UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

VITOR FIDELIS MONTEIRO GONÇALVES

ESTIMATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DA RECARGA EM ÁREA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BÁRBARA/SP

BOTUCATU
2017

VITOR FIDELIS MONTEIRO GONÇALVES

ESTIMATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DA RECARGA EM ÁREA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BÁRBARA/SP

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu para obtenção do título de mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione

BOTUCATU

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Gonçalves, Vitor Fidelis Monteiro, 1991-
G635e Estimativa e espacialização da recarga em área do Sistema Aquífero Bauru na estação ecológica de Santa Bárbara/SP / Vitor Fidelis Monteiro Gonçalves.– Botucatu: : [s.n.], 2017
91 p.: il., color. , grafs., tabs.

Dissertação(Mestrado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas. 2. Abastecimento de agua. 3. Sistema Aquífero Bauru. 4. Hidrogeologia. I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ESTIMATIVA E ESPACIALIZAÇÃO DA RECARGA EM ÁREA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU NA ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BÁRBARA/SP

AUTOR: VÍTOR FIDELIS MONTEIRO GONÇALVES
ORIENTADOR: RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
Faculdade de Ciências e Engenharia / UNESP

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA
Depto de Solos e Recursos Naturais / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu

Prof. Dr. MURILO CÉSAR LUCAS
Depto Acadêmico de Construção Civil / UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Videoconferência)

Botucatu, 28 de julho de 2017.

Á minha mãe,

Neusa Fidelis Monteiro Gonçalves,

eu dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, que me apoiaram nessa jornada.

Ao Professor Doutor Rodrigo Lilla Manzione, pelos anos de orientação, paciência, ensinamentos, e exemplo de profissional para mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida no período do Mestrado, possibilitando a realização do trabalho atual.

Aos amigos do Curso de Pós-Graduação em Agronomia.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Teresa de Calcutá. **Reaching Out in Love:** Stories. New York: Continuum International Publishing Group, 2000.

RESUMO

Fenômenos geográficos apresentam indexação temporal e espacial. Temporal pela dinâmica do processo que se altera ao longo de um período ou sob determinada influência. Espacial pela maneira com que se distribui ao longo do território. Diversas são as condicionantes que podem induzir comportamentos e padrões nesses fenômenos em bacias hidrográficas, como pedoformas, compartimentação geomorfológica, canais de drenagem, geologia, clima, entre outras. A maneira com que dados de monitoramento de recursos naturais são tratados sob o ponto de vista geoespacial pode determinar de forma definitiva o resultado final das feições que se deseja representar e dos mapas obtidos. E por consequência toda inferência que se deseja obter a respeito de determinada região de forma que venha a contribuir nos planos de bacias e gerenciamento dos recursos hídricos. O objetivo desse trabalho foi estimar a recarga das águas subterrâneas por meio do método da Variação da Superfície livre (WTF) na Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB), situada no município de Águas de Santa Bárbara, sudoeste do estado de São Paulo, a partir de dados de monitoramento. Foram utilizados dados de monitoramento climatológico e hidrogeológico para estimar a recarga das águas subterrâneas no período de 2014/2016. Para isso, foi testada uma metodologia baseada no princípio de calcular antes/interpolar depois, onde a recarga foi estimada pontualmente pelo método da flutuação da superfície livre (WTF) para cada poço de monitoramento. Os resultados do trabalho foram interpolados pelo do Inverso do quadrado da distância (IDW) demonstrando graficamente como o fenômeno foi especializado e qual foi a taxa de recarga para a área de estudo.

Palavras-chave: águas subterrâneas, método da variação da superfície livre, Sistema Aquífero Bauru.

ABSTRACT

Geographical phenomena show time and space indexation. Time indexation for the process dynamics, which, changes itself through the period or under influence. Space indexation for the manner that it distributes itself in the territory. The factors are diverse and they an induce behavior and patterns in watershed phenomena, like pedofomrs, geomorphological compartmentation, rivers, streams, geology, climate, among others. The manner, which the natural resources monitoring data, is treated by geospatial look can determine the final result of the components which is aimed to represent and obtained maps. Thus, by consequence, all the inference which is desired to be obtained about a determined region for contributing in watershed plans and water resources management. The aim of this work was to estimate the groundwater recharge via Water Table Fluctuation Method (WTF), from monitoring data, in Santa Barbara Ecological Station (EEcSB), located in Águas de Santa Bárbara county, southeast of Sao Paulo state. It was used climate and hydrogeological monitoring data to estimate the groundwater recharge in the period of 2014/2016. It was tested a methodology based in calculate first/interpolate after, where the recharge was estimated by water table fluctuation method (WTF) for each monitoring well. The results were interpolated by the inverse distance weighting (IDW) method showing in graphs how the phenomena was spatialized and what was the recharge rate presented in the study area.

Keywords: groundwater, water table fluctuation method, Bauru Aquifer System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estratigrafia do grupo Bauru 19
Figura 2- Diagrama esquemático demonstrando um balanço hídrico para uma coluna de solo.....22
Figura 3 - Hidrógrafa hipotética do nível freático, mostrando a diferença entre o pico e a linha extrapolada. 29
Figura 4 - Área da Estação Ecológica de Santa Bárbara e da Floresta Estadual no município de Águas de Santa Bárbara - SP 32
Figura 5 - Rede de drenagem e poços analisados na área de estudo 33
Figura 6 – Método de perfuração dos poços 34
Figura 7 - Precipitação na área durante o período todo analisado 34
Figura 8 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G1 na Bacia do Guarantã 38
Figura 9 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço P1 na Bacia do Passarinho 38
Figura 10 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B1 na Bacia do Bugre 39
Figura 11 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S2 na Bacia do Santana 39
Figura 12 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI3 na Bacia do Boi 40
Figura 13 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço P1 na Bacia do Passarinho 40
Figura 14 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço G1 na Bacia do Guarantã 41
Figura 15 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço B1 na Bacia do Bugre 41
Figura 16 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço S2 na Bacia do Santana 42
Figura 17 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço S2 na Bacia do Santana 42
Figura 18 – Mapa da recarga para o ano hidrológico 2014-2015. 47
Figura 19 – Mapa da recarga para o Ano Hidrológico 2015-2016 48

Figura 20 - Mapa da diferença da recarga entre os anos hidrológicos 2014-2015 e 2015-2016 (mm) 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Passarinho 43
Tabela 2 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Guarantã 43
Tabela 3 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Bugre 43
Tabela 4 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Santana 44
Tabela 5 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Boi. 44
Tabela 6 – Análise estatística da recarga estimada 45
Tabela 7 - Percentuais de recarga em relação a precipitação do Ano Hidrológico 2014-2015. 45
Tabela 8 - Percentuais de recarga em relação a precipitação do Ano Hidrológico 2015-2016. 46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC	Clorofluorcarboneto
DAEE	Departamento de Águas e Energia do Estado de São Paulo
EEcSB	Estação Ecológica de Santa Barbara
FNUAP	Fundo de população das Nações Unidas
IDW	Método do Inverso de Quadrado da distância / Inverse Weighting
IG	Instituto Geológico
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
PG	Progressão geométrica
SMA	Secretaria do Meio Ambiente
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
UGRHI	Unidade de Gerenciamento do Recursos Hídricos
UNESCO	Organização das Nações Unidas para Educação, Ciência e Cultura
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho“
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
USP	Universidade de São Paulo
WTF	Método da Variação da Superfície Livre / water table fluctuation method
ZFP	Método do Plano de Fluxo Zero

