8	27.8	166	244.4	101.7	37.5	6.4	0	61.6	44.3	744.8
1937	21.6	5.3	104.9	151	146.3	258.2	171.9	85.6	9.5	0	0	0	954.3
1938	36.5	45.4	94.9	127.8	141.5	56.5	95	159.5	13.1	50.7	0	0	820.9
1939	21.8	27	61.7	90.2	206.6	2.3	201.3	108	14.4	73.5	41.2	11.2	859.2
1940	266.2	243.5	150.9	135.6	132.9	123.5	90	99	112	0	0	46	1399.6

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	T. Anual
	mm												
1941	0	60.5	318.5	86	59	179	127	44	14	0	0	21.5	909.5
1942	29	0	0	59	42	125	158.2	104.5	0	49	0	96	662.7
1943	62	50	20	67	150	59	137	87	35	0	7	45	719
1944	0	10	62	35	130	179	122	77	51.1	0	77.9	32.8	776.8
1945	23.6	6.2	0	77.5	402.4	113.3	84.9	16.7	33.8	6.1	4.7	31.8	801
1946	0	42	31.3	7.8	93	157.9	130.5	51.6	41.1	0	49.1	28.4	632.7
1947	4	63.2	332.3	145.8	127.4	161.3	89.7	45.1	75	0	71.3	26.2	1141.3
1948	23.4	23.8	156.4	59.3	154.4	297.5	154.6	70.4	48.3	50.6	0	145.2	1183.9
1949	6.4	0	0	44.6	184.2	104.8	60.6	96.4	106.8	0	117.9	0	721.7
1950	10.5	16	10.4	72.1	120.2	90.5	101.2	66.6	40.5	24.2	18.1	6.3	576.6
1951	0	0	8.2	204.8	111	201.2	138.3	73.7	46.4	0	0	18.2	801.8
1952	5.7	8.5	149.3	18.1	127.4	72.2	62.9	49.6	0	0	0	51.5	545.2
1953	0	0	0	117.9	103.7	215	105.5	36.3	0	5.9	194	0	778.3
1954	0	56.5	86.6	103.5	139.5	113.4	46.5	65.9	5.5	0	18.6	36	672
1955	36	0	15.5	30.4	96	32.9	84	65.9	76.5	0	0	7.9	445.1
1956	6.4	0	93.3	55	59.3	30.2	66.5	129.9	8.8	0	37.5	0	486.9
1957	62	56.5	176.9	155.6	145.8	107.4	37.1	14.3	0	0	0	0	755.6
1958	22.8	35.4	35.7	8.4	48.4	126.1	109.1	106.9	63.6	0	0	22.4	578.8
1959	0	28.5	34.5	30.9	33.7	90.8	125.3	72.3	0	0	18.9	7.2	442.1
1960	29.7	8.2	300.5	94.9	96.1	106.6	64.2	38.2	0	0	0	0	738.4
1961	84	15.7	67.3	47.6	74.6	156.9	105.3	68.9	0	8.5	0	0	628.8
1962	26.9		2	126.1	120	232.4	161.6	12.9	0	0	13.4	0	695.3
1963		0	114.5	0	56.9	194.5	140.6	40.5	0	0	98.2	48.7	693.9
1964	89	82.1	56.3	168.8	114	149.5	182.5	124.5	0	0	0	0	966.7
1965	0	19.2	49.9	37.8	68.2	86.7	144.8	106.8	0	0	0	21.5	534.9
1966	38.2	126.4	0	203.4	199.6	202.3	82.2	98.3	0	28.5	0	0	978.9
1967	0	18	66.4	204.2	156.3	73.9	117.4	77.1	67.5	0	28.8	49.8	859.4
1968	31.1	54.4	87.1	73.3	154.2	156.2	150.3	177.8	55.1	0	25.1	0	964.6
1969	0	125	140.6	47.7	137.4	183.2	230.2	63.7	0	0	0	57.9	985.7
1970		16	54.8	25.1	11.2	27.6	109.2	51.9	12	12.4	82.8	0	403

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	T. Anual
	mm												
1971	0	3	0.8	110.3	148.1	41.4	63.9	12	85.4	25.7	0.3		490.9
1972	34.2	32.1	17.5	70.5	134.2	64.4	29.5	38.2	1.1			88.3	510
1973	3.3	13.2	39.5	62.2	86.2	112.6	44	18.9	67.3	46.1	16.5		509.8
1974	16.5		205.5	170.1	85.2	88.3	145.4	29.1	6		75.8	17.3	839.2
1975	32.4		19.3	135.9	192	222.3	257.4	35.6	34.9			6.2	936
1976	14.4	147.9	31.9	100.8	29.2	73.5	60.3	4.1	32	101.8	57.6	44	697.5
1977	82.7	38.4	76.7	45.4	241.9	168.9	178.6	47.4	48.8	3.4	3.1	42.3	977.6
1978	13	85.4	150.1	93.6	175.4	95.3	89.2	47.7	71.8	4.2	0.3	14.2	840.2
1980	129.8	168.5	82.8	11	8.8	97.2	51.3	22.5	26.6	79.5	9	38	725
1981	105	12.8	242.5	77	29.3	57	42.6	46.5	24	0	96.5	45	778.2
1982	3.5	42.7	12.5	158.5	186	74	54.5	86.2				15	632.9
1983	54	64.5	34.6	29.3	23.5	55.1	47.6	47.9	4.3	2.1	0	0	362.9
1984	12.8	26.9	167.4	189.6	127.2	73	141.7	47.2	37.4	5.3	1.5	0	830
1985	62.4	66.2	101.2	301.5	53.2	115	151.8	85.1	28.6	0	9.1	3.3	977.4
1986	6.6	24.8	117.7	37.1	111.9	72.8	123.2	28.3	68.3	24.2	41.5		656.4
1987	10.1	1.5	73.6	65.6	25.7	116.2	76.4	55	0	0	0	36.1	460.2
1988	5.1	4.5	112	163.2	32.7	147	182.9	72.1	27.6	4.5	6.8	9	767.4
1989	22	0	71.1	123.2	162.5	119.5	205.6	52.2	62	0	21.4	145.8	985.3
1990	2.1	93.1	0	70	48.5	84.8	101.4	37.3	37.8	8.8	21.4	0	505.2
1991	11.3	25.5	54.4	23.7	67.5	80.3	42.8	118.4	40	2	43.8	0	509.7
1994	17	13.6	174.8	26.7	116.4	269	102.2	54.6	71.6	2.6	0.4	21.6	870.5
1998	26.8	4.7	13.9	6.7	28.4	87.2	62.9	57.8	10.1	1.6	0	9.3	309.4
1999	20.7	10.6	21.6	7.5	81.2	84.5	59.7	31.1	44.1	48.9	11.9	115	536.8
2000			28.5	114	66.2	139.1	83.8	53.9	53.3	13.7	37.1		589.6