

ADONAI GOMES FINEZA

**MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE UM AQUÍFERO FREÁTICO
POROSO COM O VISUAL MODFLOW E POR MEIO DE REDES
NEURAIS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Câmpus Viçosa

T

F496m
2015 Fineza, Adonai Gomes, 1982-
Modelagem hidrogeológica de um aquífero freático poroso com o
visual Modflow e por meios de redes neurais artificiais / Adonai Gomes
Fineza. - Viçosa, MG, 2015.
xviii, 163f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador : Eduardo Antônio Gomes Marques.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Hidrogeologia. 2. Água subterrâneas. 3. Solos -
Permeabilidade. 4. Redes neurais (Computação). I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.


CDD 22. ed. 551.49

ADONAI GOMES FINEZA


**MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE UM AQUÍFERO FREÁTICO
POROSO COM O VISUAL MODFLOW E POR MEIO DE REDES
NEURAIS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal
de Viçosa, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, para obtenção do título
de *Doctor Scientiae*.

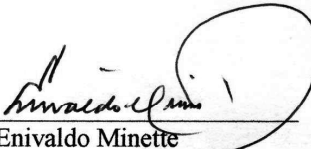
APROVADA: 25 de fevereiro de 2015.



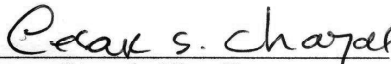
Alexandre Gomes Facco



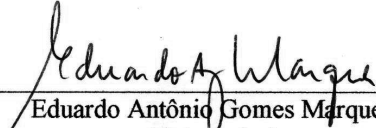
Jonathas Batista Gonçalves Silva



Enivaldo Minette



César da Silva Chagas
(Coorientador)



Eduardo Antônio Gomes Marques
(Orientador)

De onde, pois, vem a sabedoria? Onde está o lugar do entendimento?

Está encoberta aos olhos de todo vivente, e oculta às aves do céu. O Abadom e a morte dizem: Ouvimos com os nossos ouvidos um rumor dela.

Deus entende o seu caminho, e ele sabe o seu lugar. Porque ele perscruta até as extremidades da terra, sim, ele vê tudo o que há debaixo do céu. Quando regulou o peso do vento, e fixou a medida das águas; quando prescreveu leis para a chuva e caminho para o relâmpago dos trovões; então viu a sabedoria e a manifestou; estabeleceu-a, e também a esquadrinhou. E disse ao homem: Eis que o temor do Senhor é a sabedoria, e o apartar-se do mal é o entendimento.” (Jô 28:20-28)

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu Aba Pai, criador de tudo que se pode e não se pode ver.

À minha amável esposa Rafaela, o maior presente que Deus me deu.

Aos meus filhos Nicolas e Murilo, dos quais privei de atenção durante meses para me dedicar a este trabalho. Esta é, sem dúvida, a cruz deste trabalho.

Aos meus pais Adilson e Aparecida, que sem dúvida alguma, foram os “engenheiros” principais na construção do meu caráter, através do incontestável amor que sempre demonstraram.

À minha irmã Aline e seu esposo Daniel, pela amizade e pelo apoio.

Ao meu orientador, o professor Eduardo Antônio Gomes Marques (UFV), pela dedicação profissional e incentivo em meus trabalhos, pela participação em minha vida acadêmica e sobre tudo pela sua grande amizade.

Ao meu coorientador César da Silva Chagas (EMBRAPA - Solos) pelo apoio e aulas de Redes Neurais Artificiais.

Ao professor Alexandro Gomes Facco (UFES) pelo imenso apoio e aulas de ArcGis.

Ao Vinícius Corrêa Carvalho pelas aulas de Modflow.

Ao CNPq por ter me concedido a bolsa de doutorado e financiamento no desenvolvimento do projeto.

À Universidade Federal de Viçosa, mais precisamente ao Departamento de Engenharia Civil, pela minha excelente formação profissional.

Ao SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) de Viçosa, pelos dados fornecidos.

Ao Pr. Marcos e Pra. Luciene, meus líderes espirituais, que me auxiliaram a buscar ao Senhor e permanecer em paz, mesmo em tempos de tribulação.

BIOGRAFIA

ADONAI GOMES FINEZA, filho de Adilson da Silva Fineza e Aparecida do Carmo Gomes Fineza, natural de Leopoldina, Minas Gerais, nasceu no dia 26 de outubro de 1982.

Casado com Rafaela Vieira Rodrigues Fineza e pai de Nicolas Rodrigues Fineza e Murilo Rodrigues Fineza.

Em maio de 2006, graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa.

Em julho de 2008, obteve o título de *Magister Scientiae* em Geotecnia pelo Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.

Iniciou, em março de 2010, o Doutorado em Geotecnia também no Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em Fevereiro de 2015.

Atualmente é gestor e professor do curso de Engenharia Civil da Univiçosa e sócio gerente da Baruk Consultoria Ambiental e Engenharia Ltda.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
RESUMO	xv
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESES DO ESTUDO	3
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1	
INVESTIGAÇÃO DE UM AQUÍFERO POROSO SUPERFICIAL EM ÁREA URBANA VISANDO GERAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	6
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS	11
2.1. Localização da Área de Estudo	11
2.2. Modelo Digital de Elevação e Atributos Topográficos	12
2.3. Balanço Hídrico.....	15
2.4. Estimativa de Recarga e Descarga	16
2.5. Poços de Monitoramento	18
2.6. Determinação da Condutividade Hidráulica através de <i>Slug Test</i>	21
2.7. Caracterização Geológica-Geotécnica.....	24
2.8. Caracterização de Solos e Uso e Ocupação do Solo	25
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
3.1. Modelo Digital de Elevação e Atributos Topográficos	26
3.2. Balanço Hídrico e Vazões no Ribeirão São Bartolomeu.....	31
3.3. Caracterização Geológica-Geotécnica.....	36

3.4. Caracterização dos Solos	39
3.5. Uso e Ocupação do Solo.....	44
3.6. Monitoramento dos Poços.....	46
3.7. Determinação da Condutividade Hidráulica.....	50
3.8. Levantamento de Poços e Nascentes e Volume de Captação de Água Subterrânea	55
3.9. Recarga e Descarga do Aquífero.....	56
4. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
CAPÍTULO 2	
MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE ÁREA DE ESTUDO	
POR MEIO DO MODFLOW	67
RESUMO.....	67
ABSTRACT.....	68
1. INTRODUÇÃO.....	69
1.1. Programa Computacional Utilizado (Visual Modflow)	71
1.2. Parâmetros Hidrogeológicos de Entrada	72
1.3. Modelos de Águas Subterrâneas	76
1.4. Métodos Numéricos para Resolução dos Modelos	76
1.5. Condições Iniciais e Condições de Contorno	77
1.6. Calibração do Modelo Numérico	77
2. MATERIAIS E MÉTODOS	79
2.1. Modelo Hidrogeológico Conceitual	79
2.2. Modelo Matemático Computacional	79
2.3. Determinação da Malha do Modelo	80
2.4. Condições de Simulação	83
2.5. Condições Iniciais	84
2.6. Condições de Contorno.....	84
2.7. Recarga	88
2.8. Evapotranspiração	89
2.9. Parâmetros de Armazenamento.....	89
2.10. Condutividade Hidráulica	89
2.11. Calibração	92
2.12. Análise de Sensibilidade	92

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	100
REFERÊNCIAS.....	102

CAPÍTULO 3

MODELAGEM ESPACIAL DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO EM UM AQUIFERO POROSO POR REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	105
RESUMO	105
ABSTRACT	106
1. INTRODUÇÃO.....	107
2. MATERIAL E MÉTODOS	117
2.1. Localização da Área de Estudo	117
2.2. Nível do Lençol Freático e Covariáveis Ambientais Utilizadas	118
2.3. Parâmetros de Configuração das Redes Neurais Artificiais	120
2.4. Validação dos Modelos de Redes Neurais Artificiais	122
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	124
3.1. Estatística Descritiva do Nível do Lençol Freático e Covariáveis Ambientais Utilizadas.....	124
3.2. Importância das covariáveis.....	127
3.3. Avaliação do Desempenho das RNAs.....	130
3.4. Predição Espacial do Nível do Lençol Freático pelas RNAs.....	140
3.5. Avaliação do Desempenho do ModFlow.....	142
3.6. Comparação entre o ModFlow e as RNAs	146
4. CONCLUSÕES.....	149
REFERÊNCIAS.....	151
APÊNDICES	158

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 INSTRUMENTAÇÃO DE UM AQUÍFERO POROSO SUPERFICIAL EM ÁREA URBANA ELABORAÇÃO DE SEU MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	6
Tabela 1 - Informações sobre poços em monitoramento	19
Tabela 2 - Informações sobre as nascentes cadastradas na área de estudo	25
Tabela 3 - Dados meteorológicos da estação da UFV	33
Tabela 4 - Área das classes de solos identificadas na área de estudo	40
Tabela 5 - Valores de condutividade hidráulica (K) do modelo calibrado para os eixos x, y e z.....	42
Tabela 6 - Resultados de condutividade hidráulica obtidos por Betim (2013).....	43
Tabela 7 - Valores médios de condutividade hidráulica para as classes de solo presentes na área de estudo.....	44
Tabela 8 - Usos do solo existentes na área de estudo	44
Tabela 9 - Resultados do monitoramento do nível freático (N.A.)	47
Tabela 10 - Variação do NA nos poços de monitoramento	49
Tabela 11 - Condutividade Hidráulica (K).....	54
Tabela 12 - Informações sobre os poços já cadastrados na área do município de Viçosa (MG)	55
Tabela 13 - Termos da equação da Recarga.....	60

CAPÍTULO 2	MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE ÁREA	
	DE ESTUDO POR MEIO DO MODFLOW	69
Tabela 1	- Coordenadas e cargas hidráulicas dos poços e nascentes.....	81
Tabela 2	- Dados dos seguimentos do ribeirão na área de estudo (<i>Stream</i>).....	87
Tabela 3	- Condutividades hidráulicas (K_z) das camadas existentes na área de estudo	90
Tabela 4	- Valores de condutividade hidráulica do modelo calibrado.....	93
CAPÍTULO 3	MODELAGEM ESPACIAL DO NÍVEL DO	
	LENÇOL FREÁTICO EM UM AQUÍFERO POROSO	
	POR REDES NEURAS ARTIFICIAIS.....	118
Tabela 1	- Valores médios do nível do lençol freático nos poços de monitoramento nas épocas consideradas	120
Tabela 2	- Valores dos atributos topográficos nos poços de monitoramento.....	122
Tabela 3	- Conjuntos de covariáveis ambientais testados na predição pelas RNAs.....	131

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 INSTRUMENTAÇÃO DE UM AQUÍFERO POROSO SUPERFICIAL EM ÁREA URBANA ELABORAÇÃO DE SEU MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	6
Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Viçosa (MG).	11
Figura 2 - Hidrograma em que é obtida a variável Δh	17
Figura 3 - Localização dos poços de monitoramento dentro da área de estudo.	20
Figura 4 - Sequência de instalação dos poços de monitoramento. Em (a) perfuração com trado mecânico. Em (b) instalação do tubo de PVC no furo, (c) resultado da colocação do selo de bentonita. Em (d) exemplo da proteção com manilha com tampa de proteção especial, para se evitar vandalismo.	21
Figura 5 - <i>Diver</i> utilizado para aquisição de dados durante o <i>Slug Test</i>	22
Figura 6 - Equipamento utilizado como <i>slug</i> nos ensaios.....	22
Figura 7 - Geometria do poço parcialmente penetrante em aquífero livre.	23
Figura 8 - Determinação dos parâmetros adimensionais A, B e C.....	24
Figura 9 - Coleta de amostras deformadas nos furos de sondagem: (a) amostrador, (b) amostra deformada e (c) acondicionamento.....	25
Figura 10 - MDE da área de estudo.	26

Figura 11 - Distribuição espacial dos atributos topográficos na área de estudo.	27
Figura 12 - Distribuição de frequência dos atributos topográficos na área de estudo.	28
Figura 13 - Balanço hídrico do município de Viçosa para o período Janeiro 2012 a Dezembro de 2013.	34
Figura 14 - Vazões de entrada e saída da área.	35
Figura 15 - Solo residual jovem de gnaiss, silto-arenoso, de cor cinza e dourada (dada pela elevada concentração de micas), muito micáceo, com níveis, caulinizados. Lateralmente o SRJ, passa a argilo-arenoso, micáceo, avermelhado, com pequenos níveis de caulim. À esquerda ocorre um solo residual jovem silto-arenoso, mais erodível e à direita transição entre solo residual jovem e solo residual maduro, na qual ocorre solo argiloso de cor avermelhada. Coordenadas X: 720.897 / Y: 7.705.517.....	37
Figura 16 - Detalhe da textura original Solo Residual Maduro de gnaiss, silto-arenoso, com vários níveis de quartzo, localmente micáceo, bem bandado. Localmente passa a areno-argiloso, róseo, bem foliada. Ocorrem veios de quartzo na massa de solo. Coordenadas – X: 720.562 / Y: 7.705.772.....	37
Figura 17 - Seção geológico-geotécnica D.	38
Figura 18 - Perfil geológico-geotécnico encontrado por Carvalho (2013).....	38
Figura 19 - Mapa de caracterização dos solos da área estudada.	39
Figura 20 - Perfis representativos dos solos identificados na área.	41
Figura 21 - Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.....	45
Figura 22 - Gráficos do NA dos poços de monitoramento.	48
Figura 23 - Resultados do monitoramento do N.A. em poços de observação realizados por Carvalho (2013), entre outubro de 2011 e setembro de 2012, com frequência semanal.	50

Figura 24 - Resultados do monitoramento do N.A. em poços de observação realizados por Rocha (2015) com frequência semanal.	50
Figura 25 - Poços nos quais foram realizados ensaios de <i>Slug Test</i>	51
Figura 26 - Resultado do <i>Slug Test</i> do poço P5.	51
Figura 27 - Resultado do <i>Slug Test</i> do poço P6.	52
Figura 28 - Resultado do <i>Slug Test</i> do poço P8.	52
Figura 29 - Resultado do <i>Slug Test</i> do poço P12.	52
Figura 30 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P5 – Lote.	53
Figura 31 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P6 – Bananeira.	53
Figura 32 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P8 – Oficina.	53
Figura 33 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P8 – Oficina.	54
Figura 34 - Mapa de áreas em relação à permeabilidade.	56
Figura 35 - Hidrograma dos Poços: P2 – MBC e P3 - Milharal.	58
Figura 36 - Hidrograma da cisterna P 17 - Elisângela.	58
Figura 37 - Hidrograma dos Poços: P6 - Bananeira, P7 - Mina e P8 - Oficina Mecânica.	58
Figura 38 - Hidrograma dos Poços: 12 – Cemitério e P13 – PSF1.	59

**CAPÍTULO 2 MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE ÁREA
DE ESTUDO POR MEIO DO MODFLOW 69**

Figura 1 - Área modelada com a localização dos poços de monitoramento.	80
Figura 2 - Mapa da área de estudo com fator de exagero igual a 2.	81
Figura 3 - Modelo 3D da área de estudo mostrando as superfícies limítrofes entre os três <i>layers</i> (camadas), identificados no aquífero livre.	83
Figura 4 - Exemplo de perfil e características de um dos poços de monitoramento instalado na área de estudo.	84
Figura 5 - Condições de contorno do modelo representadas pelas células inativas (cor verde) e o <i>Stream</i> (linhas de cor azul).	85

Figura 6 - Áreas permeáveis (recarga), em verde, e impermeáveis, em azul, identificadas na área de estudo.....	88
Figura 7 - Mapas das camadas (de 0 a 5m (a) e de 5 a 75m (b)) com suas respectivas condutividades hidráulicas.	91
Figura 8 - Gráfico da convergência do modelo.....	94
Figura 9 - Calibração dos poços calculados e observados.	95
Figura 10 - Modelo hidrológico bidimensional. Em (a) até uma profundidade de 5m e em (b), até a profundidade de 75m.	96
Figura 11 - Elevação do lençol freático com as linhas potenciométricas.	97
Figura 12 - Linhas potenciométricas e velocidades de fluxo na primeira camada.	98
Figura 13 - Linhas potenciométricas e velocidades de fluxo na segunda camada.	98
Figura 14 - Resultado da validação do modelo.	99

CAPÍTULO 3 MODELAGEM ESPACIAL DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO EM UM AQUIFERO POROSO POR REDES NEURAI ARTIFICIAIS..... 117

Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Viçosa e localização dos poços de monitoramento.	121
Figura 2 - Exemplo de Topologia de RNA utilizada.	124
Figura 3 - Estatística descritiva para o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento nas diferentes épocas consideradas.	126
Figura 4 - Estatística descritiva das covariáveis ambientais nos poços de monitoramento considerados.	126
Figura 5 - Resultados da análise de correlação de Pearson entre o nível do lençol freático (NLF) medido nos poços de monitoramento e as covariáveis ambientais.....	129
Figura 6 - Resultados de SSE obtidos no treinamento das RNAs para os diferentes conjuntos testados.....	131

Figura 7 - Comportamento do SSE, R^2 da validação cruzada e RMSE obtidos pelas RNAs selecionadas para cada conjunto de covariáveis.....	133
Figura 8 - Variação do nível do lençol freático nos poços de monitoramento (observado e estimado).....	137
Figura 9 - Erros absolutos obtidos na predição do nível do lençol freático pelos conjuntos de covariáveis utilizadas.....	139
Figura 10 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do conjunto 1.....	141
Figura 11 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do conjunto 2.....	142
Figura 12 - R^2 e RMSE obtidos pelo ModFlow.....	143
Figura 13 - Variação do nível do lençol freático nos poços de monitoramento pelo ModFlow.....	143
Figura 14 - Erros absolutos obtidos na predição do nível do lençol freático pelo ModFlow.....	144
Figura 15 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do ModFlow.....	145
Figura 16 - Variação do nível do lençol freático estimados pelo ModFlow e pelas RNAs dos conjuntos 1 e 2.....	146

RESUMO

FINEZA, Adonai Gomes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2015. **Modelagem hidrogeológica de um aquífero freático poroso com o Visual Modflow e por meio de Redes Neurais Artificiais.** Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientador: César da Silva Chagas.

O objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo hidrogeológico conceitual e numérico de uma microbacia urbana (Viçosa, Minas Gerais, Brasil) através de um programa computacional comercial, visando a predição da carga hidráulica (superfície potenciométrica) e eventuais variações sazonais. Posteriormente, os dados coletados foram utilizados em redes neurais artificiais (RNA) com o objetivo de comparar com os resultados do modelo numérico e avaliar a eficiência das RNAs com este enfoque. O modelo hidrogeológico conceitual baseou-se em dados primários e secundários e permitiu identificar os aquíferos porosos nos quais ocorre o lençol freático na área de estudo, bem como seus parâmetros hidrogeológicos. Posteriormente, o modelo hidrogeológico conceitual e os parâmetros hidrogeológicos (condutividade hidráulica, transmissividade e coeficiente de armazenamento) foram inseridos em um programa computacional (Visual Modflow) para elaboração do modelo hidrogeológico numérico. O modelo numérico elaborado mostra que o fluxo subsuperficial segue, de forma aproximada, as direções do fluxo superficial, deslocando-se das porções mais elevadas do terreno para as mais baixas. Além disso, não se observam variações sazonais significativas de sua posição e foram observadas porções da área de estudo que apresentam-se secas em todas as estações do ano, em conformidade com os dados reais obtidos. Por fim, visando a predição da superfície potenciométrica através de RNA foram testadas diferentes combinações entre as

seguintes variáveis discriminantes: elevação; declividade; curvatura; índice topográfico combinado (CTI); distância vertical do canal de drenagem; aprofundamento do vale; direção de fluxo e distância euclidiana, todos obtidos a partir de um modelo digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 5m. Os resultados demonstram um grande potencial de utilização desta abordagem e os mapas inferidos por RNA mostraram muita coerência com os resultados fornecidos pelo Visual Modflow.

ABSTRACT

FINEZA, Adonai Gomes, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2015. **Hydrogeological modeling of a phreatic porous aquifer through Visual Modflow and Artificial Neural Networks.** Adviser: Eduardo Antônio Gomes Marques. Co-Adviser: César da Silva Chagas.

The purpose of this study was to develop both a conceptual and a numerical hydrogeological model of a watershed located in an urban area (Viçosa, Minas Gerais State, Brazil) through a commercial software in order to predict water level position (potentiometric surface) and its possible seasonal variations along a year. Subsequently, all collected data were used in Artificial Neural Networks (ANN) with the same purpose and also to compare with results from the numerical modeling and to evaluate its efficiency. The hydrogeological conceptual modeling was based on primary and secondary data and has allowed the identification of three porous superficial aquifers occurring within the study area as well as their main hydrogeological parameters (hydraulic conductivity, transmissivity etc.), which were then used as input data for numerical modeling in Visual Modflow®. The numerical model shows that underground water flow approximately follow the superficial flow, from higher to lowers areas within the watershed and also, that there are some portions of the watershed which are completely dry during all year, all this results are in accordance with observed data. Finally, for the prediction of potentiometric surface throughout ANN, different combinations between the following selected variables were performed: elevation; slope; curvature; combined topographic index; vertical distance of drainage channel; valley depth, flow direction and Euclidean distance; all data obtained from a Digital Elevation Model with 5m resolution.

Results have shown a great potential for using this approach for hydrogeological purposes. All maps produced throughout RNA have shown good consistency to Visual Modflow results.

INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por recursos hídricos e a escassez cada vez maior de água para o consumo humano, são problemas enfrentados com relativa frequência pela sociedade atual. A degradação da qualidade da água superficial, seja nos grandes centros, nos pequenos municípios ou na zona rural, é uma constante e com isso a utilização de águas subterrâneas tem se tornado uma alternativa cada vez mais utilizada para abastecimento humano no Brasil e no mundo. Entretanto, a poluição dos aquíferos, especialmente em áreas urbanas onde estão inseridas diversas fontes poluidoras tem sido objeto de grande preocupação, já que as mesmas são áreas potenciais de captação, principalmente no lençol freático.

Pelo exposto, estudos e pesquisas relacionados a esse tema assumem grande relevância, gerando conhecimentos que podem ser aplicados no planejamento e gestão dos recursos hídricos e na conservação da qualidade da água subterrânea de uma região. Neste contexto, insere-se o presente estudo.

O presente trabalho propõe promover um estudo relativo às características hidrogeológicas de uma área de estudo localizada na porção urbana da bacia do ribeirão São Bartolomeu, na qual está inserido o município de Viçosa/MG, visando definir um panorama em que identifique a quantidade, a disponibilidade e o fluxo dessas águas, através de medições *in loco*. De maneira a prover essas informações, elaborou-se um modelo hidrogeológico do aquífero freático utilizando-se do programa computacional Visual Modflow. A superfície potenciométrica resultante do modelo hidrogeológico foi, posteriormente, comparada a um modelo de predição da posição do nível de água do lençol freático utilizando-se da técnica de Redes Neurais Artificiais, configurando-se em uma aplicação inédita dessa técnica.

Os estudos realizados permitiram, ainda, definir as áreas de recarga, circulação e descarga do aquífero freático, assim como uma avaliação da disponibilidade hídrica subterrânea e do fluxo da água subterrânea na área de estudo.

Pode-se destacar como resultados do estudo:

1. Determinação do balanço hídrico da área de estudo;
2. Levantamento dos poços e cisternas já existentes e o volume de captação dos mesmos;
3. Instalação de 14 poços de monitoramento de água subterrânea;
4. Monitoramento do nível d'água dos poços ao longo de um ano hidrológico;
5. Elaboração do modelo digital de Elevação e da carta de declividade da área;
6. Definição do perfil geológico representativo do aquífero freático, para a área de estudo;
7. Realização de estudos pedológicos, geológicos, geomorfológicos e hidrológicos que permitiram a elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual;
8. Avaliação da disponibilidade da água subterrânea da área;
9. Determinação do fluxo da água subterrânea da área;
10. Elaboração de um modelo hidrogeológico numérico do aquífero freático;
11. Elaboração da superfície potenciométrica do aquífero freático, por meio de Redes Neurais;
12. Comparação entre os resultados da superfície potenciométrica entre os dois modelos (Visual Modflow e Redes Neurais).

CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E HIPÓTESES DO ESTUDO

A realização de pesquisa bibliográfica sobre o tema do estudo mostrou que havia algumas lacunas de conhecimento sobre o mesmo.

Inicialmente, descobriu-se que dados acerca de parâmetros hidrogeológicos sobre os materiais que compõem o aquífero freático da área urbana de Viçosa - formados por solos residuais maduros e jovens de gnaisses, são raros na literatura nacional e mesmo internacional.

Os trabalhos de Betim (2013) e Carvalho (2103), que foram desenvolvidos na mesma bacia hidrográfica, caracterizaram a permeabilidade e alguns parâmetros hidrogeológicos desses materiais, mas a quantidade de dados, aliada à variabilidade textural, em especial dos solos residuais jovens e dos aluviões, sugere que uma maior quantidade de dados é necessária para dar representatividade estatística às mesmas.

Outro ponto a destacar refere-se ao fato de que não foram encontrados estudos acerca de modelagem hidrogeológica numérica de aquíferos freáticos em áreas urbanas da Zona da Mata de Minas Gerais e nem sobre modelos de aquíferos freáticos em solos residuais de rochas gnáissicas.

Por fim, foram encontrados na literatura, mesmo internacional, apenas três estudos envolvendo aplicação de Redes Neurais Artificiais à determinação da superfície potenciométrica e suas variações sazonais.

Assim, as seguintes questões devem ser respondidas pelo estudo proposto:

- ✓ O modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo guarda semelhanças com o definido no estudo realizado por Carvalho (2013)?

- ✓ Como os parâmetros determinados no presente estudo correlacionam-se com aqueles obtidos por Betim (2013) e Carvalho (2013), para materiais da mesma bacia hidrográfica?
- ✓ É possível construir um modelo hidrogeológico numérico da área de estudo? Se sim, o modelo é confiável? O modelo numérico consegue representar variações sazonais da superfície potenciométrica?
- ✓ É possível aplicar à técnica de Redes Neurais Artificiais para a modelagem da superfície potenciométrica do aquífero freático em bacias hidrográficas do Brasil? Os resultados são confiáveis? Como os resultados se comparam aos obtidos pelo modelo numérico obtido através do Visual Modflow (tradicionalmente utilizado em estudos desse tipo)?

OBJETIVOS

O objetivo geral do presente estudo é elaborar um modelo hidrogeológico numérico, através de um programa computacional tradicionalmente utilizado nesse tipo de estudo, e comparar a superfície potenciométrica obtida nesse modelo com um produzido através da técnica de Redes Neurais Artificiais.

Como objetivos secundários, pretende-se elaborar o modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo, determinar os parâmetros hidrogeológicos dos materiais que compõem o aquífero freático poroso existente na área do estudo. Definir os parâmetros hidrogeológicos do aquífero, através da realização do *Slug Test* e do monitoramento da posição do nível de água ao longo de um ano hidrológico.

CAPÍTULO 1

INVESTIGAÇÃO DE UM AQUIFERO POROSO SUPERFICIAL EM ÁREA URBANA VISANDO GERAÇÃO DE DADOS DE ENTRADA PARA O MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

RESUMO

O objetivo deste estudo foi realizar a caracterização do aquífero poroso e monitor a posição do lençol freático ao longo do ano hidrológico em uma área urbana, no município de Viçosa (MG)., utilizando como fonte de dados: levantamento planialtimétrico para determinação do modelo digital de elevação do terreno, execução de sondagens da área de estudo, perfis de solo, *Slug Test* para determinação da condutividade hidráulica, precipitação, elaboração do mapa de uso do solo para determinação das áreas permeáveis e impermeáveis e monitoramento de 14 poços perfurados e 3 poços cacimba. Como resultado foi possível a elaboração do balanço hídrico e vazões do ribeirão São Bartolomeu, a caracterização geológica-geotécnica do aquífero poroso, a caracterização pedológica, a determinação das áreas permeáveis e impermeáveis da área de estudo, a determinação da condutividade hidráulica do aquífero nas três camadas de solo encontradas e a recarga e descarga do aquífero. Todos esses dados foram utilizados para construir um modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo.

Palavras-chave: caracterização, aquífero freático, poços de monitoramento, *Slug Test*.

CHAPTER 1

INVESTIGATION OF A SUPERFICIAL POUROUS AQUIFER IN AN URBAN AREA TO GENERATE INPUT DATA FOR A CONCEPTUAL HYDROGEOLOGICAL MODEL

ABSTRACT

The main purpose of the present study was to perform a complete characterization of a porous aquifer and to monitor the water depth position during a hydrological year in an urban watershed of Viçosa city, Minas gerais State, Brazil. The characterization was based on a detailed topographic survey, execution of boreholes, construction of cross-sections, in situ *Slug Test*, monitoring of water depth position. As a result a complete geological-geotechnical characterization of all materials and porous aquifers present in the study area, the identification of permeable and impervious areas, as well as all hydrological data from all these materials. All this data was then used to build a conceptual model of the study area.

Keywords: characterization, free aquifer, monitoring wells, *Slug Test*.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do funcionamento do aquífero e suas propriedades são fundamentais para a gestão adequada dos recursos hídricos subsuperficiais, permitindo, dentre outras atividades: a avaliação da disponibilidade hídrica, o rebaixamento de níveis da cota freática (NA) para a exploração mineral, a captação de água para abastecimento, irrigação ou finalidade industrial, o diagnóstico de áreas contaminadas, a determinação de áreas de recarga e descarga do aquífero etc.

Um modelo hidrogeológico conceitual tem como princípio básico determinar as principais características constitutivas e estruturais do terreno, bem como a existência e as propriedades de reservatórios naturais de águas subterrâneas (FEITOSA e FILHO, 2000).

Diversos autores (CARVALHO, 2013; ROCHA, 2015; MONTEIRO, 2000; PAIVA et al., 2013; SHANKAR et al., 2009) elaboraram modelos hidrogeológicos conceituais de aquíferos freáticos no Brasil e no mundo. Da avaliação desses trabalhos é possível verificar que vários fatores devem ser considerados para a caracterização hidrogeológica de um local, com destaque para: geologia, hidrologia, morfologia, clima, vegetação e tipos de solos.

A crescente importância das águas subterrâneas para o abastecimento público e para a produção econômica deixa clara a necessidade de uma adequada caracterização hidrogeológica dos aquíferos, que permitam uma gestão adequada desses recursos, permitindo a sua sustentabilidade, evitem sua degradação, e permitam a sua proteção, especialmente em zonas sujeitas à maior risco de poluição, como é o caso das áreas urbanas.

No ano de 2001 ocorreu uma crise de abastecimento hídrico no Brasil. Em 2013 e 2014 a crise voltou a ocorrer e com intensidade ainda maior. No município de Viçosa-MG, no qual está inserida a área do presente estudo, ocorreu até mesmo racionamento de água, fatos que justificam a importância de estudos voltados também à gestão de águas subterrâneas.

A despeito do intenso e crescente uso da água subterrânea no Brasil, o conhecimento hidrogeológico dos principais aquíferos brasileiros ainda é incipiente. Em anos recentes, diversos estudos tem sido realizados com o intuito de promover um melhor conhecimento desses aquíferos. Se em relação aos principais aquíferos os estudos ainda são escassos, para os aquíferos superficiais os mesmos são quase inexistentes. A seguir apresentam-se alguns exemplos de estudos realizados no Brasil com enfoque em estudos voltados à aquíferos porosos freáticos.

Betim (2013) e Carvalho (2013) realizaram estudos na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu. O foco do estudo de Betim (2013) foi o estudo da condutividade hidráulica dos solos e a avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital, afluente do Ribeirão São Bartolomeu. Já o estudo de Carvalho (2013) teve por objetivo principal criar um modelo hidrogeológico numérico da microbacia do córrego Palmital, em uma área de ocupação rural, para compreender o fluxo subterrâneo no aquífero estudado. Esses autores determinaram, ainda, o perfil geológico-geotécnico das suas respectivas áreas de estudo, as características texturais e as espessuras dos materiais existentes no perfil, bem como a posição do nível de água (N.A.) e suas variações sazonais.

Marques (2010) elaborou um modelo hidrogeológico conceitual detalhado de uma extensa área do Triângulo Mineiro, com foco específico no aquífero freático constituído por materiais das coberturas detrito-lateríticas e de aluviões. O estudo baseou-se em um detalhado levantamento de campo e instalação de poços rasos (até 5,0m) para monitoramento da posição do N.A. O estudo determinou, ainda, direções de fluxo e as condutividades hidráulicas dos materiais que compõem o aquífero freático, mas não houve monitoramento da variação do N.A. ao longo de um ano hidrológico.

Righetto et al. (2005) afirmaram que os estudos de caracterização hidrogeológica do aquífero Dunas/Barreiras na cidade de Natal mostraram que as informações coletadas eram insuficientes para uma adequada caracterização do aquífero visando sua utilização para o abastecimento de água da cidade. Esses

autores basearam-se apenas em dados planialtimétricos, de caracterização geológica e de identificação da superfície potenciométrica.

Collischonn e Kirchheim (2006) realizaram estudo de quantificação da recarga e das reservas do aquífero Coxilha das Lombas (RS), através de balanço hídrico. Os autores concluem que a posição e a configuração do topo e da base do aquífero são fundamentais para uma modelagem hidrogeológica mais aprofundada

O presente estudo tem como objetivo elaborar o modelo hidrogeológico conceitual de um aquífero poroso superficial livre em área urbana. O modelo foi construído com base em uma detalhada caracterização do meio físico da área de estudo e seu entorno. Inicialmente elaborou-se o modelo digital de elevação (MDE) e a carta de declividade; sobre essas características do relevo realizaram-se investigações de campo que permitiram proceder à caracterização geológica, hidrogeológica, de recursos hídricos e pedológica da área de estudo. Essas investigações consistiram de levantamento de dados em campo (geologia, pedologia, hidrogeologia, cadastro de nascentes e poços etc.), determinação do balanço hídrico da área, realização de furos de sondagem, monitoramento de vazões no Ribeirão São Bartolomeu a montante e a jusante da área de estudo ao longo de um ano hidrológico, implantação de poços de monitoramento, monitoramento da posição do N.A. ao longo de um ano hidrogeológico e realização de ensaios hidrogeológicos *in situ*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo fica localizada no perímetro urbano do município de Viçosa (MG), em uma subárea da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, entre as coordenadas UTM 7.705.514 e 7.706.470m N e 719.750 e 720.750m E, Zona 23 S (Figura 1). A área total possui 72,32 hectares.

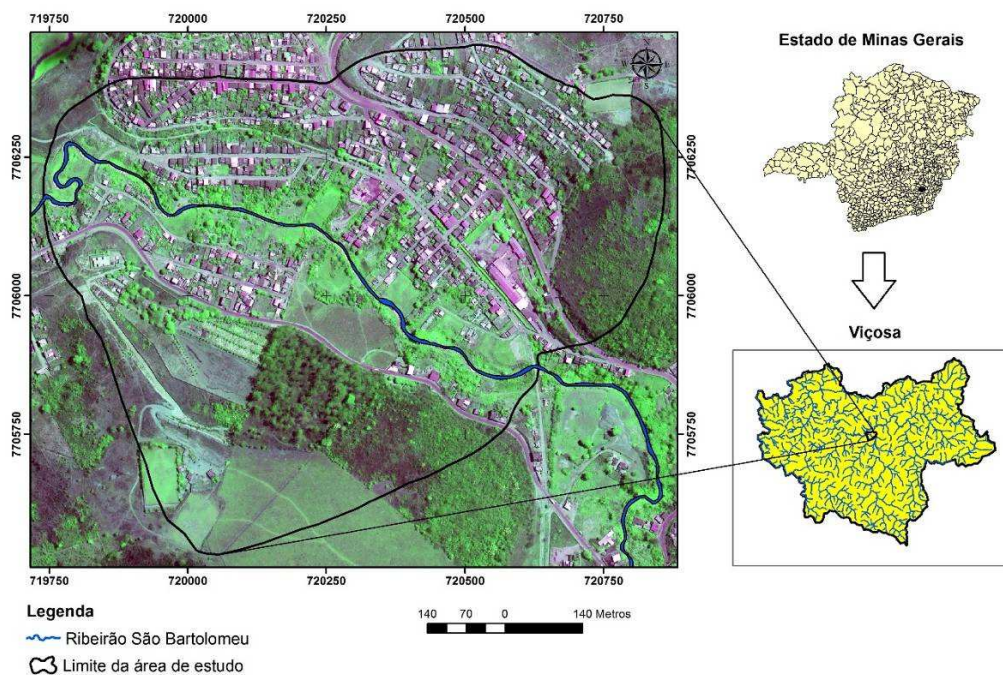


Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Viçosa (MG).

A caracterização da área de estudo foi feita com base em atividades de campo e escritório desenvolvidas com o intuito de prover os dados para a elaboração do modelo conceitual.

As atividades de campo consistiram em execução de levantamento de campo (pedológico, recursos hídricos e geológico), execução de furos de sondagem à percussão tipo SPT, alocação de poços de monitoramento, execução de testes de *slug*, além do levantamento dos poços e já existentes na área de estudo. As atividades de escritório incluíram a realização do balanço hídrico da área de estudo, por meio da estimativa da recarga e da evapotranspiração, além do tratamento dos dados anteriormente gerados nas atividades de campo.

2.2. Modelo Digital de Elevação e Atributos Topográficos

A análise das variáveis morfométricas fornece dados quantitativos que permitem uma avaliação da potencialidade morfogenética das elevações. Neste sentido, foi gerado um modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo a partir de curvas de nível e pontos cotados, na escala de 1:25.000, obtidos no levantamento topográfico realizado pelo SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto) do município de Viçosa - MG. Na elaboração deste MDE, com resolução espacial de 5 m, foi utilizado o software ArcGIS Desktop v.10.2 (ESRI, 2013), utilizando-se o módulo *Topo to Raster*. Este módulo utiliza um método de interpolação especificamente desenhado para a criação de um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente. É baseado no programa ANUDEM desenvolvido por Hutchinson (1993) que utiliza uma técnica de interpolação por diferenças finitas, e combina a eficiência de uma interpolação local, tal como o Inverso do Quadrado da Distância, com métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade, como o interpolador Kriging (ESRI, 1997). Assim, o *Topo to Raster* interpola uma superfície a partir dos dados de elevação, e posteriormente modifica esta superfície pela imposição da drenagem mapeada (hidrografia), que possibilita uma suavização e um aumento sensível da precisão do modelo gerado, produzindo uma superfície hidrologicamente consistente (CHAGAS, 2006).

A última etapa na elaboração do MDE consistiu na correção de erros, principalmente das depressões espúrias, que são pequenas imperfeições no modelo

gerado, caracterizadas por áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, semelhantes a uma depressão. Essas depressões ou “*sinks*” são consideradas empecilhos ao escoamento durante a aplicação de modelos hidrológicos, sedimentológicos e de poluentes de origem difusa (ALVES SOBRINHO et al., 2010). Estas depressões foram eliminadas com a utilização a extensão *Spatial Analyst > Hydrology > Fill*. A partir do MDT livre das depressões espúrias foram derivados no ArcGIS Desktop 10.2 os atributos topográficos do terreno: elevação, declividade, curvatura, índice CTI e direção de fluxo; e no software de geoprocessamento SAGA GIS, através da utilização do módulo *Terrain Analysis > Channels*, os atributos: distância vertical do canal de drenagem e aprofundamento do vale, que possibilitaram um melhor conhecimento das características do relevo na área de estudo.

Dentre os atributos topográficos, a elevação e a declividade influenciam diretamente o movimento superficial e a infiltração de água no solo (MOORE et al., 1993). A declividade tem sido considerada um dos mais importantes atributos topográficos primários, pois afeta diretamente a velocidade do fluxo superficial e subsuperficial de água e conseqüentemente o teor de água no solo, o potencial de erosão/deposição, e muitos outros processos importantes (GALLANT e WILSON, 2000). A declividade é a primeira derivada da altitude e é definida como um plano tangente a superfície, ou seja, corresponde à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, expresso como a mudança de elevação sobre certa distância (SILVEIRA, 2010).

A forma da curvatura de uma encosta pode influenciar bastante a distribuição lateral dos processos pedológicos, hidrológicos e geomórficos (PENNOCK et al., 1987). Essa influência tem sido relacionada, principalmente, ao controle que as formas côncava e convexa exercem sobre a distribuição de água e materiais solúveis das partes mais elevadas para as mais baixas. As duas curvaturas mais comumente computadas são: plano de curvatura (taxa de variação do aspecto ao longo da curva de nível) e perfil de curvatura (taxa de variação da declividade ao longo da linha de fluxo). O perfil de curvatura é importante para caracterizar mudanças na velocidade do fluxo de água e processos relacionados ao transporte de sedimentos. Por sua vez, o plano de curvatura mede a propensão da água convergir ou divergir à medida que atravessa o Elevação (GALLANT e WILSON, 2000; CHAGAS, 2006). O perfil de curvatura refere-se ao caráter convexo/côncavo do terreno, quando analisado em

perfil e o plano de curvatura refere-se ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal (SILVEIRA, 2010).

O índice topográfico combinado ou índice de umidade (CTI, sigla em inglês) é um atributo topográfico secundário, sendo definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo. Este índice foi desenvolvido para ser utilizado em estudo de catenas (Moore et al., 1993). O índice topográfico combinado é obtido conforme apresentado na equação 1:

$$cti = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \beta}\right) \quad \text{Equação 1}$$

em que:

A_s é a área de contribuição (fluxo acumulado + 1) * (tamanho da célula do grid em m²) e

β é a declividade expressa em radianos.

A direção de fluxo define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica (RENNÓ et al., 2008). A continuidade topológica para as direções de fluxo é, conseqüentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir. As conexões hidrológicas de direção de fluxo entre dois pontos em uma superfície não são as mesmas que aquelas baseadas em distância euclidiana. A direção de fluxo de água na rede de drenagem é obtida pela função *flow direction*, que gera uma grade regular definindo as direções de fluxo, tomando-se por base a linha de maior declividade da elevação. O novo *grid* gerado determina a direção de maior declividade de um pixel em relação a seus oito pixels vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada um dos pixels do *grid*, que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção (ALVES SOBRINHO et al., 2010).

A distância vertical da superfície em relação ao canal de drenagem mais próximo ou em relação ao nível de base local indica a proximidade dos canais de drenagem e, por conseqüência, as condições de drenagem de uma área que podem influenciar a energia potencial da água (ROMÃO, 2006), que também atuará ainda na ação dos processos erosivos. A profundidade do vale ou dissecação vertical se destaca como uma variável que representa a altitude relativa do relevo, refletindo seu grau de entalhamento. Essa variável é de extrema relevância para a identificação de

áreas mais susceptíveis a ações gravitacionais e, portanto, mais frágeis aos processos denudativos.

A distância euclidiana da hidrografia é descrita por uma função de linhas de distâncias diretas, que traduzem a relação de cada célula com uma fonte ou conjunto de fontes. O *grid* que representa este atributo topográfico mostra a distância de cada célula à célula mais próxima da rede de drenagem (vetorial). Com relação a importância deste tema para o estudo, o cálculo da distância euclidiana possibilita caracterizar as áreas com maior influência da rede de drenagem, e/ou susceptíveis a inundações e alagamentos. A distância euclidiana da hidrografia foi calculada utilizando-se a extensão *Spatial Analyst > Distance > Euclidean Distance no ArcGIS Desktop v.10.2*.

2.3. Balanço Hídrico

O balanço hídrico pode ser definido como o cálculo dos volumes de entrada (Q_E) e saída (Q_S) de água em uma bacia hidrográfica (POEHLS e SMITH, 2009). Reichardt (1985), define-o como a somatória das quantidades de água que entram e saem de um elemento de volume de solo e, num dado intervalo de tempo. Assim o balanço hídrico de um sistema físico real é baseado no princípio da conservação das massas ou da continuidade o qual preconiza que as entradas e saídas são equivalentes à variação do volume de água armazenada no meio.

O balanço hídrico e seus componentes podem ser expressos pela equação 2 (THORNTHWAITE e MATHER, 1955). Esta equação é utilizada para a camada útil do solo e, portanto, empregada apenas para o estudo de superfície e subsuperfície rasa. Como o presente estudo aplica-se apenas ao lençol freático, considerou-se a mesma aplicável ao estudo proposto.

$$\Delta S = P - (ETR + ES + I)$$

Equação 2

Em que:

ΔS = variação do armazenamento de água no solo;

P = precipitação;

ETR = evapotranspiração real;

ES = escoamento superficial; e

I = infiltração.

O balanço hídrico utilizado foi calculado para o período de setembro de 2012 à agosto de 2013, período concordante com o monitoramento potenciométrico (posição do nível de água) realizado nos poços da área.

Os dados de entrada referentes à precipitação e evapotranspiração foram obtidos da estação meteorológica da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pois na área de estudo não existe nenhuma estação e a da UFV é a mais próxima, distando apenas 5 (cinco) quilômetros.

Para o cálculo da vazão de entrada e de saída da área de estudo realizaram-se onze campanhas de monitoramento da vazão do Ribeirão São Bartolomeu, que é o único curso d'água a atravessar a área de estudo, através de molinete hidrométrico, no ribeirão São Bartolomeu.

2.4. Estimativa de Recarga e Descarga

A recarga de um aquífero consiste no acréscimo de água à sua zona saturada de forma natural (precipitação) ou artificial (irrigação). Alguns fatores que interferem nesse processo são: a condutividade hidráulica vertical do meio, a transmissividade do aquífero e a percolação vertical da água através da zona insaturada do solo (POEHLS e SMITH, 2009).

O método da variação da superfície freática (VNA) é um dos mais utilizados na estimativa da recarga em aquíferos livres (CARVALHO et al., 2014). Considera que a elevação do nível d'água dos aquíferos livres ocorre somente devido a eventos de recarga. Caso a descarga do aquífero seja mais veloz que o aporte de água da precipitação (recarga) o método possui pouca relevância. Dentre as vantagens do método pode-se citar sua simplicidade, facilidade de aplicação e o fato do mesmo não fazer considerações acerca do movimento da água através da zona não saturada do solo até a superfície freática, desse modo não se considera a existência de caminhos preferenciais da água, o que inviabilizaria a aplicação da técnica (HEALY e COOK, 2002). É recomendado para pequenos intervalos de tempo (leituras do nível d'água feitas em intervalos de horas ou alguns dias) em locais que apresentem aquíferos rasos e que sofram variações significativas de altura de sua superfície freática. As incertezas do método incluem a obtenção de um valor representativo do rendimento específico (S_y) e a consideração acerca que mudanças na pressão

atmosférica, ar aprisionado no meio poroso ou outros fenômenos não influenciam na elevação do nível d'água (SCANLON, 2002).