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 REVISÃO DE LITERATURA 15
2.1. Água Subterrâneas 15
2.2. Aquíferos 17
2.2.1. Sistema Aquífero Bauru 18
2.3. Recarga das águas subterrâneas 19
2.3.1. Definições 19
2.3.2. Métodos de estimativa de recarga 21
2.3.2.1. Método do Balanço Hídrico 21
2.3.2.2. Métodos baseados em interações com águas superficiais 23
2.3.2.3. Métodos baseados em estudos da zona não saturada 24
2.3.2.4. Métodos baseados em estudos da zona saturada 26
2.3.2.5. Método da Variação da superfície Livre (Water Table Fluctuation) 28
2.4. Modelo Conceitual de Estudo em Hidrogeologia 30
3 Material e Métodos 32
3.1. Área de estudo 32
3.2. Monitoramento dos parâmetros agrometeorológicos 33
3.2.1. Monitoramento da oscilação do nível freático 35
3.3. Mapeamento da recarga 35
3.3.1. Estimativa da recarga direta dos poços de monitoramento 36
4 Resultados e Discussões 37
4.2. Análise do Ano Hidrológico 2014-2015 45
4.3. Análise do Ano Hidrológico 2015-216 46
4.4. Espacialização dos dados de recarga direta 46
5 Conclusões 50
5.1. Considerações Finais 51
Referências Bibliográfica 53
Apêndice A - Oscilação dos níveis freáticos e precipitação dos poços 56
Apêndice B - Método da Variação da superfície livre para os poços analisados 75

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental à existência humana. Esse recurso é importante para inúmeras atividades humanas como a agricultura, indústria e consumo humano. Apesar de um recurso muito abundante no mundo, a maior parte da água se encontra salinizada nos oceanos e necessita ser dessalinizada para o consumo humano, entretanto, esse é um processo de alto custo, atingindo pequena parte da população atual. Assim, no panorama tecnológico atual, a água doce é um recurso vital aos seres humanos e toda a vida na Terra.

A água se movimenta então como um ciclo sobre a superfície da Terra, e sendo um ciclo, o conteúdo desse recurso se mantém o mesmo, com perdas insignificantes pela atmosfera para o universo. Nesse contexto, a água se torna um recurso finito. Visto que grande parte desse recurso está nos oceanos, cabe aos seres vivos uma menor porção, que é a chamada água doce. Parte dessa água doce se mantém inacessível, localizada em geleiras, nos polos do planeta. Um recurso que se torna escasso com o aumento da população. A teoria malthusiana propõe que a população mundial cresce em progressão geométrica (P.G.), ou seja, ela duplica a cada 25 anos, porém o recurso água se mantém o mesmo. As projeções dos órgãos oficiais mostram que a população atingiu a marca de 7,2 bilhões de habitantes em 2013, segundo o Fundo de População das Nações Unidas (FNUAP), e com estimativa de 7,4 bilhões em 2017. Com esse aumento, torna-se muito preocupante para os tomadores de decisão e pesquisadores no mundo todo, visto que a água potável conhecida atualmente será escassa nesse cenário.

Com isso, as águas subterrâneas se tornam um recurso importante ao gerenciamento dos recursos hídricos, visto que suprem possíveis faltas para a população acima das mesmas. Exemplos recentes no Brasil demonstram a eficiência das águas subterrâneas em suprir a demanda que antes era atingida pelas águas superficiais, a chamada crise hídrica em São Paulo é uma delas, onde inúmeros condomínios perfuraram poços em suas áreas para suprir as necessidades de todos seus condôminos, e ainda podemos citar diversas cidades que são majoritariamente abastecidas por águas subterrâneas no Brasil.

Entretanto esse aumento rápido no consumo desse recurso, que até então se encontrava de difícil acesso, se torna um desafio aos órgãos gestores para fiscalizar

e perfurar mais poços para o abastecimento das cidades. Um problema que cabe ressaltar é que os estudos sobre as águas subterrâneas ainda encontram barreiras financeiras e tecnológicas, existindo assim uma dificuldade em se estimar claramente a quantidade de água que existe e em que velocidade esse recurso pode ser explorado.

A água é considerada água subterrânea a partir do momento que a mesma se armazena em meio subterrâneo em aquíferos, ou seja, pacotes sedimentares porosos, ou pacotes de rocha mais dura com fraturas que permitam a percolação desse recurso, e assim, observa-se a necessidade de entender todos os fenômenos pelos quais os recursos hídricos passam sob a superfície, como a percolação, a infiltração profunda, o fluxo em sub superfície e a recarga dos aquíferos. Esses fenômenos são importantes pois determinam a dinâmica das águas subterrâneas na área em que se deseja estudar, e eles podem ser considerados fenômenos geográficos pois possuem característica temporal e espacial. Assim, esses fenômenos acontecem de acordo com os atributos físicos na superfície e têm um período para ocorrerem.

No contexto desses fenômenos, a recarga das águas subterrânea se torna um elemento de fundamental importância a ser estudado para o entendimento das dinâmicas das águas subterrâneas e também ao gerenciamento dos recursos hídricos, visto que ela determina qual a quantidade de precipitação que realmente se torna recursos palpável ao consumo, condicionando os usos e a extração para que não haja déficit no recurso apresentado, isso em um cenário ideal, podendo haver variações na realidade, entretanto, essas variações também são passíveis de estudo.

A infiltração profunda ou recarga é de extrema importância para os estudos agronômicos, visto que os estudos da recarga estão diretamente relacionados a análise da altura do nível freático, e assim dos estudos de irrigação e drenagem. A quantidade de água no solo, nas zonas saturadas, não saturadas e superficialmente, demonstra a quantidade de umidade presente para as necessidades agronômicas. Os estudos agronômicos, a partir desses dados, pode analisar a necessidade de se drenar a água para se atingir um cenário ótimo para o cultivo a ser plantado, ou o inverso, a necessidade de se irrigar o meio para que se atinja o cenário ideal para o cultivo.

Desta forma, o objetivo do trabalho atual foi estimar a recarga das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru por meio do método da Variação da Superfície Livre (WTF) e espacializar esse fenômeno para a área da Estação Ecológica de Santa Bárbara, no município de Águas de Santa Bárbara, sudoeste do Estado de São Paulo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Água Subterrâneas

A água subterrânea é um assunto que toca a imaginação da humanidade desde seus primórdios. A possibilidade de se ter reservas enormes de água doce sob a superfície terrestre sempre permeou o imaginário humano. A Terra possui um grande aporte do recurso água em sua superfície, entretanto, em sua maioria é composta por água salgada, encontrada nos mares e oceanos, porém esse recurso está impróprio para o consumo e os métodos conhecidos atualmente ainda são de alto custo financeiro e de energia.

Da menor quantidade que resta, que tange à água doce, parte está em geleiras nos polos do planeta, e no gelo que fica sobre as montanhas. Com o aumento da população em ritmo acelerado e o aumento na necessidade de utilização do recurso, a água subterrânea é uma alternativa para suprir o consumo humano, como vem sendo observado com a maior exploração na atualidade. Manzione (2015) demonstra em seu trabalho, o panorama atual dos estudos em relação às águas subterrâneas.

A utilização de água subterrânea para consumo humano pode preceder o Homo Sapiens, com escavações dos leitos dos canais para obter-se um maior fluxo de água. Existem desenhos que demonstram a retirada de água subterrânea no Monte Atlas, Marrocos/Argélia, essas iconografias datam 8.000 anos a.C. A China, por sua vez, possui indícios de escavações de poços entre 5.000 e 3.000 anos a.C., e alguns poços encontrados no Egito e Pérsia datam 800 anos a.C., esses são alguns exemplos de utilização das águas subterrâneas em culturas primitivas (MANZIONE, 2015).

Segundo Bouguerra (2003), os poços comunitários tinham e ainda tem o papel de base da organização social de inúmeros povos na África e no Mundo Árabe. Outro exemplo a se apresentar é o relato de uso do ‘Shaduf’ no Egito, o ‘Shaduf’ era uma ferramenta para a extração de água em poços, sendo formada por uma vara longa

apoiada a um pilar com algo como um recipiente na ponta, e que é utilizada na região do Nilo há 3.250 anos.