A recarga foi estimada usando-se a técnica da variação do nível d'água (VNA), uma vez que trata-se de um aquífero poroso. Para isso, monitorou-se a posição do nível de água (N.A.) em 14 (catorze) poços de monitoramento durante o ano hidrológico 2012 a 2013. O registro das mensurações da superfície freática foram plotadas em um gráfico das leituras versus o tempo e a recarga estimada através da equação 3, a seguir. (HEALY e COOK, 2002).

$$R = S_y \cdot (dh/dt) = S_y \cdot (\Delta h/\Delta t) \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

R = recarga (mm/dia);

S_y = rendimento específico;

Δh = variação da altura da superfície freática devido a um evento de recarga (mm), e

Δt = tempo de duração do evento de recarga (dia).

A variável Δh é obtida através da análise do gráfico (hidrograma) formado pelas leituras do nível d'água versus o tempo, como pode ser visto na Figura 2 a seguir. Este parâmetro corresponde à altura compreendida entre o pico do gráfico e o ponto mais baixo da curva de recessão, a qual é criada (extrapolada) a partir do ponto onde o gráfico começa a se elevar, a curva segue o traçado a partir deste ponto de como seria caso não houvesse o pico. Assim se obtém a recarga total (CARVALHO, 2014).

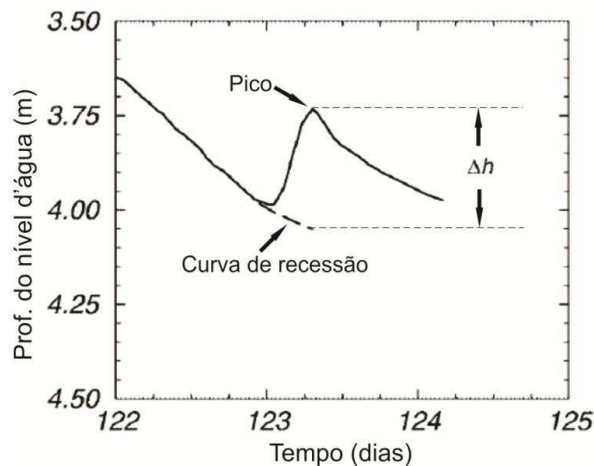


Figura 2 - Hidrograma em que é obtida a variável Δh .

Fonte: Carvalho (2014).

O rendimento específico (S_y) foi estimado através da equação de Healy e Cook (equação 4), fórmula empírica que correlaciona a condutividade hidráulica (K) com o rendimento específico, que é frequentemente utilizada em trabalhos em que se estima a recarga de aquíferos freáticos como os de Maziero e Wendland (2008) e Vasconcelos (2005).

$$\delta\gamma = 0,117 \cdot \sqrt[3]{K} \quad \text{Equação 4}$$

A equação 4 é válida apenas quando o parâmetro K é expresso em m/dia.

Em cada hidrograma foi obtido um Δh para cada pico encontrado. O somatório do Δh encontrado foi utilizado na equação 3 juntamente com o valor de S_y estimado pela equação 4 e o tempo utilizado foi de um ano, referente ao período de monitoramento dos poços.

Os resultados encontrados foram comparados aos do monitoramento da vazão do Ribeirão São Bartolomeu.

2.5. Poços de Monitoramento

Na área de estudo foram instalados 14 (catorze) poços de monitoramento, conforme se observa na imagem da Figura 3. Além disso, mais 3 (três) cisternas (poços-cacimba), já existentes na área foram monitorados para permitir uma caracterização mais adequada da área. Na Tabela 1 apresentam-se as coordenadas dos poços, altitude e data em que os mesmos foram instalados.

A instalação de poços de monitoramento foi realizada mediante o estudo prévio da área e alocados de forma estratégica, de forma a contemplar toda a área, todos os poços foram executados até a profundidade de dois metros abaixo da superfície freática (parcialmente penetrantes no aquífero freático), para garantir a mensuração do nível d'água em qualquer época do ano. A construção dos poços seguiu os procedimentos descritos na norma da ABNT NBR 15495-1: 2007 e Versão Corrigida 2:2009 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares (porosos). Parte 1: Projeto e construção. Para a escavação utilizou-se um trado mecânico.

Tabela 1 - Informações sobre poços em monitoramento

Poço	Coordenadas do Poço				Cota da Boca (m)	Data de Instalação
	Longitude	Latitude	X	Y		
P1 – Moto Pista	42° 52' 58,707"	20° 44' 01,344"	720.445,690	7.705.881,032	615,687	07/2011
P2 – MBC	42° 53' 07,117"	20° 43' 54,440"	720.205,138	7.706.096,575	613,407	07/2011
P3 – Milharal	42° 53' 12,358"	20° 43' 53,110"	720.054,012	7.706.139,466	612,050	07/2011
P4 – Ponte	42° 53' 21,017"	20° 43' 50,739"	719.804,412	7.706.215,665	614,182	07/2011
P5 – Lote	42° 53' 20,225"	20° 43' 51,922"	719.826,856	7.706.178,968	612,765	07/2011
P6 – Bananeira	42° 53' 14,135"	20° 43' 54,639"	720.001,984	7.706.093,092	612,328	07/2011
P7 – Mina	42° 53' 06,176"	20° 43' 59,201"	720.230,460	7.705.949,776	617,919	07/2011
P8 – Oficina Mecânica	42° 52' 59,238"	20° 44' 02,347"	720.429,944	7.705.850,406	615,050	07/2011
P9 – Campo 10 Maio	42° 53' 13,642"	20° 44' 09,057"	720.010,447	7.705.649,469	707,065	06/2012
P10 – Campo Escorpião	42° 52' 48,523"	20° 43' 47,886"	720.742,17	7.706.299,0	716,021	06/2012
P11 – Frente da Oficina	42° 53' 01,481"	20° 44' 04,204"	720.364,276	7.705.794,140	639,847	06/2012
P12 – Cemitério	42° 53' 09,750"	20° 44' 00,997"	720.126,313	7.705.895,884	644,932	06/2012
P13 – Posto de Saúde 1	42° 53' 16,451"	20° 43' 58,813"	719.933,288	7.705.965,605	638,680	06/2012
P14 – Posto de Saúde 2	42° 53' 21,534"	20° 43' 55,401"	719.787,593	7.706.072,475	626,561	06/2012
P15 – Cisterna da Filinha	42° 53' 04,089"	20° 43' 53,739"	720.293,043	7.706.117,001	619,610	D.N.C.
P16 – Cisterna João Ferreira	42° 53' 10,424"	20° 43' 50,101"	720.111,176	7.706.231,292	623,836	D.N.C.
P17 – Cisterna Elisângela	42° 53' 15,067"	20° 43' 50,095"	719.976,846	7.706.233,221	623,308	D.N.C.

*D.N.C. – Data Não Conhecida

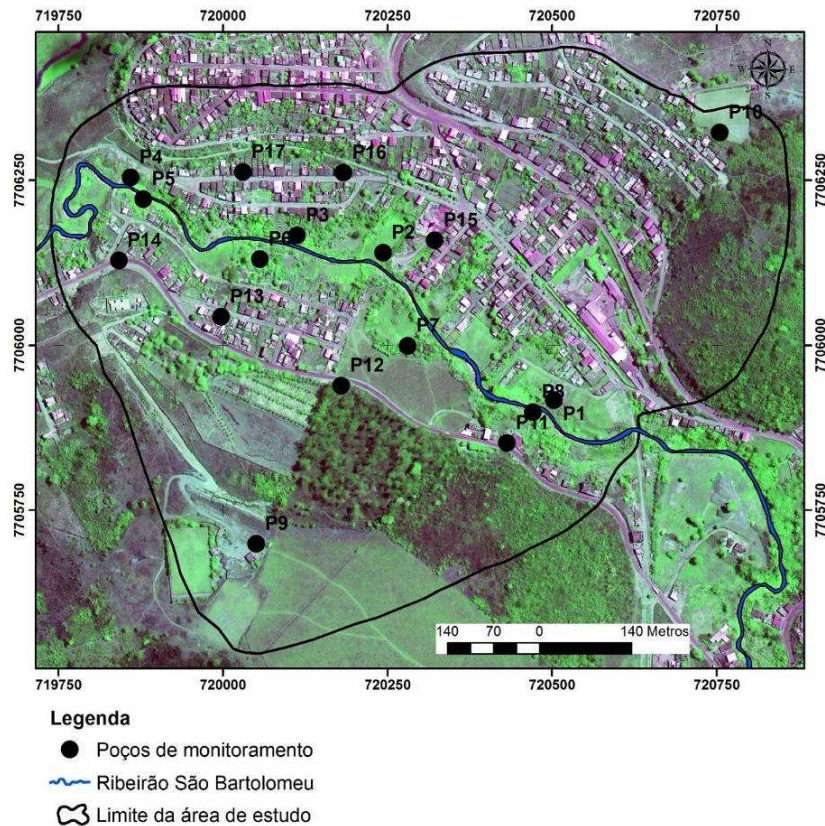


Figura 3 - Localização dos poços de monitoramento dentro da área de estudo.

Após a execução do furo e limpeza do fundo do poço, a tubulação foi instalada e o excesso de tubos foi cortado para ficar mais próximo da superfície do elevação. Em cada poço foi instalada uma ponteira filtrante em PVC rígido com 2” de diâmetro (50mm) e 1,0m de comprimento, na qual foram perfurados com furadeira elétrica diversos orifícios para entrada de água. A porção externa foi então envolvida por geotêxtil e amarrada com linha de pesca. No fundo da ponteira colocou-se um "cap" de PVC. O espaço anular existente entre a parede do furo e o tubo de PVC foi preenchido com areia quartzosa, lavada até cerca de 0,5m acima da ponteira. A seguir colocou-se solo natural retirado do próprio poço. O um metro mais próximo da superfície foi preenchido com bentonita em pó que, a medida que foi sendo colocada no espaço foi sendo umedecida, de maneira a expandi-la e garantir que água de superfície não atingisse o lençol freático. Por fim, construiu-se um selo de cimento nos 20-30cm mais próximos à superfície. De maneira a se evitar vandalismo, instalou-se uma manilha para proteção do poço e uma tampa de ferro. A sequência de fotos da Figura 4 ilustra todo o procedimento.

Para a realização do monitoramento do nível d'água, primeiramente se realizava a punção dos poços com o auxílio de um *bailer* e após algumas horas era realizada a leitura da profundidade do lençol freático, através de um medidor de nível elétrico da marca *Solinst*. A profundidade do nível d'água subterrâneo foi monitorada entre setembro de 2012 e agosto de 2013, com frequência quinzenal.

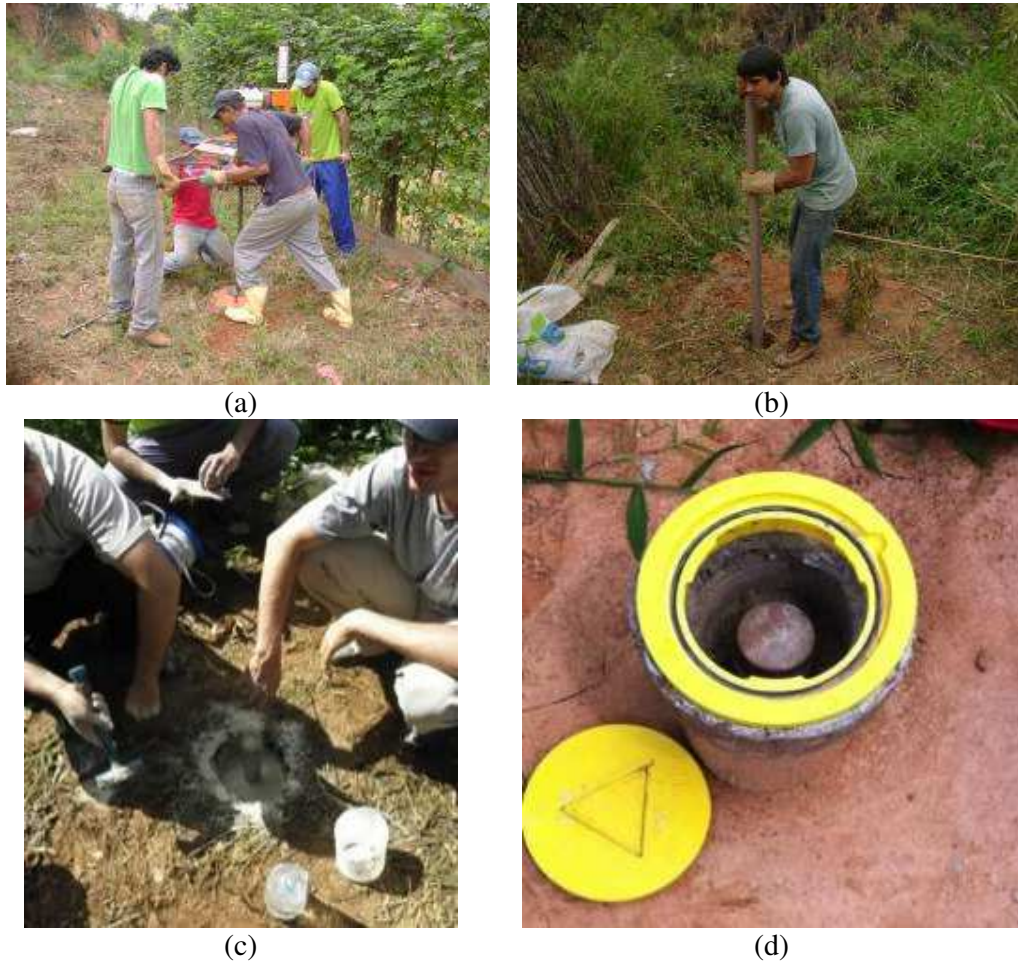


Figura 4 - Sequência de instalação dos poços de monitoramento. Em (a) perfuração com trado mecânico. Em (b) instalação do tubo de PVC no furo, (c) resultado da colocação do selo de bentonita. Em (d) exemplo da proteção com manilha com tampa de proteção especial, para se evitar vandalismo.

2.6. Determinação da Condutividade Hidráulica através de *Slug Test*

O ensaio de *Slug Test* é realizado para determinação da condutividade hidráulica e da transmissividade do solo em subsuperfície e consiste na adição ou remoção de um determinado volume de água ou *slug* (cilindro de volume conhecido)

em um poço. Essa ação provoca o aumento ou redução do nível d'água no poço, o qual é mensurado ao longo do tempo até que o nível de água retorne ao nível anterior ao início do teste. (KRUSEMAN e RIDDER, 2000).

Existem diversos métodos para o cálculo da condutividade hidráulica através de *Slug Test* como os desenvolvidos por Cooper-Bredehoeft-Papadopulos, Hvorslev, Bouwer e Rice, Van der Kamp, dentre outros (FETTER, 2001).

A escolha do método é feita de acordo com alguns fatores como: tipo de aquífero (confinado, semiconfinado ou livre), penetração parcial ou total do poço no aquífero e a relação entre a altura da água no poço e o comprimento do filtro (CARVALHO, 2013).

Foi realizado o teste com *slug* em quatro poços na área de estudo (P5, P6, P8 e P12), o qual realizou-se através de um monitoramento contínuo (automático) do nível d'água através de um *diver* (Figura 5).



Figura 5 - *Diver* utilizado para aquisição de dados durante o *Slug Test*.

O equipamento utilizado no ensaio foi um medidor de nível d'água elétrico modificado (Figura 6), o qual foi adaptado para ter em sua ponta o *slug*.



Figura 6 - Equipamento utilizado como *slug* nos ensaios.

Os dados gerados (leituras registradas no *Slug Test*) foram processados através do software *Aquifer Test Pro 4.0* da empresa *Waterloo Hydrogeologic Inc.* Para calcular a condutividade hidráulica nos poços utilizou-se o método proposto por Bouwer e Rice (1976) que foi desenvolvido para ensaios com poços instalados em aquíferos livres.

Na equação 5 apresenta-se a expressão matemática de Bouwer e Rice (1976). (In: OLIVA, 2005) e na Figura 7 é apresentada a geometria do poço parcialmente penetrante em um aquífero livre, que representa a situação real dos poços instalados na área.

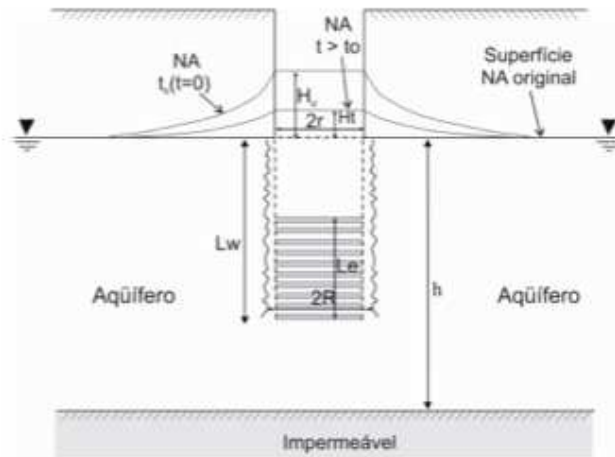


Figura 7 - Geometria do poço parcialmente penetrante em aquífero livre.

Fonte: Oliva (2005).

$$k = \frac{r_c^2 \cdot \ln\left(\frac{R_e}{R}\right)}{2 \cdot L_e \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{H_0}{H_t}\right) \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

K = condutividade hidráulica (cm/s);

r_c = raio do revestimento (cm);

R = raio do poço (cm);

R_e = distância radial efetiva em que a carga hidráulica é dissipada (cm);

L_e = comprimento do filtro ou intervalo por onde a água se infiltra (cm);

t = tempo transcorrido de H_0 até H_t (s);

H_0 = nível d'água no início do ensaio (cm); e

H_t = nível d'água em determinado tempo t (cm).

A variável R_e não pode ser mensurada diretamente, logo a expressão (R_e / R) é estimada a partir da equação 6 e é utilizada de acordo com a relação entre a camada saturada do aquífero (h) e a distância entre a superfície freática e a base do poço (L_w) (OLIVA, 2005).

Para determinar o valor de $\ln(R_e/R)$ na equação 4, o método apresenta a seguinte solução quando o poço é parcialmente penetrante, ou seja, ($L_w < h$) na equação 6.

$$\ln\left(\frac{R_e}{R}\right) = \frac{1}{\left\{ 1 + \frac{1}{\ln\left(\frac{L_w}{R}\right)} + \frac{A + B \cdot \ln\left[\frac{h - L_w}{R}\right]}{\frac{L_e}{R}} \right\}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

L_w = distância da superfície da água à base do filtro (cm);

h = espessura saturada do aquífero (cm); e

Constantes A, B e C são encontradas graficamente em função de L_e/R (Figura 8).

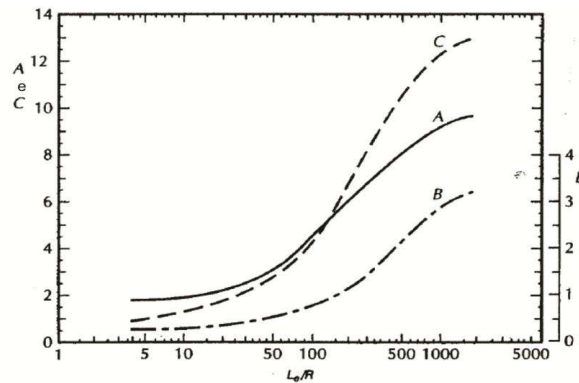


Figura 8 - Determinação dos parâmetros adimensionais A, B e C.

Fonte: Fetter (2001).

2.7. Caracterização Geológica-Geotécnica

Para a definição das camadas de materiais existentes em subsuperfície e que compõem o aquífero freático na área de estudo foram utilizados dados produzidos por Marques (2008) e realizado um levantamento geológico-geotécnico de campo, para marcação de pontos complementares que permitissem um adequado conhecimento da área. A esses dados foram adicionados os de subsuperfície, obtidos a partir da interpretação das informações coletadas nos furos realizados para a implantação dos poços de monitoramento.

Em cada furo de sondagem foram coletadas amostras deformadas de solo a cada metro (Figura 9) para a classificação geológico-geotécnica através de análise tátil-visual dos materiais.



Figura 9 - Coleta de amostras deformadas nos furos de sondagem: (a) amostrador, (b) amostra deformada e (c) acondicionamento.

Nessa etapa foram, ainda, cadastradas todas as nascentes existentes na área de estudo, cujas coordenadas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações sobre as nascentes cadastradas na área de estudo

Nascente	Denominação	Coordenadas (UTM)	
N1	D. Ana	719.935	7.706.049
N2	Bananeira	720.008	7.706.093
N3	Nascente 1	720.040	7.706.087
N4	Nascente 2	720.068	7.706.075
N5	Mina	720.220	7.705.945

2.8. Caracterização de Solos e Uso e Ocupação do Solo

O estudo de solos foi realizado por meio de trabalhos de campo, nos quais foram identificadas as principais classes de solos que ocorrem na área. Adicionalmente, foram descritos 4 (quatro) perfis de solo em pontos específicos. A classificação dos solos foi realizada de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2013) no 2º nível categórico do sistema. A caracterização dos solos teve por objetivo avaliar qualitativamente as condições de infiltração de água nestes solos, que podem influenciar a recarga do aquífero, tais como a presença de camadas de impedimento, compactação, pedregosidade e/ou rochiosidade. Nessa etapa realizou-se ainda, o mapeamento de uso e ocupação do solo, por meio de interpretação de uma imagem do satélite IKONOS-2, com 1 m de resolução espacial, do ano de 2007 e verificação em levantamento de campo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Modelo Digital de Elevação e Atributos Topográficos

O modelo digital do elevação (MDE) da área de estudo é mostrado na Figura 10. Conforme já mencionado anteriormente esse modelo serviu de base para a geração dos atributos topográficos, e como dado de entrada no Visual Modflow e na predição espacial pelas Redes Neurais Artificiais (RNA).

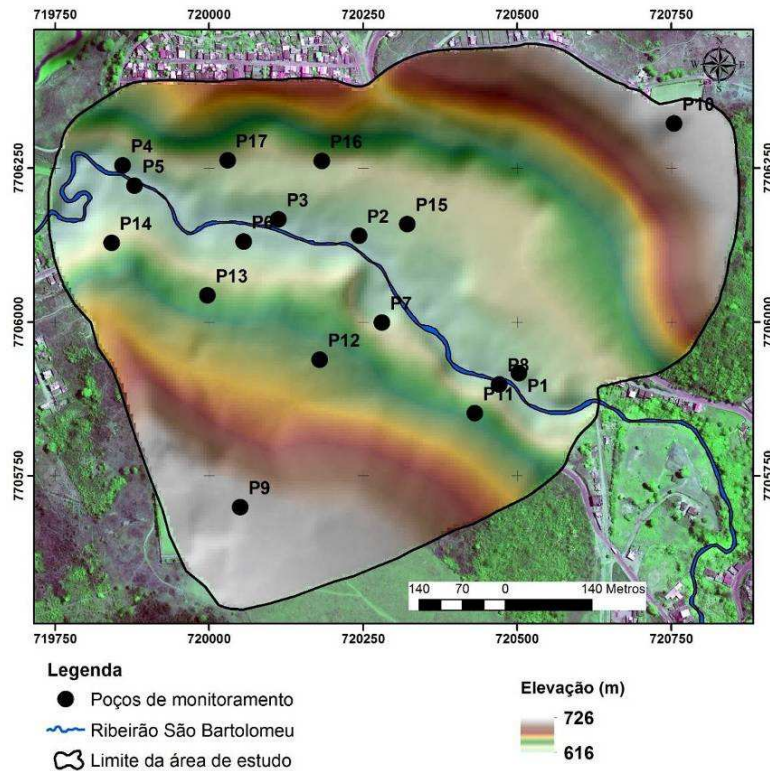


Figura 10 - MDE da área de estudo.

A distribuição espacial dos atributos topográficos utilizados é mostrada na Figura 11.

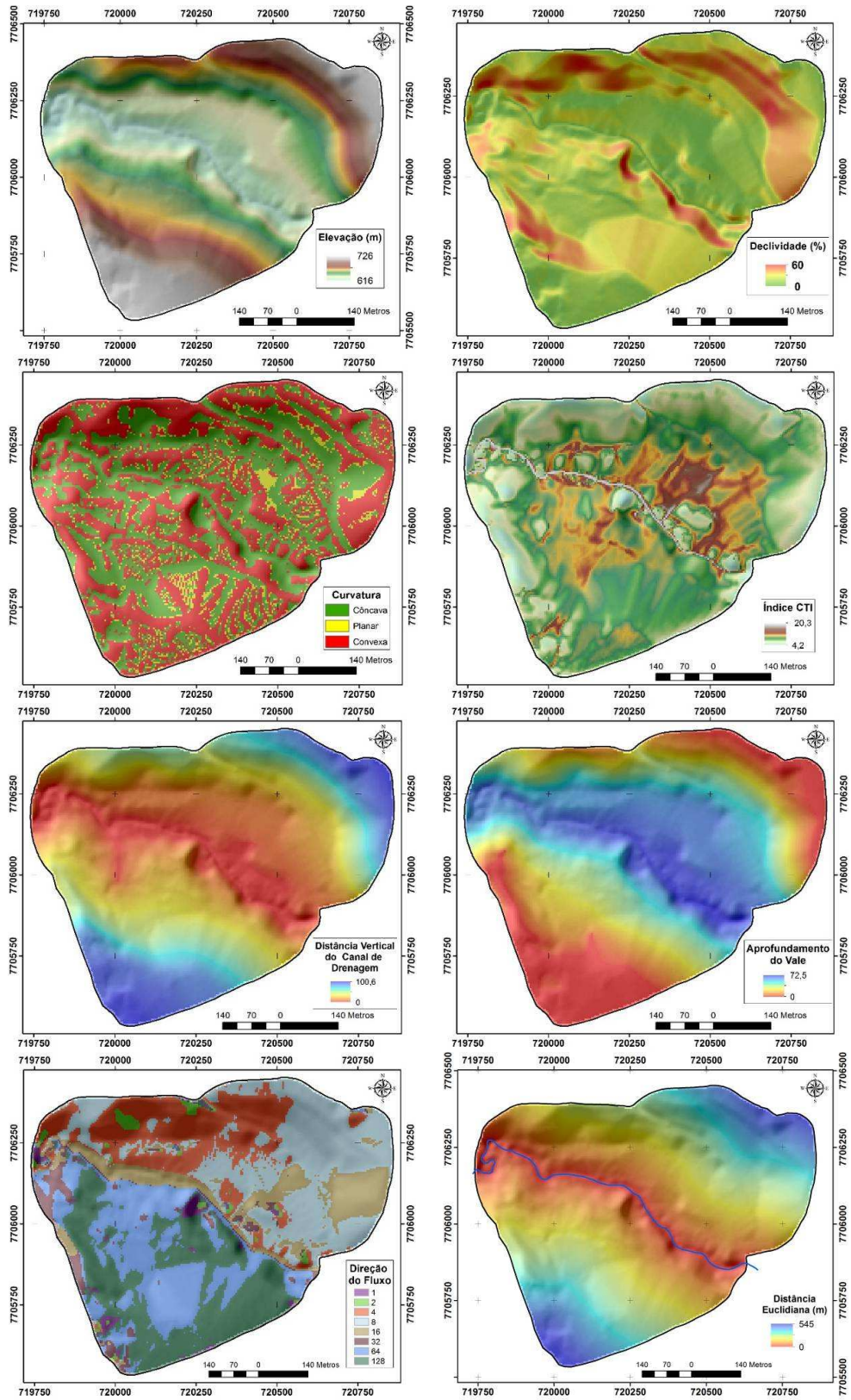


Figura 11 - Distribuição espacial dos atributos topográficos na área de estudo.

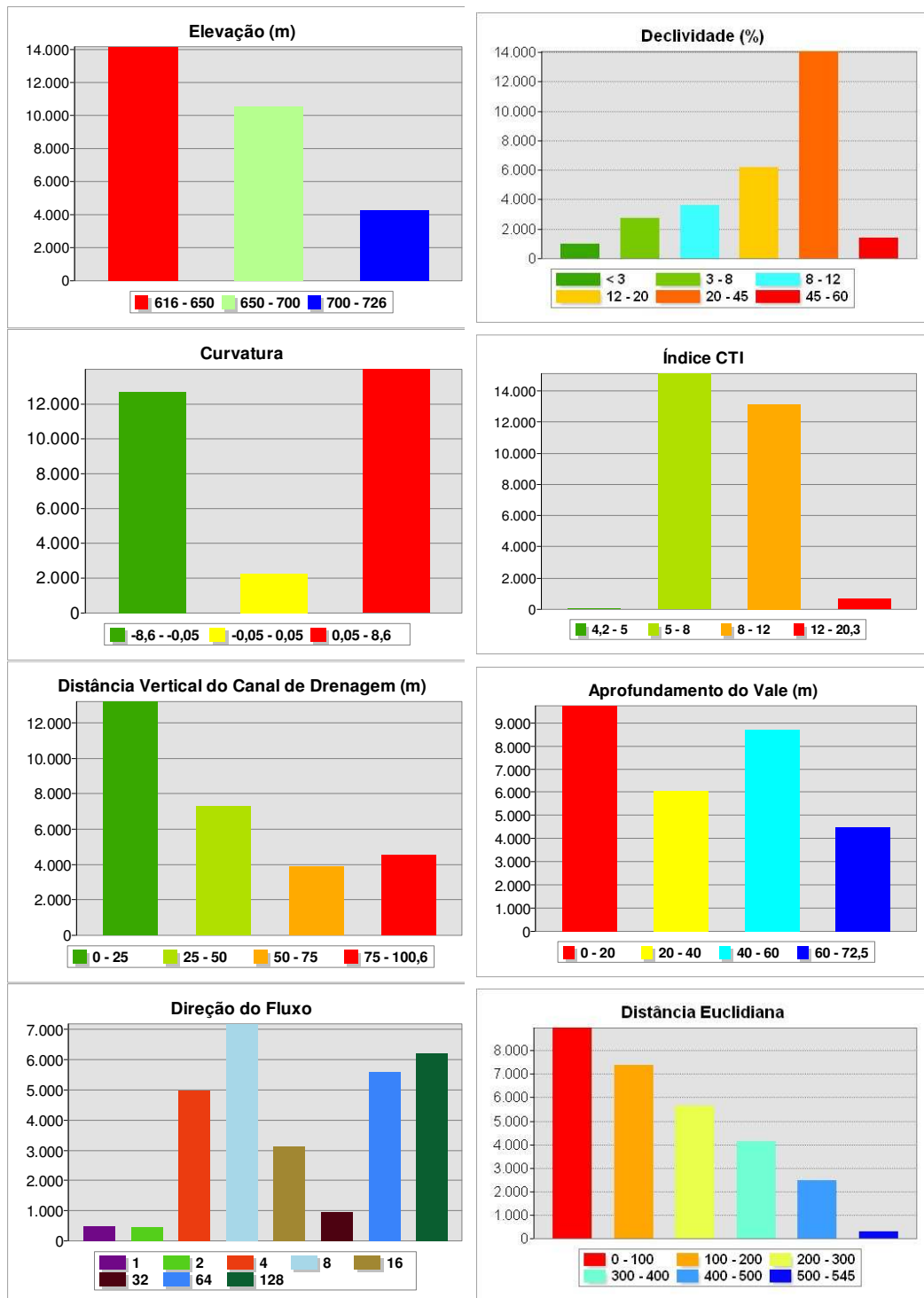


Figura 12 - Distribuição de frequência dos atributos topográficos na área de estudo.

Os valores de elevação na área variam de aproximadamente 616 a 726 m, com uma média de 658 m. As áreas de menor altitude estão localizadas próximas ao

encontro do ribeirão São Bartolomeu com o rio Turvo e as áreas mais elevadas localizam-se nos extremos norte e sul da área, nos espigões, conforme mostra a Figura 10. A área de estudo está associada em sua maior parte ao Domínio Colinoso de Mar de Morros, caracterizado por apresentar colinas com amplitude topográfica inferior a 100 m, com vertentes convexo-côncavas de gradiente suave e geometria dos topos alongada ou arredondada.

A elevada média estimada para a declividade (22,6%) expressa bem as características de relevo movimentado da área. Os maiores declives estão associados sempre com as áreas côncavas e os menores com as áreas de terraço e sedimentos do Quaternário. Tomando-se como referência a classificação adotada pela Embrapa (2013), verifica-se que 74,8% da área da bacia apresentam declividade superior a 12%, sendo que 70,0% em relevo forte ondulado (12 - 45%) e apenas 4,8% em relevo montanhoso (> 45%). As áreas de relevo plano a suavemente ondulado (0 - 12%), que favorecem a recarga do aquífero, ocupam 25,2% da área e estão localizadas, principalmente na calha do Ribeirão São Bartolomeu e no topo de elevação na porção sul.

Os resultados obtidos para a curvatura do terreno mostram que 48,3% das encostas da área são convexas, 43,9% são côncavas e aproximadamente 7,8% da área constituem áreas planas, ou seja, áreas que apresentam valores próximos a zero. A média estimada para este atributo está próxima de zero, o que comprova o equilíbrio entre áreas convexas e áreas côncavas, com o mínimo atingindo -8,56 e o máximo 8,64 (Figura 11). Valores razoáveis, para a curvatura em áreas de relevo muito movimentado, como no presente caso, estão entre -4 e 4 (GALLANT e WILSON, 2000). Dessa maneira, os resultados obtidos para este atributo ultrapassam esses valores, o que pode ser atribuído à qualidade do MDE gerado com base nas curvas de nível disponíveis.

As áreas côncavas mais significativas são encontradas nas partes mais declivosas do relevo (forte ondulado e montanhoso). Aqui a associação com a declividade é importante, pois nestas áreas são encontrados solos mais rasos (Cambissolos), devido ao intenso processo de remoção que estas áreas sofreram, causado pelo maior fluxo convergente de água. Embora, essas áreas apresentem uma maior propensão à infiltração de água no solos quando comparada com as áreas convexas, onde o fluxo é divergente, a maior parte apresenta ocupação urbana, pouco contribuindo, assim, para a recarga do aquífero. Por outro lado, a maior parte das

áreas convexas estão ocupadas por pasto e remanescentes de vegetação, principais áreas de recarga na área. Apesar disso, a elevada declividade associada a essas áreas limita a infiltração de água no solo e, por conseguinte, a recarga do aquífero. Desta maneira, as áreas potencialmente favoráveis à infiltração de água no solo e para recarga do aquífero são aquelas pouco declivosas, localizadas próximo ao Ribeirão São Bartolomeu - em sua maior parte de curvatura côncava e aquelas convexas, no topo de elevações (Figura 11). Por meio da análise da curvatura da vertente Silveira (2010) verificaram que foi maior a variabilidade espacial dos atributos físicos e hídricos do solo em áreas côncavas e convexas, enquanto que nas áreas de curvatura linear, com relevo mais homogêneo, os atributos apresentaram menor variabilidade. A explicação está associada à influência do fluxo da água e dependência espacial dos atributos físicos e hídricos do solo aos elementos do relevo (pedoformas).

Os valores obtidos para o índice topográfico combinado ou índice de umidade (CTI, sigla em inglês) variaram de 4,2 a 20,3, com um valor médio de 8,1, sendo que aproximadamente 52% das células do *grid* mostram valores inferiores à média (MOORE et al., 1993). Neste caso, valores elevados do índice CTI estão relacionados à áreas planas de baixada (10 a 15), onde são encontrados os Argissolos e/ou áreas côncavas, que favorecem o acúmulo de água no solo. De maneira geral, as áreas com declividades superiores a 12% apresentam valores de índice CTI inferiores a 8,0. Portanto, a menor porcentagem de áreas com valores do índice CTI superiores a 8,0 (47,6%) indica que existe na área de estudo um baixo potencial para a infiltração de água no solo, e, por conseguinte, para favorecer a recarga do aquífero. Além disso, a maior parte dessa área apresenta ocupação urbana.

Resultados similares foram obtidos em um trabalho de delineamento de faces da paisagem na costa Australiana utilizando-se de um MDE de 25 m de célula, encontraram um valor médio para o CTI de 9,23 com uma variação de 6,74 a 20,79. No Brasil desenvolveu-se um estudo para estimar a profundidade do lençol freático através do CTI na bacia hidrográfica do Rio Corumbataí, encontrando um valor médio de 9,38. (ALVES, 2008).

A direção de fluxo (Figura 11), que define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma área (Rennó et al., 2008), indica que as principais direções de escoamento da água na área são a sudoeste > noroeste > norte > sul (Figura 12). Dentre estas a que apresentam maior ocupação urbana são as direções sul e sudoeste, enquanto que nas demais a ocupação é pouco significativa.

Os valores obtidos para a distância vertical da superfície em relação ao canal de drenagem (Figura 11) mostram que a área apresenta em sua maior parte distâncias da drenagem superiores a 25 m (54,1%), portanto relativamente distantes em relação ao nível de base local e, por consequência, influenciando em maior grau a energia potencial da água (Romão, 2006), que favorece o escoamento superficial de água nas encostas e dificulta a infiltração no solo e a recarga do aquífero. Já os valores obtidos para o aprofundamento do vale na área alcançam valores de até 72,5 m, refletindo seu forte grau de entalhamento. Essa variável também corrobora as características da área em favorecer o escoamento superficial e dificultar a infiltração de água no solo.

Nas áreas que apresentam maior distância vertical em relação ao canal de drenagem, caracterizam solos com boa drenagem, no entanto, a água que se encontra nestas áreas também apresenta uma maior energia potencial o que pode contribuir para a ação de processos erosivos (ROMÃO, 2006). No entanto, nas áreas de topos de morro, apresentam relevo predominantemente suave ondulado, convexo e divergente. Condições estas que podem favorecer o maior desenvolvimento dos solos, pois a forma do relevo favorece a dispersão do fluxo da água reduzindo o transporte de sedimentos (VALERIANO, 2008).

Os valores obtidos para a distância euclidiana em relação ao canal de drenagem (Figura 11) mostram que a área apresenta em sua maior parte distâncias horizontais superiores a 100 m (69%), portanto relativamente distantes da drenagem.

3.2. Balanço Hídrico e Vazões no Ribeirão São Bartolomeu

Os dados referentes à precipitação, evapotranspiração, déficit hídrico e excedente hídrico, para o ano hidrológico estudado, são apresentados na Tabela 3. De acordo com estes dados, obteve-se o balanço hídrico da Figura 11, que resultou em uma precipitação total acumulada no período de 1.263,7 mm. Esse valor, em conjunto com os resultados de excedente e déficit hídricos são importantes porque com base neles é que são determinadas a recarga do aquífero para o ano hidrológico monitorado e que irá ser simulado no Visual Modflow, para a determinação do modelo hidrogeológico numérico.

Este valor é semelhante à média da região (1.200mm) e cerca de 20% inferior ao valor encontrado por Carvalho (2013) para uma microbacia de um afluente do ribeirão São Bartolomeu, igual à 1.558,30 mm. Já Rocha (2015) encontrou um valor de precipitação total de cerca de 1.006 mm para o ano de seu estudo.

Tabela 3 - Dados meteorológicos da estação da UFV

Mês	Número de Dias	P (mm)	ETP (mm)	P-ETP (mm)	ARM (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
SET_12	30	46.9	60.02	-13.1	38.54	52.3	7.7	0.0
OUT_12	31	98.9	73.36	25.5	64.08	73.4	0.0	0.0
NOV_12	30	218.1	40.34	177.8	100.00	40.3	0.0	141.8
DEZ_12	31	206.5	58.65	147.8	100.00	58.7	0.0	147.8
JAN_13	31	148.5	47.49	101.0	100.00	47.5	0.0	101.0
FEV_13	28	110.8	55.94	54.9	100.00	55.9	0.0	54.9
MAR_13	31	222.2	41.59	180.6	100.00	41.6	0.0	180.6
ABR_13	30	119.6	36.62	83.0	100.00	36.6	0.0	83.0
MAI_13	31	62.1	34.24	27.9	100.00	34.2	0.0	27.9
JUN_13	30	24.7	31.57	-6.9	93.36	31.3	0.2	0.0
JUL_13	31	1.9	30.93	-29.0	69.84	25.4	5.5	0.0
AGO_13	31	3.5	43.87	-40.4	46.64	26.7	17.2	0.0

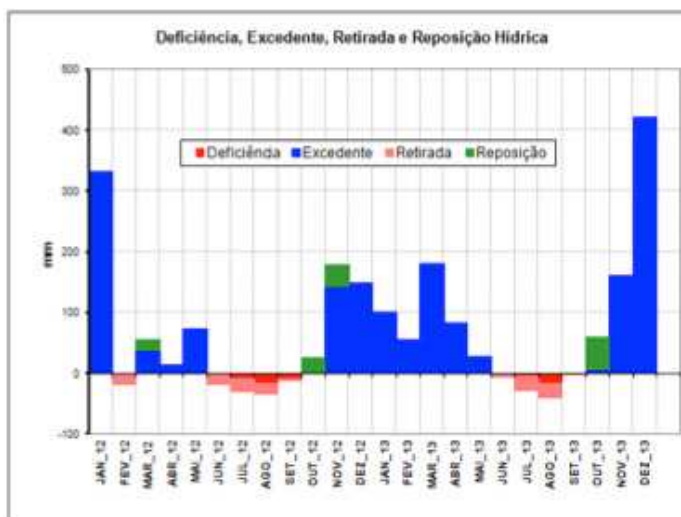
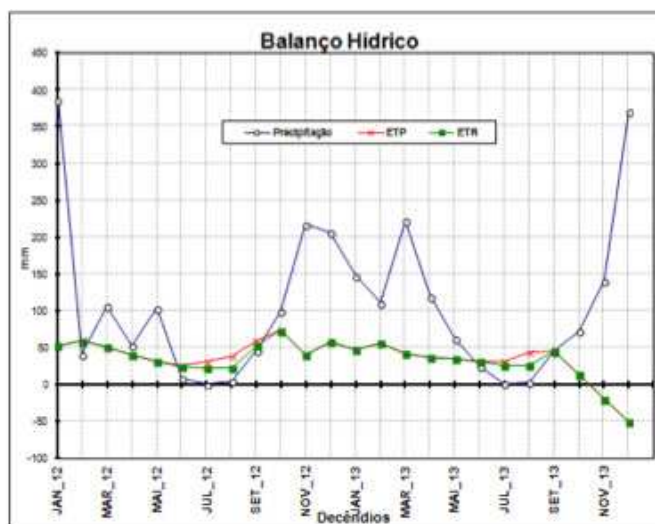


Figura 13 - Balço hídrico do município de Viçosa para o período Janeiro 2012 a Dezembro de 2013.

Fonte: Estação Meteorológica da UFV.

Como resultado do balanço hídrico, verifica-se que há um excedente hídrico no município. Esse resultado mostra que pode ocorrer recarga do aquífero na área de estudo. Mello (2013) afirma que aquíferos granulares com boa condutividade hidráulica proporcionam aos rios um regime fluviométrico mais regular, com maiores vazões por unidade de área e menor diferença entre as máximas e as mínimas. Esses aquíferos também contribuem significativamente com a vazão básica mas, em compensação, a recarga subterrânea anual é menor do que nos aquíferos fraturados, cujo regime de vazão dos rios é mais influenciado pelo regime de precipitação.

Os valores correspondentes às 9 medidas de vazão realizadas na calha do Ribeirão São Bartolomeu, na entrada e saída da área de estudo, são apresentadas no gráfico da Figura 14. Este gráfico mostra que o ribeirão São Bartolomeu apresenta comportamento influente entre abril e setembro, passando a comportamento efluente entre outubro e fevereiro, durante a estação chuvosa. Esses resultados devem, entretanto, ser analisados com cuidado, já que há lançamento de esgoto *in natura* nesse trecho do ribeirão.

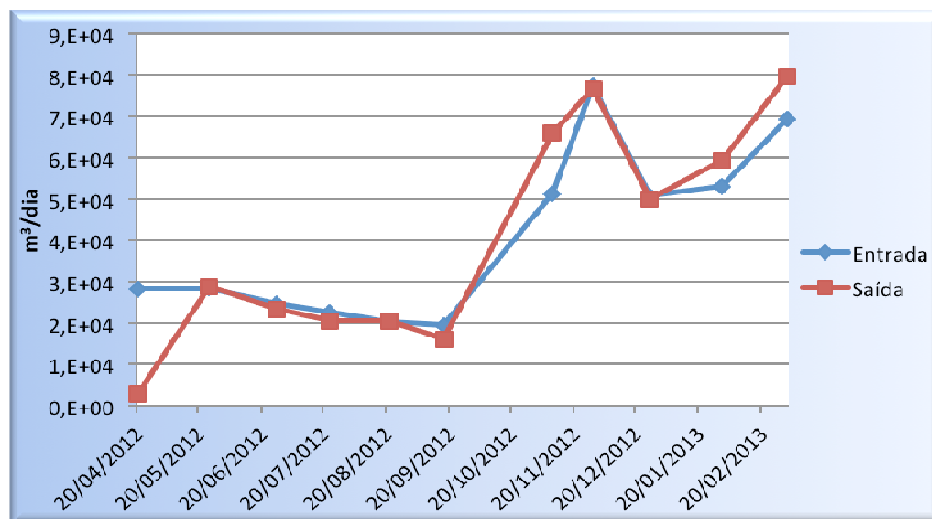


Figura 14 - Vazões de entrada e saída da área.

A variabilidade das vazões se mostrou grande principalmente no período de cheia, em decorrência da oscilação pluviométrica do período chuvoso. No período de vazante, a influência da precipitação diminui e a parcela da vazão do rio que é abastecida pelo aquífero se torna mais representativa. Embora não quantificado nesse

estudo, de forma qualitativa foi possível observar que, no período da cheia, a contribuição do aquífero para a vazão do rio é maior do que na vazante, uma vez que a carga hidráulica é maior. No período da vazante, o escoamento superficial se torna muito pequeno e o escoamento subterrâneo passa a ser o principal contribuinte do rio. Isso explica a pouca variabilidade das vazões mínimas quando comparadas às máximas, bem como a predominância de rios perenes em aquífero granular e rios intermitentes em áreas de aquífero fraturado (MELLO, 2013).

3.3. Caracterização Geológico-Geotécnica

A geologia da bacia do ribeirão São Bartolomeu é monótona. De acordo com Lopes (1989) a geologia de Viçosa caracteriza-se pelo predomínio de biotita-gnaisses, biotita-anfibólio-gnaisses e biotita-anfibólio-granada-gnaisses, localmente migmatizados, tendo, subordinadamente intercalações de quartzitos, xistos, anfibolitos e rochas cálcio-silicáticas.

O mapeamento realizado em toda a bacia por Marques (2008) permitiu identificar a presença dos três tipos de gnaisses, além de corpos intrusivos de origem ígnea, frequentemente concordantes com o bandamento gnáissico, compondo, portanto, *sills* de rocha básica com características macroscópicas de um diabásio. Essas unidades gnáissicas também ocorrem na área de estudo, entretanto, destaca-se que a delimitação desses litotipos em mapa é extremamente dificultada pela escassez de afloramentos de rocha sã na área de estudo. A maior parte dos pontos de mapeamento refere-se a exposições de solo residual jovem ou maduro em cortes de estradas e ruas. Apenas em algumas pedreiras e raros afloramentos em cortes (fora da área de estudo) é possível observar a rocha original, em diversos estágios de alteração intempérica.

Nos fundos dos vales ocorrem sedimentos Quaternários compostos por areias e argilas aluvionares, cuja delimitação pode ser determinada em imagens de satélite. Estes sedimentos caracterizam-se pela elevada variedade textural, indo desde areias puras a argilas orgânicas. Os materiais que compõem esses sedimentos na área de estudo apresentam características de permeabilidade (elevada) que favorecem a infiltração de água no terreno. Essa característica é ainda mais importante quando se considera os atributos topográficos apresentados anteriormente.

Especificamente na área objeto do presente estudo não são encontrados afloramentos de rocha sã, apenas cortes em solos residuais, maduros e jovens, de gnaisses, como se observam nas imagens da Figura 15 e da Figura 16.



Figura 15 - Solo residual jovem de gnaiss, silto-arenoso, de cor cinza e dourada (dada pela elevada concentração de micas), muito micáceo, com níveis, caulinizados. Lateralmente o SRJ, passa a argilo-arenoso, micáceo, avermelhado, com pequenos níveis de caulim. À esquerda ocorre um solo residual jovem silto-arenoso, mais erodível e à direita transição entre solo residual jovem e solo residual maduro, na qual ocorre solo argiloso de cor avermelhada. Coordenadas X: 720.897 / Y: 7.705.517.



Figura 16 - Detalhe da textura original Solo Residual Maduro de gnaiss, silto-arenoso, com vários níveis de quartzo, localmente micáceo, bem bandado. Localmente passa a areno-argiloso, róseo, bem foliada. Ocorrem veios de quartzo na massa de solo. Coordenadas – X: 720.562 / Y: 7.705.772.

O perfil geológico-geotécnico da área de estudo foi construído com base nos dados coletados em superfície durante levantamento de campo e dados advindos das sondagens realizadas para a instalação dos poços de monitoramento. A seguir na Figura 17 é apresentada uma seção geológico-geotécnica elaborada da área de estudo, como exemplo. As demais seções são apresentadas em anexo.

Carvalho (2013) e Betim (2013) encontraram perfis geológico-geotécnicos semelhantes ao mostrado na Figura 16 em trabalhos desenvolvidos na bacia do Córrego Palmital, que é um afluente do Ribeirão São Bartolomeu. Já Rocha (2015) encontrou apenas solos residual jovem em seu estudo realizado no campus da UFV, a montante da área do presente estudo. Stephan (2010), estudando processos erosivos em solos residuais de Juiz de Fora (MG), também encontrou perfis geológico-geotécnicos semelhantes, desenvolvidos também sobre rochas gnáissicas e migmatíticas semelhantes às existentes na área. Fonseca (2014), estudando indicadores ambientais em áreas de risco de movimentos de massa em Juiz de Fora também encontrou perfis desenvolvidos em rochas gnáissicas de Juiz de Fora (MG), muito semelhantes aos descritos para a área de estudo. De forma geral, os materiais que compõem os solos residuais encontrados na área de estudo e mostrados na Figura 15 e na Figura 16, ocorrem por toda a área de ocorrência de rochas gnáissicas de alto grau existentes na Zona da Mata de Minas Gerais.

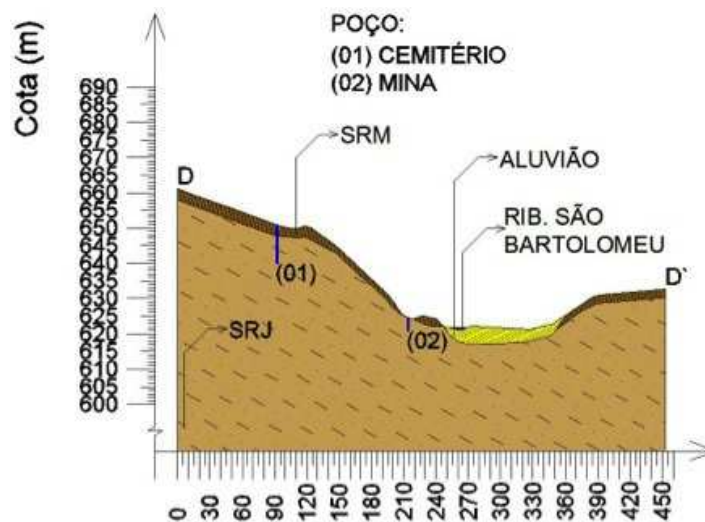


Figura 17 - Seção geológico-geotécnica D.

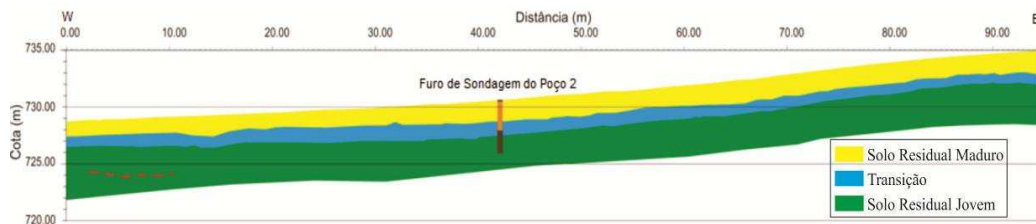


Figura 18 - Perfil geológico-geotécnico encontrado por Carvalho (2013).

A identificação dos materiais existentes em profundidade na área de estudo, representado no perfil esquemático da Figura 18, norteou a instalação dos poços de monitoramento, de tal maneira que os mesmos atravessassem todas as camadas observadas e que dados sobre a condutividade hidráulica desses materiais, que servirão como dados de entrada no modelo numérico, pudessem ser coletados.

3.4. Caracterização dos Solos

O mapa de caracterização dos solos da área de estudo, elaborado com o auxílio do MDE e dos atributos do terreno, na escala de 1:10.000 (Figura 19), a partir das relações entre os solos identificados no perfis e esses atributos do terreno (relação solo-paisagem) identificou as seguintes classes de solos nas partes onde não há ocupação urbana intensa (áreas permeáveis): Argissolos Vermelho-Amarelos, Cambissolos Háplicos e Latossolos Vermelho-Amarelos.

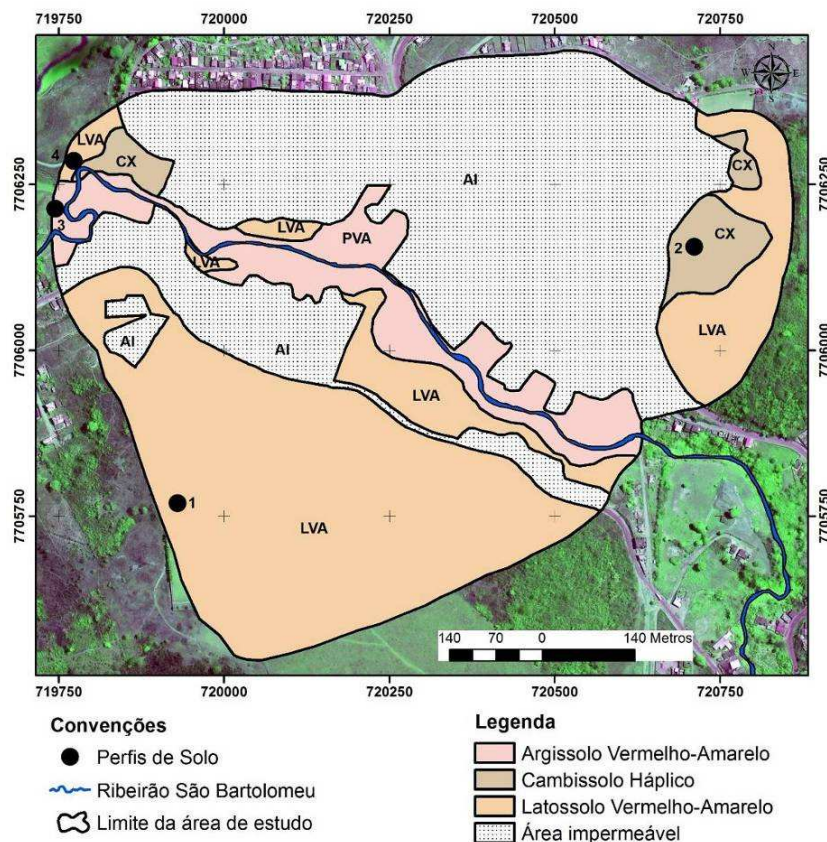


Figura 19 - Mapa de caracterização dos solos da área estudada.

Os Latossolos Vermelho-Amarelos, que ocupam 28,56 ha (39,5% da área total de estudo) são a classe dominante, seguida pelos Argissolos Vermelho-Amarelos, com 7,48 ha, o que equivale a 10,4% da área de estudo e dos Cambissolos Háplicos que foram identificados em 2,62 ha (3,6%). A área considerada impermeável, formada pelas ocupações urbanas e vias pavimentadas ocupam 33,66 ha, o que corresponde a 46,5% da área (Tabela 4).

Tabela 4 - Área das classes de solos identificadas na área de estudo

Classe de Solo	Área (Ha)	%
Argissolo Vermelho-Amarelo	7,48	10,4
Cambissolo Háplico	2,62	3,6
Latossolo Vermelho-Amarelo	28,56	39,5
Área Impermeável	33,66	46,5
Total	72,3	100

Os Latossolos Vermelho-Amarelos, que predominam nas partes mais declivosas e convexas da paisagem, situação típica na região (BARUQUI, 1982), são solos profundos a muito profundos, com espessura do sólum sempre superior a 150 cm, apresentam textura argilosa ou muito argilosa e são acentuadamente drenados (Figura 20). De maneira geral, apresentam condições físicas muito boas, sem a presença de camadas de impedimento, que possibilitam a infiltração e a retenção de água nas camadas mais profundas, que por sua vez favorecem a recarga do aquífero. No entanto, por ocorrerem em áreas muito declivosas e convexas com fluxo divergente, a infiltração e retenção de água pode ser limitada.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos que ocupam as partes baixas da área de estudo (vales e terraços), ao longo de toda a calha do Ribeirão São Bartolomeu são solos profundos, bem drenados, de textura argilosa ou muito argilosa e não apresentam camadas de impedimento que possam limitar a infiltração de água no solo (Figura 20). Por essas razões também apresentam condições físicas bastante favoráveis para infiltração de água no solo, embora sejam mais estruturados e apresentem uma velocidade de infiltração mais lenta do que a verificada para os Latossolos Vermelho-Amarelos. Diferentemente destes, por ocuparem áreas menos declivosas apresentam condições muito mais favoráveis para a recarga do aquífero.

Os Cambissolos Háplicos são encontrados em locais de grande inclinação associados com áreas de curvatura côncava. Estes solos são caracterizados por serem pouco profundos ou profundos, com espessura do sólum sempre inferior a 150 cm, apresentam textura média ou argilosa e são bem drenados (Figura 18). A presença

desses solos em relevo muito movimentado, limita a infiltração de água nestes solos e favorece sobremaneira o escoamento superficial de água.



Figura 20 - Perfis representativos dos solos identificados na área.

Carvalho (2013), obteve valores de condutividade hidráulica para Argissolos, Latossolos e Cambissolos para uma outra área na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, em seu modelo hidrogeológico numérico calibrado. Os resultados obtidos pelo autor encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores de condutividade hidráulica (K) do modelo calibrado para os eixos x, y e z

Camada 1	Kx (cm·s⁻¹)	Ky (cm·s⁻¹)	Kz (cm·s⁻¹)
Latossolo	2,10E-05	2,03E-05	1,87E-06
Aluvião	2,48E-05	2,56E-05	2,28E-05
Argissolo	4,55E-05	4,29E-05	3,40E-06
Cambissolo	1,41E-04	1,35E-04	4,02E-07

Betim (2013) realizou ensaios de condutividade hidráulica nesses três tipos de solos e encontrou os valores mostrados na Tabela 6 e que resultaram nos valores médios mostrados na Tabela 7. Os resultados foram um pouco diferentes com daqueles obtidos por Carvalho (2013), já que os Cambissolos Háplicos são aqueles que apresentam a maior condutividade hidráulica média, enquanto os Argissolos apresentam a menor.

Zuquette (2006), afirma que o uso e o estágio de desenvolvimento, assim como as práticas de manejo, afetam as propriedades hidráulicas dos materiais inconsolidados e, portanto, as características de infiltração, refletidas pelos resultados da condutividade hidráulica e, conseqüentemente, afetam, também, a recarga do aquífero. As características de recarga podem ser avaliadas com resultados muito diferentes, em função de como considera-se o evento de chuva, se com intensidade constante ou transiente, ao longo da duração total. Dependendo de como é definido o evento de chuva, pode se chegar a valores muito diferentes, quanto à recarga e ao escoamento superficial. Para a condição de cana-de-açúcar antiga, observa-se uma menor capacidade de infiltração, gerando, conseqüentemente, um maior potencial de escoamento superficial. Assim, a taxa de infiltração varia intensamente, tanto espacial, quanto temporalmente, demandando medidas de gestão para orientar a exploração das águas, em relação às taxas de recarga, em função do processo de uso e ocupação dessas regiões.

Fiori e Campos (2010) comprovaram que as variações da condutividade hidráulica vertical K, de cada grupo dos diferentes tipos de coberturas de regolitos e solos são controladas, principalmente, pela estrutura e macroporosidade do perfil. A diminuição da condutividade observada com o aumento da profundidade é devida aos processos de translocação de argilas e pela redução da estruturação granular e grumosa.

Considerando-se os resultados desses autores, observa-se que há uma variação natural da condutividade hidráulica nesses solos, em função das suas características genéticas. De maneira geral, entretanto, é possível observar que a consideração da condutividade hidráulica desses solos, associada às suas características físicas e às condições de relevo em que os mesmos ocorrem na área de estudo permite concluir que os solos mais favoráveis à infiltração de água (recarga do aquífero freático) são os Argissolos, que ocorrem em porções do relevo mais suaves e apresentam maiores valores de condutividade hidráulica.

Tabela 6 - Resultados de condutividade hidráulica obtidos por Betim (2013)

Classe de Solo	Profundidade do Ensaio (cm)	Condutividade Hidráulica (cm.s⁻¹)	Média (cm.s⁻¹)
Argissolo Vermelho-Amarelo	80 – 130	9,26E-05	5,78E-05
	130 – 180	2,31E-05	
Latossolo Vermelho-Amarelo	50 -150	1,01E-05	5,59E-05
	150 – 250	6,04E-05	
	250 – 350	3,57E-05	
	350 – 450	1,17E-04	
Argissolo Vermelho-Amarelo	95 – 195	4,42E-06	3,43E-06
	195 – 215	2,44E-06	
Cambissolo Háplico	100 – 200	5,93E-06	2,80E-05
	200 – 300	1,00E-04	
	300 – 400	3,70E-06	
	400 – 500	4,44E-05	
	500 – 600	8,14E-06	
	600 – 700	1,39E-05	
	600 – 800	1,99E-05	
Cambissolo Háplico	100 – 200	3,90E-05	7,97E-05
	200 – 300	7,36E-05	
	300 – 400	1,18E-04	
	400 – 500	6,02E-05	
	500 – 600	6,73E-05	
	600 – 700	1,14E-04	
	600 – 800	8,63E-05	
Latossolo Vermelho-Amarelo	80 – 180	4,32E-07	8,21E-06
	180 – 280	2,31E-07	
	280 – 380	2,48E-05	
	380 – 480	7,21E-06	
	480 – 580	8,39E-06	

Tabela 7 - Valores médios de condutividade hidráulica para as classes de solo presentes na área de estudo

Classe de Solo	Condutividade Hidráulica Média (cm.s⁻¹)
Latossolo Vermelho-Amarelo	3,20E-05
Argissolo Vermelho-Amarelo	3,06E-05
Cambissolo Háplico	5,39E-05

3.5. Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo é mostrado na Figura 19. A partir desse mapa foi possível separar as zonas permeáveis das zonas impermeáveis da área de estudo (Figura 21). Ao contrário das áreas estudadas por Betim (2013), Carvalho (2013) e Rocha (2015), nas quais predominava o uso agrícola, a área do presente estudo caracteriza-se pela sua intensa urbanização, que ocupa 31,72 ha de um total de 72,32 ha, o que equivale a 43,8% da área total (Tabela 8). As principais ocupações do solo na área de estudos foram: ocupação urbana, pasto e vegetação remanescente.

Tabela 8 - Usos do solo existentes na área de estudo

Classe de Uso e Cobertura do Solo	Área (Ha)	%
Cemitério	3,42	4,7
Ocupação Urbana	31,72	43,8
Pasto	26,66	36,9
Solo exposto	0,91	1,3
Vegetação remanescente	7,65	10,6
Via pavimentada	1,96	2,7
Total	72,32	100

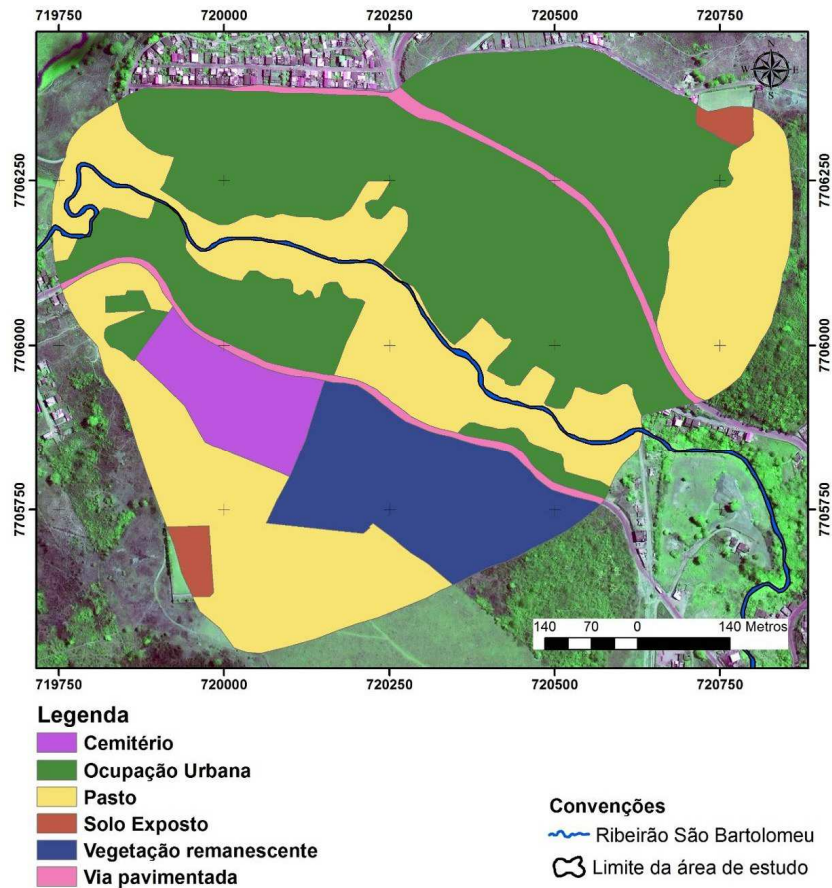


Figura 21 - Mapa de uso e cobertura do solo da área de estudo.

Os processos de recarga de um aquífero são influenciados pela superfície e subsuperfície, ocorrendo de forma mais acentuada em áreas em que os solos possuem textura mais grosseira, pois sua permeabilidade é maior. O processo de compactação dos solos diminui a permeabilidade dos solos (PAES e NETO, 2012).

O uso da terra exerce significativa influência sobre a infiltração da água no solo e esta pode ser modificada pelo homem, por intermédio de seus programas de manejo. A interrelação entre as diferentes atividades humanas e as potencialidades e fragilidades do meio físico podem acarretar tanto situações de risco ao homem e a seus empreendimentos quanto impactos ambientais e, em consequência, provoca a degradação de áreas e riscos à saúde pública (BROLLO, 2000).

As áreas habitadas (quadras e habitações individuais) representam uma fonte de contaminação e impermeabilização nas áreas de afloramento. A potencial contaminação biológica, principalmente coliformes, nestes locais próximos às áreas habitadas, deve se ao lançamento de dejetos orgânicos e inorgânicos, a criação de

animais e ainda ao acúmulo de resíduos (plástico, latas, mobílias). A redução da infiltração da água no solo para recarga do aquífero, seja pela impermeabilização e/ou compactação ou pelo aumento do escoamento superficial, é um agravante (MAZZOLLI, 2013).

3.6. Monitoramento dos Poços

Os poços de monitoramento foram monitorados quinzenalmente no período de setembro de 2012 à agosto de 2013. Os resultados são apresentados na Tabela 9, em que é possível observar todas as leituras do nível d'água freático realizadas. Além dos 14 (catorze) poços escavados apresenta-se, ainda, os resultados da leitura do NA em 3 (três) cisternas cadastradas na área.

Na Figura 22 mostra-se as curvas de variação do N.A. em cada poço. É possível notar que a variação do N.A. apresenta comportamento semelhante em todos os poços com rebaixamento e subida do lençol para um mesmo período do ano, em resposta à precipitação.

Tabela 9 - Resultados do monitoramento do nível freático (N.A.)

Data	Moto Pista	MBC	Milharal	Ponte	Lote	Bananeira	Mina	Oficina Mecânica	Boate	Cemitério	PSF 1	1º de Maio	PSF 2	Camp. do Esc.	Cisterna Filinha	Cisterna João Fer.	Cisterna Elisangela
07/09/2012	3,34	2,42	1,83	4,98	3,36	2,3	2,6	2,24	-	14	9,5	-	-	-	4,98	10,06	10,45
17/09/2012	3,32	2,4	1,83	5	3,37	2,18	2,55	2,24	-	14,11	9,56	-	-	-	5,14	10,02	10,45
02/10/2012	3,34	2,43	1,83	5,01	3,39	2,29	2,58	2,25	-	13,88	9,59	-	-	-	5,18	9,8	10,48
18/10/2012	3,3	2,37	1,83	5,05	3,4	2,25	2,58	2,24	-	14,18	9,66	-	-	-	5,09	9,62	10,37
03/11/2012	3,33	2,45	1,89	5,1	3,45	2,36	2,69	2,26	-	14,27	9,71	-	-	-	4,8	9,76	10,41
12/11/2012	3,26	2,22	1,77	5,05	3,41	2,17	2,56	2,15	-	14,37	9,75	-	-	-	4,94	9,76	10,54
27/11/2012	3,27	2,35	1,86	5,28	3,5	2,19	2,61	2,18	-	14,57	9,79	-	-	-	5	9,8	10,44
12/12/2012	3,17	2,21	1,69	5,39	3,74	2,09	2,58	2,09	-	14,53	9,85	-	-	-	4,9	9,88	10,45
28/12/2012	3,27	2,39	1,93	5,55	3,9	2,35	2,46	2,17	-	14,63	9,9	-	-	-	4,9	9,97	10,72
17/01/2013	3,29	2,47	2	5,54	3,9	2,54	2,75	2,3	-	14,86	9,95	-	-	-	4,95	10,05	10,67
31/01/2013	3,25	2,66	2,17	5,49	3,85	2,47	2,72	2,22	-	14,93	10	-	-	-	4,81	10,15	10,71
15/02/2013	3,26	2,74	2,26	5,57	3,89	2,57	2,7	2,24	-	14,99	10,02	-	-	-	4,94	10,2	10,77
27/02/2013	3,35	2,81	2,34	5,57	3,91	2,59	2,85	2,28	-	15,06	10,07	-	-	-	5	10,3	10,83
13/03/2013		2,69	2,08	5,49	3,77	2,84	2,36	2,38	-	15,1	10,13	-	-	-	5,05	10,6	11,04
27/03/2013		2,69	2,13	5,53	3,85	2,27	2,68	2,38	-	15,17	10,14	-	-	-	5,06	10,3	10,93
10/04/2013		2,56	1,94	5,41	3,73	1,98	2,62	2,41	-	15,09	10,21	-	-	-	5,02	10,32	10,59
26/04/2013		2,41	1,98	5,47	3,69	1,84	2,56	2,35	-	15,07	10,17	-	-	-	5,02	10,33	10,57
16/05/2013		2,36	2,09		3,92	2,45	2,79	2,55	-	15,19	10,26	-	-	-	4,99	10,34	10,51
30/05/2013		2,23	1,85		3,74	2,29	2,51	2,31	-	14,71	9,59	-	-	-	4,93	10,22	10,41
14/06/2013		2,19	1,78		3,71	2,21	2,46	2,25	-	14,58	9,32	-	-	-	4,85	10,21	10,38
27/06/2013		2,21	1,81		3,66	2,2	2,39	2,21	-	14,55	9,28	-	-	-	4,85	10,22	10,35
12/07/2013		2,2	1,77		3,64	2,18	2,37	2,22	-	14,49	9,24	-	-	-	4,86	10,2	10,34
29/07/2013		2,17	1,71		3,64	2,15	2,27	2,29	-	14,45	9,2	-	-	-	4,82	10,19	10,32
15/08/2013		2,15	1,71		3,6	2,11	2,23	2,29	-	14,41	9,17	-	-	-	4,8	10,19	10,3
31/08/2013		2,19	1,79		3,65	2,16	2,25	2,34	-	14,52	9,24	-	-	-	4,92	10,24	10,31

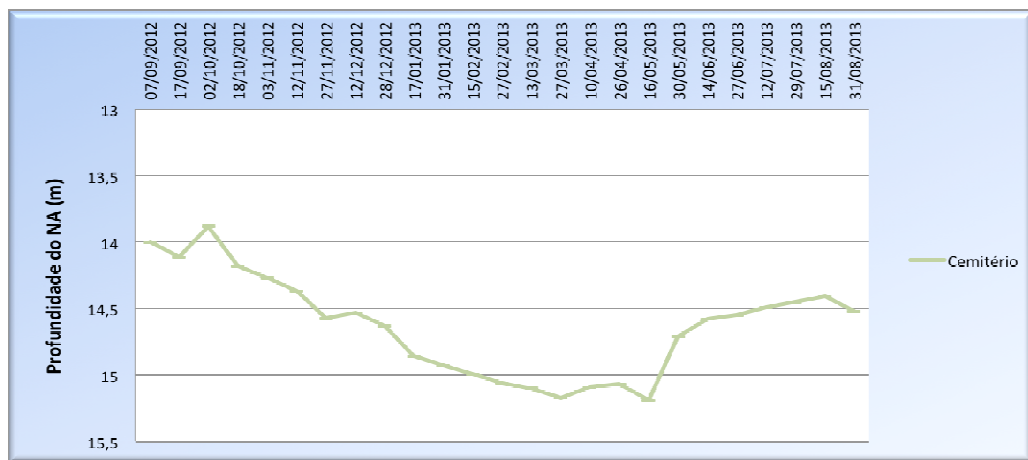
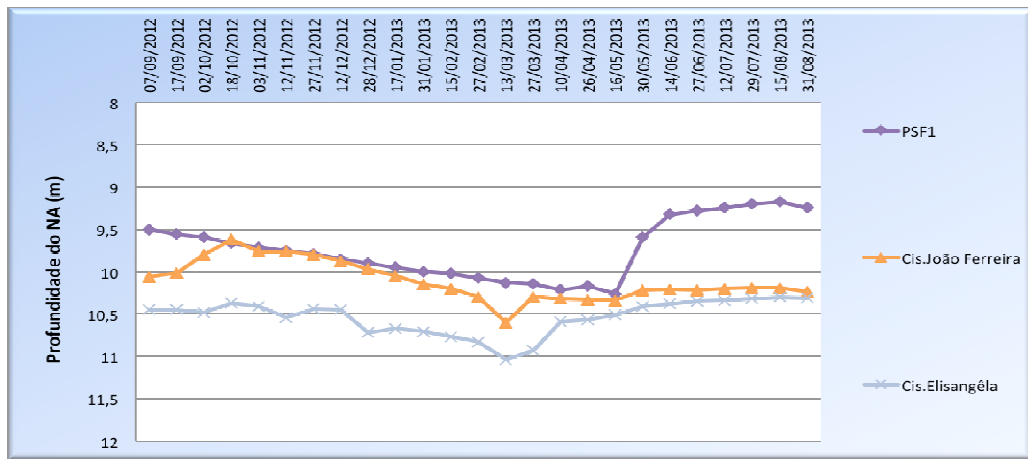
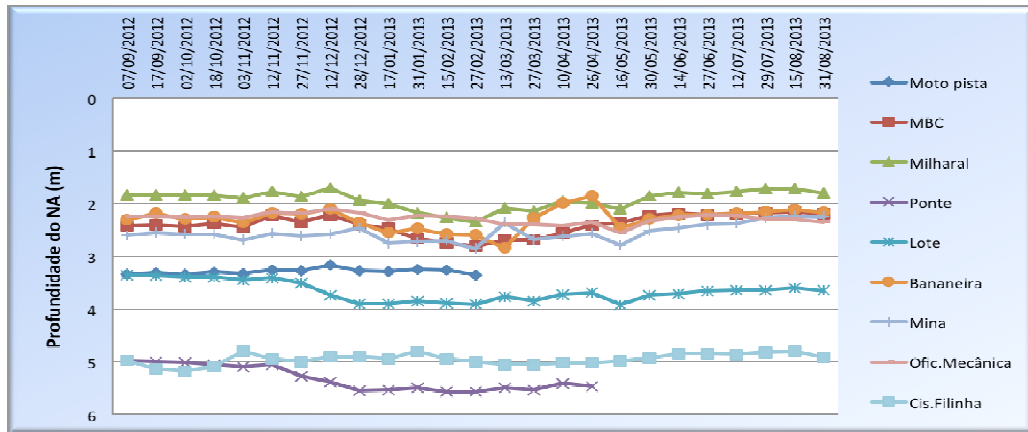


Figura 22 - Gráficos do NA dos poços de monitoramento.

Na Tabela 10 mostram-se os valores referentes às cotas mínimas, máximas e a variação do N.A. ao longo do período monitorado para cada um dos poços de observação.

Tabela 10 - Variação do NA nos poços de monitoramento

Poços	Profundidade Mínima	Profundidade Máxima	Variação (m)
Moto Pista	3.17	3.35	0.18
MBC	2.15	2.81	0.66
Milharal	1.69	2.34	0.65
Ponte	4.98	5.57	0.59
Lote	3.36	3.92	0.56
Bananeira	1.84	2.84	1.00
Mina	2.23	2.85	0.62
Oficina Mecânica	2.09	2.55	0.46
Cemitério	13.88	15.19	1.31
PSF 1	9.17	10.26	1.09
Cisterna Filinha	4.8	5.18	0.38
Cisterna João Fer.	9.62	10.34	0.72
Cisterna Elisangela	10.3	11.04	0.74

As variações da superfície freática são inferiores à 1,5 m e localizam-se, sempre, dentro dos limites da mesma camada geológica. Logo, o aquífero da área de estudo é livre, confirmando a hipótese de que, apesar de haver duas camadas de solo sobre o maciço rochoso (solo residual maduro e solo residual jovem), as camadas estão interconectadas, compondo um único aquífero freático. Observa-se uma grande correlação entre as precipitações na bacia e o aumento da superfície freática, o que é esperado para um aquífero livre. Todos os poços mostraram elevação da cota do N.A. um mês após o término do período de chuvas (maio/2013). Essa elevação do N.A. manteve-se até meados de agosto de 2013, quando o N.A. começa a se aprofundar, em função do período de estiagem. Isso mostra que há uma defasagem entre o período de chuvas e a flutuação do N.A., mas que o mesmo é diretamente afetado pela recarga proporcionada pelos períodos de chuvas mais intensas.

A comparação desses resultados com os obtidos por Carvalho (2013) e Rocha (2015), mostrados na Figura 23 e na Figura 24, mostra que na área desses autores, nas quais o uso do solo é predominantemente agrícola, e não há ocupação urbana, a resposta dos aquíferos freáticos aos eventos de precipitação se dá de forma muito

mais rápida, podendo-se observar picos de elevação do N.A. em até 1 mês após a ocorrência de chuvas mais intensas, ou seja, de forma bem mais rápida em relação à área do presente estudo, provavelmente em função do uso diferente.

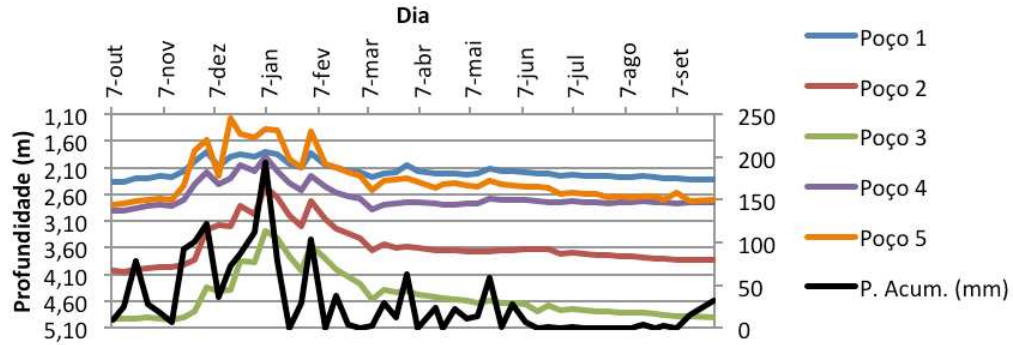


Figura 23 - Resultados do monitoramento do N.A. em poços de observação realizados por Carvalho (2013), entre outubro de 2011 e setembro de 2012, com frequência semanal.

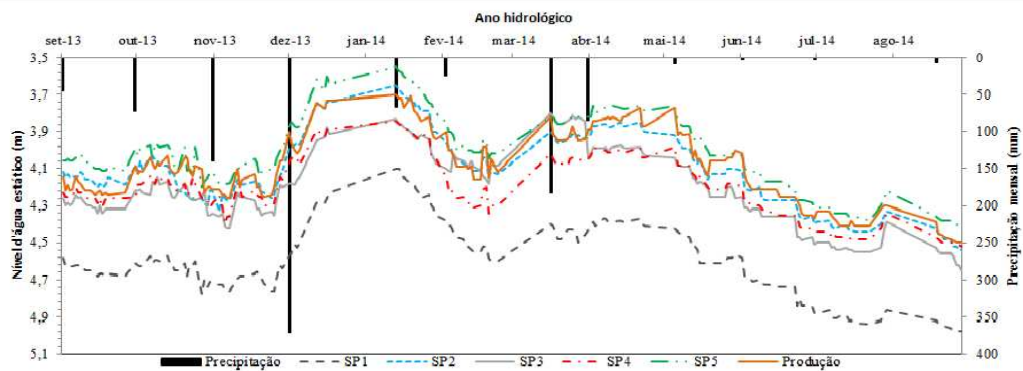


Figura 24 - Resultados do monitoramento do N.A. em poços de observação realizados por Rocha (2015) com frequência semanal.

3.7. Determinação da Condutividade Hidráulica

A determinação da condutividade hidráulica pelos ensaios de *Slug Test* foram realizados em quatro poços (Figura 25): P5 (Lote), P6 (Bananeira), P8 (Oficina Mecânica) e P12 (Cemitério). Os gráficos com os resultados de cada teste podem ser observados na Figura 26, na Figura 27, na Figura 28 e na Figura 29.

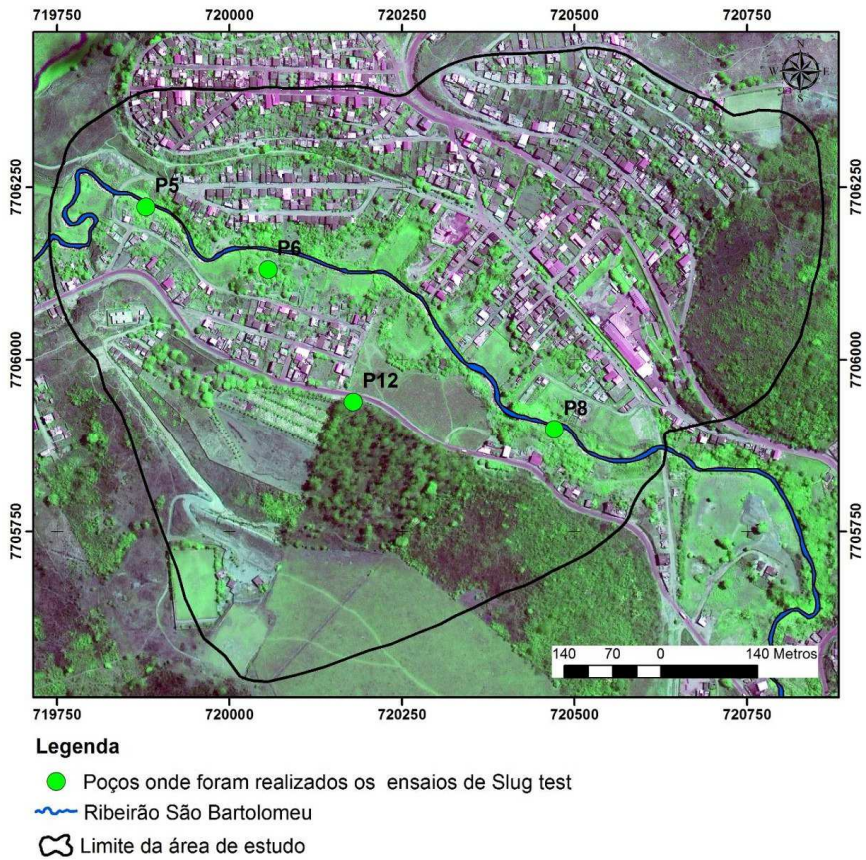


Figura 25 - Poços nos quais foram realizados ensaios de *Slug Test*.

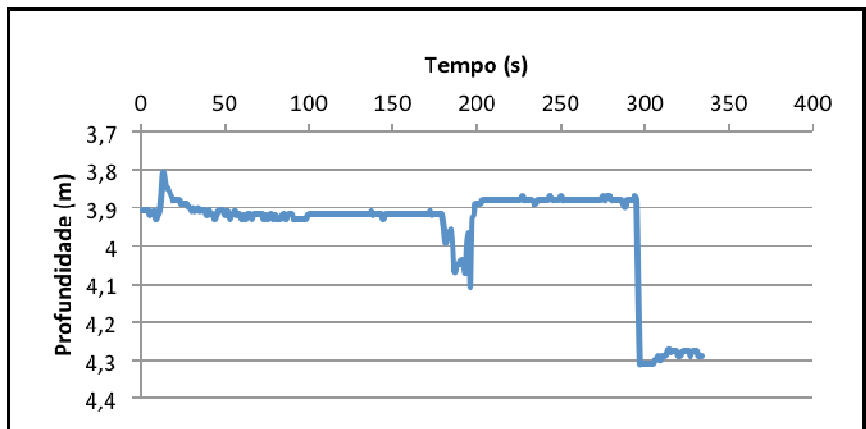


Figura 26 - Resultado do *Slug Test* do poço P5.

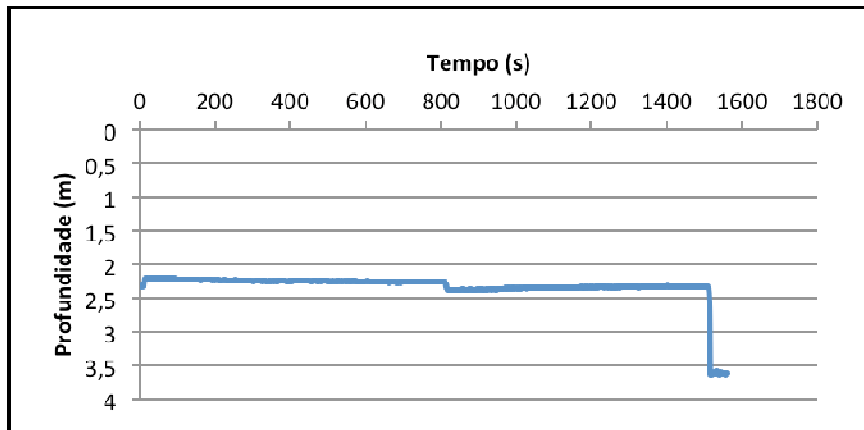


Figura 27 - Resultado do *Slug Test* do poço P6.

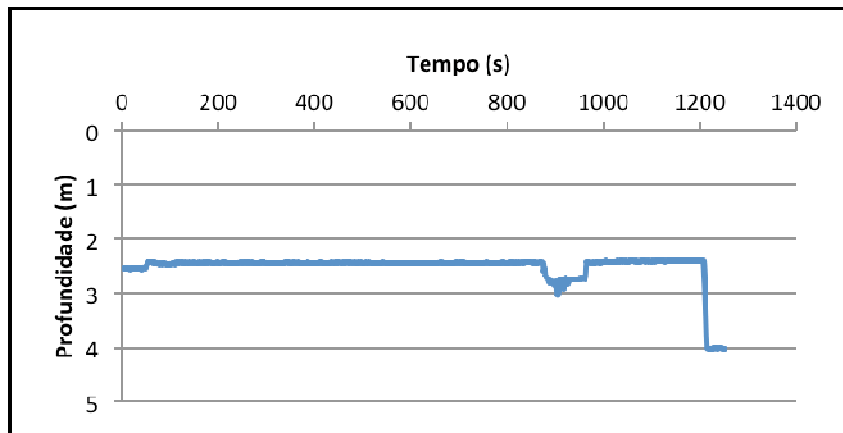


Figura 28 - Resultado do *Slug Test* do poço P8.

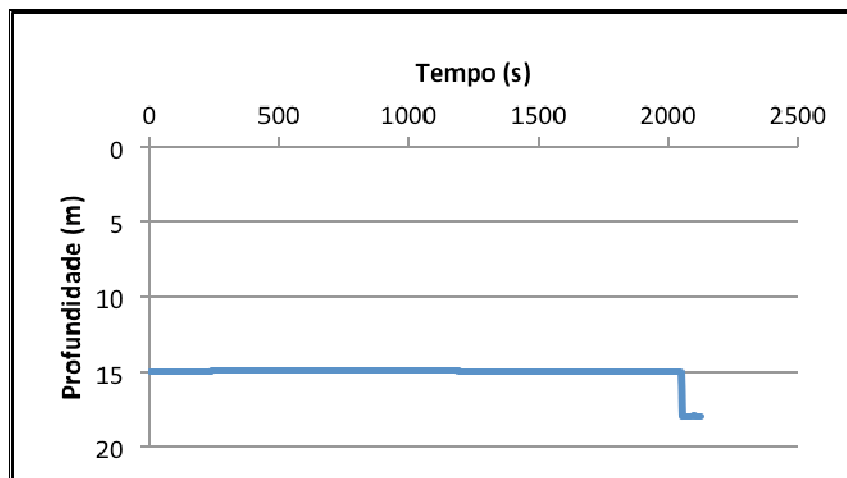


Figura 29 - Resultado do *Slug Test* do poço P12.

Nos gráficos da Figura 30 a Figura 33 apresentam-se os dados obtidos nos *Slug Test* e que foram utilizados no cálculo da condutividade hidráulica.

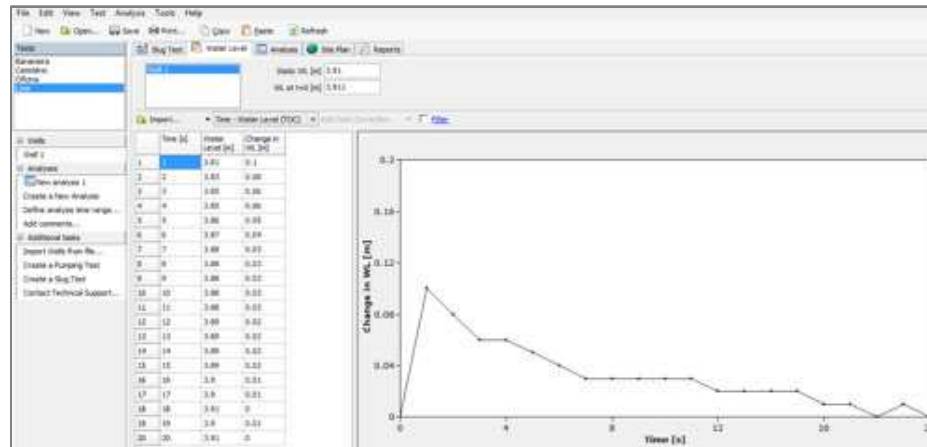


Figura 30 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P5 – Lote.

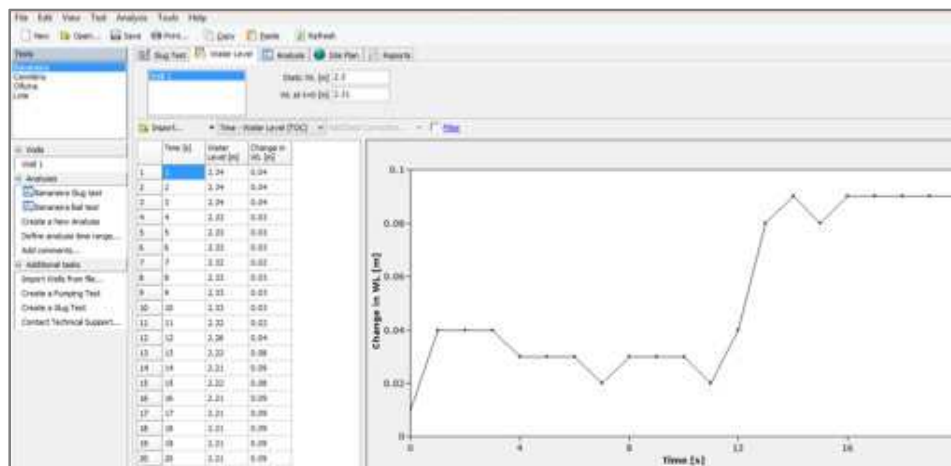


Figura 31 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P6 – Bananeira.