O Mundo Greco-Romano amplia o conhecimento em relação às águas subterrâneas, Platão traz a ideia do Tártaro, que seria um mar subterrâneo que apoiaria a terra (superfície) acima dele, sendo que as cavernas representariam as conexões entre os mares (subterrâneo e superficial), e as ondas responsáveis pelo transporte de água entre eles. Essa associação entre água subterrânea e cavernas se torna natural quando se observa a geomorfologia e geologia grega, entretanto a falha dos pensadores gregos estava em não considerar a chuva como parte do processo, pois achavam que o volume precipitado não era suficiente para repor as grandes quantidades de água que encontravam nas cavernas (MANZIONE, 2015).

Entretanto, com o passar dos anos, os pensadores gregos começaram a associar a precipitação e até mesmo a evaporação como partes integrantes de todo o sistema das águas, e ainda observam que o volume dos rios podia ser maior que os da precipitação, criando três principais teorias para isso acontecer: a terra continha água em seu interior e saia para a superfície constantemente, o ar no interior da terra se transformava em água ou a própria terra estava se transformando em água.

Durante a idade média pouco se evoluiu na questão das águas subterrâneas na Europa, com perfurações por volta de algumas dezenas de metros, enquanto a China já produzia poços com mais de mil metros. Contudo, um fato importante a ser destacado nesse período, foi a perfuração de um poço pelos Monges da Ordem dos Cartuxos em Artois, na França. A palavra ‘*artesiano’* vem desse poço, e a técnica utilizada pelos monges troca as escavações por perfurações na Europa, auxiliando o desenvolvimento de técnicas mais modernas.

Com a idade moderna, os pensadores se voltam às ideias gregas, entretanto, novas ideias surgem como o conceito de ciclo hidrológico proposto por Palissy em 1580, onde ele agrega infiltração e precipitação no conceito. Com a idade contemporânea, vem com uma grande evolução geral na ciência, que por sua vez, traz todas as teorias aplicadas na ciência atualmente, e são a base para todos os estudos futuros.

O panorama brasileiro demonstra a utilização de águas subterrâneas para o consumo desde o início da colonização com a existência de ‘cacimba’ em fortes militares, conventos e igrejas. Todavia, a exploração das águas subterrâneas no Brasil

se inicia na década de 60, na região nordeste, através da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), que em duas décadas perfurou milhares de poços na região, possibilitando a criação do Inventário Hirogeológico Básico do Nordeste.

A região sudeste inicia os estudos na década de 70, quando a PAULIPETRO, empresa para buscar fontes de petróleo e gás natural, encontrou um grande aporte de águas subterrâneas na Bacia Sedimentar do Paraná. Esse panorama vem crescendo, e se fortaleceu com a criação da Agência Nacional de Águas (ANA) em 2000. Essa Agência possui uma agenda especial para tratar das Águas subterrâneas, auxiliada pelos órgãos gestores e fiscalizadores, como por exemplo no estado de São Paulo, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), a Secretaria do Meio Ambiente (SMA), da Companhia Ambiental do estado (CETESB), dos institutos de Pesquisa Tecnológica (IPT) e geológica (IG), e de muitas universidades, como UNESP, UNICAMP e USP (MANZIONE, 2015).

2.2. Aquíferos

Aquíferos são formações geológicas que tem capacidade de armazenar e/ou permitir a movimentação da água nessa estrutura, como por exemplo pacotes sedimentares existentes em sub superfície e que contém água. A água subterrânea ainda pode ser encontrada em aquicludes ou aquitardos. Aquicludes são formações que contém água em pequenas quantidades ou até quantidades significativas, entretanto, essas formações não transmitem essa água em condições naturais. Já os aquitardos são estruturas semipermeáveis, delimitadas por estruturas mais permeáveis (FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).

Os aquíferos podem ser classificados como: confinados e não confinados (livres), levando-se em conta a presença ou não do nível freático. Normalmente os aquíferos confinados possuem maior produção, entretanto os aquíferos livres são amplamente explorados pela fácil acessibilidade (CAICEDO, 2007). Os aquíferos confinados podem ainda ser divididos em: drenante e não drenante, aqueles considerados não drenantes possuem ambas as camadas limítrofes impermeáveis. Já os aquíferos confinados drenantes são aqueles onde uma das comadas que o limitam é semipermeável, oferecendo resistência, mas permitindo certo fluxo (FEITOSA; MANOEL FILHO, 1997).

Os aquíferos não confinados ou livres são aqueles que ocorrem mais próximos da superfície, os limites desses Sistemas Aquíferos são o nível freático e a zona não saturado na parte superior, e barreiras permeáveis, semipermeáveis ou outros sistemas aquíferos na parte inferior. Esses sistemas aquíferos possuem recarga direta que podem sofrer alteração de acordo com a intensidade da chuva, o uso e ocupação do solo, a profundidade do lençol freático e o fluxo subterrâneo. (TOWNLEY, 1998).

No Estado de São Paulo destacam-se os aquíferos Guarani, Bauru e Serra Geral pela sua grande disponibilidade hídrica e utilização, principalmente na região centro-oeste do estado.