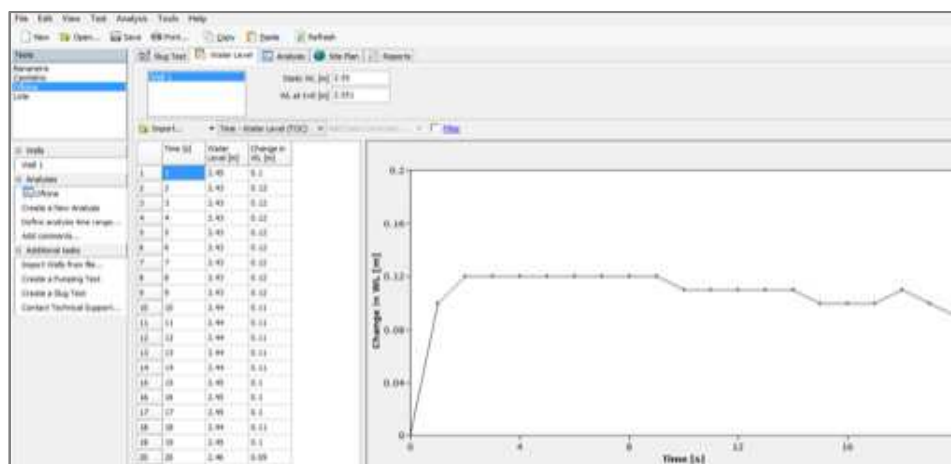


Figura 32 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P8 – Oficina.

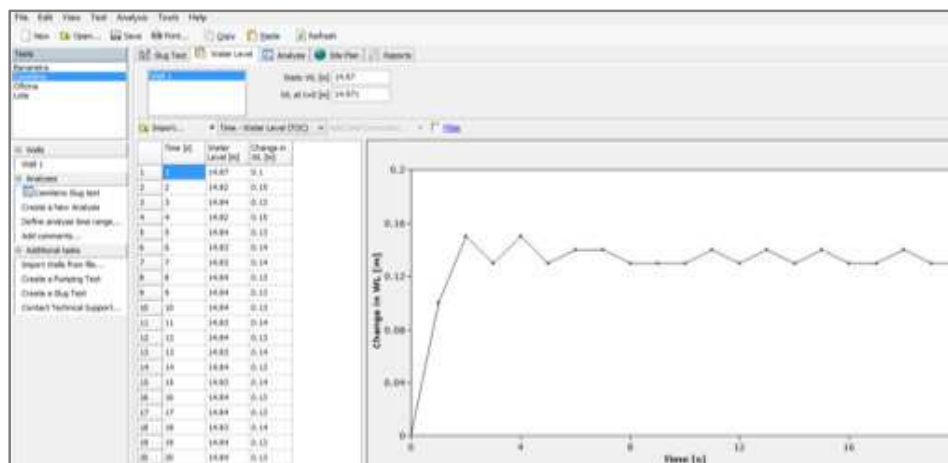


Figura 33 - Gráfico com a alteração do lençol freático no P8 – Oficina.

Na Tabela 11 a seguir, apresentam-se as condutividades hidráulicas calculadas a partir dos resultados dos *Slug Test* através do programa *Aquifer Test Pro 4.0*.

Tabela 11 - Condutividade Hidráulica (K)

Poços	Condutividade Hidráulica K (m/s)	Tipo de Solo
P5	$4,21 \times 10^{-4}$	Aluvião
P6	$1,516 \times 10^{-6}$	Solo Residual Maduro (SRM)
P8	$4,79 \times 10^{-8}$	Aterro Compactado
P12	$2,14 \times 10^{-7}$	Solo Residual Jovem (SRJ)

Os resultados encontrados estão para a condutividade hidráulica dos solos residuais estão em acordo (mesma ordem de grandeza) com os resultados obtidos por Carvalho (2013) e Betim (2013), mostrados na Tabela 4, na Tabela 5 e na Tabela 6. Já o valor de condutividade hidráulica da camada de aluvião mostrou-se uma ordem de grandeza maior do que à determinada por Rocha (2015), também na margem do Ribeirão São Bartolomeu. Entretanto, em função da elevada variedade textural dos aluviões existentes na calha do ribeirão, considera-se que o valor obtido é representativo e coerente com os materiais que ocorrem na área.

3.8. Levantamento de Poços e Nascentes e Volume de Captação de Água Subterrânea

De acordo com o levantamento realizado junto ao SAAE (Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa – MG), mostrado na Tabela 12, não existem cisternas cadastradas na área de estudo. Os poços cadastrados, tanto no Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM) quanto no Sistema de Informação e Gestão de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) ainda são poucos. Entretanto, sabe-se que existem diversos poços ainda não cadastrados, já que provavelmente os mesmos não têm outorga. Mesmo o SAAE, assim como o IGAM, responsável por avaliar os processos de outorga em nível estadual, não tem um cadastro atualizado dos poços existentes, pelo que se procurou, no presente trabalho, realizar este levantamento para a área de estudo. Como é possível observar na Tabela 1, existe um total de 14 (quatorze) poços profundos cadastrados na área do município de Viçosa, sendo dez poços cadastrados pelo SAAE e quatro pela presente pesquisa.

Destaca-se que, nos poços cadastrados pelo SAAE, não há informações dos volumes captados, pois os mesmos não são monitorados. Assim apenas nos poços cadastrados pela presente pesquisa foram obtidas as vazões outorgadas.

Tabela 12 - Informações sobre os poços já cadastrados na área do município de Viçosa (MG)

Poço	Coordenadas do Poço (UTM SAD 69)		Vazão Bombeada (m ³ /h)
	X	Y	
Poço Cadastro 1	722.319,329	7.709.278,314	N. D.
Poço Cadastro 2	722.104,757	7.709.523,791	N. D.
Poço Cadastro 3	719.021,416	7.700.950,571	N. D.
Poço Cadastro 4	725.524,02	7.708.409,696	N. D.
Poço Cadastro 5	726.289,369	7.703.652,677	N. D.
Poço Cadastro 6	726.465,055	7.704.021,678	N. D.
Poço Cadastro 7	717.912,078	7.708.691,483	N. D.
Poço Cadastro 8	720.387,481	7.700.678,588	N. D.
Poço Cadastro 9	720.901,027	7.701.127,587	N. D.
Poço Cadastro 10	721.765,299	7.697.473,106	N. D.
Poço Cadastro 11	721.122,00	7.700.442,00	3,5
Poço Cadastro 12	7.20928,00	7.700.811,00	3,5
Poço Cadastro 13	721.014,00	7.700.759,00	4,5
Poço Cadastro 14	720.814,00	7.700.436,00	3,5

* N.D. – Não Disponível.

Além dos poços listados na Tabela 12, também foram cadastrados todos os poços cacimba (amazonas) e nascentes na área de estudo, tendo sido encontrados 5 (cinco) nascentes e 20 (vinte) poços-cacimba, sendo que os poços-cacimba não são usados com frequência e nem tem vazão bombeada conhecida.

3.9. Recarga e Descarga do Aquífero

Com base no mapa de uso do solo mostrado na Figura 19, elaborou-se um mapa de áreas consideradas permeáveis e impermeáveis, mostrado na Figura 34. Como área impermeável considerou-se as áreas residenciais e as vias de acesso pavimentadas. Todos os demais usos foram considerados permeáveis. Assim, julgou-se que o excedente hídrico calculado através do balanço hídrico só poderia infiltrar nas áreas consideradas permeáveis correspondendo, portanto, à fração da superfície de estudo na qual poderia ocorrer recarga do aquífero.

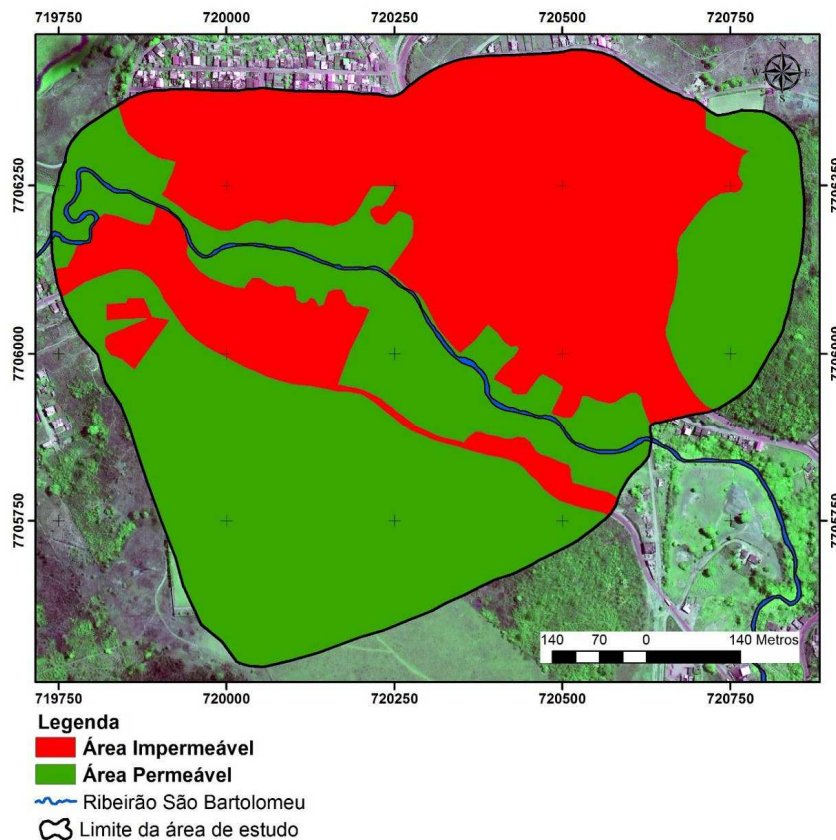


Figura 34 - Mapa de áreas em relação à permeabilidade.

Com base nos comportamentos semelhantes dos picos de recarga (mesma época) observados no monitoramento do lençol freático, foi possível dividir o seu comportamento em três grupos, influenciados principalmente pela declividade do terreno e pela sua localização (área de recarga – permeável, ou de descarga – impermeável). Maldaner (2010) afirma que a topografia pode ser o fator dominante na taxa de recarga em uma área onde o clima, padrão de chuvas, geologia e cobertura superficial são similares. Em estudo de detalhe da variação do nível de água em uma secção com desnível de 20 m entre o topo e a planície, a recarga na porção superior foi de 24,3% da precipitação, 14% para a encosta e 44% para a planície.

- Grupo 1: poços localizados na margem direita do ribeirão São Bartolomeu, em área de ocorrência de Argissolos, baixa declividade e zona de recarga: P2 – MBC e P3 - Milharal;
- Grupo 2: poços localizados na margem esquerda do ribeirão São Bartolomeu e próximos da planície de inundação do mesmo, também em área de ocorrência de Argissolos, baixa declividade e zona a jusante de encosta com menor ocupação urbana: P6 – Bananeira, P7 – Mina e P8 - Oficina (Figura 37);
- Grupo 3, em área de ocorrência de Latossolos, com declividade mais acentuada, em zona de recarga e a jusante de área com menor ocupação urbana: poços localizados na margem esquerda do ribeirão São Bartolomeu e fora da sua área de inundação, na altura da rodovia BR-482: P12 – Cemitério e P13 - PSF1 (Figura 38). Menor nível freático registrado em 16/05/13.



Figura 35 - Hidrograma dos Poços: P2 – MBC e P3 - Milharal.

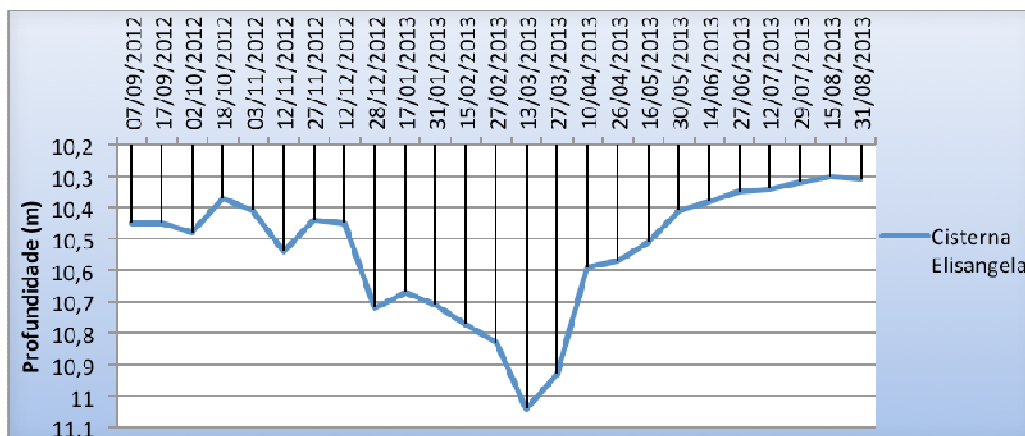


Figura 36 - Hidrograma da cisterna P 17 - Elisângela.

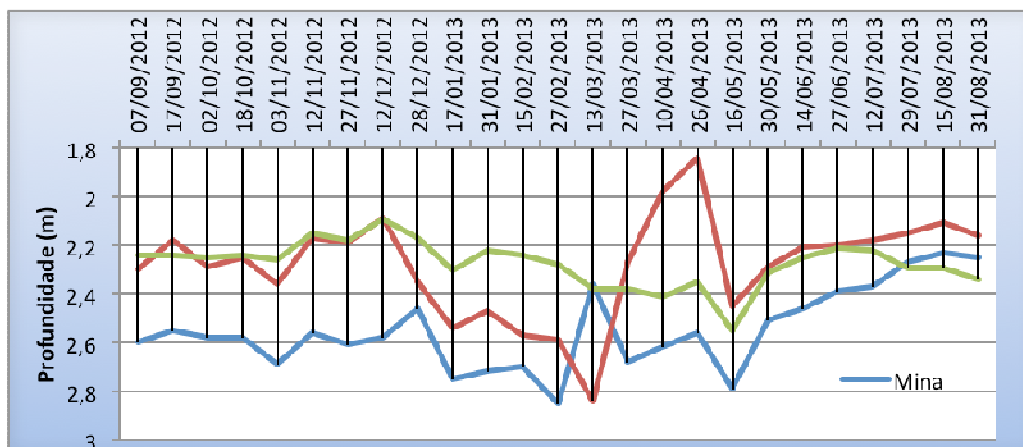


Figura 37 - Hidrograma dos Poços: P6 - Bananeira, P7 - Mina e P8 - Oficina Mecânica.

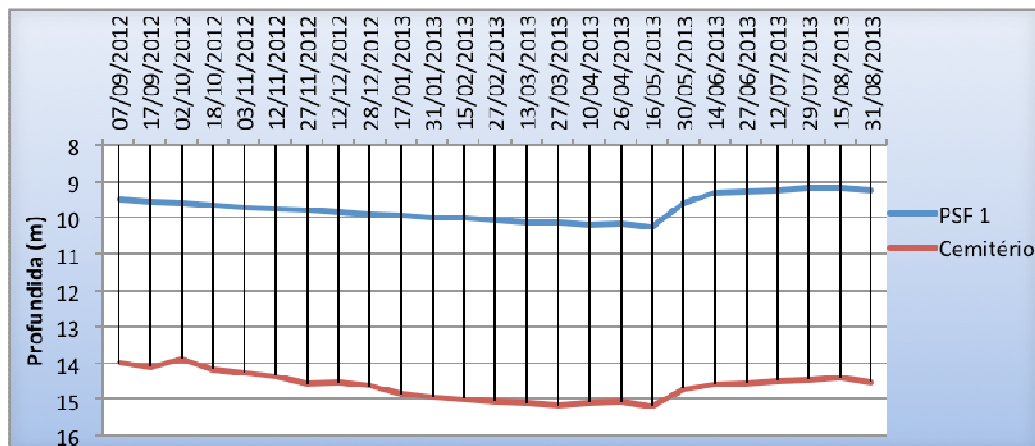


Figura 38 - Hidrograma dos Poços: 12 – Cemitério e P13 – PSF1.

Os poços dos grupos 2 e 3 mostraram uma maior variação do N.A. ao longo do período de monitoramento, com curvas com comportamento semelhante aos da curva de precipitação. Os poços instalados no grupo 3, ao contrário, mostraram comportamento com muito menor variação do N.A. e com resposta menos significativas às chuvas, mostrando que é importante separar as características da área em que os mesmos foram implantados, para que se possa interpretar os resultados do monitoramento, já que a declividade, uso do solo, características pedológicas, parecem influenciar às características de infiltração.

As velocidades da água no perfil do solo variam entre 10^{-4} e 10^{-8} m/s nas camadas saturadas, de acordo com as condutividades hidráulicas obtidas através do *Slug Test* e mostradas anteriormente. Os valores dos termos da equação do cálculo da recarga são mostrados na Tabela 13, para cada poço analisado. A condutividade hidráulica serviu de base para o cálculo do rendimento específico (S_y), através da equação 3. Os valores de rendimento específico são semelhantes aos encontrados por Rocha (2015) e Carvalho (2013). A média dos valores encontrados para a recarga considerando-se os poços P6 e P12 (que são os poços cujos testes foram feitos em solo residual de ganisse) foi de 223,96 mm, cerca de 10% inferior ao obtido por Carvalho (2013), que foi de 271mm. Para o aluvião a recarga foi bem menor (aproximadamente 128mm), enquanto que para o aterro compactado a mesma foi igual a 1/3 da recarga obtida para os solos residuais (poço P8 – Oficina). Esse valores de recarga correspondem a 17 % da precipitação total anual para os solos residuais, 10% para os aluviões e cerca de 6% para o aterro compactado.

Tabela 13 - Termos da equação da recarga

Poço	K (m/dia)	Sy	$\Sigma\Delta H (\mu)$	Recarga (mm/ano)
P5 – Lote	10,8	0,164	0,78	127,92
P6 – Bananeira	0,131	0,088	3,32	292,16
P8 – Oficina	0,00414	0,053	1,43	75,79
P12 – Cemitério	0,0185	0,066	2,36	155,76

4. CONCLUSÕES

A metodologia e a coleta de dados realizada permitiu a identificação e a delimitação do aquífero freático poroso. Especificamente, os estudos realizados permitiram:

- a) Definir as características do relevo importantes à modelagem hidrogeológica: os atributos topográficos que mais influenciaram a modelagem hidrogeológica da área de estudos foram a elevação, declividade, distância vertical e direção de fluxo;
- b) Identificar as unidades e o perfil geológico-geotécnico, em profundidade, da área de estudo, composta pela seguinte sequência de camadas: o aluvião presente na calha do ribeirão São Bartolomeu, o solo residual maduro em uma camada de aproximadamente 5m na superfície e o solo residual jovem em camada inferior até o impenetrável (topo rochoso);
- c) Comprovar que o modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo é muito semelhante ao existente na área de estudo de Carvalho (2013);
- d) Identificar os principais tipos de solos identificados na área: Latossolos Vermelho-Amarelos, os Argissolos Vermelho-Amarelos e os Cambissolos Háplicos, sendo a relação deles com a recarga dos aquíferos a seguinte: os Latossolos possibilitam a infiltração e a retenção de água nas camadas mais profundas, que por sua vez favorecem a recarga do aquífero, os Argissolos são bastante favoráveis para infiltração de água no solo, embora sejam mais estruturados e apresentem uma velocidade de infiltração mais lenta do

que a verificada para os Latossolos e os Cambissolos que limitam a infiltração de água e favorecem sobremaneira o escoamento superficial de água;

- e) Identificar os principais tipos e usos do solo na área de estudo, a saber: ocupação urbana, pasto e vegetação remanescente; fundamentais para a identificação de zonas permeáveis e impermeáveis, imprescindível à modelagem hidrogeológica;
- f) Definir componentes do balanço hídrico que permitiram determinar os valores de recarga do aquífero freático, cujo valor médio alcançou 224 mm para o solo residual e 128mm para o aluvião, enquanto que para o aterro compactado a mesma foi igual a 1/3 da recarga obtida para os solos residuais. Esse valores de recarga correspondem a 17 % da precipitação total anual para os solos residuais, 10% para os aluviões e cerca de 6% para o aterro compactado. Os meses de outubro, novembro e dezembro os principais para a recarga do aquífero;
- g) Definir os parâmetros hidrogeológicos, em especial a condutividade hidráulica, dos materiais existentes no modelo conceitual, que apresentaram valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos por Betim (2013) e Carvalho (2013), para materiais da mesma bacia hidrográfica?
- h) Estimar as zonas de recarga do aquífero freático, referente às áreas delimitadas como permeáveis e separadas de acordo com o uso e ocupação e com o tipo de solo.

Todos esses dados são dados de entrada do modelo hidrogeológico numérico, que compõe a segunda etapa do presente estudo.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15495 - 1: 2007. Versão Corrigida 2009. **Poços de Monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados**. 2007.

ALVES M. R. **Múltiplas técnicas no mapeamento digital dos solos**. Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado. Piracicaba, São Paulo, 159p. 2008.

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. e AYRES, F. M. Delimitação Automática De Bacias Hidrográficas Utilizando Dados SRTM. **Engenharia Agrícola**, v.30, n.1, p.46-57. 2010.

BARUQUI, F. M. **Inter-relações solo-pastagens nas regiões mata e rio doce do estado de Minas Gerais**. 119 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

BETIM, L. S. **Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital – Viçosa, MG**. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

BROLLO, M. J.; VEDOVELLO, R.; ODA, G.H. **Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação através de um sistema gerenciador de informações geoambientais – Um instrumento de gestão ambiental**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. São Paulo, 2000.

CARVALHO, V. E. C. **Modelagem hidrogeológica de uma pequena bacia hidrográfica localizada na Zona da Mata de Minas Gerais**. 2013. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 223 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

COLLISCHONN, B.; KIRCHHEIM, R. **Quantificação da recarga e das reservas do Aquífero Coxilha das Lombas (RS) através de balanço hídrico**. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Curitiba, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Ver. Ampliada. Brasília : Embrapa, 2013. 353 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE. ESRI. ARC/INFO v. 7.1.1. Redlands, 1997. Programa de computador. 2 CD-ROM.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2.ed. CPRM/REFO, LABHIDRO-UFPE, Fortaleza, CE, 2000. 391 p.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4.ed. Prentice Hall, 2001. 615 p.

FIORI, J. P. O.; CAMPOS, J. E. G. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 229-235, 2010.

FONSECA, L. A. M. **Indicadores ambientais em áreas de movimento de massa (áreas de risco) em Juiz de Fora, Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

GALLANT, J. C.; WILSON, J. P. **Primary topographic attributes**. In: WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 51-85.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. Using Groundwater Levels to Estimate Recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 91-109, 2002.

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. **Analysis and evaluation of Pumping Test Data**. Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement – ILRI. Amsterdam, Holanda, 2000. 372 p.

LOPES, A. S. **Manual de Fertilidade do Solo**. Trad. e adapt. A. S. Lopes. São Paulo, ANDA/POTAFOS, 1989. 155 p.

MALDANER, C. H. **Recarga de aquífero em área urbana – estudo de caso de Urânia (SP)**. 95 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MARQUES, E. A. G. **Mapeamento geológico-geotécnico da bacia do ribeirão São Bartolomeu – Plano de Segurança da Água, Ribeirão São Bartolomeu**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 89 p. 2008.

MARQUES, E. A. G. **Relatório técnico de avaliação da profundidade do nível d'água e determinação da direção de fluxo nas áreas de fertirrigação com vinhaça da Usina Uberaba S. A.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010. 87 p.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da recarga em área urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13 n. 3 p. 35-46, 2008.

MAZZOLLI, M. Ocupação irregular em áreas de recarga do Aquífero Guarani e vegetação ripária em Lages-SC. **Geosul, Florianópolis**, v. 28, n. 55, p. 163-180, jan./jun. 2013.

MELLO, L. T. A. **Influência de aquíferos no regime fluviométrico anual de pequenas bacias e na recarga subterrânea**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídrico. Bento Gonçalves, RS. 2013.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of American Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

MONTEIRO, A. B. *Modelagem do fluxo subterrâneo nos aquíferos da planície do Recife e seus encaixes*. 180 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2000.

OLIVA, A.; KIANG, C. H.; CHANG, M. R. C. Determinação da Condutividade Hidráulica da Formação Rio Claro: Análise Comparativa através de Análise Granulométrica e Ensaio com Permeâmetro Guelph e Testes de *Slug*. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, p. 1-17, 2005.

PAES, C. O.; NETO, A. A. M. **Influência da compactação de solos agrícolas na recarga subterrânea em área de afloramento do sistema aquífero Guarani (SAG)**. XVII Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas. Bonito, MS. 2012.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 235-247, 2013.

PENNOCK, D. J.; ZEBARTH, B. J.; DE JONG, E. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. **Geoderma**, v. 40, p. 297-315, 1987.

POEHLS D. J.; SMITH, G. J. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology**. Editora Academic Press, 2009. 527 p.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 486 p.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. HAND, **??sobrenome do autor??**. A new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RIGHETTO, A. M. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Dunas / Barreiras em Natal, RN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2005.

ROCHA, S. F. **Implantação de um sistema de filtração em margem de lagoa e avaliação hidrogeológica da interação Lagoa - Aquífero. 11 f.** Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

ROCHA, S.F. Implantação de um sistema de filtração em margem e avaliação hidrogeológica da interação lagoa – aquífero. 2015. 111p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas – região de Goiânia – GO.** 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 18-39, 2002.

SHANKAR V.; ECKERT, P.; OJHA, C.; KÖNIG, C. M. Transient three-dimensional modeling of riverbank filtration at Grind well field, Germany. **Hydrogeology Journal**, v. 17, p. 321-326, 2009.

SILVEIRA C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais.** 153 f. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PA, 2010.

STEPHAN, A. M. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios Inderbitzen.** 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 8, n. 1, 1955.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais.** São José dos Campos: INPE, 2008.

ZUQUETTE, L. V. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Revista Escola de Minas**, v. 59, n. 1, p. 81-87, 2006.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE ÁREA DE ESTUDO POR MEIO DO MODFLOW

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi construir um modelo hidrogeológico numérico via Visual Modflow® da área de estudo, visando determinar a posição do lençol freático. Como dados de entrada do modelo foram utilizados os dados gerados do modelo hidrogeológico conceitual construído no capítulo 1. Como condição de contorno para o modelo matemático computacional foi utilizado a condição de contorno denominada como *stream*, para definir o posicionamento do ribeirão São Bartolomeu. Como principal resultado, foi possível obter a posição do lençol freático e suas variações ao longo de um ano hidrológico, que mostraram muito boa adesão aos resultados de campo. Os dados utilizados serviram de base para utilização na etapa posterior da pesquisa, assim como para comparação com os resultados obtidos nessa terceira etapa.

Palavras-chave: modelagem, aquífero freático, hidrogeologia, Modflow.

CHAPTER 2

HYDROGEOLOGICAL NUMERICAL MODELLING OF THE STUDY AREA THROUGH VISUAL MODFLOW

ABSTRACT

In this section, the conceptual hydrogeological model was inserted into Visual Modflow® software in order to build and run a numerical model with the aim of representing the position of the water table within the study area and its seasonal variations. As a contour condition for São Bartolomeu River the stream condition was used. The results show good agreement with field observations. These results were then used as used as input data for the following step of the proposed research as for comparison with its results.

Keywords: numerical modeling, free aquifer, hydrogeology, Modflow.

1. INTRODUÇÃO

A utilização sustentável dos recursos hídricos subterrâneos implica na adoção de medidas de gestão adequadas, que evitem a degradação desses recursos e que permitam a sua proteção, especialmente em zonas sujeitas ao maior risco de poluição, como é o caso de áreas urbanas.

A criação de um modelo hidrogeológico numérico, quando calibrado e sendo representativo das condições observadas em campo, é capaz de simular cenários e assim permitir previsões acerca das mudanças provocadas nos aquíferos como alocação de poços para bombeamento de água ou movimentação de plumas de contaminantes em subsuperfície. Deste modo, como afirma Carvalho (2013), a criação de modelos auxilia na tomada de decisões e oferece subsídios para o estudo de projetos ambientais.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo a criação de um modelo hidrogeológico numérico de um aquífero poroso livre situado em área urbana localizada no município de Viçosa, MG, que permita a compreensão do fluxo subterrâneo no aquífero freático local e eventuais variações sazonais.

De maneira a alcançar o objetivo proposto realizaram-se as seguintes tarefas:

- Elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual, apresentado no Capítulo 1;
- Criação uma base de dados hidrogeológicos;
- Obtenção dos dados de entrada necessários para a geração do modelo computacional;
- Elaboração do modelo hidrogeológico numérico no programa Modflow; e

- Calibração do modelo produzido de forma a torná-lo representativo das informações coletadas em campo.

O presente estudo pretende, portanto, ser uma contribuição no campo da hidrogeologia, aplicado à caracterização e modelagem hidrogeológica de pequenas bacias hidrográficas urbanas visando permitir uma melhor gestão dos recursos hidrogeológicos em áreas urbanas com características semelhantes.

No Brasil, estudos envolvendo modelagem numérica de aquíferos freáticos rasos não são comuns. No exterior, por outro lado, é bem mais comum a realização de estudos de modelagem hidrogeológica desses aquíferos, que tem sido objeto de atenção há mais tempo. A seguir, apresentam-se alguns exemplos de estudos desenvolvidos em aquíferos freáticos no exterior.

Carroll et al. (2009) elaboraram um modelo hidrogeológico do aquífero não confinado para o sistema de fluxo Regional do Vale da Morte (*Death Valley Regional Flow System - DVRFS*), Nevada (Estados Unidos) e compararam os resultados obtidos com um modelo anterior, baseado em aquíferos confinados com utilização de um parâmetro de rendimento específico para representar condições não confinadas, denominado modelo DVRFS do USGS (*United States Geological Service*). Os autores consideram que houve uma melhora sobre a simulação com o novo modelo. Entretanto, em discussão posterior sobre o artigo, Faunt et al. (2011) afirmam que as evidências apresentadas por Carroll et al. (2009) não suportam as conclusões desses autores e destacam que o modelo DVFRS do USGS é conceitualmente bom e compõem uma ferramenta apropriada para avaliar disponibilidade hídrica subterrânea em escala regional.

Yang et al. (2011) desenvolveram um modelo de fluxo subterrâneo tridimensional na cidade de Tungliao, China, através do Visual Modflow. A área modelada é composta por um aquífero freático, um aquífero confinado e um aquífero confinado. O modelo conceitual foi construído através da análise de dados hidrogeológicos e os resultados obtidos do modelo mostraram boa aderência aos resultados reais de campo.

Yanxun et al. (2011) modelaram um aquífero Quaternário freático na região de Balasu, China. O modelo foi calibrado para o período de Outubro de 2005 a Maio de 2006 e foi verificado no período de Junho de 2006 à Setembro de 2006. Os resultados do modelo convergiram bem com os dados do monitoramento,

comprovando que o Modflow é uma ferramenta adequada à simulação de fluxo subterrâneo.

1.1. Programa Computacional Utilizado (Visual Modflow)

Utilizado frequentemente em trabalhos hidrogeológicos, o programa computacional Visual Modflow é uma interface gráfica do código Modflow, o qual possibilita o estudo de fluxos subterrâneos (hídricos e/ou de contaminantes) através de modelos de uma, duas ou três dimensões que representam as condições do sistema em estudo, permitindo sua calibração e possibilitando a construção de cenários de simulação. Segundo Teramoto (2007), esse pacote computacional é o mais difundido atualmente, seja para modelagem de fluxo de água subterrânea ou para transporte de solutos. O Modflow é composto de códigos, em forma modular, que solucionam os problemas de fluxo tridimensionalmente, em diferenças finitas implícitas, com bloco de nó centrado. Cada módulo no Modflow contém códigos criados para representação de problemas específicos dentro do modelo. A divisão do programa em módulos permite ao usuário examinar as feições hidrogeológicas específicas do modelo de forma independente, assim como permite a adição de novos módulos ao programa sem modificar os pacotes existentes.

A vantagem oferecida por este *software* é a visualização gráfica do modelo, permitindo maior interatividade com o usuário, possibilitando a elaboração e simulação de problemas em tempo reduzido. Permite também um ágil e rápido ajuste dos parâmetros do modelo, inclusive com a utilização de ajustes automáticos destes parâmetros, visando a calibração pelo método da inversão (TERAMOTO, 2007).

As camadas aquíferas podem ser simuladas como confinadas, semiconfinadas e livres e o regime de bombeamento pode ser escolhido entre permanente e transiente. O modelo admite, ainda as seguintes condições de contorno: Carga hidráulica especificada (condição de *Dirichlet*), Fluxo especificado (condição de Neumann) e Fluxo dependente da carga hidráulica (condições de Robim ou de Cauchy).

O Visual Modflow consiste de quatro telas principais: entrada de dados – “*input*”, simulações – “*run*”, saída dos resultados – “*output*” e configuração do sistema – “*setup*”. No menu principal o usuário pode criar ou abrir um arquivo pré-

existente, determinar as unidades de trabalho, dimensionar a malha a ser pesquisada e acessar os demais módulos (*input, run e output*). O módulo de entrada de dados permite ao usuário graficamente atribuir todos os parâmetros necessários à construção de um modelo tridimensional do fluxo de água. O módulo de pesquisa permite que sejam selecionados as cargas iniciais, tipos de recarga, a tipologia dos aquíferos, selecionar se o meio é isotrópico ou anisotrópico, e, finalmente, fazer as simulações.

1.2. Parâmetros Hidrogeológicos de Entrada

i. Carga hidráulica (h) e gradiente hidráulico (i)

Carga hidráulica de acordo com Poehls & Smith (2009) é definida como a medida da pressão sofrida pela água tendo por base uma superfície de referência e é expressa em unidades de comprimento (L).

A carga hidráulica corresponde à união de três energias: cinética, potencial e de pressão, e é expressa pela Equação 1 (FEITOSA & FILHO, 2000).

$$h = \frac{v^2}{2g} + Z + \frac{P}{\rho g} \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

h = Carga hidráulica expressa em m;

v = Velocidade do fluido expressa em m/s;

g = Aceleração da gravidade expressa em m/s²;

z = Altura do fluido até a superfície de referência expressa em m;

P = Pressão sobre o fluido; e

ρ = Densidade do fluido.

A componente referente à energia cinética é desprezada, pois usualmente, em especial em aquíferos porosos, as velocidades de escoamento das águas subterrâneas são muito pequenas (fluxo laminar) quando comparadas aos outros componentes energéticos (HEATH, 1983).

Com base nesta variável é possível se obter a direção do fluxo da água subterrânea no solo, que se move dos locais de maior carga hidráulica para os de menor carga. Sabendo-se a carga hidráulica é possível, ainda, calcular o gradiente

hidráulico através da Equação 2. Caso a direção não seja especificada, considera-se a direção na qual ocorre o maior decréscimo na carga (CARVALHO, 2013).

$$i = \frac{dh}{dl} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

i = Gradiente hidráulico;

dh = Diferença entre a carga hidráulica de dois pontos próximos; e

dl = Distância entre os pontos.

ii. Permeabilidade intrínseca (k) e condutividade hidráulica (K)

A permeabilidade intrínseca refere-se à capacidade do meio em permitir a passagem de um fluido através de seus vazios, quando saturados, sendo influenciada somente pelas dimensões, interconectividade e forma dos vazios. Maiores diâmetros de poros oferecem menor resistência ao escoamento e, portanto maiores valores de permeabilidade intrínseca. Possui dimensão de comprimento (L^2). São calculados a partir da Equação 3, a seguir (POEHLS & SMITH, 2009).

$$k = C \cdot d^2 \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

k = Permeabilidade intrínseca;

C = Fator de forma; e

d = diâmetro médio dos poros do meio poroso.

A condutividade hidráulica, por outro lado, é um parâmetro que representa a resistência que o meio poroso oferece ao escoamento da água em seu interior. Essas duas propriedades (permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica) são usualmente confundidas, mas enquanto a primeira depende exclusivamente das características do meio, a segunda depende das características do meio e do fluido percolante. A condutividade de meios saturados é geralmente mais elevada do que a de meios insaturados por causa do excesso de água nos poros que permite que a mesma corra livremente e não seja aderida as partículas do meio pelas forças de adesão e coesão (POEHLS & SMITH, 2009). É expressa em unidades de velocidade ($L \cdot T^{-1}$) como m/s ou cm/s e calculada através da Equação 4, mostrada a seguir (FEITOSA & FILHO, 2000).

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

Equação 4

Em que:

K = Condutividade hidráulica;

k = Permeabilidade intrínseca;

ρ = Massa específica do fluido;

g = Aceleração da força da gravidade; e

μ = Viscosidade absoluta.

iii. Porosidade (n) e porosidade efetiva (ne)

A porosidade representa o volume de vazios ou poros contidos no solo ou rocha (TODD & MAYS, 2005), ou seja, determina a quantidade de água contida em um aquífero. Ela é função das características do meio como tamanho, forma e organização das partículas (POEHLIS & SMITH, 2009). A porosidade é expressa a seguir.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

Equação 5

Em que:

n = Porosidade;

V_v = Volume de poros ou vazios; e

V = Volume total.

A porosidade efetiva representa o volume de poros ou vazios interconectados, os quais possibilitam o fluxo hídrico no solo ou rocha (TODD & MAYS, 2005). É descrita pela equação a seguir (FEITOSA & FILHO, 2000).

$$n_e = \frac{V_D}{V}$$

Equação 6

Em que:

n_e = Porosidade efetiva;

V_D = Volume de água drenada pela força gravitacional; e

V = Volume total.

Segundo Feitosa & Filho (2000), um bom aquífero deve ter altos valores das duas porosidades. A argila possui alta porosidade total (na faixa de 35 – 45%), entretanto possui baixa porosidade efetiva (por volta de 3%), logo não é um material adequado para formar um aquífero. O contrário pode se dizer das areias e pedregulhos os quais apresentam elevadas porosidades total (na faixa de 20 – 35%) e

efetiva (por volta de 29%) constituindo-se, portanto, em bons materiais formadores de aquíferos. Para os materiais não consolidados e a maioria das rochas consolidadas as duas porosidades são iguais (TODD & MAYS, 2005).

iv. Rendimento específico (Sy)

O rendimento específico é definido como o volume de água descarregada por um aquífero livre por unidade de área superficial por decréscimo unitário do nível d'água (carga hidráulica). Trata-se de uma variável adimensional que apresenta valores que costumam situar-se entre 0,01 e 0,30, apresentando, portanto, valores bem superiores aos parâmetros de armazenamento dos aquíferos confinados (KRUSEMAN & RIDDER, 2000).

Geralmente é calculado pela equação de Biecinski a seguir. (PAZDRO, 1983, In: ALVAREZ e NIEDZIELSKI, 1996).

$$S_y = 0,117 \cdot \sqrt[3]{k} \quad \text{Equação 7}$$

Em que:

Sy = rendimento específico; e

K = condutividade hidráulica expressa em m/dia.

v. Transmissividade (T)

A transmissividade é definida como o fluxo que atravessa uma seção de uma unidade de largura pela altura referente à espessura do aquífero sob um gradiente hidráulico unitário (Cleary, 1989). Ou seja, compreende o volume de água que é transmitido horizontalmente através da espessura saturada do aquífero. É uma propriedade comumente utilizada em modelos bidimensionais. Sua dimensão é L^2T^{-1} e é dada pela Equação 16 a seguir (CARVALHO, 2013). No caso de aquíferos livres, Freeze & Cherry (1979) destacam que o valor de b a ser utilizado deve ser equivalente à espessura da camada saturada.

$$T = K \cdot b \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

T = Transmissividade;

K = Condutividade hidráulica; e

b = Espessura da camada saturada do aquífero.

1.3. Modelos de Águas Subterrâneas

Um modelo pode ser definido, simplesmente, como qualquer representação feita acerca de um meio real (FETTER, 2001). Do ponto de vista físico e matemático, um modelo é uma descrição conceitual que exemplifica os meios físicos reais por meio de equações matemáticas (MANDLE, 2002). Os modelos que envolvem águas subterrâneas podem servir a dois propósitos principais: descrever o fluxo da água subterrânea e/ou os processos de transporte de contaminantes no solo. Cleary (1989) cita outras aplicações desses modelos como permitir o conhecimento de locais para instalação de poços de abastecimento, previsão do comportamento de um aquífero ou um poluente no solo, delimitar áreas para a proteção das zonas de recargas dos aquíferos, avaliar metodologias adequadas para tratar aquíferos contaminados ou passíveis de contaminação e auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos (CARVALHO, 2013).

Modelos hidrogeológicos trabalham com uma de duas condições de fluxo possíveis: fluxo permanente ou estacionário (*steady-state flow*) – no qual se considera que o fluxo (sua magnitude e direção) não se altera em qualquer ponto do domínio com o tempo; e fluxo transiente (*transient flow*) – que leva em consideração a ocorrência de variação do fluxo na área modelada com o tempo.

1.4. Métodos Numéricos para Resolução dos Modelos

Carvalho (2013) apresenta um detalhado resumo de como os métodos numéricos são utilizados para a resolução de equações complexas que governam o fluxo das águas subterrâneas e a migração de poluentes, que podem ter enfoques em uma, duas ou três dimensões (Mandle, 2002). São usualmente empregados para modelagens de áreas que possuam geologia anisotrópica e/ou heterogênea (Cleary, 1989), mas não exclusivamente. Apresentam soluções aproximadas das equações devido à discretização da área no tempo e espaço (DELLEUR, 1999).

Definida a discretização do modelo conceitual no espaço, os métodos numéricos conseguem transformar as equações diferenciais parciais em um conjunto de equações algébricas, definindo células que, em conjunto, constituem uma rede de nós (vértices das células) ou grid conforme descrito por Anderson e Woessner (1992

apud Alberto, 2005), e no tempo através de passos ou etapas (Mandle, 2002). Cada célula possui uma equação representando o fluxo hídrico que ocorre nela, em geral, com base em seu balanço hídrico (entrada e saída de água). A resolução das equações fornece uma distribuição de cargas hidráulicas no centro ou na interseção entre as células, estes pontos representando as células como um todo. O sistema de equações algébricas consiste em n equações com n variáveis, em que n representa o número de células ou elementos. Processos iterativos permitem a resolução numérica destas equações (CAVICCHIA, 2007).

1.5. Condições Iniciais e Condições de Contorno

As condições iniciais se referem às cargas hidráulicas do sistema em um determinado tempo (denominado, geralmente, de tempo zero) e que servem de referência para os cálculos que serão executados (Franke et al., 1987). Essas condições são fundamentais para as condições de fluxo transiente já que, neste regime, são necessárias para a simulação das cargas hidráulicas, já que as cargas para cada passo de tempo são obtidas com base na carga hidráulica de um tempo anterior ao que está sendo calculado. Geralmente é realizada uma simulação em regime estacionário para se obter as cargas hidráulicas iniciais para as simulações transientes (CARVALHO, 2013).

As condições de contorno representam os limites hidráulicos ou físicos que delimitam o modelo. Os corpos d'água superficiais ou maciços impermeáveis são exemplos de barreiras físicas enquanto que as barreiras hidráulicas, responsáveis pelo controle do fluxo das águas subterrâneas, são observadas como os divisores de água (divisores topográficos) ou linhas de fluxo (BERNICE, 2010).

1.6. Calibração do Modelo Numérico

O modelo matemático computacional é criado através de um software que utilizará um determinado método numérico para a resolução das equações governantes do fluxo subterrâneo, geralmente o método das diferenças finitas ou o método dos elementos finitos. Este software processa as informações provenientes do

modelo conceitual (área do modelo, condições iniciais, condições de contorno, dentre outras) produzindo o modelo matemático (CARVALHO, 2013).

A calibração do modelo consiste em se manipular os parâmetros hidrogeológicos do meio poroso de modo a se ter o melhor ajuste possível dos dados observados em campo com os dados simulados pelo software (Alberto, 2005). O modelo é testado a cada alteração das variáveis até que se obtenha uma alta correlação entre os dados comparados (Teramoto, 2007). Dentre as metodologias utilizadas a mais usada é a do método da tentativa e erro (“*Trial and Error*”). Outros métodos incluem a utilização de softwares como o WinPest.

A análise de sensibilidade testa a influência de cada dado ou parâmetro de entrada nos resultados simulados pelo modelo. Nesta etapa é feita também a análise do grau de incertezas contidas nos dados de entrada. Todo modelo apresenta incertezas decorrentes das aproximações e distribuição dos parâmetros no domínio simulado, as quais devem ter seus efeitos mensurados nos resultados gerados pelo modelo, pois influenciam as simulações feitas (TERAMOTO, 2007). Por fim, deve-se proceder à validação do modelo, através da utilização de um conjunto de dados diferentes daqueles utilizados na sua calibração e análise de sensibilidade, de maneira a verificar a proximidade entre os dados calculados pelo modelo e os efetivamente medidos em campo.

Por fim, pode-se realizar, ou não uma análise de previsão de cenários, nas quais o modelo anteriormente calibrado e validado irá ser utilizado para realizar previsões confiáveis acerca do comportamento do aquífero frente à atividades como alocação de novos poços de bombeamento, aumento da área impermeabilizada sobre a recarga, efeitos de períodos de seca extrema, ou prever a movimentação de plumas de contaminação no subsolo terrestre; permitindo, desse modo, uma melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos, levando à uma melhor tomada de decisões, gerenciamento e manutenção das águas subterrâneas do aquífero modelado. (Carvalho, 2013).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelo Hidrogeológico Conceitual

Previamente à modelagem matemática, que é o foco principal do presente capítulo, elaborou-se um modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo, com base nas diversas informações coletadas e ou produzidas nas etapas anteriores da pesquisa. Todas as informações coletadas permitiram identificar e definir as camadas geológicas e as unidades aquíferas existentes na área de estudo, tanto em superfície quanto em profundidade, bem como definir os parâmetros hidrogeológicos de cada uma dos aquíferos existentes bem como as condições de contorno. Todas essas informações foram apresentadas no capítulo anterior.

2.2. Modelo Matemático Computacional

O modelo matemático computacional consiste na conversão das informações do modelo conceitual, o qual tem por base, no geral, informações pontuais ou localizadas da área de estudo. Estas informações foram extrapoladas para a área de estudo inteira através de técnicas de geologia e por métodos numéricos, gerando um modelo matemático.

Desenvolveu-se o modelo com o uso do software Visual Modflow Pro 2009.1 através do método numérico das diferenças finitas. Os dados de entrada foram coletados nas etapas anteriores da pesquisa e basearam-se em dados primários e secundários (literatura).

2.3. Determinação da Malha do Modelo

Discretizou-se a área de estudo (72,32 ha) em células de 4 m de largura por 4 m de comprimento, definindo-se uma área de 16 m² para cada bloco. Assim, a malha (*grid*) utilizada é composta por 395 linhas e 409 colunas. A área não modelada, por se encontrar fora da área de estudo, encontra-se marcada em verde na Figura 1. Estas células possuem fluxo nulo e são denominadas de células inativas. Os números nos eixos da Figura 1 (1119 x 1027), obtida no Visual Modflow representa a distância em metros. Na Figura 1 ainda é possível se observar a posição dos dezessete poços de monitoramento implantados na área de estudo e monitorados ao longo de um ano hidrológico e na sss o mapa 3D da área de estudo com fator de exagero igual a 2.

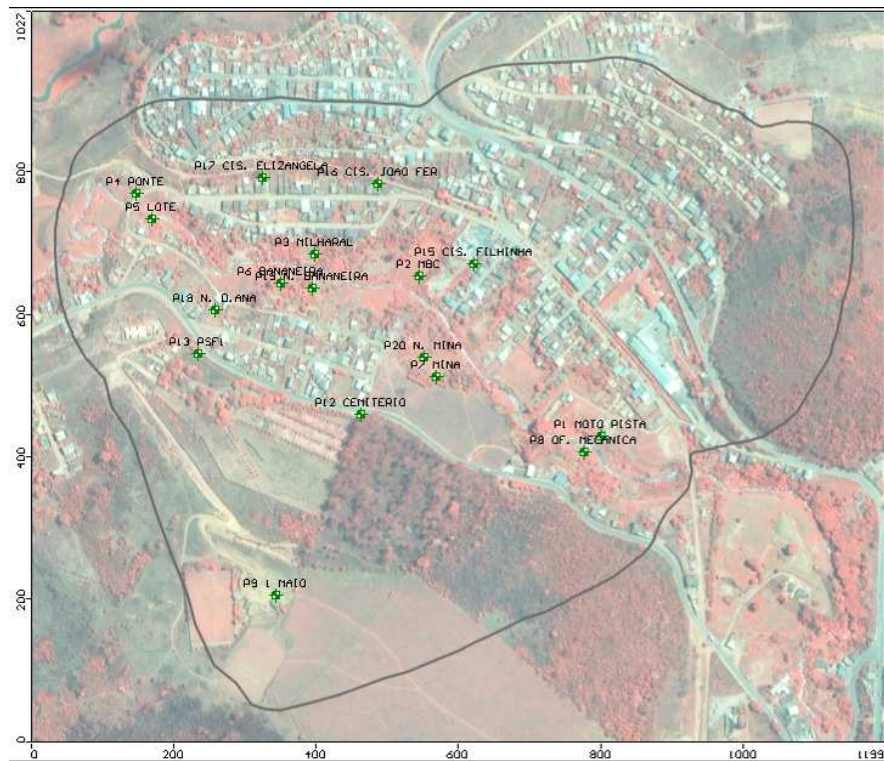


Figura 1 - Área modelada com a localização dos poços de monitoramento.

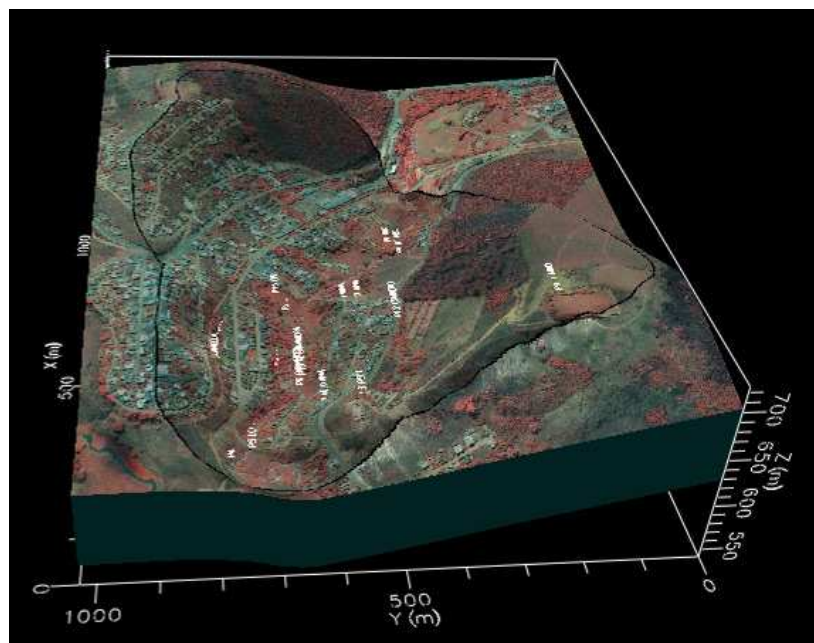


Figura 2 - Mapa da área de estudo com fator de exagero igual a 2.

As coordenadas geográficas dos poços e nascentes alocados no modelo, bem como as suas cargas hidráulicas para a calibração são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas e cargas hidráulicas dos poços e nascentes

Poço	Coordenadas		Carga Hidráulica (m)
	X	Y	
P1 - Moto Pista	720.445,690	7.705.881,032	617,54
P2 - MBC	720.205,138	7.706.096,575	616,52
P3 - Milharal	720.054,012	7.706.139,466	616,78
P4 - Ponte	719.804,412	7.706.215,665	614,02
P5 - Lote	719.826,856	7.706.178,968	613,36
P6 - Bananeira	720.001,984	7.706.093,092	614,96
P7 - Mina	720.230,460	7.705.949,776	619,96
P8 - Oficina Mecânica	720.429,944	7.705.850,406	616,18
P9 - 1º de Maio	720.050,994	7.705.699,634	674,7
P12 - Cemitério	720.126,313	7.705.895,884	633,66
P13 - Posto de Saúde 1	719.933,288	7.705.965,605	632,28

Continua...

Tabela 1 - Cont.

Poço	Coordenadas		Carga Hidráulica (m)
	X	Y	
P15 - Cisterna Filhinha	720.293,043	7.706.117,001	620,11
P16 - Cisterna João Ferreira	720.111,176	7.706.231,292	624,12
P17 - Cisterna Elisângela	719.976,846	7.706.233,221	623,93
P18 - Nasc. D'Ana	719.935	7.706.049	626,1
P19 - Nasc. Bananeira	720.008	7.706.093	617
P20 - Nasc. Mina	720.220	7.705.945	619,3

O foco do estudo – o aquífero freático, foi separado em 2 (duas) camadas (*layers*) (Figura 3), de acordo com os dados do modelo conceitual, em especial nos dados das sondagens realizadas. O *layer* superior e intermediário representa o solo residual maduro de gnaiss, e o inferior o solo residual jovem. Nas proximidades do curso d'água que corta a área de estudo (Ribeirão São Bartolomeu), esse *layer* superior foi definido como solo aluvionar, mantendo-se as demais camadas. A topografia da superfície do terreno foi implementada no programa com base nas informações topográficas fornecidas pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Viçosa. A camada superior como tendo 5 m de espessura, e a inferior com 70 m, estimando-se estes valores a partir da diferença entre as cotas do poço do cemitério 651,64m e do poço 1º de maio 717,26m, somando-se ao produto final a profundidade do lençol freático no poço do cemitério 14,63m.

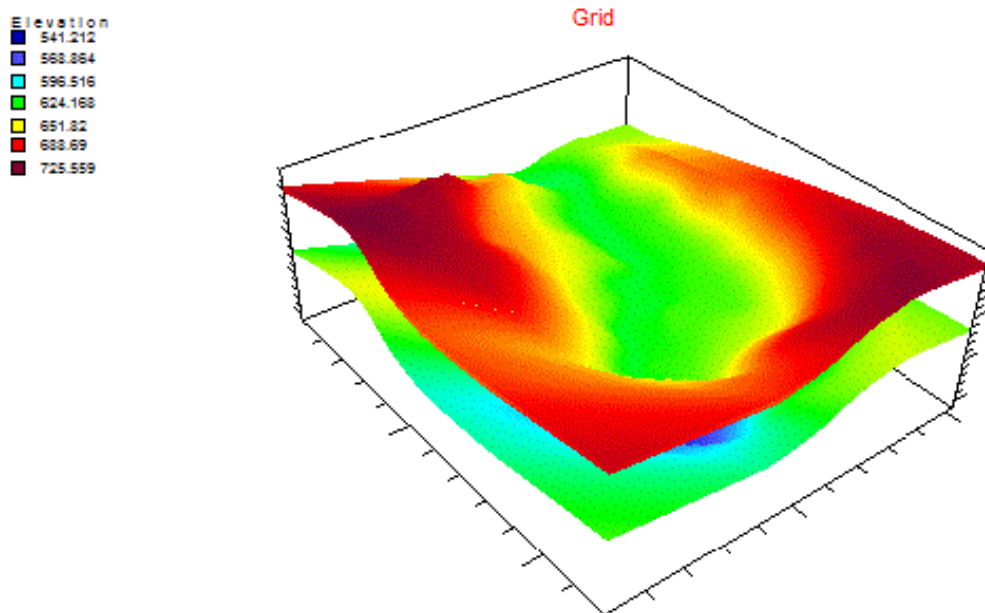


Figura 3 - Modelo 3D da área de estudo mostrando as superfícies limítrofes entre os três *layers* (camadas), identificados no aquífero livre.

2.4. Condições de Simulação

Simulou-se o modelo em condição de fluxo estacionário ou permanente (*steady-state*). Nesta condição o modelo gerado considera que não ocorrem variações significativas das cargas hidráulicas ao longo do tempo.

Na Figura 4, verifica-se a descrição e o perfil geológico observado em um dos poços de monitoramento instalados na área, como exemplo. Ressalta-se que esses poços foram monitorados ao longo de um ano hidrológico, conforme detalhado no capítulo 1 anteriormente apresentado.

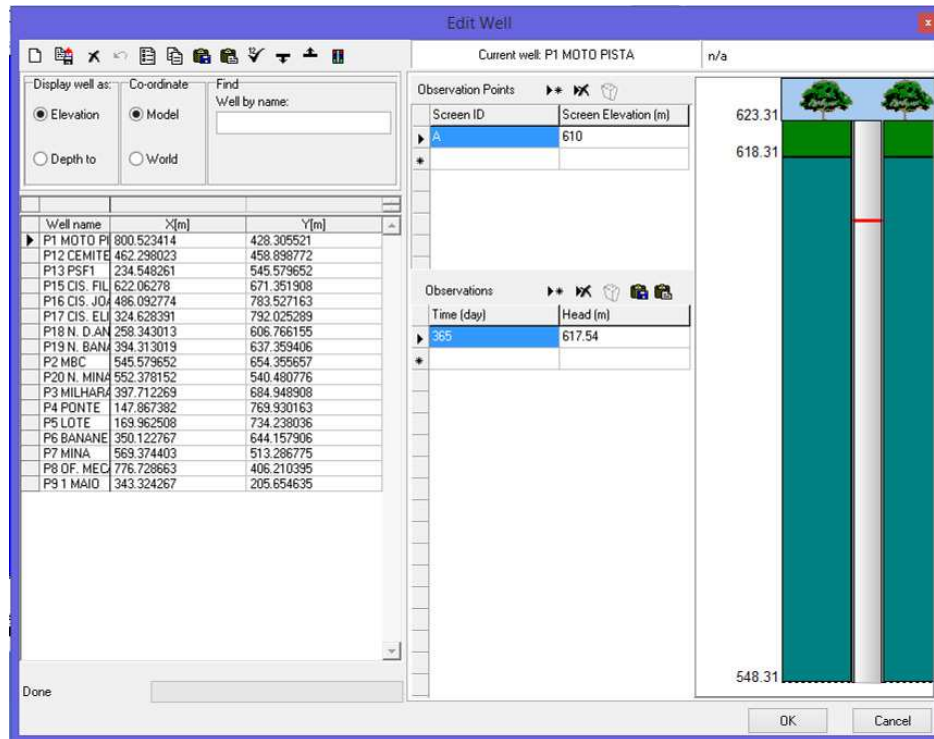


Figura 4 - Exemplo de perfil e características de um dos poços de monitoramento instalado na área de estudo.

2.5. Condições Iniciais

A carga inicial (*Initial Head*), ou ponto inicial de leitura, é sempre a cota mais elevada da área de estudo, portanto, adotou-se o valor 725,997 m com base no levantamento topográfico planialtimétrico realizado pelo SAAE.

2.6. Condições de Contorno

As condições de contorno externas são responsáveis por limitar a seção de bacia em estudo. Elas foram baseadas nos divisores topográficos e nas informações obtidas nos poços, e foram consideradas coincidentes com os divisores de água subterrâneos, como definido em Cleary (1989).

Esta condição de contorno (Condição de Neumann) considera que o fluxo subterrâneo é nulo nas células em que o limite foi traçado. Esta condição foi inserida

no Visual Modflow através das células inativas que delimitam o domínio modelado (Figura 5).

Considerou-se o ribeirão São Bartolomeu, na área de estudo, como influente e efluente, ou seja, hora as águas subterrâneas se movimentam dos aquíferos para o ribeirão e hora as águas subterrâneas se movimentam do ribeirão para os aquíferos. Esta consideração baseou-se nos dados de vazão da área de estudo, que durante parte do ano possui a vazão de entrada menor que a vazão de saída e durante parte do ano possui a vazão de entrada maior que a vazão de saída, conforme detalhado no Capítulo 1, anteriormente apresentado. Para implementar esta condição foi usada a ferramenta *Stream* do programa.

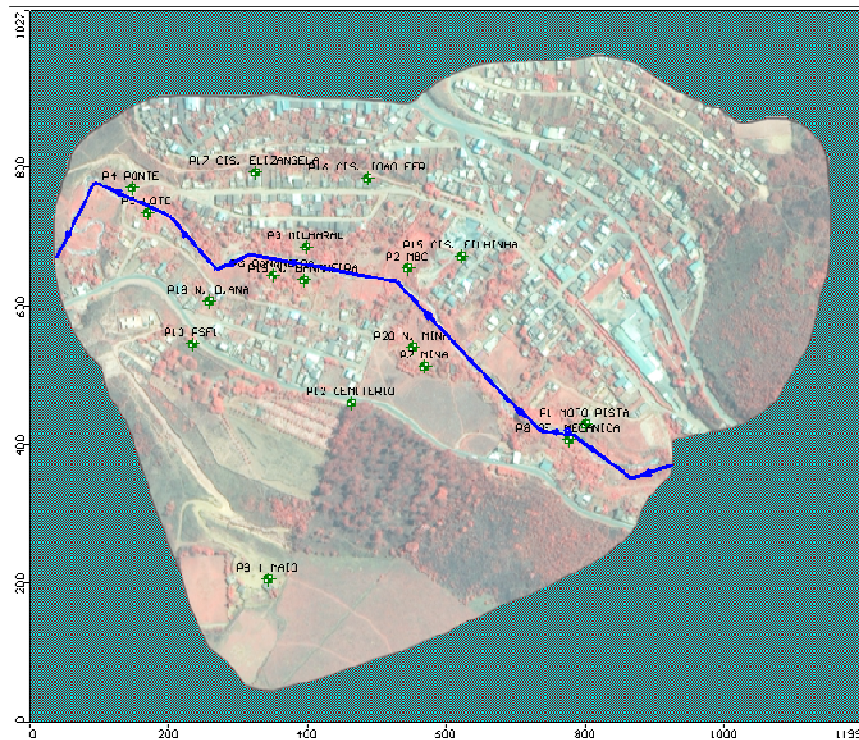


Figura 5 - Condições de contorno do modelo representadas pelas células inativas (cor verde) e o *Stream* (linhas de cor azul).

A condição *Stream* baseia-se em um parâmetro denominado condutância que representa a dificuldade ou facilidade que o material do leito do ribeirão oferece à água para entrar ou sair do modelo (Bernice, 2010). A condutância é calculada segundo uma simples fórmula matemática (Equação 9), vista em Soares (2010).

$$C = \frac{KL \cdot W}{M}$$

Equação 9

Em que:

C = condutância entre o leito de drenagem e o aquífero ($L^2 T^{-1}$);

K = condutividade hidráulica no leito do curso d'água ($L T^{-1}$);

L = largura da célula em que o *Stream* passa (L);

W = largura do curso d'água (L); e

M = espessura da camada drenante (L).

Para o cálculo da condutância considerou-se a condutividade hidráulica do material aluvionar obtido em *Slug Test* realizado no poço P5 – Lote ($K = 4,21 \times 10^{-3}$ m/s). As larguras (L e W) foram definidas como sendo iguais a 4 m, enquanto que, para a espessura da camada drenante, adotou-se um valor de 1 m. Dessa forma, a condutância calculada foi igual a $5,8 \text{ m}^2/\text{dia}$ (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados dos seguimentos do ribeirão na área de estudo (*Stream*)

Segmento	Tempo de Parada (dias)	Cotas do Terreno (m)	Cota do Ribeirão (m)	Cota de Topo do Leito do Ribeirão (m)	Cota de Base do Leito do Ribeirão (m)	Vazão do Trecho (m ³ /dia)	Condutância do Leito (m ² /dia)																																																		
1	365	625,7	630,0	626,5	626,0	40500	5,8																																																		
		621,3						2	621,3	626,0	622,5	622,0	617,9	3	617,9	623,0	619,5	619,0	617,7	4	617,7	622,0	618,5	618,0	617,4	5	617,4	622,0	618,5	618,0	617,1	6	617,2	621,5	618,0	617,5	617,0	7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8
2		621,3	626,0	622,5	622,0																																																				
		617,9						3	617,9	623,0	619,5	619,0	617,7	4	617,7	622,0	618,5	618,0	617,4	5	617,4	622,0	618,5	618,0	617,1	6	617,2	621,5	618,0	617,5	617,0	7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9		
3		617,9	623,0	619,5	619,0																																																				
		617,7						4	617,7	622,0	618,5	618,0	617,4	5	617,4	622,0	618,5	618,0	617,1	6	617,2	621,5	618,0	617,5	617,0	7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9								
4		617,7	622,0	618,5	618,0																																																				
		617,4						5	617,4	622,0	618,5	618,0	617,1	6	617,2	621,5	618,0	617,5	617,0	7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9														
5		617,4	622,0	618,5	618,0																																																				
		617,1						6	617,2	621,5	618,0	617,5	617,0	7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9																				
6	617,2	621,5	618,0	617,5																																																					
	617,0				7	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9																													
7	617,0	621,5	618,0	617,5																																																					
	617,0				8	617,0	621,5	618,0	617,5	617,0	9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9																																			
8	617,0	621,5	618,0	617,5																																																					
	617,0				9	617,0	621,5	618,0	617,5	616,8	10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9																																									
9	617,0	621,5	618,0	617,5																																																					
	616,8				10	616,8	621,0	617,5	617,0	615,9																																															
10	616,8	621,0	617,5	617,0																																																					
	615,9																																																								

Além da condutância, outro dado de entrada necessário à utilização da condição *Stream*, é a vazão no trecho da drenagem em que a mesma é considerada. Assim, considerou-se a vazão de entrada para o trecho 1, somando-se 1/10 avos da diferença da vazão de entrada e saída até obter-se no trecho 10 a vazão de saída, ou seja, dividiu-se o ribeirão São Bartolomeu inserido na área de estudo, em 10 segmentos, para facilitar a modelagem do programa.

2.7. Recarga

Calculou-se a recarga através do método da Variação do Nível de Água (VNA), adotando-se a média encontrada na análise dos 4 (quatro) poços monitorados. Para tanto, utilizou-se a condutividade hidráulica fornecida pelos ensaios de *Slug Test* e a variação do nível freático estimada pelos hidrogramas, tendo sido obtido um valor de 191,95 mm/ano.

As áreas de recarga (permeáveis), definidas com base nos usos do solo identificados na área de estudo, são inseridas através de comandos próprios do Visual Modflow, como se observa na Figura 6, em que são mostradas as áreas consideradas impermeáveis (em azul escuro) e permeáveis (em verde).

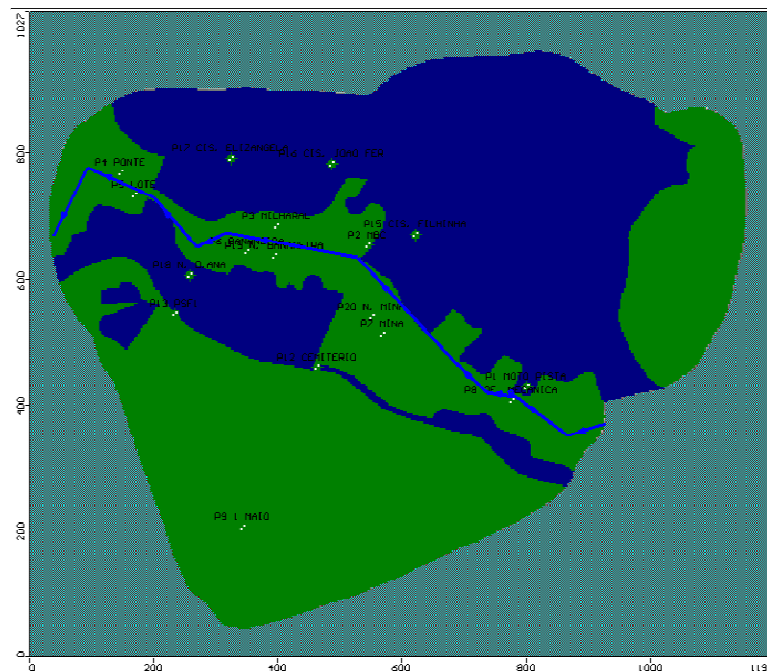


Figura 6 - Áreas permeáveis (recarga), em verde, e impermeáveis, em azul, identificadas na área de estudo.

2.8. Evapotranspiração

Utilizou-se o valor de evapotranspiração calculado através dos dados das Normais Climatológicas da estação da Universidade Federal de Viçosa, igual a 523,9 mm/ano.

Para a definição do parâmetro profundidade de extinção (“*Extinction Depth*”), referente à profundidade máxima na qual a evapotranspiração atua no modelo, adotou-se o valor de 1 m, baseando-se nos estudos de Carvalho (2013), para uma área próxima à área de estudo.

2.9. Parâmetros de Armazenamento

Os parâmetros referentes ao Armazenamento foram adicionados ao programa Visual Modflow através de uma aba própria denominada “*Storage*” (Armazenamento). Considerou-se que os mesmos são constantes para todas as camadas que compõem o aquífero livre na área de estudo.




Como se trata de um aquífero livre considera-se apenas o valor de S_y (rendimento específico). O valor da porosidade total (n) foi obtida do trabalho de Betim (2013), realizado na mesma bacia hidrográfica, em solos de alteração idênticos aos existentes na área de estudo. A porosidade efetiva (n_e), considerada como sendo igual a 50% da porosidade total, conforme Cleary (1989). O valor de $S_y = 0,08$ foi calculado pela média dos poços P6 (0,088), P8 (0,053) e P12 (0,066), nos quais se realizou a determinação da condutividade hidráulica através de *Slug Test*.

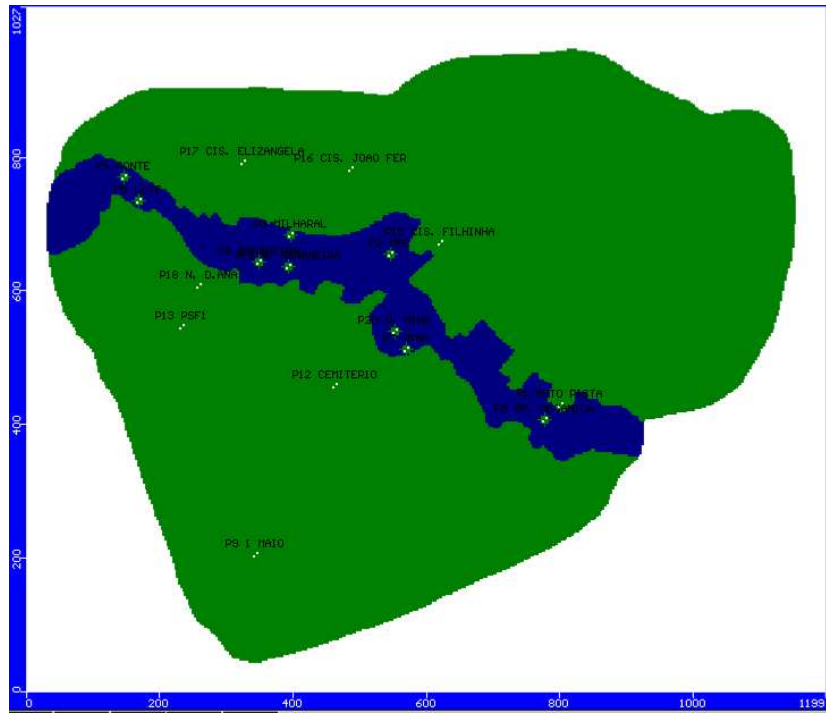
2.10. Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica também foi determinada através dos ensaios de *Slug Test*. Foram realizados ensaios em todas camadas identificadas na área de estudo, um para o Aluvião, outro para o Solo Residual Jovem (SRJ) e outro para o Solo Residual Maduro. Em todos os casos, considerou-se o solo como isotrópico no plano xy e a condutividade no eixo z como sendo 10 vezes menor que a condutividade dos outros eixos, com base em dados de Carvalho (2013).

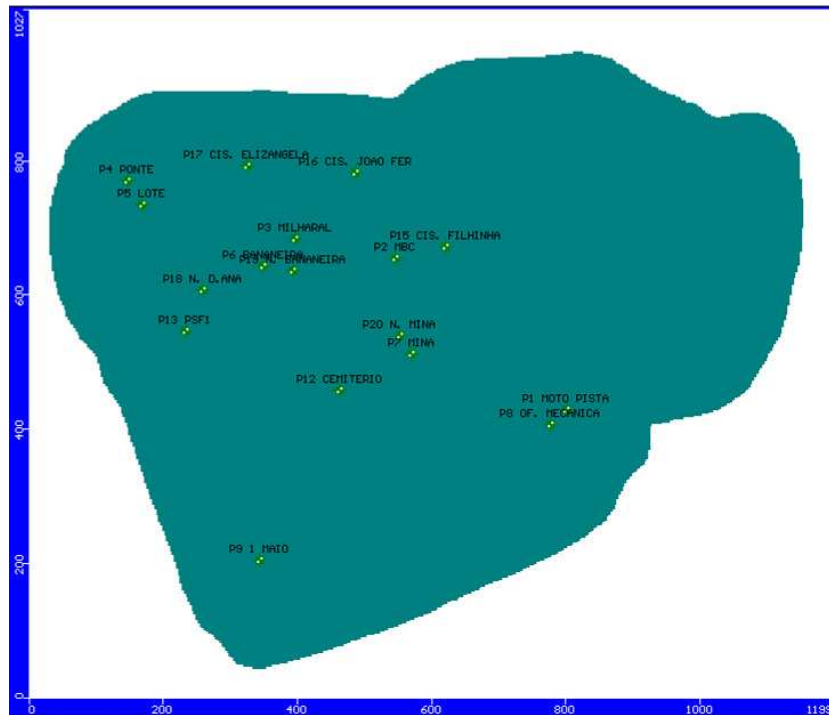
Os valores de condutividade hidráulica utilizados para a modelagem são apresentados na Tabela 3. Na Figura 7 apresentam-se os mapas com as condutividades hidráulicas representadas das três camadas (aluvião - a, solo residual maduro – b, e solo residual jovem – c). Alocou-se a condutividade para cada célula de acordo com sua classe de solo, sendo que na segunda camada, o solo aluvionar limita-se à calha do ribeirão (4 metros) e na terceira camada não se encontra o solo aluvionar.

Tabela 3 - Condutividades hidráulicas (K_z) das camadas existentes na área de estudo

Solo	Cor	Condutividade Hidráulica K_z (cm/s)
Aluvião		$4,21 \times 10^{-4}$
SRM		$1,52 \times 10^{-6}$
SRJ		$2,14 \times 10^{-7}$



(a)



(b)

Figura 7 - Mapas das camadas (de 0 a 5m (a) e de 5 a 75m (b)) com suas respectivas condutividades hidráulicas.

2.11. Calibração

Executou-se o processo de calibração, de modo a ajustar o modelo aos dados existentes, de tal forma que o mesmo pudesse representar, de forma adequada, os dados reais coletados.

Neste sentido, realizou-se a calibração do modelo tendo como base a posição do nível d'água nos 14 (catorze) poços monitorados e das 3 (três) nascentes, com base nos dados das campanhas de monitoramento realizadas entre 09/2012 e 08/2013.

2.12. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo consistiu na alteração sistemática de alguns parâmetros como altura da lâmina d'água e condutância do ribeirão São Bartolomeu, enquanto mantinham-se os outros dados com os valores devidamente calibrados. Realizou-se a análise para se conhecer a influência dos parâmetros no modelo, bem como suas fragilidades ou incertezas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Visando a calibração do modelo modificaram-se vários parâmetros tomando-se por base os valores calculados para os parâmetros de entrada, de modo a diminuir a diferença entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas. Os valores de condutividade hidráulica foram mostrados no capítulo anterior, e basearam-se nos ensaios de *Slug Test*. Na Tabela 4 apresentam-se os valores das condutividades hidráulicas do modelo calibrado.

Embora o programa tenha sugerido um valor de K_x diferente para o solo aluvionar; após a remodelagem o resultado se apresentou pior com um RMS maior.

Tabela 4 - Valores de condutividade hidráulica do modelo calibrado

Solo	K_x (cm/s)	K_y (cm/s)	K_z (cm/s)
Aluvião	$4,21 \times 10^{-3}$	$4,21 \times 10^{-3}$	$4,21 \times 10^{-4}$
SRM	$1,52 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-6}$
SRJ	$2,14 \times 10^{-6}$	$2,14 \times 10^{-6}$	$2,14 \times 10^{-7}$

Alteraram-se os demais parâmetros do modelo pelo método de tentativa e erro. Ao final do processo nenhum dos parâmetros recebeu novo valor, uma vez que todos haviam sido calculados e expressaram excelente confiabilidade. Este valor resultou de uma maior aproximação entre as cargas hidráulicas calculadas e as observadas em campo.

O modelo convergiu com 138 interações de 250 possíveis, como se pode verificar no gráfico da Figura 8, o que demonstra a estabilidade do modelo, com parâmetros bem calculados e ajustados. A modelagem calibrada encontra-se detalhada no apêndice.

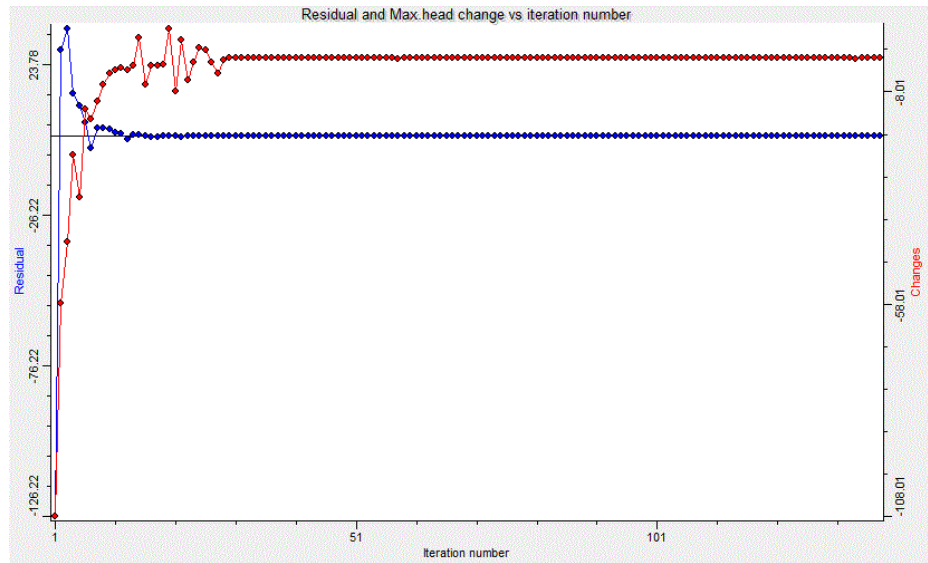


Figura 8 - Gráfico da convergência do modelo.

Os valores finais dos parâmetros referentes à calibração do modelo são mostrados na Figura 9. Vários autores recomendam que para se obter um modelo bem calibrado é necessário que o RMS Normalizado seja inferior a 10 % (CARVALHO, 2013; FERRARI, 2006, PAIVA et al., 2013). O modelo calibrado alcançou um RMS normalizado de 21,33 %, duas vezes acima do valor recomendado, e apresentando correlação de (84,6 %) entre seus dados. Entretanto, verificou-se uma boa aproximação entre os dados reais, de campo, e os dados previstos pelo modelo numérico calibrado, em relação à profundidade do nível de água e à direção do fluxo em subsuperfície.

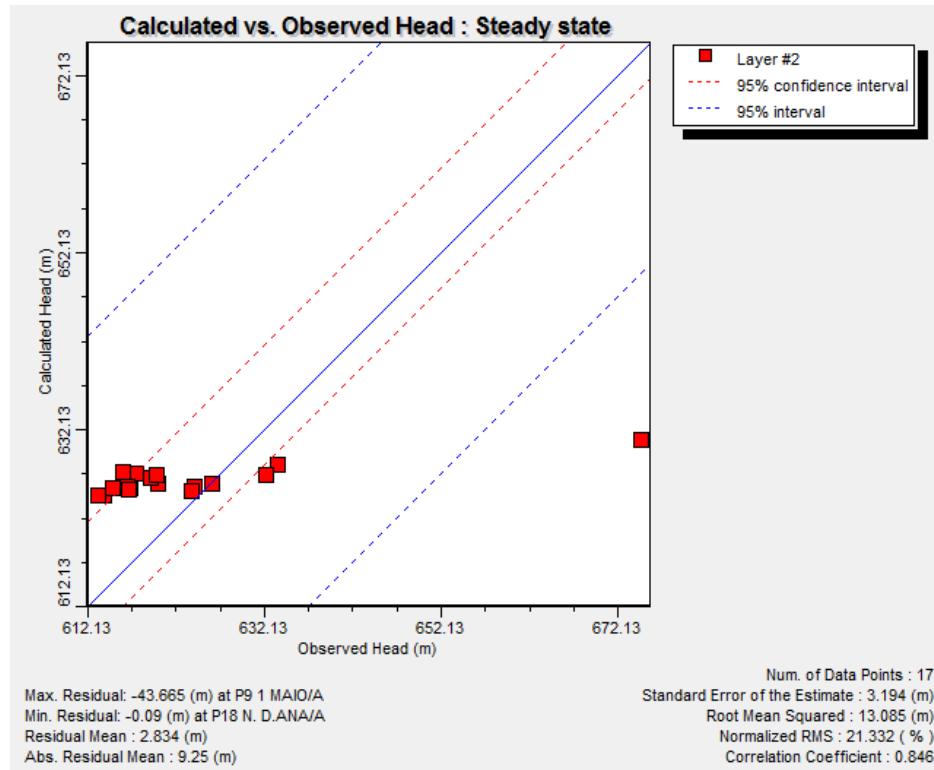
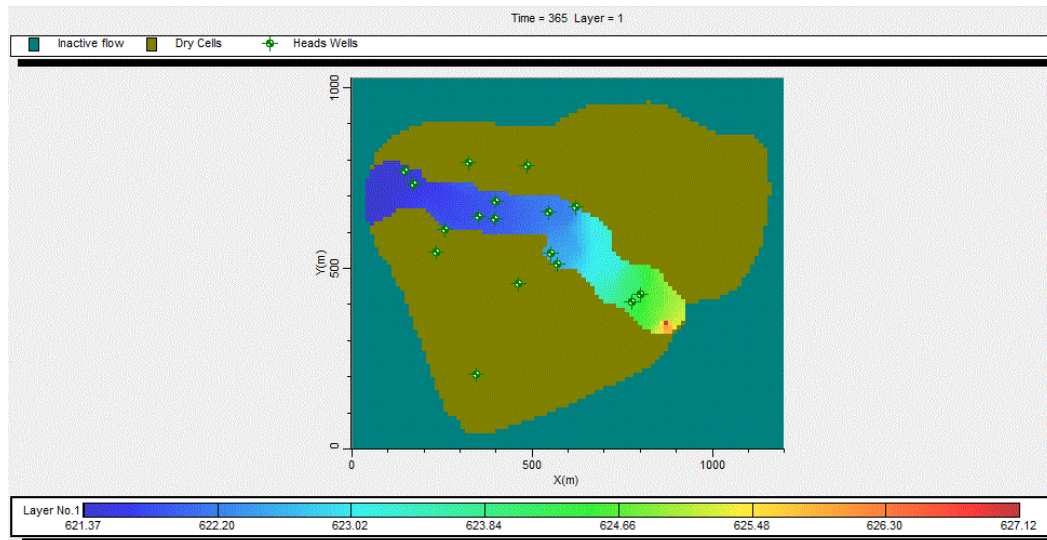
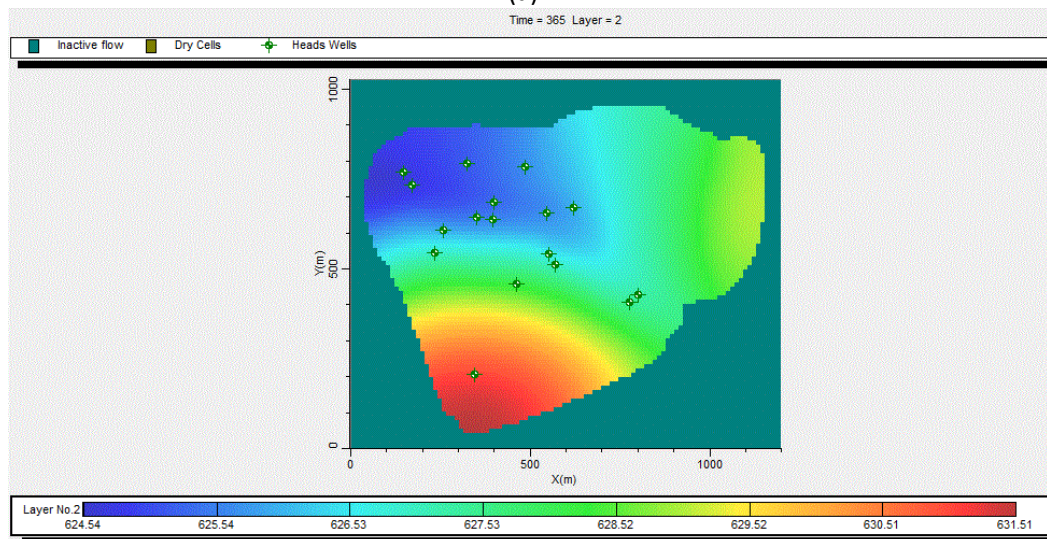


Figura 9 - Calibração dos poços calculados e observados.

Na Figura 10 apresenta-se o modelo hidrogeológico bidimensional de fluxo permanente, para as profundidades de 5m (a) e 75m (b), respectivamente. A parte colorida da figura representa a extensão total do aquífero freático na área de estudo. A camada de cor marrom representa o restante da área de estudo, locais em que não há ocorrência de aquífero livre até 5m de profundidade. Ou seja, na Figura 10 a observa-se que o aquífero livre só contém água livre nas porções mais baixas do terreno, às margens do Ribeirão São Bartolomeu.



(a)



(b)

Figura 10 - Modelo hidrológico bidimensional. Em (a) até uma profundidade de 5m e em (b), até a profundidade de 75m.

Na Figura 11 a seguir verifica-se a elevação do lençol freático com as linhas potenciométricas.

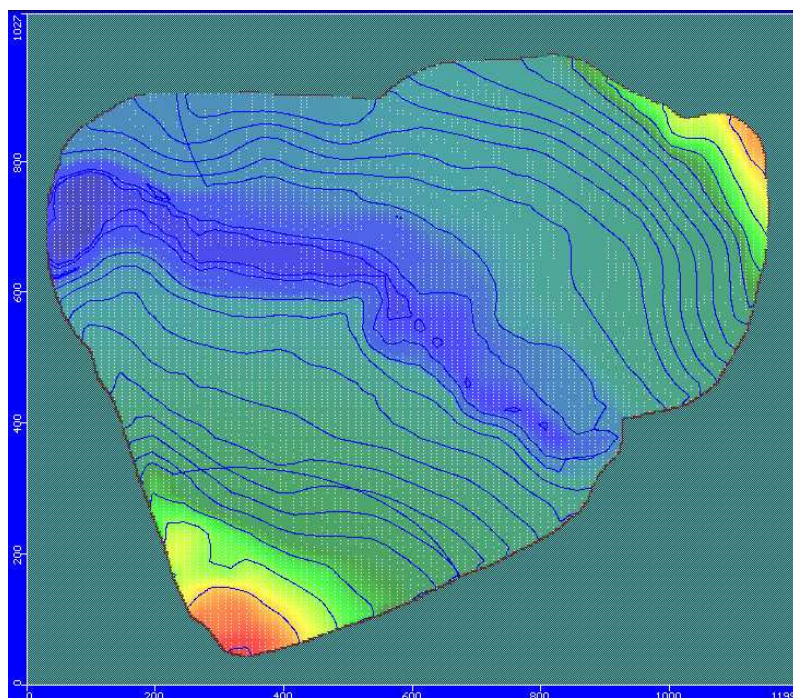


Figura 11 - Elevação do lençol freático com as linhas potenciométricas.

Diversos autores (Carvalho, 2013; Rocha, 2015; Paiva, 2009), verificaram a necessidade de alteração dos valores de alguns parâmetros durante a etapa de calibração do modelo, de maneira a obter uma melhor proximidade entre os resultados previstos pelo modelo e os efetivamente observados. No presente trabalho, ao final do processo de calibração, apenas a altura da cota do nível d'água do Ribeirão São Bartolomeu recebeu novos valores. Os demais valores foram fiéis aos resultados obtidos ou, como no caso, da porosidade efetiva, dos valores inicialmente estimados, aumentando a confiabilidade dos resultados.

Os valores dos parâmetros metros hidrodinâmicos calibrados e utilizados no modelo são semelhantes, em ordem de grandeza, aos encontrados por Carvalho (2013), Rocha (2015) e Paiva (2009), que também trabalharam com aquíferos freáticos com características semelhantes no Brasil.

Nas Figuras 12 e 13 a seguir podemos verificar o as linhas potenciométricas e velocidades do fluxo na primeira camada de 5m e as velocidades de fluxo na segunda camada de 70m de profundidade, respectivamente.

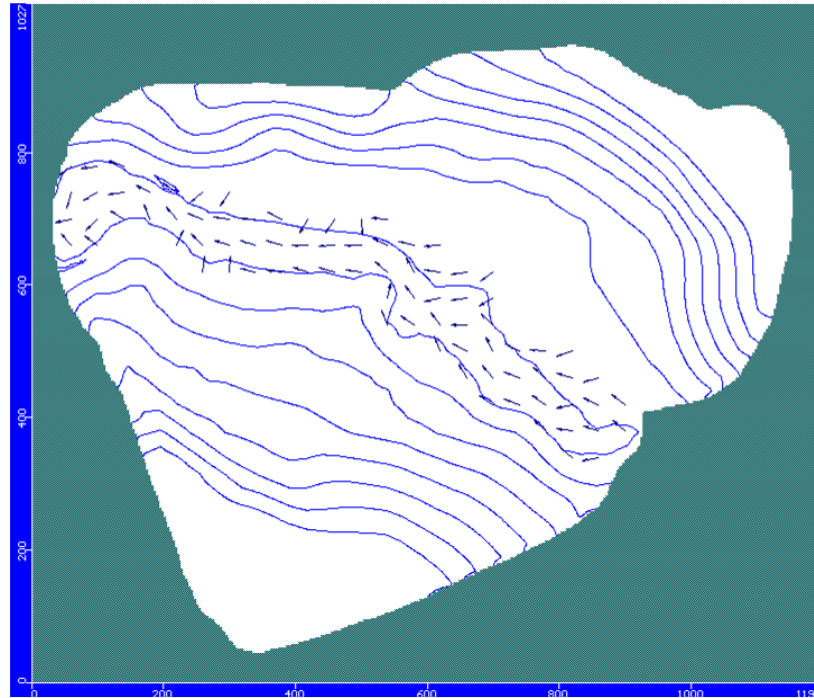


Figura 12 - Linhas potenciométricas e velocidades de fluxo na primeira camada.

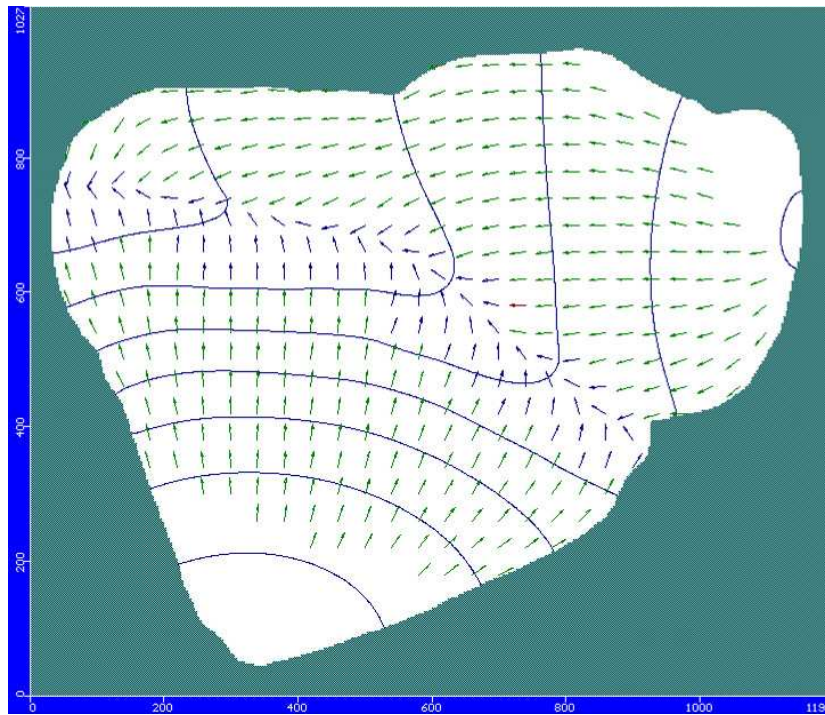


Figura 13 - Linhas potenciométricas e velocidades de fluxo na segunda camada.

Para validação do modelo, o mesmo foi rodado sem as três nascentes mapeadas, ou seja, apenas com os poços de monitoramento. O resultado foi muito

semelhante, apresentando apenas uma RMS um pouco maior, da ordem de 23%, como se verifica na Figura 14 a seguir.