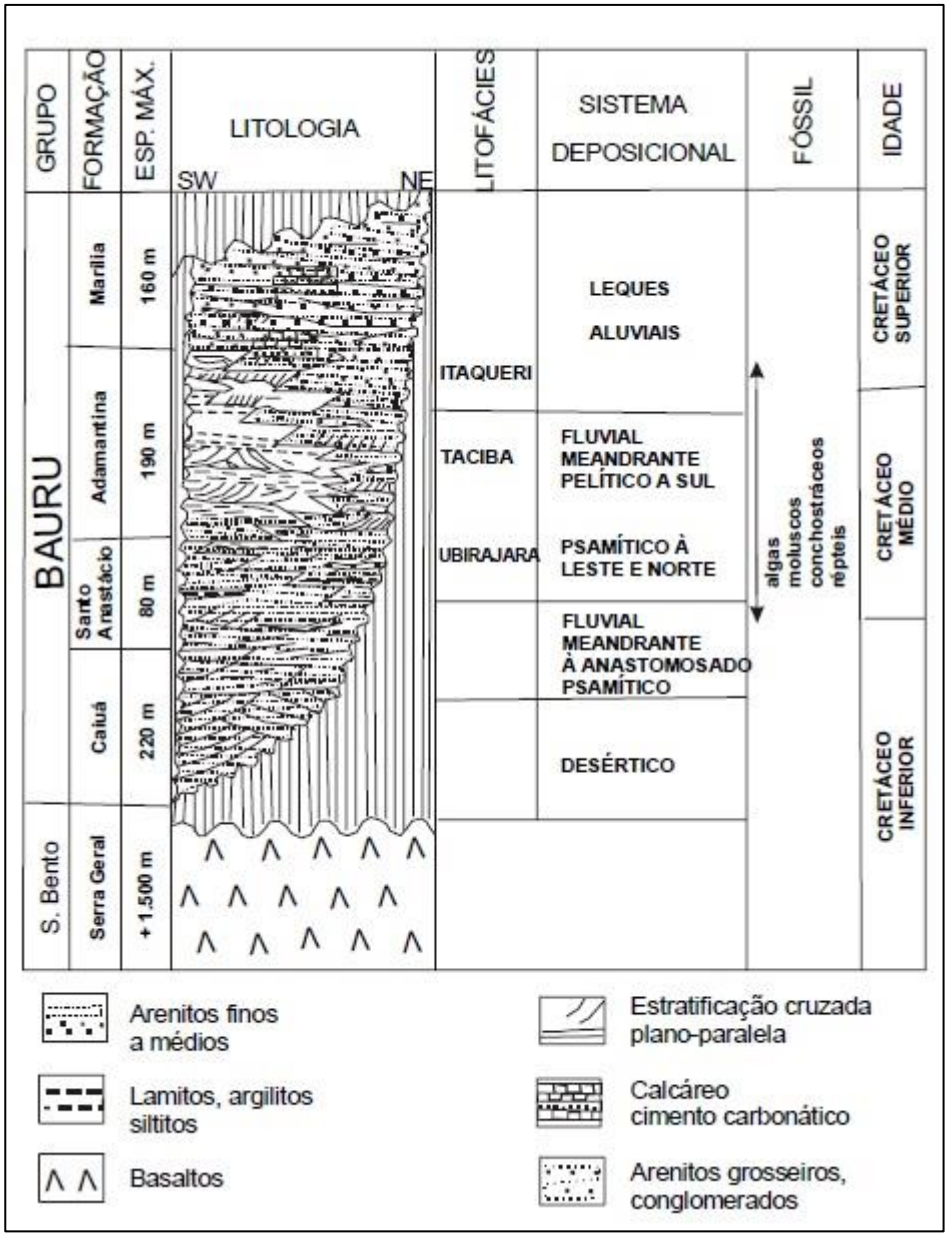
2.2.1. Sistema Aquífero Bauru

O Grupo Bauru se estende por cerca de 40% do estado de São Paulo, abrangendo 104000 km² e se divide em quatro Formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marilia. A Formação Caiuá possui grande uniformidade litológica, granulação fina a média de cor vermelho-escuro e arroxeado, estratificação cruzada de grande porte e matriz inferior a 5% com grãos sub arredondados a arredondados, a espessura máxima conhecida dessa formação é de 200 metros. Já a Formação Santo Anastácio possui granulação de fina a média, de cor marrom-avermelhada, estratificação incipiente plano-paralela ou cruzada de baixo-ângulo, matriz inferior a 15% e grãos arredondados a sub angulares, possui espessura máxima de 80 metros e podem recobrir a formação Caiuá ou o embasamento basáltico. (Paula e Silva et al., 2005)

A Formação Adamantina, por sua vez, apresenta granulação fina a muita fina, de coloração castanho-avermelhada a cinza-escuro, estratificação cruzada, as maiores espessuras encontradas estão entre 160 e 190 metros. Por fim, a formação Marilia tem em seu conteúdo: granulação grosseira a conglomeratória, teor de matriz variável, possuindo espessura máxima conhecida no município de Marilia, 160 metros.

A hidrogeologia do Grupo Bauru (Figura 1) o coloca como um sistema aquífero livre sobre a camada impermeável representada pelos derramamentos basálticos da formação Serra Geral. Os pesquisadores ainda dividem esse Sistema Aquífero em: unidade aquífera Bauru inferior, que compreende as formações Caiuá e Santo Anastácio, e a unidade aquífera Bauru médio/superior, que compreende as formações Adamantina e Marilia. (BARISON; KIANG, 2004).

Figura 1 – Estratigrafia do grupo Bauru



FONTE: Barrison e Kiang (2004)

2.3. Recarga das águas subterrâneas

2.3.1. Definições

No meio acadêmico é possível encontrar muitas definições diferentes de recarga entre diversos autores sobre o assunto, assim, a recarga é definida por Healy (2010) como a quantidade de água que atinge o aquífero em qualquer direção e que, por sua vez, soma-se ao armazenamento subterrâneo que está em subsuperfície, e por ter tal

função, a recarga rege a quantidade de recurso disponível no aquífero para o abastecimento e diversos usos. Segundo Balek (1988), a recarga das águas subterrâneas é a quantidade de água que contribui para o aumento temporário ou permanente dos recursos subterrâneos.

Por sua vez, Xu e Beekman (2003) conceituam em sua publicação na UNESCO, a recarga como a adição de água a um reservatório subterrâneo podendo ser por quatro maneiras diferentes: fluxo em sentido descendente através da zona não-saturada atingindo o lençol freático, fluxo entre os aquíferos em sentido descendente ou lateral, recarga induzida por corpos d'água próximos ou recarga artificial por infiltrações antrópicas e injeções a partir de um poço. Para Manzione (2015), a recarga é o fluxo de água descendente que atinge o nível piezométrico.

A recarga das águas subterrâneas pode ser classificada em natural ou artificial, ou seja, recarga natural é aquela proveniente da precipitação e corpos d'água em superfície, visto que a recarga artificial é aquela proveniente da ação antrópica, como por exemplo pela injeção de água em poço ou as perdas dos sistemas públicos de abastecimento de água. Pode ainda ser classificada como difusa, também conhecida como direta, onde a água é derivada da precipitação, ou em certos casos, da irrigação, suas características são o acontecimento em larga escala, e a possibilidade de haver diferentes intensidades na área analisada.

Já a recarga localizada, ou indireta, é aquela derivada dos corpos d'água superficiais ou de aquíferos e aquicludes próximos (SCANLON et al., 2002), ou ainda de sistemas de irrigação pontuais ou vazamentos nos sistemas de abastecimento.

Gomes (2008) determina a recarga profundo no Sistema Aquífero Guarani a partir do método do Balanço Hídrico em zona saturada. Scanlon et al. (2002) e Healy (2010), por sua vez, elaboram um compêndio com os principais métodos para a estimativa de recarga subterrânea e apontam os principais métodos utilizados, enquanto Adhikary et al. (2012) apresentam um estudo onde houve a estimativa de recarga para um aquífero raso a partir dos dados de precipitação e observações sobre a oscilação do nível freático. No estudo conduzido por Hayashi e Farrow (2014) é demonstrada a resposta da recarga à variabilidade interanual e interdecadal da precipitação em uma bacia hidrográfica no Canadá. Já Wendland et al. (2015), estudaram a contribuição da recarga na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, bacia que é representativa para o Sistema Aquífero Bauru.

2.3.2. Métodos de estimativa de recarga

Como pode ser observado em Healy (2010) Scanlon et al. (2002) e Wendland et al. (2007), existem inúmeros métodos avaliados até os dias atuais para estimar a recarga das águas subterrâneas e que a escolha do método ideal depende dos objetivos do trabalho a ser desenvolvido e da precisão que se espera dos resultados, além das possibilidades econômicas e de disponibilidade de equipamentos.

Healy (2010) e Scanlon et al. (2002) apresentam em seus trabalhos, métodos para estimar a recargas divididos em categorias, e para cada categoria foi dissertado os atributos de diversas técnicas de cada método utilizado na área acadêmica par quantificar o atributo, e se tornaram referências expoente para os estudos da recarga subterrânea.

Os métodos para estimar a recarga das águas subterrâneas podem ser divididos em: Método do Balanço Hídrico, Métodos baseados em estudos de interação com águas superficiais, Métodos baseados em estudos da zona não saturada e Métodos baseados em estudos da zona saturada, e assim, os métodos para cada zona ainda podem ser classificados por abordagens: física, traçador ou modelagem numérica.

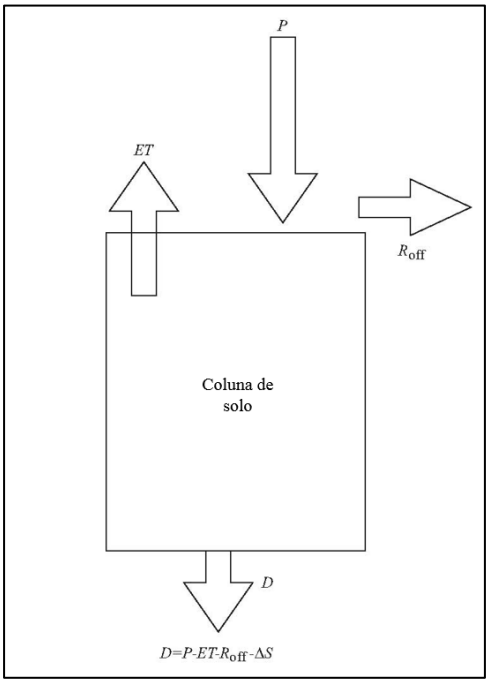
As modelagens numéricas podem ser aplicadas em quaisquer abordagens, seja aquelas voltadas às águas superficiais, zona não saturada ou zona saturada. Para o primeiro tipo, a modelagem de bacia hidrográfica (precipitação/escoamento) é utilizada para estimar a recarga através do residual da equação do balanço hídrico. A modelagem da zona não saturada é utilizada para estimar drenagens profundas abaixo da zona da raiz ou recarga em resposta a forçante meteorológica. Para as zonas saturadas, os modelos de fluxo de águas subterrâneas estimam recargas pelos dados de condutividade hidráulica, potenciais hidráulicos entre outros parâmetros físicos.

2.3.2.1. Método do Balanço Hídrico

A recarga pode ser considerada como a parte residual de uma equação de balanço hídrico (SCANLON et al., 2002), por isso muitos métodos elaborados para a estimativa da recarga podem ser considerados como método do balanço hídrico. Assim, o método pode ser representado pelo diagrama (Figura 2), onde é apresentado

todos os componentes do balanço hídrico em uma coluna de solo, como pode ser observado no trabalho de Manzione (2015).

Figura 2- Diagrama esquemático demonstrando um balanço hídrico para uma coluna de solo.



Fonte: HEALY (2010), adaptado por MANZIONE (2015)

De acordo com o mesmo autor, no diagrama, a precipitação é representada pela letra P, evapotranspiração é definida por ET, Roff é o escoamento superficial e D é a drenagem profunda. A drenagem profunda pode também ser entendida como a infiltração, alguns autores aqui consideram que a drenagem profunda pode ser considerada recarga, entretanto, outros pesquisadores consideram que essa drenagem ainda se divide em subsolo em escoamento em subsuperfície e recarga, que seria a quantidade especifica que atinge a superfície piezométrico. A Equação representa o Balanço Hídrico:

$$D = P - ET - R_{off} - \Delta S \quad (1)$$

Além da precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem, a Equação 1 ainda adiciona o componente ΔS que é a variação no armazenamento subterrâneo, ou seja, a quantidade de água na coluna de solo, esse componente é importante para os estudos de recarga pois podem demonstrar a oscilação do nível

freática e a mudança nas espessuras das zonas saturada e não-saturada. Scanlon et al. (2002) enaltece que a maior limitação do método do balanço hídrico é que sua acurácia depende da qualidade e acurácia na medição e obtenção dos outros componentes da equação.

2.3.2.2. Métodos baseados em interações com águas superficiais

Segundo Healy (2010), os dados de vazão das águas superficiais podem ser um meio para estimar a recarga das águas subterrâneas em áreas úmidas e subúmidas. As áreas úmidas podem ser aquelas onde há interação entre as águas superficiais de corpos d'água e aquíferos, podendo esses corpos doar ou receber água dos aquíferos, assim a recarga pode ser definida a partir dos dados de ganho e perda de água dos corpos d'água. Os métodos mais comuns relacionados aos estudos com a interação da água subterrânea com as águas superficiais são: balanço hídrico do canal, medidores de infiltração, traçadores isotópicos e escoamento de base (SCANLON et al., 2002)

Segundo Healy (2010), os ganhos e perdas de águas superficiais podem ser estimados utilizando o balanço hídrico do canal. A Equação 2 representa esse método:

$$R = Q_{up} - Q_{down} + \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - E_a - \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

(2)

Onde, Q é a taxa de fluxo, sendo que Q_{up} e Qdown são as taxas de fluxo ascendente e descendente, já Qin e Qout são os fluxos de entrada e saída desse sistema. Ea representa a evaporação do canal e ∆s é a mudança na quantidade de água no canal. A recarga é então a perda do sistema como um dado residual da equação, o valor de recarga estimado é recarga potencial, pois não leva em conta as sucessivas evaporações sofridas pelo canal e outras perdas em subsuperfície.

Geralmente, os valores de recarga estimados por esse método atingem uma constante se a profundidade do lençol freático for duas vezes maior que a largura do canal, visto que nessa condição é a gravidade que rege o sistema. A escala temporal varia de escala eventual (minutos a horas) até períodos muito mais longos, provenientes da somatória dos eventos pontuais.

O método dos medidores de infiltração consiste na aplicação de cilindros no fundo dos leitos dos rios e lagos. Esses cilindros possuem um reservatório de água interno onde a infiltração é medida a partir da mudança no volume nesse reservatório. Esse é método é considerado barato e de fácil aplicação, entretanto, por ser um método de estimativa pontual é necessária uma ampla rede de amostragem (SCANLON et al. 2002).

A recarga subterrânea pode ser identificada por isótopos estáveis de oxigênios e hidrogênio. Por exemplo, as águas de um rio devem possuir menos isótopos estáveis em relação a precipitação se o mesmo possuir maior quantidade de água proveniente das nascentes. Esses traçadores isotópicos fornecem informações sobre as fontes da recarga, entretanto, dificilmente quantificam as taxas de recarga. A escala temporal vai de meses para áreas com fluxos altos à centenas de anos para regiões de baixo fluxo (HEALY, 2010).

A utilização do escoamento de base para estimar a recarga é baseada na abordagem do balanço hídrico, visto que a recarga pode ser estimada a partir da separação da hidrógrafa do canal neste método. O método considera a recarga em igual valor a descarga residual do balanço hídrico. Contudo, bombeamento, evapotranspiração e fluxo para aquíferos mais profundos devem ser analisados separadamente para diminuir as incertezas do método (SCANLON et al., 2002).

2.3.2.3. Métodos baseados em estudos da zona não saturada

Os métodos para estimar a recarga na zona não-saturada, em sua maioria, são utilizados em regiões áridas e semiáridas, onde essa zona é geralmente mais espessa quando comparada a outras regiões do planeta. (HEALY, 2010). Os métodos que são classificados para os estudos voltados para essa zona específica são: Lisímetros, Plano de Fluxo Zero (ZFP), Lei de Darcy, Traçadores Históricos e Ambientais, Traçadores aplicados e Modelagem numérica.

Lisímetros são receptáculos preenchidos com solo, com ou sem vegetação, hidrologicamente isolado do solo a sua volta para estimar os componentes do balanço hídrico. Todos os lisímetros são projetados para coletar os dados de drenagem. Os lisímetros de pesagem são geralmente utilizados para estimar evapotranspiração, eles são construídos com balanças de precisão capazes de medir pequenas mudanças no armazenamento do lisímetro. Nesse método, se a base do lisímetro não for mais

profunda que a zona da raiz, os fluxos de drenagem concebidos superestimam as taxas de recarga. Os lisímetros não são comumente utilizados para estimar a recarga pois são caros, difíceis de construir e necessitam muita manutenção (SCANLON et al., 2002).

O método do Plano do Fluxo Zero (ZFP) se baseia no plano onde o gradiente hidráulico vertical é zero. Esse plano representa a separação entre o movimento ascendente e descendente da água, ou seja, evaporação e infiltração ou recarga. O ZFP estima a recarga pontual e as escalas temporais podem ir de eventuais a anuais. A técnica ZFP é relativamente cara pelos equipamentos e instrumentos necessários e a quantidade de dados a ser coletado. O método é melhor aplicado quando em regiões com grandes oscilações no nível freático e o plano de fluxo zero seja menos profundo que o nível freático. (HEALY, 2010).

Segundo Scanlon et al. (2002), o método da Lei de Darcy se baseia na Equação 3 para estimar a recarga:

$$R = -K(\theta)\frac{dH}{dz} = -K(\theta)\frac{d}{dz}(h+z) \quad (3)$$
$$= -K(\theta)\left(\frac{dh}{dz}+1\right)$$

Onde K(θ) é a condutividade hidráulica no conteúdo de água ambiente. H é a carga total, h é a carga de pressão matricial e z a elevação do terreno.