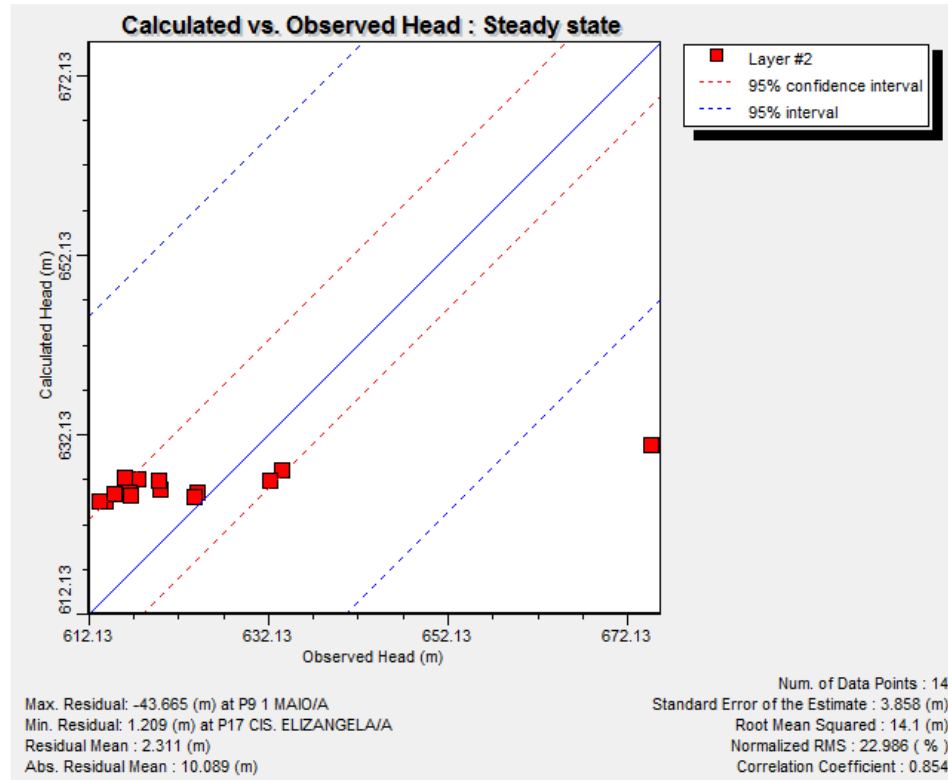


Figura 14 - Resultado da validação do modelo.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A realização de ensaios de *Slug Test* foi extremamente importante, pois permitiu obter valores de condutividade hidráulica da camada saturada específicos para os materiais existentes na área de estudo, de forma rápida, simples e fácil, evitando-se a estimativa desses valores e, portanto, um maior gasto de tempo na etapa de calibração do modelo.

O modelo hidrogeológico criado apresenta grande sensibilidade para os parâmetros condutância e condutividade hidráulica e pequena sensibilidade para a recarga e a evapotranspiração.

Considera-se que, a despeito do valor de RMS superior ao usualmente recomendado na literatura, a modelagem numérica realizada permitiu obter um modelo que conseguiu representar, de forma adequada, os resultados efetivamente observados durante o monitoramento realizado ao longo de um ano hidrológico, e o modelo conceitual considerado. A interpretação dos resultados e a observações do mapa potenciométrico obtido após a calibração mostram coerência com a direção do fluxo de água no aquífero freático, em direção à calha do Ribeirão São Bartolomeu, assim como na representação de zonas sem água (secas) ou com lençol freático profundo, nas porções mais elevadas do terreno.

Com a validação pode-se comprovar a confiabilidade do modelo.

Visando a melhoria dos resultados obtidos, incluindo uma redução do RMS, recomenda-se a implantação de outros poços nos pontos mais altos do relevo com o objetivo de aprimorar os dados que mais influenciaram na calibração dos modelos, já que as diferenças de carga observadas nos poços monitorados foram pequenas, o que pode ter dificultado a obtenção de um melhor RMS.

Recomenda-se também a promoção de estudos das variações sazonais da potenciometria ao longo de um período mais longo (pelo menos 5 anos), visando obter uma melhor representação temporal de parâmetros como precipitação (recarga), evapotranspiração e outros parâmetros de interesse, os quais poderiam ajudar na atualização e aprimoramento do modelo gerado nesta pesquisa.

Por fim, sugere-se a realização de um monitoramento da qualidade da água subterrânea existente no aquífero freático, visando avaliar se a mesma pode ser utilizada para consumo humano ou apenas para outros usos menos restritivos.

REFERÊNCIAS

ALBERTO, M. C. **Fluxo da água subterrâneo em sistema de encosta-rio, município de Paulínia (SP): Caracterização hidrogeológica e simulação numérica**. 2005. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2005.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press, Inc., London, 1992. 381 p.

BERNICE, A. M. **Evolução da contaminação por nitrato em aquíferos urbanos: Estudo de caso em Urânia (SP)**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

BETIM, L. S. Caracterização da condutividade hidráulica dos solos e estudo da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do córrego Palmital – Viçosa/MG. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

CARVALHO, V. E. C. **Modelagem hidrogeológica de uma pequena bacia hidrográfica localizada na Zona da Mata de Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

CAVALCANTI, L. S. **Geografia e prática de ensino**. Goiânia: Alternativa, 2002.

CAVICCHIA, M. E. **Desenvolvimento de modelo numérico para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos na área do projeto piloto de Ribeirão Preto**. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Princeton Groundwater Inc., 117 p. 1989.

DELLEUR, J. W. **The Handbook of Groundwater Engineering**. West Lafayette, Indiana, USA. CRC Press LLC. 1320 p. 1999.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 2.ed. CPRM/REFO, LABHIDRO-UFPE, Fortaleza, CE, 391 p. 2000.

FERRARI, L. C. K. M. **Modelagem Tridimensional de fluxo de águas subterrâneas em um aquífero livre e raso: aplicação no Parque Ecológico do Tietê – São Paulo**. 2006. 175 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 4.ed. Prentice Hall, 615 p. 2001.

FRANKE, O. R.; REILLY, T. E.; BENNETT, G. D. **Definition of boundary and initial conditions in the analysis of saturated ground-water flow systems – an introduction. Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey**. Applications of Hydraulics, Books 3: Chapter B5, Reston, Virginia, USA, 1987.

HEATH, R. C. **Basic Ground-Water Hydrology**. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 1983. 86 p.

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER, N. A. **Analysis and evaluation of pumping test data**. Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement – ILRI. Amsterdam, Holanda, 2000. 372 p.

MANDLE, R. J. **Groundwater Modeling Guidance**. Michigan Department of Environmental Quality, 2002. 54 p.

McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado. 1988.

PAIVA, A. L. R. **O Processo Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe**. 2009. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2009.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P., FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. **Revista Brasileira de Recurso Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 235-247, 2013.

PAZDRO, Z.; ALVAREZ, R. H.; NIEDZIELSKI, H. **Estimacion de la recarga en la subcuena Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México**. In: CONGRESO LATINO-AMERICANO DE HIDR. SUB., 3., México: ALHSUD, p. 35-46.

POEHLS D. J.; SMITH, G. J. **Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology**. Editora Academic Press, 2009. 527 p.

ROCHA, S. F. Implantação de um sistema de filtração em margem e avaliação hidrogeológica da interação lagoa – aquífero. 2015. 111 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2015.

SOARES, R. C. V. **Caracterização do fluxo subterrâneo das águas na porção sudoeste da bacia representativa de Juatuba**. 2010. 162 f. Dissertação (Mestrado

em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 2010.

TERAMOTO, E. H. **Caracterização Hidrogeológica e Simulação Numérica de Fluxo em uma Região Situada no Distrito Industrial de Paulínia (SP)**. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro - SP. 2007.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater Hydrology**. Ed. John Wiley & Sons, Inc. 3.ed. 2005. 652 p.

WINSTON, R. B. Upgrade to MODFLOW-GUI: Addition of MODPATH, ZONEBDGT, and additional MODFLOW packages to the U.S. Geological Survey. MODFLOW-96 Graphical - User Interface: U.S. Geological Survey Open-File Report 99 –184, 63 p. 1999.

YANG, C. et al. **Using spatial principles to optimize distributed computing for enabling physical science discoveries**. Proceedings of National Academy of Sciences, v. 106, n. 14, 5498_ 5503. doi: 10.1073/pnas. 2011.

YANXUN, S, Y. F., HUI, Q., XUEDI, Z. Research and Application of Groundwater Numerical Simulation-A 446 Case Study in Balasu Water Source. **Procedia Environmental Sciences**, v. 8, p. 146-152. 2011.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM ESPACIAL DO NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO EM UM AQUÍFERO POROSO POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

RESUMO

O objetivo deste capítulo foi avaliar a eficiência de redes neurais artificiais (RNA) para a predição da carga hidráulica (superfície potenciométrica) na área de estudo. Visando a predição da superfície potenciométrica através de RNA foram testadas diferentes combinações entre as seguintes variáveis discriminantes: elevação; declividade; curvatura; plano de curvatura; perfil de curvatura; índice topográfico combinado - CTI; distância vertical do canal de drenagem; aprofundamento do vale e direção de fluxo, todos obtidos a partir de um modelo digital de elevação (MDE) com resolução espacial de 5m. O melhor resultado foi obtido com quatro variáveis discriminantes: elevação, declividade, distância vertical do canal de drenagem e direção de fluxo; que obteve um valor de coeficiente de determinação (R^2) de 0,97. Os resultados demonstram um grande potencial de utilização desta abordagem e os mapas inferidos por RNA mostraram muita coerência com os resultados fornecidos pelo Visual Modflow.

Palavras-chave: redes neurais artificiais, modelagem espacial, aquífero freático.

CHAPTER 3

SPATIAL MODELING OF PHREATIC WATER LEVEL POSITION IN A POROUS AQUIFER THROUGH ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

ABSTRACT

The main purpose of this section was to evaluate the efficiency of Neural artificial networks (NAN) as a tool to predict the potentiometric surface (water table position and its hydraulic charge) in the study area. In order to achieve such goal, several different combinations between the following variables were tested: elevation; declivity; curvature; curvature plane; curvature profile; combined topographic index (CTI); vertical distance to river channel; valley depth; and flow direction, all data obtained from the detailed Digital Elevation Model (DEM) with spatial resolution of 5m. The best result was obtained with four discrete variables: elevation; declivity; vertical distance to river channel and flow direction, with a R square value equal to 0.97. Results have shown that the proposed approach by using NAN has a great potential to be used for hydrogeological purposes in free aquifers. Maps obtained from NAN have shown good consistency with Modflow results.

Keywords: neural artificial network, spatial modeling, free aquifer.

1. INTRODUÇÃO

A crescente importância das águas subterrâneas para o abastecimento público e para a produção econômica deixa clara a necessidade do conhecimento das reservas hídricas existentes nos aquíferos, para que os mesmos sejam utilizados de forma sustentável. O conhecimento do funcionamento do aquífero e suas propriedades são fundamentais para a gestão adequada dos recursos hídricos subsuperficiais, permitindo, dentre outras atividades: a avaliação da disponibilidade hídrica, o rebaixamento de níveis da cota freática para a exploração mineral, a captação de água para abastecimento, irrigação ou finalidade industrial, o diagnóstico de áreas contaminadas, a determinação de áreas de recarga e descarga do aquífero, ou seja, permitem obter parâmetros que facilitam a gestão adequada desses recursos.

Segundo Coppola et al. (2003), a utilização de modelos preditivos inadequados, que contribuem para uma estimativa errônea do nível do lençol freático, podem influenciar negativamente a gestão pública das águas subterrâneas, com reflexo direto sobre o bombeamento de água em níveis mais baixos do que o necessário e/ou violação das restrições impostas para o limite de nível de água em um ou mais poços de monitoramento. O grau e a frequência com que estes resultados indesejáveis ocorrem está relacionado com o erro inerente da modelagem.

A modelagem de águas subterrâneas tem emergido como uma poderosa ferramenta para ajudar os gestores de recursos hídricos a otimizar o uso da água subterrânea e proteger este recurso vital. Modelos numéricos tem sido largamente usados por engenheiros, hidrogeólogos e ambientalistas para simulação e análise de sistemas de águas subterrâneas. No entanto, estas técnicas de modelagem necessitam de muitos dados, trabalho intensivo e são caras. Em condições de dados e recursos

escassos, comum no cenário da maioria dos países em desenvolvimento, o uso de modelos numéricos é altamente restrito. Portanto, em tais casos, os modelos empíricos são uma alternativa atraente, uma vez que podem fornecer resultados úteis usando relativamente menos dados, são menos trabalhosos e de custos mais atrativos (Mohanty et al. 2010).

Várias metodologias vem sendo utilizadas para a elaboração de modelos preditivos hidrogeológicos de aquíferos freáticos, com destaque para a utilização mais recentes dos modelos que utilizam redes neurais artificiais (RNAs). Baseados no paradigma biológico dos neurônios humanos, cientistas desenvolveram modelos de redes neurais artificiais que tentam construir um modelo matemático que supostamente trabalha de maneira análoga ao cérebro humano e que podem ser utilizadas como ferramentas de apoio à tomada de decisão. As RNAs, que são baseadas na arquitetura de elementos processadores simples como os neurônios, estão sendo usadas com sucesso para uma variedade de aplicações (Atkinson & Tatnall, 1997; McBratney et al., 2003; Azhar, 2007).

Segundo Key et al. (1989), as redes neurais artificiais pertencem ao grupo de técnicas denominadas de inteligência artificial e vêm da mesma família dos sistemas especialistas e abordagens baseadas em conhecimento para aprendizagem. Enquanto os sistemas especialistas são baseados na representação simbólica do conhecimento e, conseqüentemente incorporam dados qualitativos na estimativa, através da programação a priori do algoritmo de aprendizagem, as redes neurais empregam uma abordagem conexionista (Hepner et al., 1990).

O rápido crescimento na utilização de redes neurais artificiais deve-se à sua maior precisão quando comparada a outras técnicas como classificadores estatísticos, particularmente quando as feições não são linearmente separáveis e/ou as classes informacionais têm distribuições estatísticas diferentes da assumida (Benediktsson et al., 1990; 1993; Schalkoff, 1992); à sua maior rapidez depois de treinada (Côte & Tatnall, 1995); sua habilidade para incorporar um conhecimento a priori e limitações físicas realísticas na análise; à sua habilidade para incorporar diferentes tipos de dados, facilitando os estudos sinérgicos (Benediktsson et al., 1993; Benediktsson & Sveinsson, 1997); possibilidade de manipulação eficiente de grandes quantidades de dados; e à sua maior capacidade de generalizar, isto é, apresentar bons resultados para padrões não usados durante o treinamento (Vieira, 2000; Chagas, 2006).

De acordo com Peddle et al. (1994), Atkinson & Tatnall (1997) e Benediktsson & Sveinsson (1997), as principais razões para o uso de redes neurais artificiais para classificação de dados geográficos são que estas são independentes do tipo de distribuição, diferentemente da abordagem estatística paramétrica tradicional, que assume que os dados possuem uma distribuição normal; e a habilidade para manipular dados adquiridos a diferentes níveis de precisão e ruídos, Visto que os dados de diferentes fontes são em geral de diferentes origens (nominais, numéricos, entre outros), e realmente podem ter distribuições estatísticas diferentes.

Uma rede neural artificial é composta por um elevado número de elementos processadores ou unidades de processamento, conectados entre si. Cada uma das conexões interliga somente dois elementos processadores, geralmente em um único sentido, e possui um valor que determina o grau de conectividade entre estes, denominado peso da conexão. Frequentemente, uma camada de entrada está ligada a uma camada de saída, via uma ou mais camadas internas (Schalkoff, 1992; Atkinson & Tatnall, 1997).

A estrutura de uma rede neural artificial, número de camadas e número de neurônios em cada camada são específicos para cada situação. Para a maioria dos casos, modelos com três camadas devem ser suficientes. O número de neurônios na camada de entrada deve ser igual ao número de variáveis discriminantes usadas para uma aplicação específica e o número de neurônios na camada de saída igual ao número de classes informacionais. O número de neurônios da camada interna, escondida ou oculta depende da complexidade do problema. Quanto mais simples é o problema, menos neurônios na camada interna são necessários para a convergência da rede. O número exato de camadas internas e o número de neurônios por camada para um determinado problema é frequentemente determinado experimentalmente através de tentativas e erros (Master, 1993).

Para utilização das RNAs, normalmente, são necessárias três fases. Na primeira fase, aprendizado ou treinamento, a rede é ensinada para resolver um conjunto de padrões de saída associados aos padrões de entrada. Na segunda fase, ou teste, são apresentados padrões de entrada à rede, e as saídas obtidas são comparadas às saídas desejadas. Na terceira fase, ou aplicação, a rede escolhida na fase anterior é utilizada na resolução do problema. A primeira fase é a única em que há aprendizado, e o processo como um todo pode repetir-se até que a rede obtenha

resultados satisfatórios, ou seja, até convergir para valores de erros aceitáveis pelo especialista (Master, 1993).

Nas últimas décadas, as redes neurais têm despertado um grande interesse e têm sido aplicadas em várias áreas da ciência, tais como: reconhecimento de padrões de imagens de satélite, medicina, biologia molecular e, mais recentemente, ciências ecológicas e ambientais. Algumas recentes utilizações das redes neurais nas ciências ambientais são os modelos para a estimativa da distribuição de espécies, abundância ou diversidade em função de variáveis ambientais, danos em cultivos agrícolas, riscos de enchentes, parâmetros de qualidade do ar e características de ecossistemas a partir de dados de sensoriamento remoto (Mas et al., 2004; Chagas, 2006).

Nas redes neurais artificiais do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP), que utilizam o algoritmo *Backpropagation*, um padrão de entrada é usado pelo sistema para produzir uma saída que, em seguida, é comparada com a saída de destino, se não houver nenhuma diferença, então o aprendizado não ocorre, caso contrário, os pesos são alterados para reduzir a diferença (Mohammadi, 2008). O arranjo destes neurônios pode assumir diferentes formas variando a natureza da ligação entre as camadas, o número de camadas e o número de neurônios por camadas, o que é denominado de arquitetura da RNA (Ito et al., 2000). O algoritmo *Backpropagation* ou retropropagação é o principal algoritmo de treinamento de rede e é, frequentemente utilizado no treinamento de redes MLP devido à sua eficiência.

Em uma RNA cada unidade de processamento ou neurônio está associada a um estado de ativação que é determinado pela função de ativação, contínua ou discreta, que se quer representar com o modelo. A função escolhida para o estado de ativação é responsável pelo sinal a ser transmitido por um determinado neurônio aos demais a ele conectados. Em geral, as funções mais utilizadas são a linear, a rampa, degrau (*threshold*), tangente hiperbólica e a sigmoideal. As funções tangente hiperbólica e sigmoideal se destacam, pois apresentam diversas características favoráveis, pelo fato de serem funções semi-lineares, contínuas, simétricas, deriváveis em toda sua extensão, monotonicamente crescentes e limitadas por assíntotas horizontais (Vieira, 2000).

Vieira (2000) destaca que a etapa de treinamento é de extrema importância para o desempenho de uma RNA, pois nela são apresentados os exemplos ou dados de entrada para o aprendizado da RNA. Esses exemplos correspondem à fonte de conhecimento objetivo do trabalho e todas as generalizações que ela for capaz de

realizar dependem do seu aprendizado. Assim, a seleção dos dados de entrada deve ser realizada com cautela, de modo que contenha dados de qualidade.

A utilização de modelos matemáticos para descrever e simular a modelagem hidrológica, como, por exemplo, o nível do lençol freático em aquíferos, tem sido abordado em muitos estudos durante as últimas décadas. A distinção entre estes modelos surge a partir das diferenças no modelo conceitual sobre os quais estes estão baseados e os métodos utilizados para resolver as equações que governam estes processos. Além disso, a calibração destes modelos, entre eles o ModFlow (um dos mais populares programas de modelagem do fluxo de águas subterrâneas, de acordo com McDonald & Harbaugh, 1989) é difícil por causa da necessidade de uma grande quantidade de dados de parâmetros de entrada, cuja aquisição é geralmente difícil e/ou onerosa (Lallahem et al., 2005; Chitsazan et al., 2013). Por outro lado, as redes neurais artificiais (RNAs) oferecem uma solução simples e precisa para muitos problemas de simulação (Lallahem et al., 2005; Mohammadi, 2008).

Vários estudos têm utilizado RNAs para estimar valores dos parâmetros de aquíferos. Coulibaly et. al. (2001) utilizaram quatro tipos de RNAs e dados hidrometeorológicos para simular a flutuação da altura do lençol freático no aquífero Gondo, Burkina Faso. Neste estudo foram utilizadas RNAs do tipo retardamento de entrada com estrutura de memória estática (IDNN), recorrente (RNN), função de base radial (RBF) e probabilística (PNN). Os resultados obtidos com a utilização das RNAs IDNN e RNN foram equivalentes, apesar dos procedimentos de aprendizagem serem basicamente diferentes. Por outro lado, a RBF teve um desempenho muito ruim quando comparado aos demais modelos avaliados. Além do mais, o estudo mostrou que a RNA do tipo RNN pode ser uma ferramenta robusta para melhorar o planejamento de suprimento de água onde informações sobre aquíferos não estão disponíveis.

Coppola (2000) utilizaram RNAs com dados simulados pelo ModFlow para predição dos níveis do lençol freático em vários locais, sob condições variáveis de bombeamento e recarga. Coppola et al. (2003) evidenciaram em seu estudo a elevada habilidade das RNAs na predição da flutuação do nível do lençol freático em um aquífero influenciado por bombeamento e condições meteorológicas diferentes. Os autores notaram que os resultados da predição das RNAs foram mais precisos do que o do modelo numérico utilizado. Além disso, mostraram que modelos baseados em

RNAs são bons na simulação de aquíferos cársticos onde outros modelos numéricos são em muitos casos inadequados.

Balkhair (2002) utilizou uma rede neural artificial do tipo *Multilayer Perceptron* com três camadas para estimar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento de um aquífero (camada de saída), a partir de dados do tempo de rebaixamento e diâmetro dos poços (camada de entrada), tendo como base o método proposto por Papadopoulos e Copper (1967) para poços com diâmetro grande, em um aquífero confinado, homogêneo e isotrópico. Os resultados alcançados, após a mesma ter sido treinada até atingir um nível aceitável de acurácia, mostraram boa concordância com os resultados obtidos na literatura. Além disso, o autor ressaltou que o conhecimento prévio dos parâmetros do aquífero e a sistemática de treinamento utilizada foram úteis para o desenvolvimento da pesquisa.

Daliakopoulos et al. (2005) avaliaram sete diferentes arquiteturas de RNAs e algoritmos de aprendizado na estimativa da tendência de decréscimo do nível do lençol freático no vale de Messara em Creta (Grécia), que foram comparados em termos de eficiência e precisão do modelo de predição. Os diferentes experimentos mostraram que predições acuradas podem ser alcançadas com uma rede neural *feedforward* padrão treinada com o algoritmo *Levenberg-Marquardt* que forneceu os melhores resultados para até 18 meses de previsões.

Um estudo realizado por Lin e Chen (2005), comparando uma RNA treinada com o algoritmo *Backpropagation* com uma RNA do tipo função de base radial, teve por objetivo determinar a transmissividade e o coeficiente de armazenamento de um aquífero. Nesta comparação a rede do tipo função de base radial foi superior à rede treinada com o algoritmo *Backpropagation*, determinando os parâmetros do aquífero com maior precisão e menos tempo de treinamento.

A viabilidade da utilização de RNAs para estimativa do nível do lençol freático utilizando dados de piezômetros implantados em um aquífero calcário não confinado no Norte da França foi avaliada por Lallahem et al. (2005). Estes aquíferos são os mais suscetíveis à depleção e à contaminação, com a taxa de recarga e os processos dominantes determinando seu nível de vulnerabilidade. O algoritmo de aprendizado utilizado foi o *Backpropagation*. De acordo com os autores, o modelo desenvolvido simulou saídas com elevada exatidão, no qual as estruturas mais simples produziram os melhores resultados. Além disso, o processo de modelagem interativa revelou que existe um limiar ótimo de informações e parâmetros

específicos que devem ser utilizados para a geração do modelo; sendo essa seleção a maior dificuldade identificada.

Nayak et al. (2006) investigaram o potencial de RNAs na previsão do nível de flutuação do lençol freático em um aquífero costeiro não confinado na Índia, a partir de dados pluviométricos, nível dos canais e nível de água dos poços. O conjunto de variáveis de entrada para o modelo foi selecionado através de uma combinação do conhecimento do especialista com uma análise estatística dos dados disponíveis. Os resultados sugerem que as predições do modelo são razoavelmente precisas quando avaliadas por vários índices estatísticos. Uma análise de sensibilidade dos dados de entrada sugeriu que a exclusão dos valores anteriores da série temporal do nível da água pode não ajudar o modelo a capturar o tempo de recarga do aquífero, que pode resultar em um baixo desempenho dos modelos. Em geral, os resultados mostraram que os modelos de RNA foram capazes de prever os níveis de água com até 4 meses de antecedência razoavelmente bem.

Affandi et al. (2007) avaliaram e compararam a capacidade de uma RNA com diferentes algoritmos *Backpropagation* (gradiente descendente com momentum - GDM, gradiente descendente com taxa de aprendizado adaptativo - GDX, gradiente conjugado do tipo *Fletcher-Reeves* - CGF, *Quasi-Newton* - BGF e *Levenberg-Marquardt* - LM) e uma RNA do tipo função de base radial (RBF), para estimar a flutuação do nível de água do lençol freático na Indonésia. Os dados de entrada foram obtidos em um monitoramento realizado em 5 dias em um poço de observação. O modelo com seis neurônios na camada de entrada e 10 neurônios na camada interna foi o que obteve os melhores resultados. O algoritmo LM obteve o melhor desempenho entre os algoritmos *Backpropagation*, além de ter sido superior à rede do tipo RBF. Por fim, os autores concluíram que as RNAs podem ser utilizadas para estimar a flutuação do nível de água com relativamente poucos dados.

Samani et al. (2007) desenvolveram um modelo de RNA para determinação dos parâmetros de um aquífero confinado com a utilização da análise dos componentes principais (ACP) e com o mesmo conjunto de dados utilizado por Lin e Chen (2006). A RNA proposta neste estudo utilizou o algoritmo *Levenberg-Marquardt*, diferentemente do gradiente descendente utilizado por Lin e Chen (2006). A análise de componentes principais utilizada para reduzir a dimensionalidade dos dados de entrada e a redundância entre eles, melhorou o desempenho da predição do nível do lençol freático, bem como aumentou a

velocidade de treinamento e reduziu o número de neurônios, simplificando a topologia da RNA, para somente 1 neurônio na camada de entrada e oito na camada interna, independentemente do número de registros dos dados do teste de bombeamento.

Em outro estudo realizado por Taiyan et al. (2007), os efeitos das condições hidrológicas, de tempo e umidade sobre o nível do lençol freático foram simulados por meio da utilização de uma RNA em uma parte da bacia do rio Shenyang, Norte da China. A utilização do modelo de RNA possibilitou a predição do nível do lençol freático com elevada precisão (erro médio de 0,37).

Uddameri (2007) construiu um modelo de RNA utilizando o algoritmo *Backpropagation* para estimar séries mensais e trimestrais do nível do lençol freático em um poço profundo na Formação *Evangeline* do aquífero Costa do Golfo, em Victoria, Texas. Ao contrário de aquíferos não confinados, não existem relações causais entre níveis do lençol freático e variáveis hidrometeorológicas medidas na vizinhança do poço. Os resultados obtidos para a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), desvio médio absoluto e coeficiente de correlação (R^2) foram de 1,40, 0,33 e 0,77, respectivamente, para o conjunto de teste de avaliação trimestral e de 1,17, 0,46 e 0,88 para o conjunto de teste de avaliação mensal, não utilizados no processo de treinamento das RNAs, resultados considerados superiores aos obtidos pelas técnicas de regressão também utilizadas.

Mohammadi (2008) avaliou a aplicabilidade das RNAs na simulação da flutuação do nível de água, para aquíferos com dados limitados. O software ModFlow foi utilizado para simular o fluxo do lençol freático e o modelo calibrado foi então aplicado para gerar centenas de conjunto de dados para o treinamento das RNAs, em uma abordagem semelhante à utilizada no presente estudo. Os resultados encontrados mostraram coeficiente de regressão médio de 0,958, para a RNA treinada com o algoritmo *Backpropagation*, e de 0,865 para as redes neurais recorrentes.

Reinke (2008) aplicou modelos de RNA do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP) com algoritmo *Backpropagation* para estimar a espessura da Formação da Serra Geral, o nível do lençol freático e capacidade específica, em um aquífero na bacia hidrográfica do rio Caí, RS, a partir da utilização de dados do cadastro de poços do SIAGAS. Os testes realizados (teste t) indicaram que os modelos propostos para as estimativas avaliadas não diferiram dos dados

considerados verdadeiros (SIAGAS). Por meio do coeficiente de correlação (R^2) verificou-se também uma forte correlação entre as variáveis simuladas e as consideradas verdadeiras. Assim, a autora considerou que as RNAs podem ser utilizadas como método alternativo de predição das variáveis avaliadas em relação a modelagem convencional visando a elaboração de cartas temática, bem como a otimização de processos para a exploração de água subterrânea.

O desempenho de um modelo de RNA do tipo *feedforward* padrão treinada com o algoritmo *Levenberg-Marquardt* foi avaliado por Sreekanth et al. (2009), na predição do nível do lençol freático na microbacia *Maheshwaram, Hyderabad, Índia*. A precisão e eficiência do modelo, avaliada com base no RMSE e R^2 , mostrou que o modelo de RNA utilizado obteve um bom desempenho com RMSE de 4,50 e $R^2 = 0,93$. Os autores concluíram que os modelos de RNA podem ser uma ferramenta promissora para uma avaliação precisa e acurada do nível do lençol freático.

Devido às dificuldades da identificação de modelos de estruturas não-lineares e da estimativa dos parâmetros a ele associados, Ghose et al. (2010) utilizaram RNAs do tipo *Backpropagation* (BPNN) para simular o nível do lençol freático usando como dados de entrada registros históricos do nível do lençol freático e dados hidrometeorológicos, e RNAs do tipo função de base radial (RBFN) para prever o nível do lençol freático em quatro locais diferentes na bacia do rio Mahanadi, Índia. No estudo, foram identificadas satisfatoriamente a predição da profundidade do lençol freático para os quatro locais considerados, bem como a sensibilidade dos dois modelos de RNAs testados.

Yoon et al. (2011) desenvolveram dois modelos não lineares baseados em RNAs e *Support Vector Machine* (SVM) para predição da flutuação do nível do lençol freático em dois poços em um aquífero costeiro na Coreia do Sul. Como variáveis de entrada nos modelos foram utilizados dados anteriores do nível do lençol freático, precipitação e nível da maré. Dentre as variáveis utilizadas, as mais efetivas foram os dados anteriores do nível do lençol freático na área de estudo. Além disso, o nível da maré foi mais frequentemente selecionada do que a precipitação. Os resultados do desempenho dos modelos testados mostraram que os valores do RMSE obtidos pelo modelo de RNA foi menor do que aqueles obtidos pelo modelo SVM, tanto para as amostras de treinamento quanto para as amostras de teste. Entretanto, o modelo SVM foi similar ou até mesmo superior ao modelo de RNA na predição final. A habilidade de generalização do modelo SVM foi superior à

do modelo RNA considerando as variáveis de entrada consideradas e o tempo gasto no processo.

Um modelo de RNA *feedforward* foi utilizado por Taormina et al. (2012), para simulações de longo tempo dos níveis do lençol freático em um aquífero costeiro não confinado situado na lagoa de Veneza, Itália. Dados do nível do lençol freático observados a um dado tempo foram simulados a partir da utilização das variáveis de entrada precipitação e evapotranspiração. Os resultados alcançados mostraram que o desenvolvimento de uma RNA pode reproduzir precisamente as profundidades do lençol freático de aquíferos rasos por muitos meses. O estudo sugere que a utilização de RNA pode ser usada como uma alternativa viável para simular as respostas de aquíferos sob cenários futuros plausíveis ou para reconstruir longos períodos de falta de observações.

Chitsazan et al. (2013) utilizaram RNAs na predição da flutuação do nível do lençol freático na planície de Aghili, sudoeste do Irã. A topologia de RNA considerada ideal utilizou 2 camadas internas, treinadas com quatro algoritmos diferentes: gradiente descendente com *momentum* (GDM), *Levenberg-Marquardt* (LM), *backpropagation* resiliente (RBP) e gradiente conjugado escalonado (SCG). Precipitação, evaporação, umidade relativa, temperatura (máxima e mínima), descarga do canal de irrigação e recarga do lençol freático da planície limítrofe foram utilizadas como variáveis de entrada na predição do nível do lençol freático futuro. Os dados disponíveis foram divididos em três grupos, de acordo com as características hidrogeológicas das diferentes partes da planície circundante, para cada piezômetro. O algoritmo LM foi o que apresentou os melhores resultados na predição para os três grupos hidrogeológicos considerados. A validação mostrou que a divisão dos piezômetros nos diferentes grupos de dados e as distintas redes utilizadas forneceram mais foco na simulação do nível do lençol freático na planície e os resultados obtidos foram considerados aceitáveis.

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo a modelagem da distribuição espacial do nível do lençol freático, e suas variações sazonais, em um aquífero granular livre em uma área periurbana localizada no município de Viçosa (MG), utilizando atributos topográficos de fácil obtenção, derivados de um modelo digital de elevação, com 5 m de resolução espacial, como covariáveis ambientais e redes neurais artificiais do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP) treinada com o algoritmo *Backpropagation*, como modelo preditivo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo está localizada no perímetro urbano do município de Viçosa (MG), em uma subárea da bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, entre as coordenadas UTM 7.705.514 e 7.706.470m N e 719.750 e 720.750m E, Zona 23 S (Figura 1).

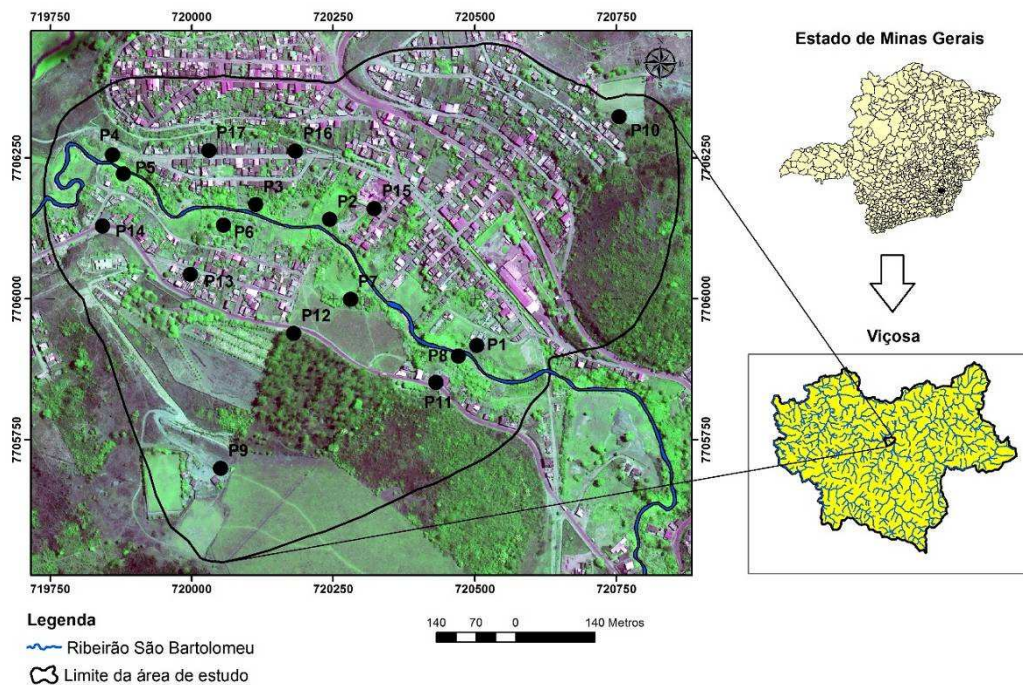


Figura 1 - Localização da área de estudo no município de Viçosa e localização dos poços de monitoramento.

2.2. Nível do Lençol Freático e Covariáveis Ambientais Utilizadas

Para análise e predição do nível do lençol freático na área estudada foram utilizados dados coletados em 17 poços de monitoramento, conforme mostrado na Figura 1. Os procedimentos utilizados na coleta desses dados estão apresentados no capítulo 1 deste estudo. Nesses poços de monitoramento foram coletados dados quinzenais ao longo de 1 ano hidrológico (Tabela 9 - Capítulo 1), no entanto, para efeito de análise e predição foram utilizados apenas dados médios, considerando três épocas distintas (variáveis dependentes), conforme a Tabela 1, visto que a variação do nível do lençol freático verificada em cada poço de monitoramento entre as coletas quinzenais foi pequena.

Tabela 1 - Valores médios do nível do lençol freático nos poços de monitoramento nas épocas consideradas

Poços	X	Y	Altitude (m)	Nível do Lençol Freático (m)		
				Período (média)		
				Anual (NA)	Seco (NS)	Chuvoso (NC)
P1	720179	7705938	623,51	3,29	3,33	3,28
P2	720243	7706140	620,05	2,40	2,29	2,51
P3	720112	7706166	619,69	1,92	1,84	2,00
P4	719858	7706252	620,25	5,33	5,22	5,37
P5	719879	7706221	619,69	3,68	3,64	3,71
P6	720056	7706130	619,69	2,28	2,17	2,40
P7	720281	7705999	625,76	2,55	2,47	2,63
P8	720471	7705898	621,30	2,28	2,31	2,25
P9	720051	7705699	713,56	61,17	61,17	61,17
P10	720755	7706323	714,22	64,00	64,00	64,00
P11	720397	7705852	644,75	12,89	12,89	12,89
P12	720179	7705938	651,44	14,64	14,60	14,68
P13	719998	7706044	640,37	9,73	9,56	9,90
P14	719842	7706129	634,56	4,95	4,95	4,95
P15	720322	7706158	626,78	4,95	4,93	4,98
P16	720183	7706262	631,75	10,12	10,21	10,03
P17	720030	7706263	630,83	10,54	10,42	10,66

Dentre os poços de monitoramento considerados, apenas os poços P9, P10 e P14 não atingiram o nível do lençol freático até a profundidade máxima de perfuração estipulada (20 m), em todo o período avaliado. Essa profundidade foi estipulada em função dos elevados custos envolvidos na perfuração destes poços e o tempo gasto nessa operação. Para contornar este problema, já que a falta de dados,

principalmente nas porções mais elevadas da área poderiam comprometer a predição pelas RNAs, optou-se por utilizar nesses pontos os valores estimados pelo programa ModFlow (Tabela 1).

Algumas razões para sua popularidade são: (1) o programa é aplicável na maioria dos problemas de modelagem do fluxo de águas subterrâneas; (2) é bem estruturado e documentado; (3) o código fonte é de domínio público e assim pode ser checado e modificado por qualquer um com conhecimento em programação e matemática; (4) é aceito pelas agências regulatórias e em casos envolvendo litígio; (5) modificações realizadas no programa aumentam as suas capacidades (Winston, 1999).

Como covariáveis ambientais ou variáveis independentes foram utilizados atributos topográficos derivados de um MDE com resolução espacial de 5m, conforme consta no capítulo 1 deste estudo. São eles: elevação, declividade, curvatura, índice CTI, distância vertical do canal de drenagem, aprofundamento do vale, direção do fluxo e distância euclidiana, perfazendo um total de 8 covariáveis. A influência dessas covariáveis ambientais para a predição do nível do lençol freático foi destacada no capítulo 1. Em seguida, os dados dos atributos topográficos em cada um dos poços de monitoramento foram extraídos no ArcGis Desktop v.10.2 com a utilização da extensão *Spatial Analyst > Extraction > Extract Multi Values To Point* (Tabela 2).

A correlação entre o nível do lençol freático nas diferentes épocas e as covariáveis ambientais utilizadas foi estimada através da correlação linear de Pearson, normalmente empregada para medir a associação linear entre variáveis, implementada no R (R Development Core Team, 2013), através da função *cor.test*, conforme Ciampalini et al. (2012) e Carvalho Júnior et al. (2014). Na correlação de Pearson o p-valor define se duas variáveis são ou não estatisticamente correlacionadas e, para este estudo, definiu-se que valores inferiores a 0,05 indicam correlação significativa.

Tabela 2 - Valores dos atributos topográficos nos poços de monitoramento

Poços	X	Y	Elevação (m)	Decl (%)	Curv at	CTI	DVCD (m)	AV (m)	DF	DE (m)
P1	720179	7705938	623,51	20,96	1,68	6,75	1,28	68,09	8,00	20,09
P2	720243	7706140	620,05	13,06	0,05	10,33	1,81	66,38	6,00	19,99
P3	720112	7706166	619,69	21,25	-0,91	7,98	1,13	64,74	16,00	14,53
P4	719858	7706252	620,25	21,44	0,47	8,06	3,00	58,94	4,00	13,28
P5	719879	7706221	619,69	20,35	1,38	5,92	2,42	58,98	30,00	5,47
P6	720056	7706130	619,69	11,46	-1,06	10,75	0,02	61,95	21,00	27,63
P7	720281	7705999	625,76	39,55	-2,37	8,84	6,25	62,46	64,00	42,71
P8	720471	7705898	621,30	31,13	-1,69	7,64	1,51	70,45	63,00	4,60
P9	720051	7705699	713,56	8,57	0,04	8,22	87,60	0,04	90,00	413,79
P10	720755	7706323	714,22	24,20	0,13	6,48	92,29	0,78	4,00	465,26
P11	720397	7705852	644,75	23,28	2,42	8,12	24,33	46,96	73,00	59,04
P12	720179	7705938	651,44	12,57	-0,11	9,72	29,09	34,22	128,00	159,07
P13	719998	7706044	640,37	16,92	-0,32	8,82	4,18	36,18	64,00	102,53
P14	719842	7706129	634,56	27,62	-0,19	6,41	15,98	35,90	53,00	61,75
P15	720322	7706158	626,78	9,50	0,43	9,18	6,28	61,71	8,00	81,10
P16	720183	7706262	631,75	27,54	-1,97	7,40	12,02	55,07	4,00	127,92
P17	720030	7706263	630,83	29,47	-1,44	7,24	12,41	52,48	4,00	99,69

Decl = declividade; Curvat = curvatura; CTI = índice CTI; DVCD = Distância vertical do canal de drenagem; AV = Aprofundamento do vale; DF = Direção do fluxo; DE = Distância euclidiana.

2.3. Parâmetros de Configuração das Redes Neurais Artificiais

As RNAs foram implementadas utilizando-se o pacote RSNNS do R (R Development Core Team, 2013). Segundo Tso & Mather (2009), a utilização de uma RNA se inicia com o processo de treinamento da rede. Inicialmente os valores referentes ao nível do lençol freático (variáveis dependentes), para todas as épocas e das covariáveis ambientais (variáveis independentes) foram reescalados para o intervalo entre 0 e 1 para facilitar o processo de treinamento e evitar a saturação da RNA, pois valores muito grandes poderiam impedir a solução do problema (saturação nas funções de transferência que impediria a convergência da rede), além de prevenir que grandes variações de uma variável pouco importante inibam pequenas, mas importantes, variações em outras variáveis.

No treinamento das RNAs, diferentes arquiteturas foram testadas, em que se variou o número de neurônios na camada de entrada e o número de neurônios na

camada interna, conforme exemplo da Figura 2, sempre utilizando, o algoritmo de aprendizado *backpropagation*, função de inicialização *Randomize Weights*, com alocação aleatória dos pesos interneurônios entre -0,5 e 0,5, função de atualização *Topological Order* e uma taxa de aprendizado de 0,2, considerando 50 ciclos de aprendizagem (Zell et al., 1996). O algoritmo de aprendizado é baseado na modificação dos pesos de conexão dos neurônios, de modo a se obter o comportamento desejado do sistema. Esta modificação é frequentemente baseada na regra de *Hebb* (Hebb, 1949). De acordo com esta regra, uma ligação entre duas unidades é fortalecida se ambas as unidades estão ativas ao mesmo tempo (Vieira, 2000; Chagas, 2006).

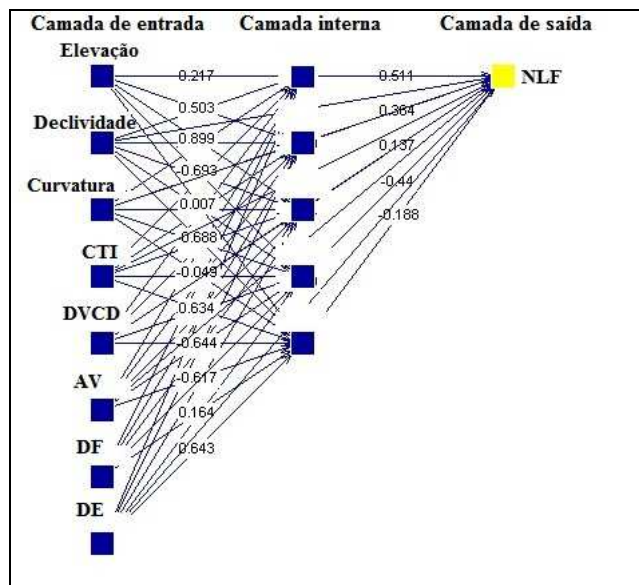


Figura 2 - Exemplo de Topologia de RNA utilizada.

CTI = Índice CTI; DVCD = distância vertical do canal de drenagem; AV = aprofundamento do vale; DF = direção do fluxo; DE = distância euclidiana; NFL = nível do lençol freático.

O número de neurônios da(s) camada(s) interna(s) foi determinado através de tentativa e erro, conforme sugerido por Hirose et al. (1991). Este procedimento começa com uma rede pequena composta de uma camada de entrada e uma de saída, as quais definem, respectivamente o número de variáveis discriminantes e o número de classes informacionais envolvidas em um determinado problema, com somente um neurônio na camada interna. O critério utilizado para adicionar neurônios na camada interna é baseado no comportamento do erro durante a fase de treinamento (SSE - *sum square error*). O erro do treinamento mede a diferença entre os valores estimados e os valores desejados para o conjunto de treinamento. Desta maneira, o

erro do treinamento foi usado como critério para avaliar o desempenho da rede e seleccionar a arquitetura(s) mais adequada(s) para a predição do nível do lençol freático na área estudada.

2.4. Validação dos Modelos de Redes Neurais Artificiais

Na etapa anterior as RNAs foram apresentadas ao conjunto de dados de treinamento (calibração). Com isso obteve-se um modelo de RNA treinado, que representa o conhecimento extraído. Numa segunda etapa este modelo deve ser validado com a utilização de um conjunto de dados de teste. Como o conjunto de dados de testes também é previamente rotulado, se pode medir a taxa de acerto, comparando-se o resultado obtido (estimado) com os dados do conjunto de testes (observado) (Cabena et al.,1997).

A performance dos modelos de predição é idealmente avaliada utilizando-se um conjunto de dados de validação independente que não foi utilizado no processo de calibração. No entanto, o número de poços de monitoramento não permitiu dividir os dados em dados de calibração e de validação. Desta forma, o desempenho final das RNAs foi obtido pelo cálculo da correlação entre os valores observados e estimados, através do coeficiente de determinação (R^2) da validação cruzada (Carvalho Junior et al., 2014) e do RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático). A técnica de validação cruzada consiste em dividir a base de dados em x partes (*folds*). Destas, $x-1$ partes são utilizadas para o treinamento e uma serve como teste. O processo é repetido n vezes, de forma que cada parte seja usada uma vez como conjunto de testes. Ao final, a correção total é calculada pela média dos resultados obtidos em cada etapa, obtendo-se assim uma estimativa da qualidade do modelo de conhecimento gerado e permitindo análises estatísticas (Cabena et al.,1997).