A aplicação do método necessita a medição e estimativa do gradiente de carga total vertical e a condutividade hidráulica da zona não saturada. O método fornece a estimativa de recarga pontual, por amplas escalas de tempo, entretanto, se aplicado em profundidades significantes em zonas vadosas, o mesmo pode representar uma área maior.

Os traçadores podem ser divididos em químicos ou isotópicos. A infiltração, precipitação e irrigação levam esses traçadores para as áreas mais profundas, sendo assim, possível estimar as taxas de recarga e os fluxos preferenciais da região. Alguns exemplos de traçadores comumente utilizados são o Brometo, ^{3}H e os corantes visíveis. A distribuição vertical dos traçadores é utilizada para estimar as taxas de velocidade e recarga através pela equação 4:

$$R = v\theta = \frac{\Delta z}{\Delta t}\theta \quad (4)$$

Onde ∆z é o pico de profundidade do traçador, ∆t é o tempo decorrente da aplicação até a amostragem e θ é a quantidade volumétrica de água. (HEALY, 2010). Os traçadores também podem ser divididos em históricos e ambientais.

Os traçadores históricos são provenientes das atividades humanas ou eventos passados, como derramamento de contaminante ou testes nucleares, e são utilizados para estimar a recarga nos últimos 70 anos. A recarga a partir desses traçadores pode ser estimada pela equação 4. Teoricamente, esta técnica poderia ser utilizada para taxas de recarga maiores que 50 mm/ano, entretanto, a dificuldade em se obter amostras de solo a grandes profundidades para se estimar o pico do traçador, torna tal técnica impraticável em maiores taxas de recarga anuais (SCANLON et al., 2002).

Traçadores ambientais são produzidos naturalmente na atmosfera terrestre e podem ser utilizados para se estimar recarga. Um exemplo de traçador ambiental é o cloreto. Quando o escoamento superficial é zero, a massa de cloreto pode ser definida pela Equação 5:

$$PC_p = DC_{uz} \quad D = \frac{PC_p}{C_{uz}} \quad (5)$$

Onde P é a precipitação, C_p é a concentração de cloreto na precipitação, D é a drenagem e C_{uz} é a concentração de cloreto na drenagem da zona não saturada. As concentrações de cloreto são geralmente maiores na zona da raiz por causa da evapotranspiração e se mantém constante em profundidade. A técnica do Balanço de Cloreto é geralmente utilizada para estimar taxas de recarga pontuais. As escalas temporais podem ir de décadas a milhares de anos (HEALY, 2010).

2.3.2.4. Métodos baseados em estudos da zona saturada

Os métodos baseados em estudos sobre a zona saturada abrangem amplas áreas e geralmente preveem recarga atual, visto que a água precipitada atinge o lençol freático. (SCANLON et al., 2002).

Os métodos para os estudos voltados a zona saturada são: Variação do Nível Freático, Lei de Darcy, Traçadores Históricos, Traçadores Ambientais. Estes métodos já abordados anteriormente, possuem uma abordagem diferente quando se trata da zona não saturada. Outro método que entra nessa seção é o Método da Variação da Superfície Livre (WTF) que será explicado na próxima seção e é o objeto de estudo do presente trabalho.

A lei de Darcy é utilizada para estimar o fluxo por uma seção transversal de um aquífero confinado ou não confinado. A recarga (R) então pode ser obtida pela Equação 6:

$$qA = RS \tag{6}$$

Onde q é o escoamento em zona não saturada, A é o fluxo volumétrico na seção transversal do aquífero e S é a área da superfície que contribui ao fluxo. As estimativas possuem altas incertezas por causa da variabilidade da condutividade hidráulica. A aplicabilidade de condutividades hidráulicas medidas em laboratório na escala de campo é questionável. (HEALY,2010).

Os traçadores históricos podem ser utilizados para ambas as zonas saturadas e não saturadas. Para regiões mais profundas, uma técnica utilizada é a datação da água subterrânea para estimar a recarga. A datação da água pode ser obtida pela concentração de CFC em comparação ao CFC presente na precipitação ou pela concentração de ^{3}H, conforme Equação 7:

$$t = \frac{l}{\lambda}\ln[l + \frac{^{3}He_{trit}}{^{3}H} \tag{7}$$

Onde λ é a constante de decaimento ($\ln 2/t^{1/2}$). A equação assume que o sistema é fechado, ou seja, não permite a fuga de ^{3}He. Entretanto, em aquíferos não confinados, as idades das águas subterrâneas aumentam com a profundidade e essa taxa de decaimento depende da geometria, porosidade e taxa de recarga do aquífero. Nestes casos, CFCs e concentrações de $^{3}H/^{3}He$ podem ser utilizadas para estimar idades de até 50 anos. Para valores maiores, entre 200 e 20000 anos, pode –se utilizar C14. (SCANLON et al., 2002). A recarga das águas subterrâneas pode ser estimada

a partir das velocidades do fluxo horizontal, que por sua vez, podem ser estimadas pelo decaimento radioativo de C14 e Cl36 em aquíferos confinados, Equação 8:

$$R = v\eta\frac{A}{S} \quad (8)$$

Onde v é velocidade do fluxo, η é a porosidade, *A* é a área da seção transversal do aquífero confinado e S é a área de recarga do aquífero. Existem muitas restrições quanto ao uso desses traçadores para datar águas subterrâneas visto que em quantidades elevadas, os mesmos podem ser nocivos. O balanço de massa de cloreto também pode ser utilizado para estudos na zona saturada, e é uma possibilidade de aplicação de traçadores ambientais (HEALY, 2010).

2.3.2.5. Método da Variação da superfície Livre (*Water Table Fluctuation*)

O método da Variação da superfície livre (*Water Table Fluctuation Method* – WTF) é um método amplamente utilizado na área acadêmica para se estimar dados de recarga das águas subterrâneas. Em seu trabalho, Healy em 2010, traça um histórico da utilização do método, o método começa a ser utilizado no começo da década de 20 do século XX, inúmeros trabalhos foram feitos, dando destaque àqueles que utilizaram as oscilações diurnas para determinar a evapotranspiração da área estudada e aqueles que foram elaborados para estimar ETgw (evapotranspiração das águas subterrâneas).

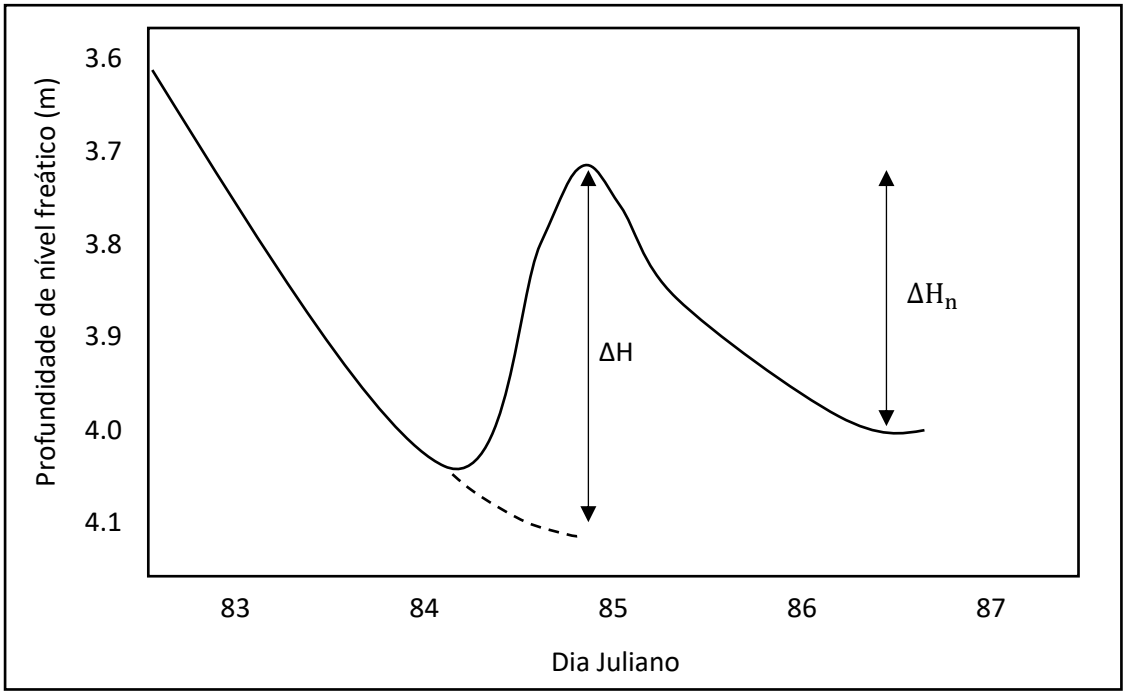
Esse método parte da premissa que a oscilação do nível piezométrico dos aquífero não confinados está diretamente relacionado às quantidades de água que atingem esse nível (SCANLON et al., 2002). Healy (2010) parte da afirmação acima e do pressuposto de que a quantidade de água disponível em uma coluna de uma unidade de área é igual ao rendimento específico vezes a altura de água na coluna. Assim, a partir de tais conceitos é possível desenvolver a equação fundamental do Método da Variação da superfície livre, Equação 9:

$$R=Sy\ (\Delta H/\Delta t) \quad (9)$$

Onde R é a recarga do poço observado, Sy é o rendimento específico do aquífero, H é a altura do nível freático analisado e t é o tempo de ocorrência da recarga. O ∆H

é obtido a partir da diferença entre o pico de ascensão do nível freático e a base da linha extrapolada da última curva de recessão (Figura 3), este valor é então inserido a fórmula acima, onde obtém-se o valor da recarga parcial, a soma das recargas é o que determina a recarga total para o período analisado. (HEALY,2010).

Figura 3 - Hidrógrafa hipotética do nível freático, mostrando a diferença entre o pico e a linha extrapolada.



Fonte: LUCAS (2012) adaptado de Healy (2010).

A linha extrapolada da curva de recessão antecedente representa o traçado que o nível piezométrico teria seguido se não houvesse a elevação do mesmo em decorrência da precipitação. A linha pode ser desenhada manualmente, um processo que denota tempo e tende à subjetividade, mas que acomoda certa intuição hidrológica. Entretanto, no panorama atual existe tecnologia suficiente para ajudar o autor a cria-la digitalmente. Essas técnicas automáticas são eficientes com períodos maiores de análise e reduzem a subjetividade do método.

Segundo Scanlon et al. (2002) é um método simples e fácil de se utilizar, visto que a presença de fluxo preferencial não restringe o método, pois considera o movimento da água pela zona não saturada.

Ainda é possível dentro do método, encontrar os valores de armazenamento subterrâneo, substituindo-se na equação: o ΔH por ΔHn, que representa a carga

hidráulica no início e no final de cada período analisado, a diferença encontrada entre a recarga e a variação do armazenamento subterrâneo está na soma da evaporação das águas subterrâneas, o fluxo de base e o fluxo em sub-superficie na área analisada. (HEALY,2010).

O método possui algumas limitações, as taxas de recarga podem variar substancialmente em áreas amplas por inúmeros fatores, como diferença na elevação do terreno, geologia, declividade, vegetação entre outros. Assim como, nem todas as elevações no nível freático representam recarga, esse aspecto pode ser encontrado em locais onde as taxas de recarga e descarga do aquífero são próximas. As incertezas quanto ao método ainda podem vir da dificuldade em estimar o valor do rendimento especifico, pois o mesmo pode variar em relação a profundidade do nível freático, e em longos períodos, em resposta ao histórico da oscilação desse nível. (DELIN et al., 2007).

Além dessas, o método ainda assume que a recarga de águas subterrâneas é um evento pontual, não levando em conta o fluxo lento e estável que pode vir a ocorrer em algumas áreas com a zona não saturada mais grossa.

O método da variação da superfície livre tem melhor desempenho quando aplicado em períodos de tempo curto em aquíferos rasos, porém o método pode ser aplicado na análise da magnitude na variação do nível freático em resposta ao clima ou uso da terra, visto que a flutuação do nível piezométrico é a resposta à recarga média (SCANLON et al., 2002).

2.4. Modelo Conceitual de Estudo em Hidrogeologia

O pesquisador que se coloca na posição de estudioso sobre as águas subterrâneas deve se atentar ao importante passo a se tomar em sua pesquisa: a elaboração de um modelo conceitual dos processos da recarga (HEALY, 2010). Esse modelo conceitual hidrogeológico que deve ser construído é a descrição de todos os fatores naturais e antropogênicos em superfície que contribuem para a dinâmica das águas subterrâneas. (KRESIC; MILKSZEWSKI, 2013). Para que seja elaborada uma análise para uma área ainda desconhecida academicamente é necessária que se reúna os dados e pontos de controle do clima, geomorfologia, geologia, hidrologia e recarga (HEALY, 2010).

Assim, o modelo conceitual hidrogeológico é construído com o objetivo de fundamentar o conhecimento dos controles hidrogeológicos analisados com as variações naturais das águas subterrâneas de uma área. Esses modelos nos permitem alocar novos poços de monitoramento onde o modelo se torna mais deficiente (DINIZ FILHO et al., 2008).

A modelagem dos recursos hídricos pode conter inúmeras formas de incerteza, por três fatores mais significante dentre outros: primeiro, existem vários tipos de intereção entre as águas subterrâneas e superficiais, segundo, o aquífero não obedece aos limites da bacia hidrográfica, e sim as bacias sedimentares e cristalinos, e por fim, existem incertezas nos dados adquiridos, como nas medições, aproximações, estimativas ou acurácia de sensores (MANZIONE, 2014). Ao serem analisados em âmbito espacial, a forma como esses dados são tratados podem ser fonte de propagação de erros e incertezas (HEUVELINK, 1998). Entender essas fontes de erros contribuem para que o analista obtenha um melhor uso da informação espacial e para que o mesmo considere os diferentes processos na tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos e nos estudos para sistemas agrícolas e florestais.

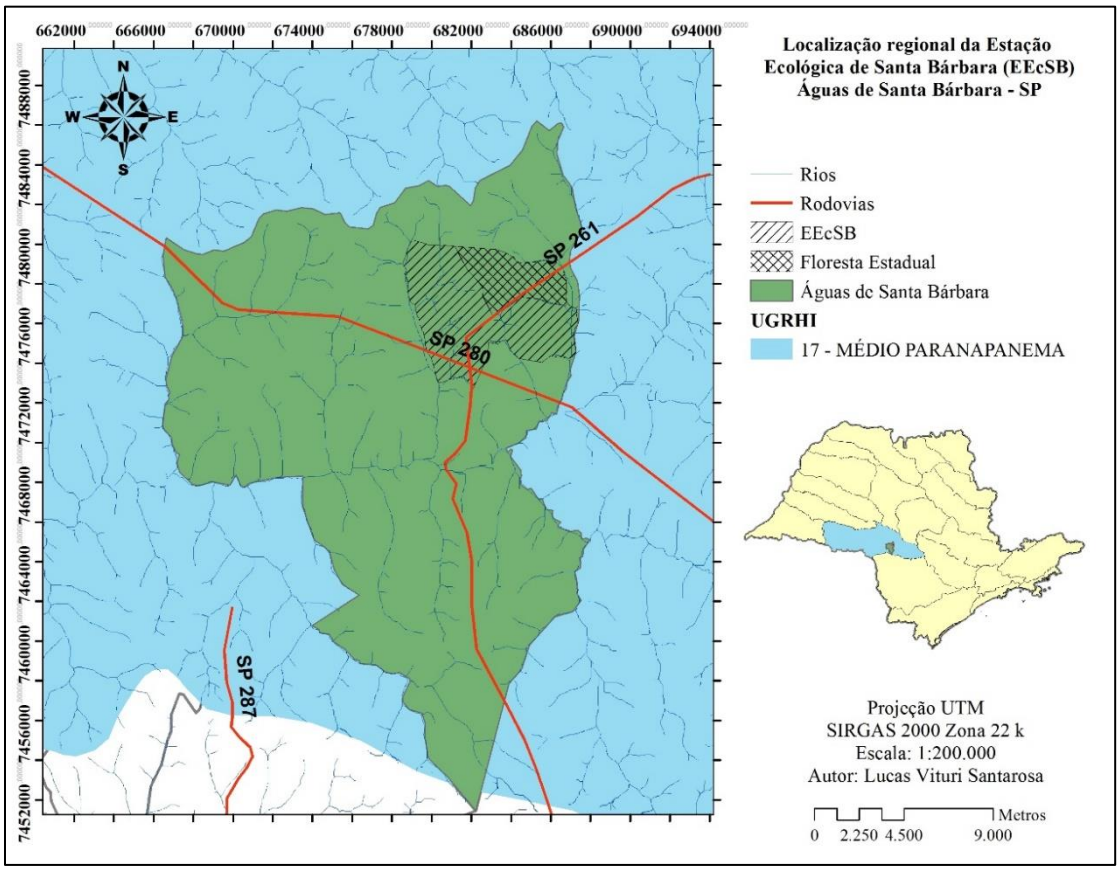
Para a melhor análise do modelo conceitual de recarga é necessário entender a taxa, a ocorrência temporal e a localização de cada ponto de recarga. Os estudos desses fatores são importantes para a análise da contaminação de águas subterrâneas, porque a dinâmica dos contaminantes se comporta como a recarga, e está relacionado ao fornecimento e quantidade das reservas subterrâneas (HEALY, 2010).