O coeficiente de determinação (R^2) é dado pela relação entre a soma dos quadrados dos resíduos da regressão (SQR) e a soma total dos quadrados (SQT), conforme a Equação 1.

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Equação 1}$$

Em que, R^2 é o coeficiente de determinação ($0 \leq R^2 \leq 1$), y_i é o valor observado da variável dependente, \hat{y}_i é o valor estimado da variável dependente e \bar{y} é a média da variável dependente. O coeficiente de determinação é sempre positivo e deve ser interpretado como a proporção da variância total da variável dependente Y que é explicada pelo modelo de regressão.

Por sua vez, o RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático), medida usualmente utilizada para medir o desempenho de predições espaciais de modelos hidrogeológicos (Copolla et al., 2003; Samani et al., 2007; Yang et al., 2009; Chitsazan et al., 2013), é calculado conforme a Equação 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que, d é a diferença entre os valores observados e os valores estimados pelas RNAs e n é o número total de poços de monitoramento considerados. Segundo Holmes et al., (2000), o RMSE é medido a partir de pontos de amostra discretos e é comumente utilizado para estimar o erro ou a incerteza nos locais onde o erro não foi medido diretamente. Assim, o RMSE se refere ao grau de diferença entre os valores estimados e os valores medidos ou observados. Assim, quanto maiores são os valores do RMSE, maiores são as discrepâncias entre os conjuntos de dados comparados. Esta avaliação foi realizada com a utilização do R (R Development Core Team, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estatística Descritiva do Nível do Lençol Freático e Covariáveis Ambientais Utilizadas

A estatística descritiva do nível do lençol freático nas diferentes épocas avaliadas (época seca, época chuvosa e anual) para os poços de monitoramento considerados é apresentada na Figura 3, enquanto na Figura 4 é mostrada a estatística descritiva das covariáveis ambientais utilizadas.

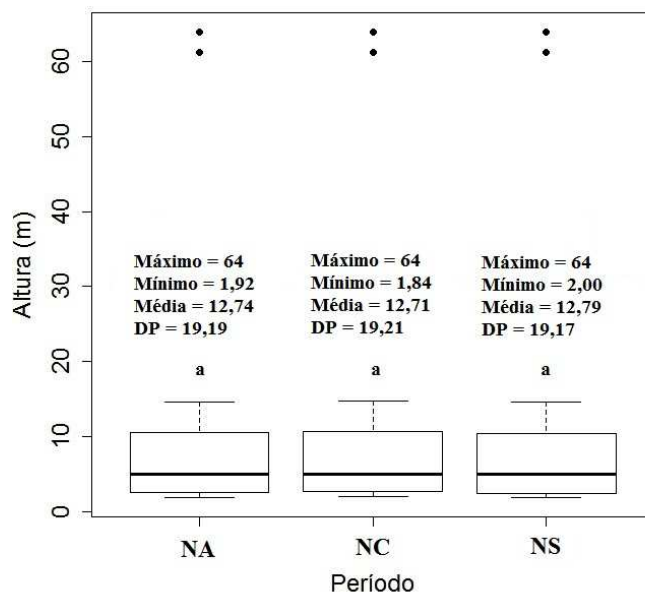
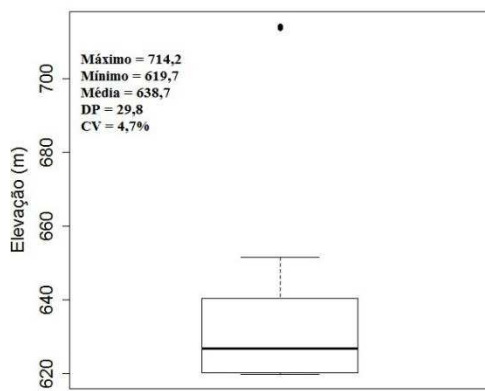


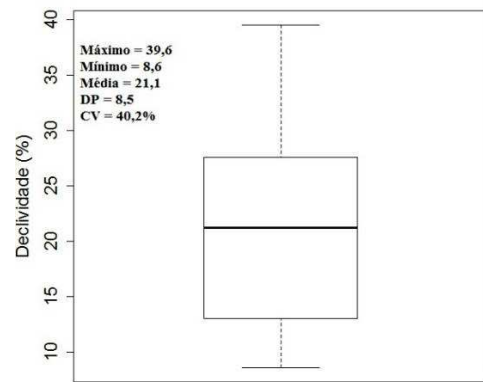
Figura 3 - Estatística descritiva para o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento nas diferentes épocas consideradas.

DP - Desvio padrão; NA - nível do lençol freático no período anual; NC - nível do lençol freático no período chuvoso; NS - Nível do lençol freático no período seco.

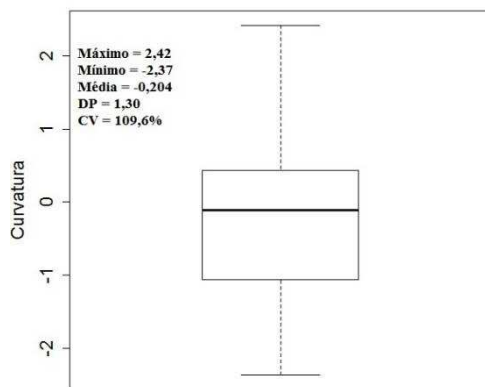
Os resultados mostram que o nível do lençol freático nos diferentes períodos considerados apresenta grande similaridade, sendo constatado pela análise de variância (ANOVA) que estes não diferem significativamente. Os elevados valores do coeficiente de variação (CV), superiores a 100% em todos os períodos, está relacionado com a elevada concentração dos poços de monitoramento em altitudes que variaram de 619,69 a 651,44 m (15 poços), enquanto apenas dois poços estão localizados em áreas com mais de 700 m, conforme pode ser observado na Figura 1. Sendo assim, todas as análises seguintes foram realizadas considerando-se o conjunto contendo os dados médios anuais (NA).



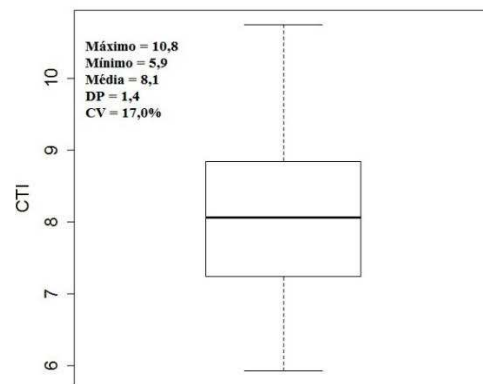
Poços de monitoramento



Poços de monitoramento



Poços de monitoramento



Poços de monitoramento

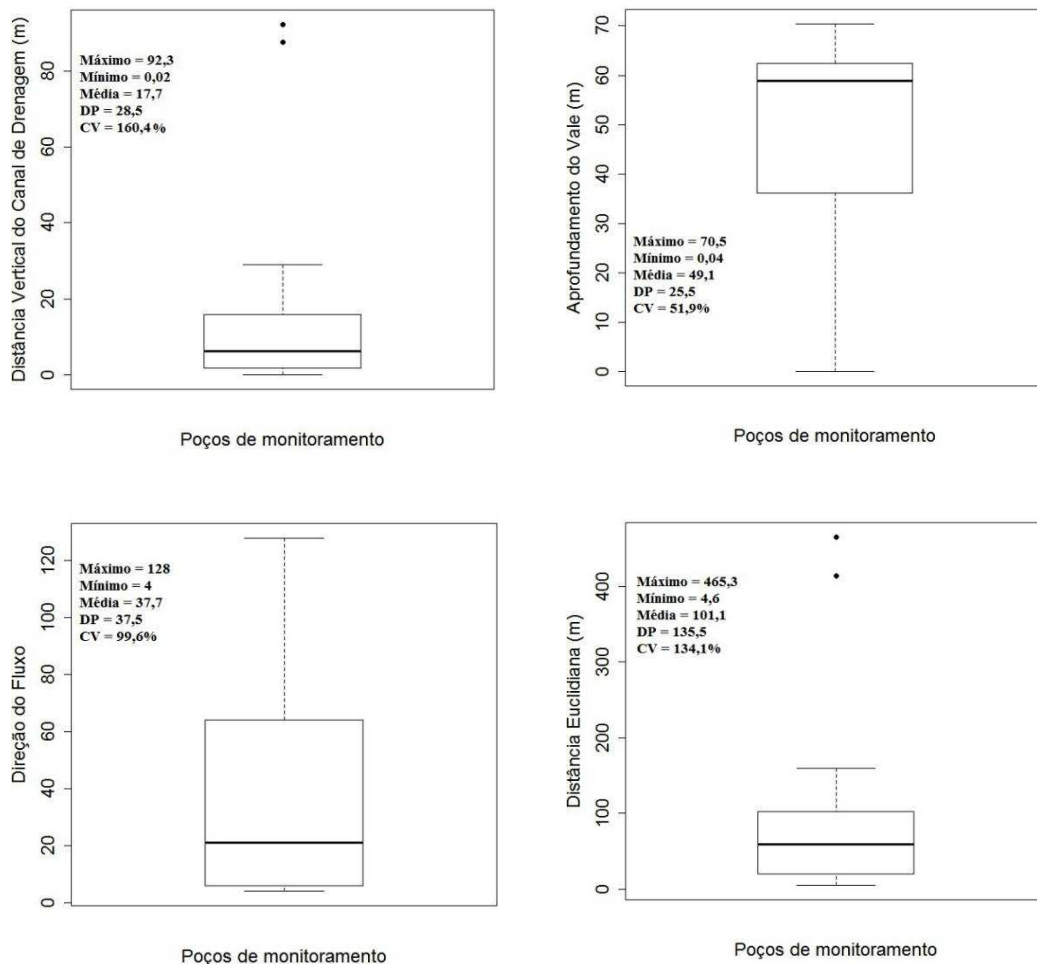


Figura 4 - Estatística descritiva das covariáveis ambientais nos poços de monitoramento considerados.

Dentre as covariáveis consideradas, apenas a elevação (4,7%) e o índice CTI (17,0%) apresentaram coeficientes de variação (CV) baixos, que indicam maior homogeneidade dos dados. As demais covariáveis apresentaram CV sempre superiores a 40%, e portanto, são grandemente heterogêneas. O CV mais elevado foi o da distância vertical do canal de drenagem (160,4%), que é a covariável mais heterogênea da área, seguida pela distância euclidiana (134,1%), curvatura (109,6%), direção do fluxo (99,6%), aprofundamento do vale (51,9%) e declividade (40,2%). Esta elevada heterogeneidade das covariáveis pode contribuir para uma melhor calibração dos modelos testados, conforme destacado por Demattê et al. (2007).

3.2. Importância das covariáveis

Os resultados da análise da correlação linear de Pearson (Figura 5) mostraram que, das oito covariáveis ambientais utilizadas, quatro apresentaram correlação significativa (elevação, distância vertical do canal de drenagem, aprofundamento do vale e distância euclidiana) com os níveis do lençol freático medidos ($p < 0,05$), enquanto a declividade, a curvatura, o índice CTI e a direção do fluxo não são correlacionadas.

A elevação apresentou uma correlação muito elevada ($r = 0,99$) com os níveis do lençol freático e, conforme destacado por Moore et al. (1993), tem grande influência sobre o movimento superficial e a infiltração de água no solo, conseqüentemente sobre os processos hidrológicos e hidrogeológicos. A utilização de atributos do terreno em um modelo de RNA para simulação do nível do lençol freático foi constatada no estudo de Reinke (2008), que utilizou dados de elevação como variável de entrada em uma RNA treinada com o algoritmo *Backpropagation*, obtendo resultados bastante satisfatórios ($R^2 = 0,95$).

A distância vertical do canal de drenagem, o aprofundamento do vale e a distância euclidiana também mostraram uma forte correlação com os níveis do lençol freático com valores de 0,99, -0,91 e 0,98, respectivamente. A forte correlação da distância vertical do canal de drenagem se deve basicamente à proximidade da maioria dos poços de monitoramento com o canal de drenagem, que influencia as condições de drenagem (Romão, 2006). O aprofundamento do vale, que representa a altitude relativa do relevo, refletindo seu grau de entalhamento, por sua vez, tem uma forte autocorrelação com a elevação e deste modo também apresentou um elevado coeficiente de correlação. A distância euclidiana da hidrografia, caracteriza as áreas com maior influência da rede de drenagem e/ou susceptíveis a inundações e alagamentos, e por essa razão mostrou forte correlação com o nível do lençol freático nos poços de monitoramento considerados.

Assim, de forma geral, as covariáveis ambientais que estão diretamente relacionadas com a distância da margem do rio guardam maior relação com a profundidade do lençol freático, que é crescente em relação ao aumento dessa distância, o que pode ser explicado pelo fato da área estudada apresentar relevo predominantemente forte ondulado, possuindo altitude crescente à medida que se afasta da margem do rio.

Por outro lado, a declividade apresentou uma correlação negativa e fraca com o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento ($r = -0,21$). Essa fraca correlação pode estar relacionada com a característica muito declivosa da área de estudo (média = 22,6%), que favorece o escoamento superficial em detrimento da recarga do aquífero, e à pouca variabilidade do nível do lençol freático com relação a declividade, conforme pode ser verificado na Figura 5.

A curvatura e a direção do fluxo foram as covariáveis ambientais que apresentaram as menores correlações com o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento ($r = 0,12$ e $0,17$, respectivamente). Segundo Florinsky (2012), os processos de transporte superficial e subsuperficial controlados pela gravidade podem ser interpretados em termos de fluxo divergente/convergente e fluxo de aceleração/desaceleração determinados pelas curvaturas horizontal e vertical, respectivamente. O fluxo convergente e a desaceleração resultam em acumulação de água favorecida pela movimentação lenta no solo. Por outro lado, a predominância de fluxo divergente e aceleração resultam em um processo de dissipação ou escoamento superficial. Neste sentido, a predominância de poços localizados em áreas de fluxo de aceleração (relevo muito declivoso), independente de fluxo convergente/divergente, pode explicar a baixa correlação entre a curvatura, e também a declividade, com o nível do lençol freático nos poços de monitoramento.

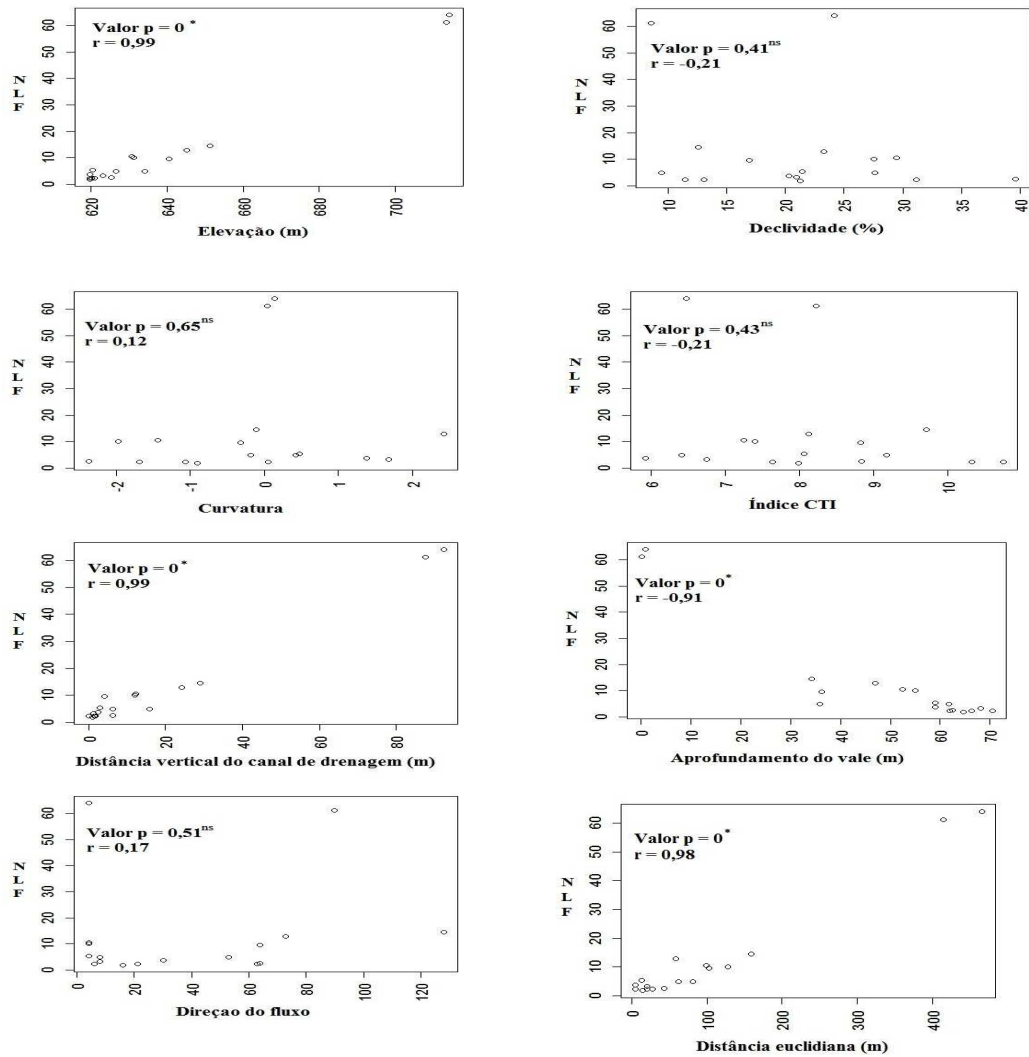


Figura 5 - Resultados da análise de correlação de Pearson entre o nível do lençol freático (NLF) medido nos poços de monitoramento e as covariáveis ambientais.

r - valor da correlação de Pearson; * significativo ao nível de 5%; ns - não significativo.

Segundo Rennó & Soares (2003), a estimativa da profundidade do nível lençol freático pode ser feita através do índice topográfico. Rennó (2003) apresentou o Sistema de Análise e Simulação Hidrológica (SASHI) que permite analisar, simular e quantificar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica através de um modelo hidrológico distribuído. Este sistema dispõe de uma interface interativa na qual diferentes valores desses parâmetros podem ser testados e o resultado pode ser imediatamente visualizado, ou então, estes parâmetros podem ser estimados através de uma regressão, caso se conheça a profundidade do nível do lençol freático de alguns pontos da bacia. Apesar dos resultados satisfatórios obtidos por Rennó &

Soares (2003), não se verificou boa correlação do índice CTI com o nível do lençol freático ($r = -0,21$) (Figura 5). Neste caso, também nota-se pouca variabilidade do nível do lençol freático com relação ao índice CTI, conforme já destacado para a declividade. Esta fraca correlação está coerente com a obtida para a declividade, e pode ser explicada pelo fato da declividade ser um componente do cálculo do índice CTI.

3.3. Avaliação do Desempenho das RNAs

Mulhall (1995) ressalta que o conjunto de treinamento apropriado para uma RNA depende de vários fatores, incluindo sua dimensão, número de conexões dos pesos, acurácia pretendida, a distribuição de probabilidade do comportamento das covariáveis, o nível de ruído e a complexidade do sistema. A complexidade no contexto das RNAs é definida como um sistema onde pequenas diferenças nos dados de entrada (covariáveis) resultam em uma diferença significativa na resposta dos dados de saída (nível do lençol freático). No presente estudo, em função do comportamento relativamente pouco complexo do sistema em questão, determinado principalmente pela elevada correlação entre algumas covariáveis ambientais e o nível do lençol freático (Figura 5) era esperado que as RNAs fossem capazes de interpolar satisfatoriamente os dados, a partir das amostras de treinamento utilizadas, o que efetivamente ocorreu.

Sendo assim, nesta etapa, procedeu-se a avaliação do desempenho das RNAs dos diferentes conjuntos de covariáveis ambientais utilizados, conforme apresentado na Tabela 3, utilizando-se as amostras de treinamento ou calibração (17 poços de monitoramento). Isto foi feito, em parte para auxiliar na avaliação do potencial de aplicação desta metodologia em outras condições, e também para possibilitar uma visão geral das limitações específicas das RNAs na predição do nível do lençol freático, conforme destacado por Coppola et al. (2003).

Tabela 3 - Conjuntos de covariáveis ambientais testados na predição pelas RNAs

Conjuntos	Covariáveis Ambientais
1	Elevação + declividade + curvatura + cti + distância vertical do canal de drenagem + aprofundamento do vale + direção do fluxo + distância euclidiana
2	Elevação + distância vertical do canal de drenagem + aprofundamento do vale + distância euclidiana
3	Declividade + curvatura + cti + direção do fluxo

Para cada conjunto considerado foi modificado apenas o número de neurônios em uma única camada interna, que variou de 3 a 10. A avaliação constou da verificação do SSE após cada RNA ser treinada com 50 ciclos de aprendizado. Em seguida, foi selecionada, para cada conjunto, a arquitetura de RNA que obteve o melhor desempenho, de acordo com o índice citado.

Os resultados obtidos nesta primeira etapa de avaliação são apresentados na Figura 6. Os conjuntos de covariáveis 1 e 2 (Tabela 3) produziram resultados muito semelhantes para o SSE, independente do número de neurônios na camada interna. Por outro lado, o conjunto 3 (declividade, curvatura, cti e direção do fluxo), apresentou uma maior oscilação entre as RNAs treinadas (Figura 6). Embora este índice seja utilizado como uma medida do desempenho do treinamento RNAs, não se mostrou adequado para a escolha da melhor arquitetura de rede para os conjuntos de covariáveis testados, conforme também verificado por Chagas (2006).

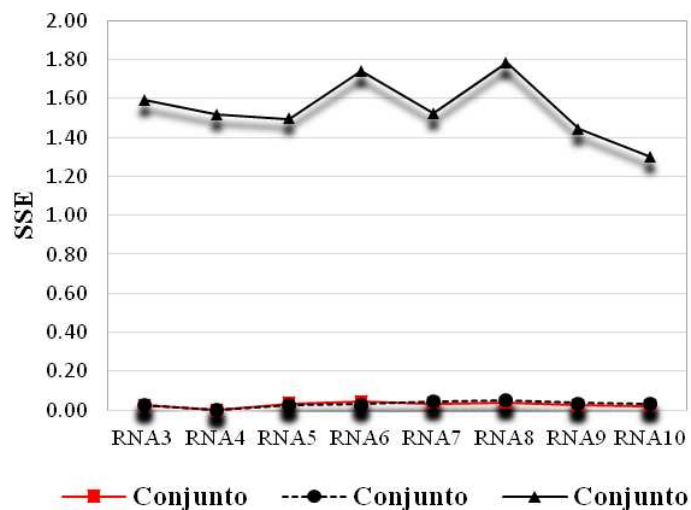
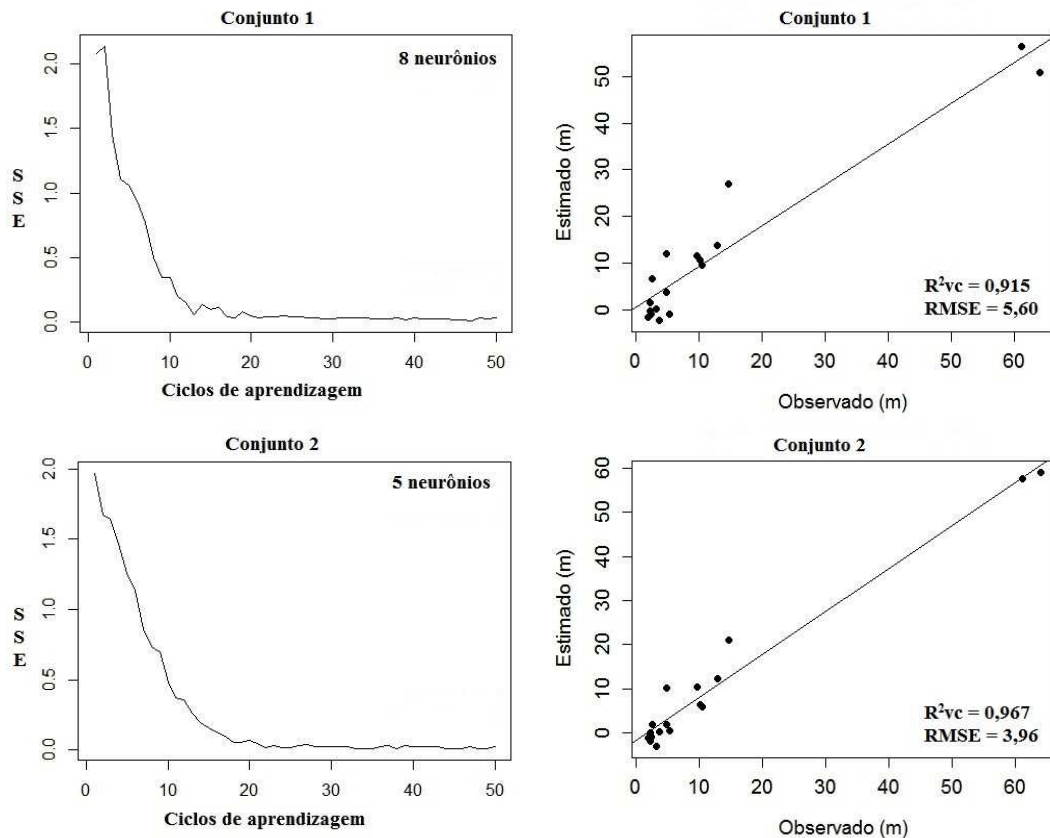


Figura 6 - Resultados de SSE obtidos no treinamento das RNAs para os diferentes conjuntos testados.

O aumento da complexidade das RNAs com a adição de neurônios na camada interna não teve influência significativa sobre o treinamento das RNAs (Figura 6). Em geral, redes maiores e mais complexas são mais eficientes para caracterizar corretamente um conjunto de treinamento, porém podem ser menos eficientes do que redes mais simples para generalizar (Foody & Arora, 1997).

Segundo Foody & Arora (1997), a arquitetura de uma RNA pode ter uma influência significativa em sua habilidade para classificar dados. Sendo assim, em função dos resultados muito semelhantes de SSE, optou-se por selecionar uma arquitetura de RNA para cada conjunto, tomando-se como base o comportamento do SSE ao longo do ciclo de aprendizagem (estabilidade) e não somente o valor final alcançado. Em uma segunda etapa foi realizada a avaliação baseada na determinação do coeficiente de determinação (R^2) da validação cruzada e do RMSE, apenas das RNAs selecionadas para cada conjunto (Figura 7).



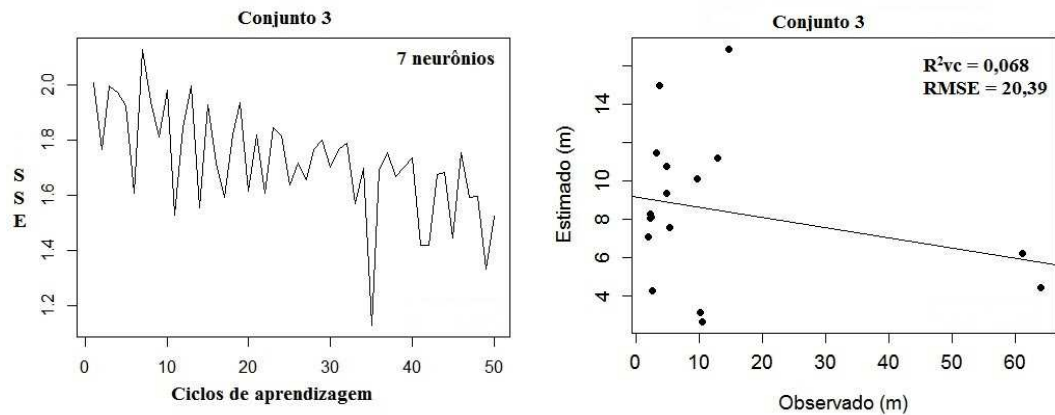


Figura 7 - Comportamento do SSE, R^2 da validação cruzada e RMSE obtidos pelas RNAs selecionadas para cada conjunto de covariáveis.

Para o conjunto 1, que contém todas as covariáveis, foi selecionada uma RNA com apenas uma camada interna contendo 8 neurônios, que obteve um R^2 da validação cruzada de 0,915 e RMSE de 5,60. A RNA selecionada para o conjunto 2 (elevação, distância vertical do canal de drenagem, aprofundamento do vale e distância euclidiana) possui uma arquitetura de rede com 5 neurônios em uma única camada interna e obteve um R^2 da validação cruzada de 0,967 e RMSE igual a 3,96.

Kanellopoulos & Wilkinson (1997) ressaltam que o uso de covariáveis extras tem efeito benéfico sobre o desempenho das RNAs, desde que a covariável utilizada forneça informação adicional útil. No entanto, não é garantido que estas covariáveis aumentarão a performance da RNA e algumas vezes, até mesmo degradam a precisão (fenômeno de Hugues). Nos casos onde existe considerável redundância entre as novas covariáveis e os dados originais, é possível que a adição de covariáveis extras reduza o desempenho geral da RNA. No presente caso, a retirada das covariáveis: declividade, curvatura, índice cti e direção do fluxo não diminuiu significativamente o desempenho do treinamento, concordando com os resultados obtidos para a análise da correlação de Pearson, na qual estas covariáveis tiveram baixa correlação com o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento.

Por outro lado, segundo Coppola et al. (2003), a acurácia da predição de uma RNA geralmente aumenta com o número de padrões ou covariáveis utilizadas no treinamento, visto que a RNA está exposta a uma variedade maior de condições do sistema e deve aprender a generalizar mais eficientemente, ou seja, seu aprendizado não se restringe a um intervalo relativamente estreito de condições. Esta tendência foi confirmada por estes autores que verificaram que o aumento do número de

covariáveis nos conjuntos de treinamento testados aumentou a performance das predições do nível do lençol freático quando as RNAs foram submetidas a validação, comprovando efetivamente a capacidade da RNA generalizar o comportamento do sistema.

Já os resultados pouco satisfatório (R^2 da validação cruzada de 0,068 e RMSE de 20,96) obtidos pelo conjunto 3 (declividade, curvatura, índice cti e direção do fluxo), comprovam a pouca importância destas covariáveis para a solução do problema, conforme resultados obtidos para a correlação de Pearson. Além disso, é possível verificar que mesmo a rede selecionada (RNA com 7 neurônios na camada interna), demonstrou dificuldades de aprendizado, apresentando uma grande oscilação ao longo do ciclo de aprendizagem, o que pode estar indicando a possibilidade de convergência para um mínimo local indesejado da superfície de erro (Tollenaere, 1990).

Desta maneira, os resultados obtidos com a utilização dos conjuntos 1 e 2 foram equivalentes e podem ser considerados como bastante satisfatórios, principalmente, nas condições do estudo, em que foram utilizados dados limitados sobre o nível do lençol freático nos poços de monitoramento. Estes resultados também demonstram, para as condições do estudo, que com um número relativamente pequeno de covariáveis ambientais é possível alcançar valores de predição acurados.

Os resultados obtidos pelos conjuntos 1 e 2 são comparáveis aos encontrados por Daliakopoulos et al. (2005), Affandi et al. (2007), Reinke (2008), Mohammadi (2008), Sreekanth et al. (2009) e Chitsazan et al. (2013). Daliakopoulos et al. (2005) encontraram valores de R^2 que variaram de 0,592 a 0,993 e RMSE de 2,11 a 9,84, ao avaliarem sete diferentes algoritmos de RNAs na estimativa da tendência de decréscimo do nível do lençol freático, sendo que os melhores resultados foram alcançados com uma rede neural *feedforward* padrão treinada com o algoritmo *Levenberg-Marquardt* que obteve R^2 de 0,985 e RMSE de 2,11.

Affandi et al. (2007) avaliaram cinco algoritmos *Backpropagation* diferentes e uma RNA do tipo função de base radial (RBF), para estimar a flutuação do nível de água do lençol freático na Indonésia. Dentre os algoritmos testados o algoritmo *Levenberg-Marquardt* (LM) foi o que obteve os melhores resultados alcançando valores de R^2 que variaram de 0,721 a 0,993.

Reinke (2008) utilizou RNAs para estimar o nível do lençol freático em um aquífero na bacia hidrográfica do rio Caí (RS), e obteve um R^2 de 0,946, que evidencia a grande similaridade entre o nível do lençol freático medido nos poços e os estimados pelas RNAs. Destaca-se que dentre os estudos consultados este foi o único que utilizou dados do terreno (altimetria) como covariável de entrada nas RNAs.

Mohammadi (2008) obteve um R^2 de 0,958 com a utilização de uma RNA treinada com o algoritmo *Backpropagation*. Sreekanth et al. (2009), avaliou uma RNA com o algoritmo *Levenberg-Marquardt* e encontrou um valor de RMSE de 4,50 e R^2 de 0,93. Em ambos os casos, as características ambientais diferem significativamente da área de estudo. A pesquisa de Mohammadi (2008) foi realizada em uma área de formação cárstica, enquanto o trabalho de Sreekanth et al. (2009) foi desenvolvido em uma área de granitos de idade arqueana com uma fina cobertura de solos de textura argilosa e média, com relevo predominantemente ondulado. Além disso, estes trabalhos diferem com relação às covariáveis utilizadas como dados de entrada nas RNAs, que em sua maior parte são dados climáticos e de recarga e descarga dos poços.

Chitsazan et al. (2013) testaram quatro algoritmos de treinamento diferentes para a predição do nível do lençol freático, utilizando como dados de entrada precipitação, evaporação, umidade relativa, temperatura (máxima e mínima), descarga do canal de irrigação e recarga do lençol freático da planície limítrofe. Dentre os algoritmos avaliados o *Levenberg-Marquardt* (LM) foi o que apresentou os melhores resultados na predição obtendo valores de R^2 de 0,982, 0,989 e 0,996, respectivamente para amostras de treinamento, teste e validação.

Por outro lado, resultados mais satisfatórios foram encontrados nos estudos de Coulibaly et al. (2001), Coppola et al. (2003), Nayak et al. (2006), Yang et al. (2009) e Yoon et al. (2011). Coulibaly et al. (2001) utilizaram quatro tipos de RNAs e dados hidrometeorológicos para simular a flutuação da altura do lençol freático e obtiveram resultados de RMSE que variaram entre 0,39 e 2,40 para os quatro tipos de RNA testados, contra 5,60 e 3,96 obtidos pelos conjuntos 1 e 2, respectivamente.

Coppola et al. (2003), obtiveram um valor de RMSE extremamente baixo (0,0625), quando da utilização das amostras de treinamento, bastante inferior aos obtidos pelos conjuntos 1 e 2 (Figura 7). Cabe ressaltar que as características gerais diferem em muito daquelas encontradas na área do presente estudo, principalmente

no que se refere ao tipo de aquífero estudado e as covariáveis utilizadas como dados de entrada na RNA. Os resultados obtidos por Nayak et al. (2006) também foram mais favoráveis do que os obtidos no presente estudo. A partir da utilização de dados pluviométricos, nível dos canais e nível de água dos poços, estes autores encontraram valores de RMSE na comparação dos níveis de água observados e estimados sempre menores do que 0,4 m, tanto na fase de treinamento quanto na fase de validação.

Yang et al. (2009) utilizaram RNAs do tipo *Backpropagation* para predição do nível do lençol freático em áreas áridas e semiáridas na província de Jilin, China, e encontraram resultados para o RMSE de 0,09. Neste estudo utilizou-se como dados de entrada nas RNAs uma série temporal de valores medidos do nível do lençol freático ao longo de 10 anos. Yoon et al. (2011) utilizando RNAs para predição da flutuação do nível do lençol freático em dois poços em um aquífero costeiro na Coreia do Sul, e como variáveis de entrada dados anteriores do nível do lençol freático, precipitação e nível da maré, encontraram valores para o RMSE de 0,107 e 0,109.

Finalmente, os resultados encontrados neste estudo foram superiores aos obtidos no trabalho de Uddameri (2007), que utilizou uma RNA com o algoritmo *Backpropagation* para estimar séries mensais e trimestrais do nível do lençol freático em um poço profundo no Texas, alcançando valores de R^2 de 0,88 para as séries mensais e $R^2 = 0,77$ para as séries trimestrais. Por outro lado, os valores de RMSE de 1,40 e 1,17 (avaliação trimestral e mensal, respectivamente) foram inferiores aos encontrados neste estudo (5,60 para o conjunto 1 e 3,96 para o conjunto 2).

Na Figura 8 é mostrada a variação do nível do lençol freático, observada e estimada nos poços de monitoramento para os três conjuntos testados. Com relação ao conjunto 1 verifica-se que os valores do nível do lençol freático foram subestimados nos poços P1, P4, P9 e P10 e superestimados nos poços P7, P12 e P14. Os demais (P2, P3, P5, P6, P8, P11, P13, P15, P16 e P17) apresentaram valores estimados mais próximos dos valores observados.

Para o conjunto 2 verifica-se que houve uma subestimação dos valores do nível do lençol freático nos poços P4, P5, P6, P9, P10, P15, P16 e P17, enquanto os valores nos poços P12 e P14 foram superestimados. Para os demais poços (P1, P2, P3, P7, P8, P11 e P13) houve uma tendência dos valores estimados ficarem mais próximos dos valores observados. No conjunto 3, com exceção dos poços P9, P10,

P11, P16 e P17 que tiveram nessa análise valores subestimados, em todos os demais poços os valores do nível do lençol freático foram superestimados.

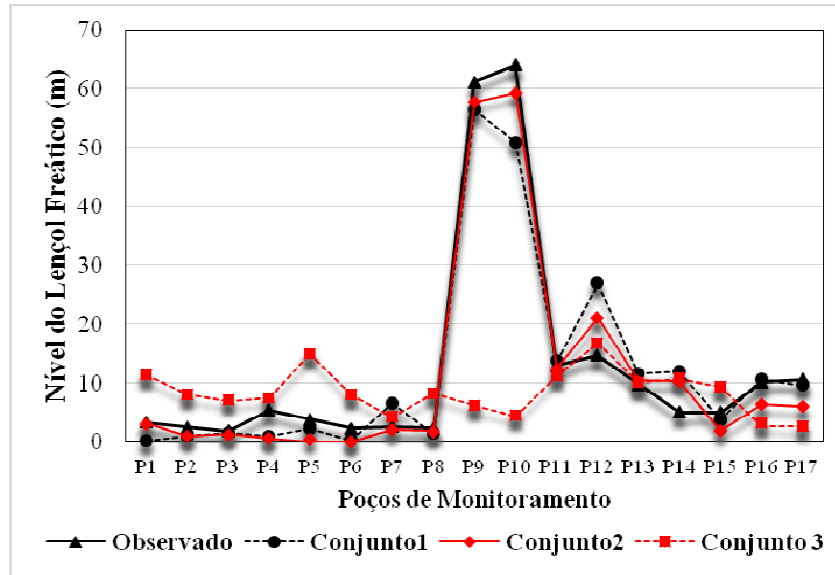


Figura 8 - Variação do nível do lençol freático nos poços de monitoramento (observado e estimado).

Yang et al. (2009), avaliaram modelos de predição do nível do lençol freático e verificaram que os valores extremos do nível do lençol foram subestimados ou superestimados, enquanto os valores medianos apresentavam-se mais próximos dos valores observados. No entanto, ressaltam que, de modo geral, houve uma boa concordância entre os valores observados e estimados. Os autores atribuíram a baixa performance dos modelos nos níveis extremos a uma incapacidade da RNA em estabelecer regras adequadas a partir do conjunto de dados de treinamento utilizado e sugeriram a inclusão de outras covariáveis de entrada, tais como dados climatológicos. Na Figura 8, se observa que não há uma tendência definida, com a maioria dos valores extremos sendo subestimados e os poços de monitoramento intermediários sendo superestimados. Dessa maneira, pode-se atribuir esses resultados a uma incapacidade da RNA utilizada em estabelecer regras adequadas para a modelagem do nível do lençol freático na área estudada, conforme destacado por Yang et al. (2009).

Em um estudo comparativo entre um modelo numérico e RNAs para a predição da flutuação do nível do lençol freático em dois aquíferos (não confinado e semiconfinado) influenciados por bombeamento e condições meteorológicas

diferentes, Coppola et al. (2003), verificaram, de modo geral, que as RNAs subestimaram os valores do nível do lençol freático, tanto para o aquífero não confinado quanto para o aquífero semiconfinado. No entanto, os resultados obtidos pelas RNAs foram mais precisos do que os alcançados pelo modelo numérico.

Os erros médios absolutos observados (Figura 9) foram de 4,24 m para o conjunto 1; 2,72 m para o conjunto 2 e de 11,16 m para o conjunto 3. Como mostra a Figura 8 estes erros foram bastante variáveis entre os poços e entre os conjuntos de covariáveis testados, sendo em todos os casos maiores do que os obtidos por Coppola et al. (2003), que foram de 0,16 e 0,18 m para os dois tipos de RNAs testados em condições bastante diferentes do presente estudo.

Os menores erros, quando da utilização do conjunto 1 para predição do nível do lençol freático, foram verificados nos poços P3 (-0,36 m), P16 (0,55 m), P11 (0,82 m), P8 (-0,86 m) e P17 (-0,91 m). Por outro lado, os maiores erros foram verificados nos poços P10 (-13,09 m) e P12 (12,33 m). Com a utilização do conjunto 2 os menores erros foram verificados nos poços de monitoramento P1 (-0,21 m), P2 (-1,45 m), P3 (-0,70 m), P6 (-2,20 m), P7 (-0,53 m), P8 (-0,51 m), P11 (-0,54 m) e P13 (-0,56 m). Já os maiores foram observados nos poços P4 (-4,77 m), P5 (-3,38 m), P9 (-3,51 m), P10 (-4,85 m), P12 (6,37 m), P14 (5,24 m), P15 (-3,15 m), P16 (-3,79 m) e P17 (-4,57 m). Entretanto, os erros nesses poços são menores do que os verificados quando se utilizou o conjunto 1, com exceção dos poços P15 (-1,22 m), P16 (0,55 m) e P17 (-0,91 m).

Em geral, os erros absolutos foram maiores no conjunto 1, o que é comprovado pelo seu erro médio absoluto mais elevado. O conjunto 3, devido ao seu baixo desempenho ($R^2_{vc} = 0,068$ e $RMSE = 20,39$), apresentou os maiores erros entre os conjuntos avaliados, à exceção dos poços P4 (2,22 m), P12 (2,22 m) e P13 (0,39 m). Diferença positiva indica que o modelo utilizado superestimou os valores e diferenças negativas indicam que os valores foram subestimados (Coulibaly et al., 2001; Affandi et al., 2007).

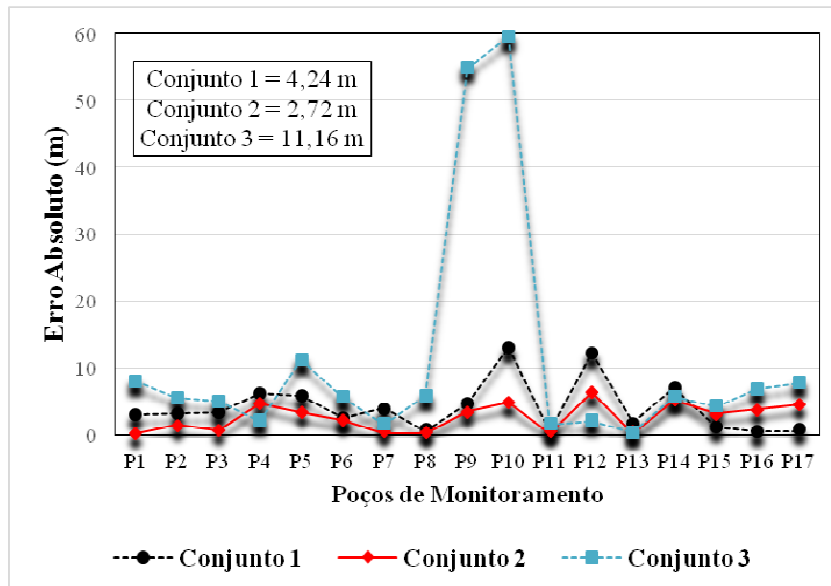


Figura 9 - Erros absolutos obtidos na predição do nível do lençol freático pelos conjuntos de covariáveis utilizadas.

Os valores do erro médio absoluto, considerados elevados, estão relacionados, principalmente, com os erros verificados nos poços de monitoramento P9, P10, P12 e P14, tanto para o conjunto 1 quanto para o conjunto 2, que estão localizados nas partes mais elevadas da área de estudo. Acredita-se que a baixa densidade de poços de monitoramento utilizados para treinamento das RNAs nessas áreas tenha contribuído para esses resultados, conforme também destacado por Reinke (2008). De maneira geral, a capacidade de generalização das RNAs, decaem quando não existem amostras ou exemplos suficientes para um reconhecimento e aprendizado adequados dos padrões.

Reinke (2008) verificou em seu estudo uma tendência dos valores do nível do lençol freático localizados nas cotas mais elevadas do terreno serem subestimados, enquanto aqueles localizados nas cotas mais baixas tiveram uma melhor concordância com os valores medidos ou reais. O autor atribuiu este resultado a uma malha de amostragem deficiente nessa faixa de dados no conjunto utilizado no treinamento das RNAs. Por conta disso, o erro médio absoluto foi de 3,87 m, inferior ao obtido com a utilização dos conjuntos 1 (4,24 m) e 3 (11,16 m), e superior ao verificado com a utilização do conjunto 2 (2,72 m).

Os resultados alcançados por Affandi et al. (2007) para o erro médio absoluto nos poços estudados não excedeu a 0,2 m, com um valor mínimo de 0,05 e máximo

de 1,34 m, portanto, melhores do que os obtidos pelos três conjuntos de covariáveis testados no presente estudo. Yang et al. (2009) também encontraram um erro médio absoluto extremamente baixo (0,07 m), com a utilização de RNAs. Nayak et al. (2006) encontraram erros médios absolutos de ± 1 m e $\pm 0,5$ m para dois poços estudados (Munganda e Cheyyeru, respectivamente).

3.4. Predição Espacial do Nível do Lençol Freático pelas RNAs

O desempenho das RNAs é afetado pela variação dos dados do conjunto de amostras utilizadas na fase de treinamento, sendo essa uma de suas principais limitações para o uso na modelagem e predição. Idealmente, as RNAs devem ser treinadas usando-se dados que abrangem uma variação mais realística do mundo real (Coppola et al., 2003). Os valores do nível do lençol freático nos poços de monitoramento (Tabela 1) variaram entre 1,92 e 64 m. Dessa maneira, a utilização da RNA com o conjunto 1 gerou um mapa de predição do nível do lençol freático (Figura 10) com valores que variaram de 0 a 61,31 m, bem próximos dos valores reais utilizados no treinamento das RNAs. Os valores obtidos para a média e o desvio padrão foram, respectivamente, de 23,79 e 17,84.

A partir desse mapa de predição foram derivadas as curvas referentes à altura do nível do lençol freático (Figura 10). Nota-se que, nesse procedimento, foram gerados artefatos ao longo das curvas, que possivelmente, foram criados devido a utilização, no conjunto 1, dos atributos topográficos que apresentaram baixa correlação com os dados do nível do lençol freático medido no poços (declividade, curvatura, índice CTI e direção do fluxo).

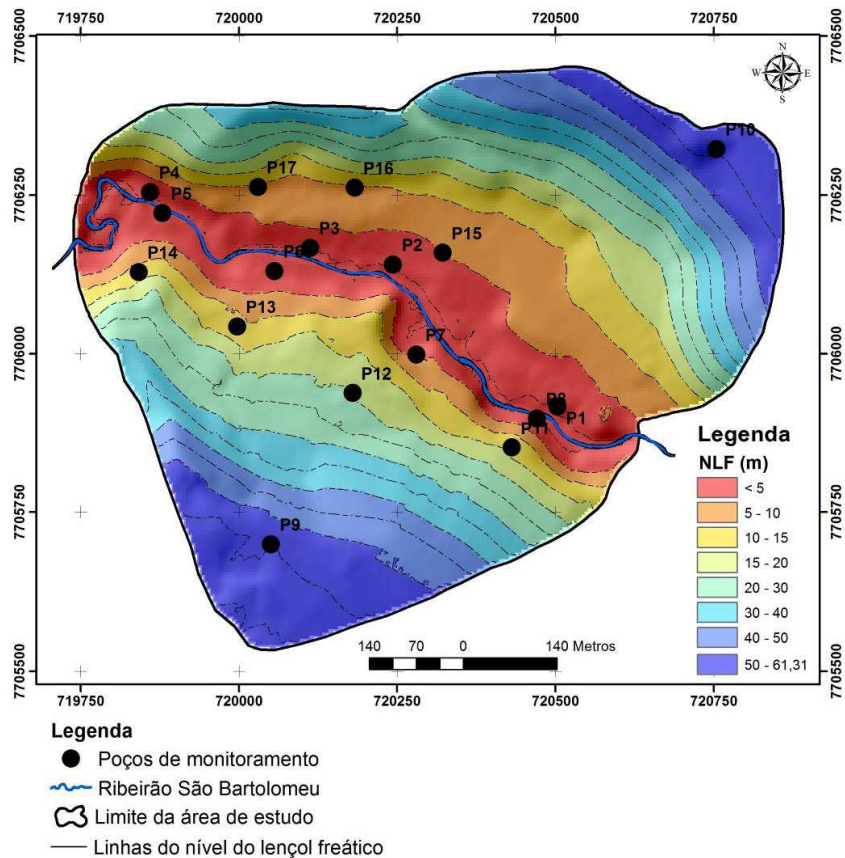


Figura 10 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do conjunto 1.

A utilização da RNA com o conjunto 2 gerou um mapa de predição do nível do lençol freático (Figura 11) com valores que variaram de 0 a 57,61 m, mais distantes, portanto, dos valores reais utilizados no treinamento das RNAs e diferentes daqueles verificados com a utilização do conjunto 1. Os valores obtidos para a média e o desvio padrão foram, respectivamente de 20,80 e 16,55. Do mesmo modo, a partir desse mapa de predição foram derivadas as curvas referentes à altura do nível do lençol freático (Figura 11). Nota-se que, com a utilização do conjunto 2 não foram gerados artefatos ao longo das curvas, como no mapa anterior (Figura 10). Neste caso, a retirada dos atributos topográficos que apresentaram baixa correlação com os dados do nível do lençol freático medido no poço (declividade, curvatura, índice CTI e direção do fluxo) melhorou o resultado deste procedimento.

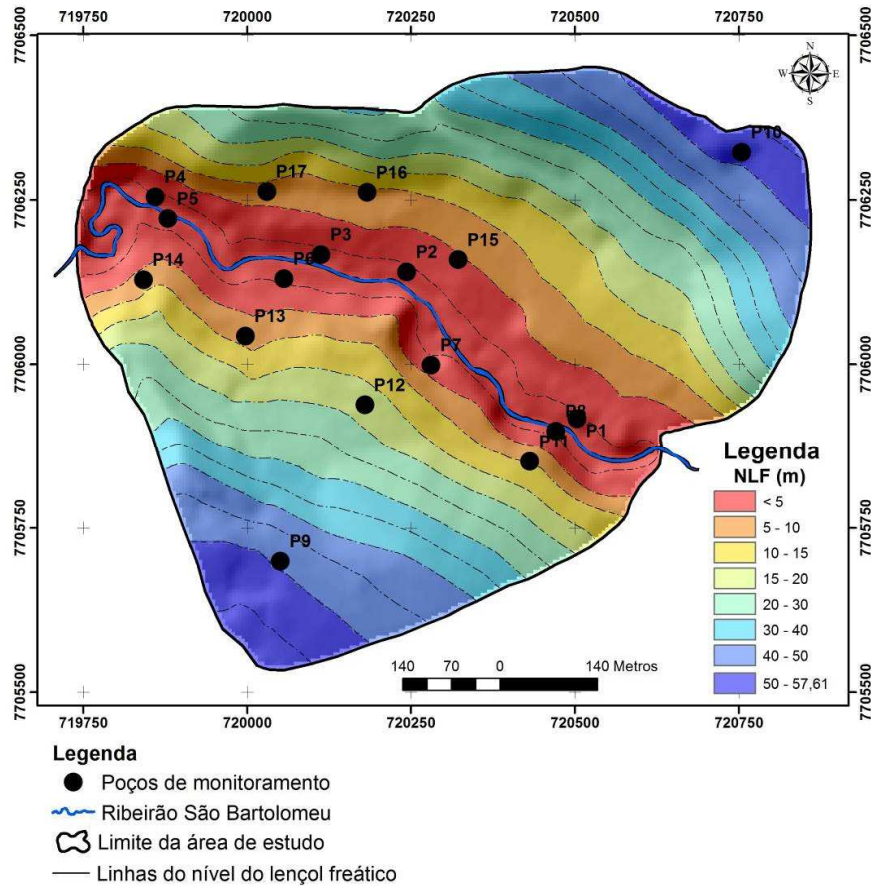


Figura 11 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do conjunto 2.

3.5. Avaliação do Desempenho do ModFlow

A utilização do ModFlow obteve um R^2 de 0,975 e RMSE de 5,57 (Figura 12). Na Figura 13 é mostrada a variação do nível do lençol freático observada nos poços de monitoramento e a estimada pelo ModFlow. Verifica-se que os valores do nível do lençol freático foram subestimados nos poços P1, P2, P3, P4, P5, P6, P8, P16 e P17 e superestimados nos poços P9, P10, P11, P12, P13 e P14. Apenas os poços P7 e P15 apresentaram valores estimados mais próximos dos valores observados.

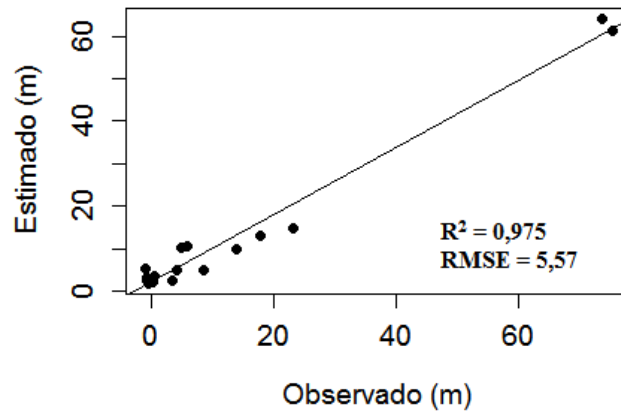


Figura 12 - R^2 e RMSE obtidos pelo ModFlow.

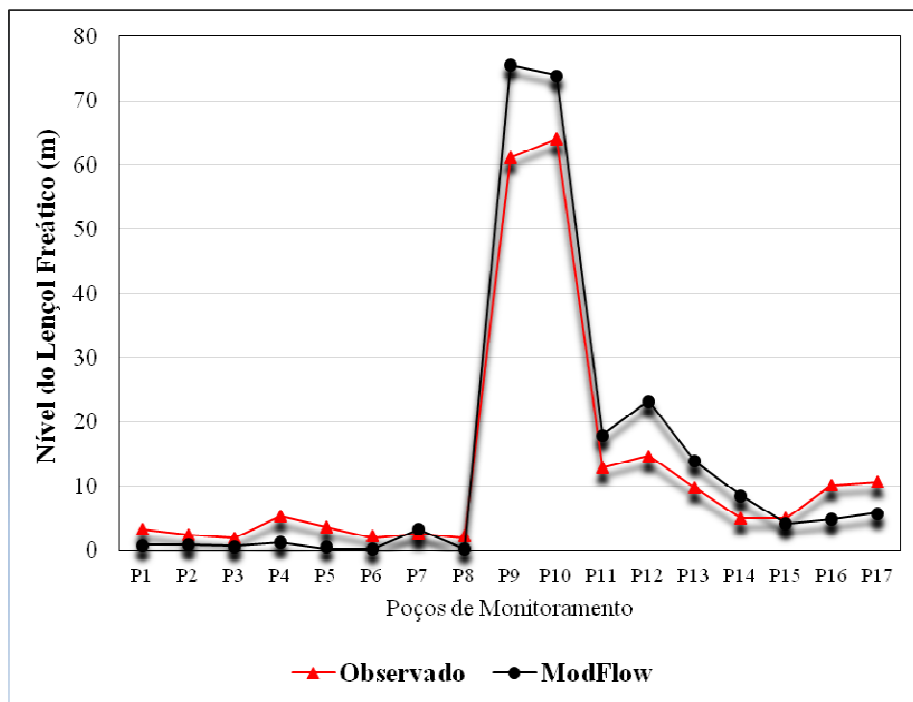


Figura 13 - Variação do nível do lençol freático nos poços de monitoramento pelo ModFlow.

O erro médio absoluto observado para o ModFlow foi de 4,36 m (Figura 14) semelhante ao obtido pelo conjunto 1 (4,24 m), maior do que o do conjunto 2 (2,72 m) e menor do que o obtido pelo conjunto 3 (11,16 m). Como mostra a Figura 13, e também conforme verificado para as RNAs, os erros foram bastante variáveis entre os poços. Os menores erros para predição do nível do lençol freático quando se

utilizou o ModFlow foram verificados nos poços P7, P15, P3 e P2, todos inferiores a 2 m, porém superiores aos do conjunto 2 e bem próximos aos do conjunto 1. Por outro lado, os maiores erros foram verificados nos poços P9, P10, P12, P16, P11, P17 e P4, cujos erros absolutos variaram de 4,16 m (P13) a 14,25 m (P9). Esses erros são maiores do que os verificados quando se utilizou o conjunto 2, com exceção dos poços P4 (-4,77 m) e P16 (3,79 m).

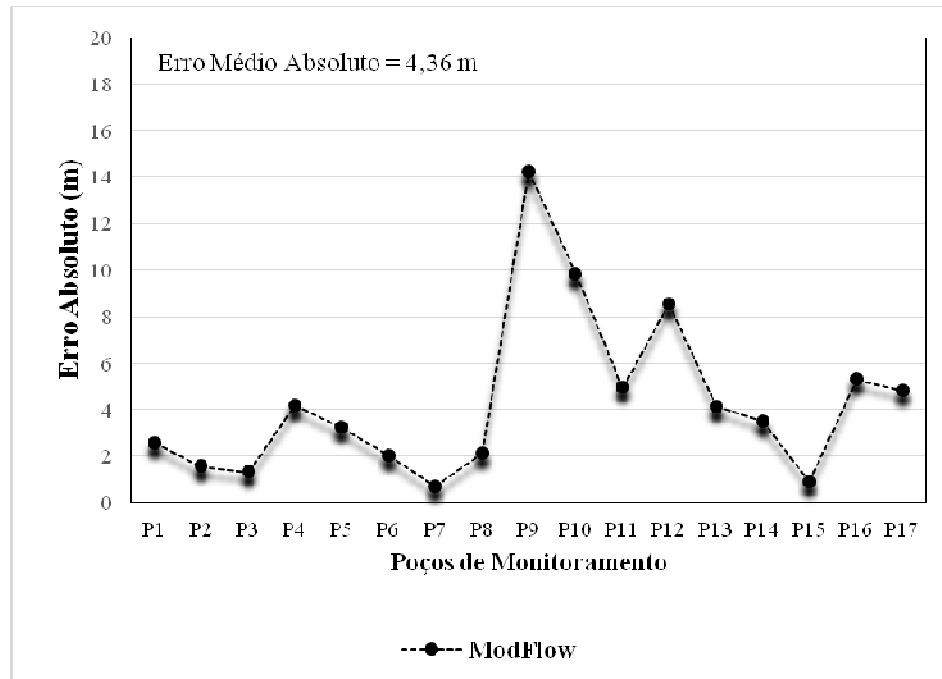


Figura 14 - Erros absolutos obtidos na predição do nível do lençol freático pelo ModFlow.

O valor do erro médio absoluto elevado são devidos, principalmente, aos erros verificados nos poços de monitoramento P9, P10, P12, P16 e P17, do mesmo modo como verificado, tanto para a RNA do conjunto 1 quanto para a RNA do conjunto 2, com exceção dos poços P16 e P17, todos localizados nas partes mais elevadas da área de estudo. Nesse caso, acredita-se também que a baixa densidade de poços de monitoramento nessas áreas tenha contribuído para esses resultados, conforme verificado para as RNAs e também destacado por Reinke (2008). Coppola et al. (2003) encontraram um valor de 0,85 m para o erro médio absoluto, quando da utilização de um modelo numérico para a predição do nível do lençol freático, muito inferior, portanto ao obtido neste estudo (4,36 m).

A utilização do ModFlow gerou um mapa de predição do nível do lençol freático (Figura 15) com valores que variaram de 0 a 78,51 m, mais distantes, portanto, dos valores reais utilizados no treinamento das RNAs e diferentes daqueles verificados com a utilização do conjunto 1. Os valores obtidos para a média e o desvio padrão foram, respectivamente de 29,03 e 25,77, superiores aos verificados pelos conjuntos 1 e 2. Similarmente ao realizado para os conjuntos 1 e 2 das RNAs, a partir desse mapa foram derivadas as curvas referentes à altura do nível do lençol freático (Figura 15). Nota-se, conforme verificado para a RNA que utilizou o conjunto 1, que foram gerados artefatos ao longo das curvas, principalmente nas partes mais baixas da área.

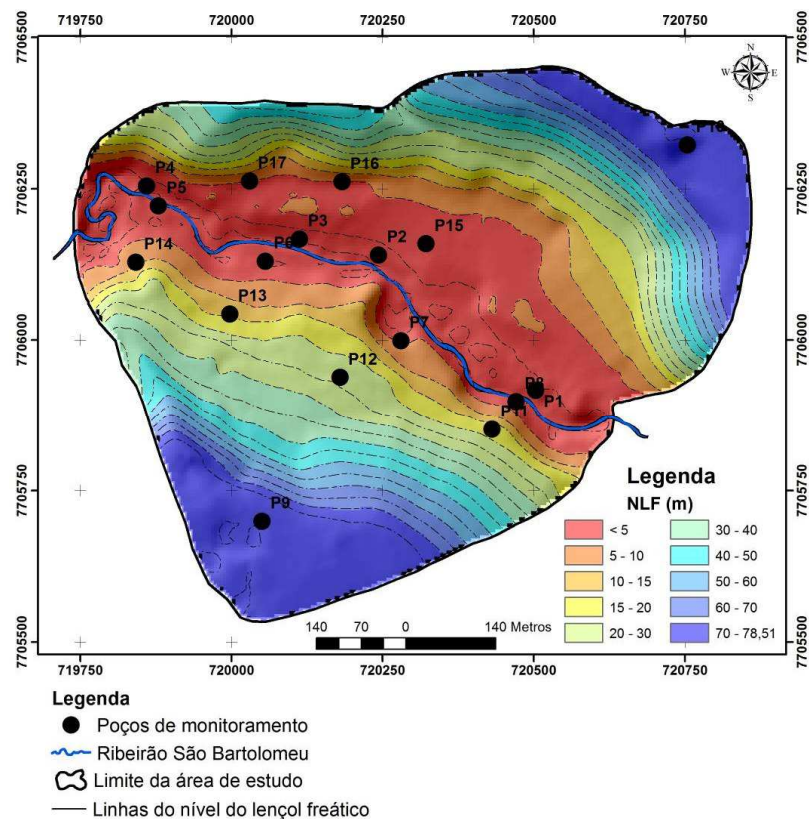


Figura 15 - Mapa da predição espacial do nível do lençol freático obtido com a utilização do ModFlow.

3.6. Comparação entre o ModFlow e as RNAs

O resultado obtido pelo ModFlow para o R^2 foi superior ao obtido pelas RNAs que utilizaram o conjunto 1 (0,915) e o conjunto 3 (0,068), e semelhante ao alcançado pela RNA que utilizou o conjunto 2. Com relação ao RMSE o ModFlow foi superior ao resultado obtido pela RNA que utilizou o conjunto 3 (20,39), semelhante ao resultado da RNA do conjunto 1(5,60) e inferior ao do conjunto 2 (3,96). Na Figura 16 é mostrada a variação do nível do lençol freático nos poços de monitoramento estimada pelo ModFlow e pelas RNAs que utilizaram os conjuntos 1 e 2, que obtiveram melhores resultados.

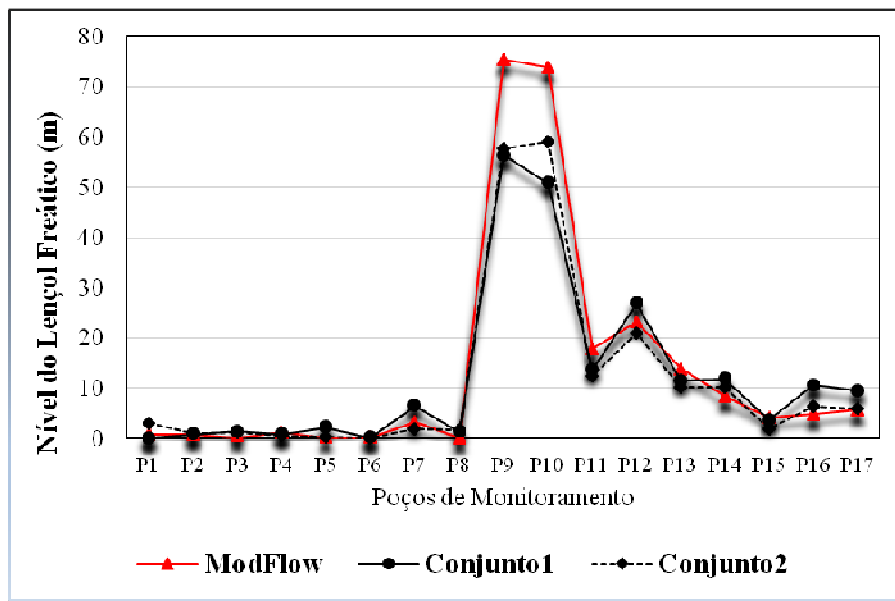


Figura 16 - Variação do nível do lençol freático estimados pelo ModFlow e pelas RNAs dos conjuntos 1 e 2.

Na figura verifica-se que os resultados obtidos pelo ModFlow foram muito semelhantes aos obtidos pelo conjunto 1 nos poços de monitoramento P1, P2, P3, P4, P6, P8 e P15. Os poços P5, P7, P12, P14, P16 e P17 mostram resultados ligeiramente inferiores e os poços P9 e P10 valores do nível do lençol freático maiores do que os obtidos com a utilização da RNA que utilizou o conjunto 1. Com relação a RNA que utilizou o conjunto 2 as maiores semelhanças foram com os poços de monitoramento P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P12, P15 e P17. Os poços P9, P10, P11 e P13 também apresentaram resultados do ModFlow maiores do que o do conjunto 2, enquanto que nos poços de monitoramento P1, P14 e P16 os resultados do ModFlow foram

ligeiramente menores do que os verificados para o conjunto 2. A comparação entre o ModFlow e as RNAs na predição do nível do lençol freático mostra que a RNA que utilizou o conjunto 2 apresentou maior concordância com os resultados do ModFlow.

Os melhores resultados obtidos com a utilização da RNA, que utilizou o conjunto 2, concordam com aqueles obtidos por Coppola et al. (2003), que verificaram que as RNAs foram mais eficazes do que um modelo numérico utilizado (ModFlow) na predição do nível do lençol freático em um aquífero cárstico, em 12 poços de monitoramento na Flórida, em resposta a mudanças nas condições climáticas e de bombeamento.

Do mesmo modo, os resultados alcançados neste estudo, principalmente com a utilização do conjunto 2, concordam com aqueles obtidos por Nikolos et al. (2008), que compararam a eficiência de um modelo numérico (*Princeton Transport Code - PTC model*) e RNAs para a predição da carga hidráulica em um aquífero localizado na porção norte da ilha Rhodes na Grécia, utilizando 23 poços de monitoramento. Os autores verificaram que as RNAs podem ser utilizadas em substituição ao modelo numérico (PTC) que é do ponto de vista computacional caro e demorado. Além disso, as RNAs forneceram predições muito satisfatórias e semelhantes as obtidas pelo modelo numérico, com erros considerados aceitáveis para aplicações práticas, inferiores a 0,05 m para a maioria dos poços de monitoramento testados.

Mohanty et al. (2013) avaliaram a performance dos modelos ModFlow e RNAs na simulação do nível do lençol freático em um sistema de aquífero aluvial. Nesse estudo, o ModFlow foi calibrado com dados de 2 anos e quatro meses (fevereiro de 2001 a maio de 2006), enquanto a validação foi feita com dados de 1 ano (junho de 2006 a maio de 2007). As RNAs foram desenvolvidas para prever o nível do lençol freático em 18 poços de observação utilizando como dados de entrada dados semanais de chuva, evapotranspiração, fase do rio, nível de água no dreno, taxa de bombeamento e nível do lençol freático nesses poços a intervalos de tempo. O período de tempo usado no ModFlow também foi considerado no treinamento e teste das RNAs. Os resultados simulados pelo ModFlow e pelas RNAs foram comparados com o nível do lençol freático observado. Os autores verificaram que as RNAs forneceram resultados mais satisfatórios para o nível do lençol freático na área estudada do que o ModFlow, do mesmo modo como verificado no presente estudo, onde a RNA que utilizou o conjunto 2 obteve resultados melhores do que o ModFlow e a RNA que usou o conjunto 1 apresentou resultado similar.

Finalmente, vale ressaltar a necessidade de um grande número de dados de entradas exigida pelos modelos numéricos como o ModFlow para este tipo de aplicação em comparação com os exigidos pelas RNAs, conforme destacado por Coppola et al. (2003), Nikolos et al. (2008), Mohanty et al. (2010) e Mohanty et al. (2013). Sendo assim, a utilização de atributos morfométricos derivados de um modelo digital de elevação de fácil obtenção em softwares de sistemas de informação geográfica (SIG) comerciais ou livres, usando um número significativamente menor de dados de entrada, com menor esforço de desenvolvimento, menor custo e maior acurácia preditiva tornam a abordagem por RNAs mais vantajosa do que os modelos numéricos, possibilitando o fácil monitoramento do nível do lençol freático em áreas de interesse como as do presente estudo.

4. CONCLUSÕES

A estatística descritiva para o nível do lençol freático medido nos poços de monitoramento (período anual, período chuvoso e período seco) mostrou que não há diferença significativa entre as diferentes épocas consideradas.

De acordo com a análise da correlação de Pearson as maiores correlações com o nível do lençol freático foram obtidas pelas covariáveis elevação, distância vertical do canal de drenagem, aprofundamento do vale e distância euclidiana, com valores de $r > 0,90$. Por outro lado, as covariáveis declividade, curvatura, índice CTI e direção do fluxo apresentaram baixa correlação com o nível do lençol freático.

Na avaliação pelas RNAs, dentre os conjuntos de covariáveis testados (conjunto 1 - todas as covariáveis, conjunto 2 - covariáveis correlacionadas com o nível do lençol freático e conjunto 3 - covariáveis não correlacionadas com o nível do lençol freático) os melhores resultados foram obtidos pelo conjunto 2 que obteve R^2 de 0,967 e RMSE de 3,96, seguido do conjunto 1 (R^2 de 0,915 e RMSE de 5,60) e pelo conjunto 3 (R^2 de 0,068 e RMSE de 20,39).

O resultado obtido com a abordagem por RNAs, quando da utilização do conjunto 1, foi similar ao obtido pelo ModFlow; superior quando o conjunto 2 foi usado e inferior com a utilização do conjunto 3, demonstrando que a seleção adequada de covariáveis ambientais tem influência direta no desempenho das RNAs, na comparação com a abordagem numérica pelo ModFlow.

A abordagem por redes neurais artificiais proposta neste estudo permitiu elaborar mapas do nível do lençol freático de um aquífero granular livre de maneira bastante satisfatória (conjuntos 1 e 2), constituindo, deste modo, uma alternativa para o monitoramento do nível do lençol freático.

A modelagem pelas RNAs por necessitar de menor quantidade de dados de entrada e menor tempo de execução, quando comparado aos modelos numéricos como o ModFlow, apresenta grande vantagem operacional e de custo, sendo um método promissor para utilização nesse tipo de simulação.

REFERÊNCIAS

- AFFANDI, A. K. Application of an artificial neural network to estimate groundwater level fluctuation. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 7, n. 2, 2007.
- ATKINSON, P. M.; TATNALL, A. R. L. Neural networks in remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 699-709, 1997.
- AZHAR, A. K. M.; ELLIOTT, R. J. R.; LIU, J. On the Measurement of Product Quality in Intra-Industry Trade: An Empirical Test for China, **China Economic Review**, v. 19, n. 2, p. 336-44, 2007.
- BALKHAIR, K. S. Aquifer parameters determination for large diameter wells using neural network approach. **Journal of Hydrology**, v. 265, p. 118-128, 2002.
- BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Feature extraction for multisource data classification with artificial neural networks. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 727-740, 1997.
- BENEDIKTSSON, J. A.; SWAIN, P. H.; ERSOY, O. K. Conjugate-gradient neural networks in classification of multisource and very-high-dimensional remote sensing data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 2883-2903, 1993.
- BENEDIKTSSON, J. A.; SWAIN, P. H.; ERSOY, O. K. Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 28, p. 540-552, 1990.
- CABENA, P.; HADJINIAN, P.; STADLER, R.; VERHEES, J. E.; ZANASI, A. *Discovering Data Mining: From Concept to Implementation*, Prentice Hall. 1997.
- CARVALHO JR., W.; LAGACHERIE, P.; CHAGAS, C. S.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B. A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment. **Geoderma**, v. 232, p. 479-486, 2014.
- CHAGAS, C. S. Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica de domínio de mar de morros. 239 f. Tese

(Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

CHITSAZAN, M.; RAHMANI, G.; NEYAMADPOUR, A. Groundwater level simulation using artificial neural network: a case study from Aghili plain, urban area of Gotvand, south-west Iran. **JGeope**, v. 3, p. 35-46, 2013.

CIAMPALINI, R.; LAGACHERIE, P.; HAMROUNI, H. **Documenting GlobalSoilMap.net grid cells from legacy measured soil profile and global available covariates in Northern Tunisia**. In: MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B. (Eds.), *Digital Soil Assessments and Beyond*. CRC Press/Balkema, London, 2012. p. 439-444.

COPPOLA, E. **Optimal pumping policy for a public supply wellfield using computational neural network with decision-making methodology**. PhD thesis, University of Arizona at Tucson, Ariz. 2000.

COPPOLA, E.; SZIDAROVSKY, F.; POULTON, M.; CHARLS, E. Artificial neural network approach for predicting transient water levels in multilayered groundwater system under variable state, pumping, and climate conditions. **Journal Hydrology Engineering**, v. 8, n. 6, p. 348-380, 2003.

CÔTE, S.; TATNALL, A. R. L. A neural network-based method for tracking features from satellite sensor images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 3695-3701, 1995.

COULIBALY, P.; ANCTIL, F.; ARAVENA, R.; BOBEE, B. Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. **Water Resources Research**, v. 37, n. 4, p. 885-896, 2001.

DALIAKOPOULOS, I. N.; COULIBALY, P.; TSANIS, I. K. Groundwater level forecasting using artificial neural network. **Journal of Hydrology**, v. 309, p. 229-240, 2005.

DEMATTÊ, J. A. M.; GALDOS, M. V.; GUIMARÃES, R. V.; GENÚ, A. M.; NANNI, M. R.; ZULLO JR., J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+LANDSAT-7 data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, p. 3813-3829, 2007.

FENG, S.; KANG, S.; HUO, Z.; CHEN, S.; MAO, X. Neural Networks to Simulate Regional Ground Water Levels Affected by Human Activities. **Groundwater**, v. 46, n. 1, p. 80-90, 2007.

FLORINSKY, I. V. **Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology**. Academic Press. Boston. 2012. 432 p.

FOODY, G. M.; ARORA, M. K. An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 799-810, 1997.

GHOSE, D. K.; PANDA, S. N.; SWAIN, P. C. Prediction of water table depth in western region, Orissa using BPNN and RBFN neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 394, p. 296-304, 2010.

HEBB, D. O. **The Organization of Behavior**. New York: John Wiley & Sons, 1949. 245 p.

HEPNER, G. F.; LOGAN, T.; RITTER, N.; BRYANT, N. Artificial neural network classification using a minimal training set: comparison to conventional supervised classification. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, p. 469-473, 1990.

HIROSE, Y.; YAMASHITA, K.; HIJIYA, S. Back-propagation algorithm which varies the number of hidden units. **Neural Networks**, v. 4, p. 61-66, 1991.

HOLMES, K. W.; CHADWICK, O. A.; KYRIAKIDIS, P. C. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. **Journal of Hydrology**, v. 233, p. 154-173, 2000.

ITO, Y.; HOSOKAWA, M.; LEE, H.; LIU, J. G. Extraction of damaged regions using SAR data and neural networks. **International Archives Photogrammetric Remote Sensing**, Amsterdam, v. 33, p. 156-163, 2000.

KANELLOPOULOS, I.; WILKINSON, G. G. Strategies and best practice for neural network image classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 711-725, 1997.

KEY, J.; MASLANIK, J. A.; SCHWEIGER, A. J. Classification of merged AVHRR and SMMR arctic data with neural networks. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 55, p. 1331-1338, 1989.

LALLAHEM, S.; MANIA, J.; HANI, A.; NAJJAR, Y. On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 92-111, 2005.

LIN, G. F.; CHEN, G. R. An improved neural network approach to the determination of aquifer parameters. **Journal of Hydrology**, v. 316, p. 281-289, 2006.

MAS, J. F.; PUIG, H.; PALACIO, J. L.; SOSA-LOPEZ, A. Modeling deforestation using GIS and artificial neural networks. **Environmental Modeling & Software**, v. 19, p. 461-471, 2004.

MASTER, T. **Practical neural network recipes in C++**. San Diego, California: Academic, 1993. 493 p.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**. USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6, Chapter A1. Washington DC. 1989.

- MOHAMMADI, K. Groundwater level Estimation Using ModFlow and Artificial Neural Networks. **Water Science and Technology Library**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin. 2008.
- MOHANTY, S.; JHA, M. K.; KUMAR, A.; PANDA, D. K. Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulating groundwater flow in Kathajodi-Surua Inter-basin of Odisha. **Indian Journal of Hydrology**, v. 495, p. 38-51, 2013.
- MOHANTY, S.; JHA, M. K.; KUMAR, A.; SUDHEER, K. P. Artificial neural network modeling for groundwater level forecasting in a river island of eastern India. **Water Resources Management**, v. 24, p. 1845-1865, 2010.
- MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.
- MULHALL, T. How much data is needed to train a neural network. **Neural Edge**, v. 8, p. 4-5, 1995.
- NAYAK, P. C.; RAO, Y. R. S.; SUDHEER, K. P. Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. **Water Resources Management**, v. 20, p. 77-90, 2006.
- NIKOLOS, I. K.; STERGIADI, M.; PAPADOPOULOU, M.P.; KARATZAS, G.P. Artificial neural networks as an alternative approach to groundwater numerical modeling and environmental design. **Hydrol. Process.**, v. 22, p. 3337-3348, 2008.
- PAPADOPULOS, I. S.; COOPER, H. H. Drawdown in well of large diameter. **Water Resources Research**, v. 3, n. 1, p. 241-244, 1967.
- PEDDLE, D. R.; FOODY, G. M.; ZHANG, A.; FRANKLIN, S. E.; LEDREW, E. F. Multisource image classification II: an empirical comparison of evidential reasoning, linear discriminant analysis, and maximum likelihood algorithms for alpine land cover classification. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 20, p. 397-408, 1994.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2013. Disponível em <<http://www.r-project.org/isbn-3-900051-07-0>>. Acesso em: 08 de maio de 2013.
- REINKE, M. **Utilização de redes neurais artificiais aplicadas a mapeamentos hidrogeológicos**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geologia, Meio Ambiente e Recursos Minerais) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, RS. 2008.
- RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte, 2003. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação bacias hidrográficas**. PhD Thesis, Remote Sensing Division – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil. 2003.

ROMÃO, P. A. **Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas - Região de Goiânia - GO**. 2006. 166 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) –Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006.

SAMANI, N.; GOHARI-MOGHADAM, M.; SAFAVI, A. A. A simple neural network model for the determination of aquifer parameters. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 1-11, 2007.

SCHALKOFF, R. J. **Pattern Recognition: statistical, structural and neural approaches**. New York: John Wiley & Sons, 1992. 384 p.

SREEKANTH, P. D.; GEETHANJALI, N.; SREEDEVI, P. D.; AHMED, S.; RAVI KUMAR, N.; KAMALA JAYANTHI, P. D. Forecasting groundwater level using artificial neural networks. **Current Science**, v. 96, n. 7, p. 933-939, 2009.

TAIYUAN, F.; SHAOZHONG, K.; ZAILIN, H.; SHAQIUN, C.; XIAOMIN, M. Neural Networks to Simulate Regional Ground Water Levels Affected by Human Activities. **Groundwater**, v. 46, n. 1, p. 80-90, 2007.

TAORMINA, R.; CHAU, K. W.; SETTI, R. Artificial neural network simulation of hourly groundwater levels in a coastal aquifer system of the Venice lagoon. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 25, p. 1670-1676, 2012.

TOLLENAERE T. SuperSAB: Fast Adaptive Backpropagation with Good Scaling Properties. **Neural Networks**, v. 3, p. 561-573, 1990.

TSO, B.; MATHER, P. M. **Classification methods for remotely sensed data**. 2.ed. Boca Raton, CRC, 2009. 356 p.

UDDAMERI, V. Using statistical and artificial neural network models to forecast potentiometric levels at a deep well in South Texas. **Environmental Geology**, v. 51, p. 885-895, 2007.

VIEIRA, C. A. O. **Accuracy of remotely sensing classification of agricultural crops: a comparative study**. 2000. 327 f. (PhD Thesis) - University of Nottingham, Nottingham, UK, 2000.

WINSTON, R. B. Upgrade to MODFLOW-GUI: Addition of MODPATH, ZONEBDGT, and additional MODFLOW packages to the U.S. Geological Survey MODFLOW-96 Graphical-User Interface: U.S. Geological Survey Open-File Report 99-184, 63 p. 1999.

YANG, Z. P.; LU, W. X.; LONG, Y. Q.; LI, P. Application and comparison of two prediction models for groundwater levels: A case study in Western Jilin Province, China. **Journal of Arid Environments**, v. 73, p. 487-492, 2009.

YOON, H.; JUN, S. C.; HYUN, Y.; BAE, G. O.; LEE, K. K. A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. **Journal of Hydrology**, v. 396, p. 128-138, 2011.

ZELL, A.; MAMIER, G.; VOGT, M.; MACHE, N.; HUBNER, R.; DORING, S.; HERRMANN, K.; SOYEZ, T.; SCHMALZL, M.; SOMMER, T.; HATZIGEORGIU, A.; POSSELT, D.; SCHREINER, T.; KETT, B.; CLEMENTE, G.; WIELAND, J.; GATTER, J. Stuttgart Neural Network Simulator v4.2. University of Stuttgart: Institute for Parallel and Distributed High Performance Systems/University of Tübingen - Wilhelm-Schickard-Institute for Computer Science - Department of Computer Architecture. 1996.

APÊNDICES

Apêndice 1

Modelo – Calibração

PEST run mode:- Parameter estimation mode

Case dimensions:-

Number of parameters : 3
Number of adjustable parameters : 3
Number of parameter groups : 1
Number of observations : 17
Number of prior estimates : 0

Model command line(s):- "C:\vmodnt\dosmess.exe" 6030756 1101

Jacobian command line:- na

Model interface files:-

Templates:

MOD12.MF.TPL

for model input files:

MOD12.MF.PL

(Parameter values written using single precision protocol.)

(Decimal point always included.)

Instruction files:MOD12.INH

for reading model output files: MOD12.HOB

PEST-to-model message file:- na

Derivatives calculation:-

Param group	Increment type	Increment low bound	Increment central	Forward or (central) switch	Multiplier (central)	Method
cnct	relative	2.0000E-02	none	switch	2.000	parabolic

Parameter definitions:-

Name	Trans-formation	Change limit	Initial value	Lower bound	Upper bound
kx__2	log	factor	4.210000E-03	1.000000E-15	1.000000E+29
ky__3	log	factor	2.140000E-05	1.000000E-15	1.000000E+29
ky__4	log	factor	1.520000E-06	1.000000E-15	1.000000E+29

Name	Group	Scale	Offset	Model command number
kx__2	cndct	1.00000	0.00000	1
ky__3	cndct	1.00000	0.00000	1
ky__4	cndct	1.00000	0.00000	1

Prior information:- No prior information supplied

Observations:-

Observation name	Observation	Weight	Group
of000035	617.540	1.000	hds.a
of000036	633.660	1.000	hds.a
of000037	632.280	1.000	hds.a
of000038	620.110	1.000	hds.a
of000039	624.120	1.000	hds.a
of000040	623.930	1.000	hds.a
of000041	626.100	1.000	hds.a
of000042	617.000	1.000	hds.a
of000043	616.520	1.000	hds.a
of000044	619.300	1.000	hds.a
of000045	616.780	1.000	hds.a
of000046	614.020	1.000	hds.a
of000047	613.360	1.000	hds.a
of000048	614.960	1.000	hds.a
of000049	619.960	1.000	hds.a
of000050	616.180	1.000	hds.a
of000051	674.700	1.000	hds.a

Control settings:-

Initial lambda : 10.000
Lambda adjustment factor : 2.0000
Sufficient new/old phi ratio per optimisation iteration : 0.30000
Limiting relative phi reduction between lambdas : 2.00000E-02
Maximum trial lambdas per iteration : 10

Maximum factor parameter change (factor-limited changes) : 10.000
Maximum relative parameter change (relative-limited changes) : na
Fraction of initial parameter values used in computing
change limit for near-zero parameters : 1.00000E-03

Relative phi reduction below which to begin use of
central derivatives : 0.10000

Relative phi reduction indicating convergence : 0.10000E-01
Number of phi values required within this range : 3
Maximum number of consecutive failures to lower phi : 3
Minimal relative parameter change indicating convergence : 0.10000E-01
Number of consecutive iterations with minimal param change : 3
Maximum number of optimisation iterations : 50

OPTIMISATION RECORD

INITIAL CONDITIONS:

Sum of squared weighted residuals (ie phi) = 3078.9

Current parameter values

kx__2 4.210000E-03
ky__3 2.140000E-05
ky__4 1.520000E-06

OPTIMISATION ITERATION NO. : 1

Model calls so far : 1

Starting phi for this iteration: 3078.9

Parameter "ky__3" has no effect on observations.

Parameter "ky__4" has no effect on observations.

Lambda = 10.000 ----->

Phi = 2942.7 (0.956 of starting phi)

Lambda = 5.0000 ----->

Phi = 2942.7 (0.956 of starting phi)

No more lambdas: relative phi reduction between lambdas less than 0.0200

Lowest phi this iteration: 2942.7

Relative phi reduction between optimisation iterations less than 0.1000

Switch to central derivatives calculation

Current parameter values

Previous parameter values

kx__2	4.445994E-03	kx__2	4.210000E-03
ky__3	2.140000E-05	ky__3	2.140000E-05
ky__4	1.520000E-06	ky__4	1.520000E-06

Maximum factor change: 1.056 ["kx__2"]

Maximum relative change: 5.6056E-02 ["kx__2"]

OPTIMISATION ITERATION NO. : 2

Model calls so far : 6

Starting phi for this iteration: 2942.7

Parameter "ky__3" has no effect on observations.

Lambda = 5.0000 ----->

Phi = 2942.7 (1.000 times starting phi)

Lambda = 2.5000 ----->

Phi = 2942.7 (1.000 times starting phi)

No more lambdas: relative phi reduction between lambdas less than 0.0200

Lowest phi this iteration: 2942.7

Current parameter values		Previous parameter values	
kx__2	4.445994E-03	kx__2	4.445994E-03
ky__3	2.140000E-05	ky__3	2.140000E-05
ky__4	1.520000E-05	ky__4	1.520000E-06
Maximum factor change: 10.00		["ky__4"]	
Maximum relative change: 9.000		["ky__4"]	

OPTIMISATION ITERATION NO. : 3

Model calls so far : 14

Starting phi for this iteration: 2942.7

Parameter "ky__3" has no effect on observations.

Lambda = 2.5000 -----> Phi = 2942.7 (1.000 times starting phi)

Lambda = 1.2500 -----> Phi = 2942.7 (1.000 times starting phi)

No more lambdas: relative phi reduction between lambdas less than 0.0200

Lowest phi this iteration: 2942.7

Current parameter values		Previous parameter values	
kx__2	4.445994E-03	kx__2	4.445994E-03
ky__3	2.140000E-05	ky__3	2.140000E-05
ky__4	4.806662E-06	ky__4	1.520000E-05
Maximum factor change: 3.162		["ky__4"]	
Maximum relative change: 0.6838		["ky__4"]	

Optimisation complete: the 3 lowest phi's are within a relative distance of eachother of 1.000E-02

Total model calls: 22

OPTIMISATION RESULTS

Covariance matrix and parameter confidence intervals cannot be determined:-
Normal matrix nearly singular; cannot be inverted.

Parameters	----->Parameter	Estimated value
kx__2	4.445994E-03	
ky__3	2.140000E-05	
ky__4	1.520000E-06	

See file C:\DOUTORADO\DOUTORADO
NOVO\MODFLOW\MOD12CALIBRADO \MOD12.SEN for parameter
sensitivities.

Observations ----->

Observation	Measured value	Calculated value	Residual	Weight	Group
of000035	617.540	628.028	-10.4879	1.000	hds.a
of000036	633.660	628.995	4.66490	1.000	hds.a
of000037	632.280	627.652	4.62770	1.000	hds.a
of000038	620.110	626.790	-6.68000	1.000	hds.a
of000039	624.120	626.375	-2.25540	1.000	hds.a
of000040	623.930	625.732	-1.80200	1.000	hds.a
of000041	626.100	626.599	-0.499200	1.000	hds.a
of000042	617.000	626.193	-9.19290	1.000	hds.a
of000043	616.520	626.347	-9.82670	1.000	hds.a
of000044	619.300	627.326	-8.02640	1.000	hds.a
of000045	616.780	625.884	-9.10420	1.000	hds.a
of000046	614.020	625.135	-11.1151	1.000	hds.a
of000047	613.360	625.205	-11.8451	1.000	hds.a
of000048	614.960	626.070	-11.1101	1.000	hds.a
of000049	619.960	627.678	-7.71770	1.000	hds.a
of000050	616.180	628.183	-12.0026	1.000	hds.a
of000051	674.700	632.074	42.6263	1.000	hds.a

See file C:\DOUTORADO\DOUTORADO NOVO\MODFLOW\MOD12CALIBRADO\ MOD12.RES for more details of residuals in graph-ready format.

See file C:\DOUTORADO\DOUTORADO NOVO\MODFLOW\MOD12CALIBRADO\ MOD12.SEO for composite observation sensitivities.

Objective function ----->Sum of squared weighted residuals (ie phi) = 2943.

Correlation Coefficient ----->Correlation coefficient = 0.8417

Analysis of residuals ----->All residuals:-

Number of residuals with non-zero weight = 17
Mean value of non-zero weighted residuals = -3.514
Maximum weighted residual [observation "of000051"] = 42.63
Minimum weighted residual [observation "of000050"] = -12.00
Standard variance of weighted residuals = 210.2
Standard error of weighted residuals = 14.50

Note: the above variance was obtained by dividing the objective function by the number of system degrees of freedom (ie. number of observations with non-zero weight plus number of prior information articles with non-zero weight minus the number of adjustable parameters.)
If the degrees of freedom is negative the divisor becomes the number of observations with non-zero weight plus the number of prior information items with non-zero weight.

Apêndice 2

Modelo – Parâmetros de Sensibilidade

OPTIMISATION ITERATION NO. 1 ----->

Parameter name	Group	Current value	Sensitivity	Rel. Sensitivity
kx__2	cmdct	4.210000E-03	41.7050	99.0793
ky__3	cmdct	2.140000E-05	0.00000	0.00000
ky__4	cmdct	1.520000E-06	0.00000	0.00000

OPTIMISATION ITERATION NO. 2 ----->

Parameter name	Group	Current value	Sensitivity	Rel. Sensitivity
kx__2	cmdct	4.445994E-03	979.860	2304.66
ky__3	cmdct	2.140000E-05	0.00000	0.00000
ky__4	cmdct	1.520000E-06	3.179632E-16	1.849960E-15

OPTIMISATION ITERATION NO. 3 ----->

Parameter name	Group	Current value	Sensitivity	Rel. Sensitivity
kx__2	cmdct	4.445994E-03	979.860	2304.66
ky__3	cmdct	2.140000E-05	0.00000	0.00000
ky__4	cmdct	1.520000E-05	2.396738E-16	1.154786E-15

COMPLETION OF OPTIMISATION PROCESS

Composite sensitivities for all observations/prior info ----->

Number of observations with non-zero weight = 17

Parameter name	Group	Current value	Sensitivity	Rel. Sensitivity
kx__2	cmdct	4.445994E-03	41.7050	98.0914
ky__3	cmdct	2.140000E-05	0.00000	0.00000
ky__4	cmdct	1.520000E-06	0.00000	0.00000