3 Material e Métodos

3.1. Área de estudo

A Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) compreende uma área de 2.712 hectares, ou 27,12 km², situada no município de Águas de Santa Bárbara, sudoeste do estado de São Paulo (Figura 4). A área de estudo pertence à Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), Médio Paranapanema. E a rodovia SP-280, Castelo Branco se destaca na região, pois liga a capital ao sudoeste do Estado.

Figura 4 - Área da Estação Ecológica de Santa Bárbara e da Floresta Estadual no município de Águas de Santa Bárbara - SP



Fonte: GONÇALVES et al. (2015).

O Plano Estadual dos Recursos Hídricos no estado de São Paulo, sancionado na Lei Estadual n°9.034 de 1994 estabelece a divisão hidrográfica do estado. O estado é então dividido em 22 Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHI), a fim de auxiliar o melhor gerenciamento desses recursos.

Segundo o plano de manejo da área (MELO; DURIGAN, 2011), o clima da região onde se encontra a Estação Ecológica é o Cwa (quente e úmido com inverno seco), pela classificação de Köppen.

A área de estudo possui dois biomas característicos: Cerrado e Mata Atlântica de interior (Floresta Estacional Semidecidual). Na região ainda é possível encontrar reflorestamentos comerciais, como o Pinus e o Eucalipto. (MELO;DURIGAN, 2011). A geomorfologia da região constitui-se a partir de um relevo colinoso com baixas declividades. A área está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, sobre o Grupo Bauru e prevalecem os Latossolos Vermelhos, mas ainda são encontrados Argissolos Vermelho-Amarelos e Nitossolos vermelhos (MELO; DURIGAN, 2011).

3.2. Monitoramento dos parâmetros agrometeorológicos

A Figura 5 mostra a rede de drenagem presente na área de trabalho e a localização dos poços que foram estudados, distribuídos nas Bacias do Boi, Bugre, Guarantã, Passarinho e Santana. Foram analisados 8 poços na Bacia do Boi, 12 poços na Bacia do Bugre, 10 na Bacia do Guarantã, 3 poços na bacia do Passarinho e 17 poços na Bacia do Santana, totalizando 50 poços no estudo, que foram perfurados como na Figura 6.

Figura 5 - Rede de drenagem e poços analisados na área de estudo

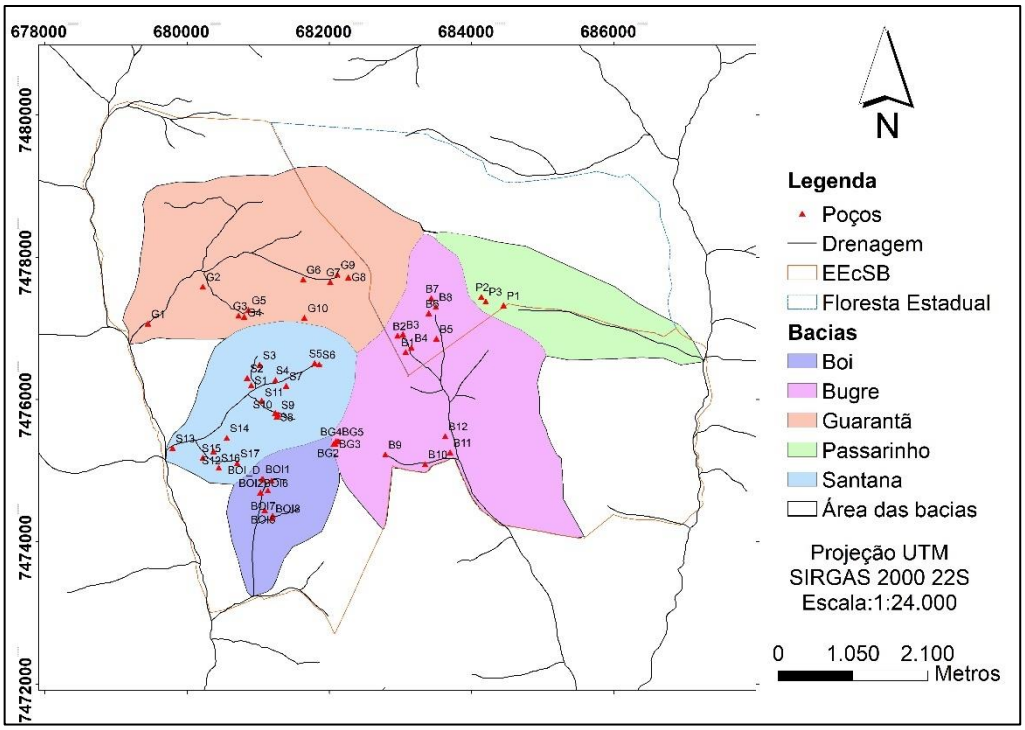
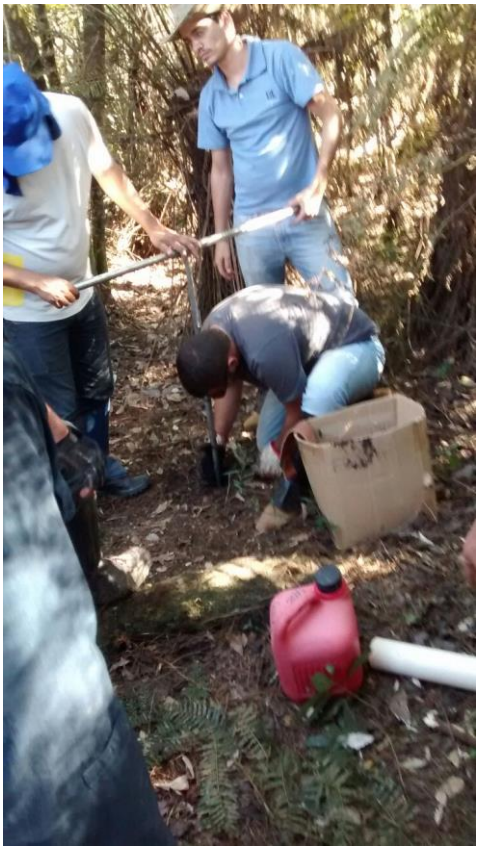
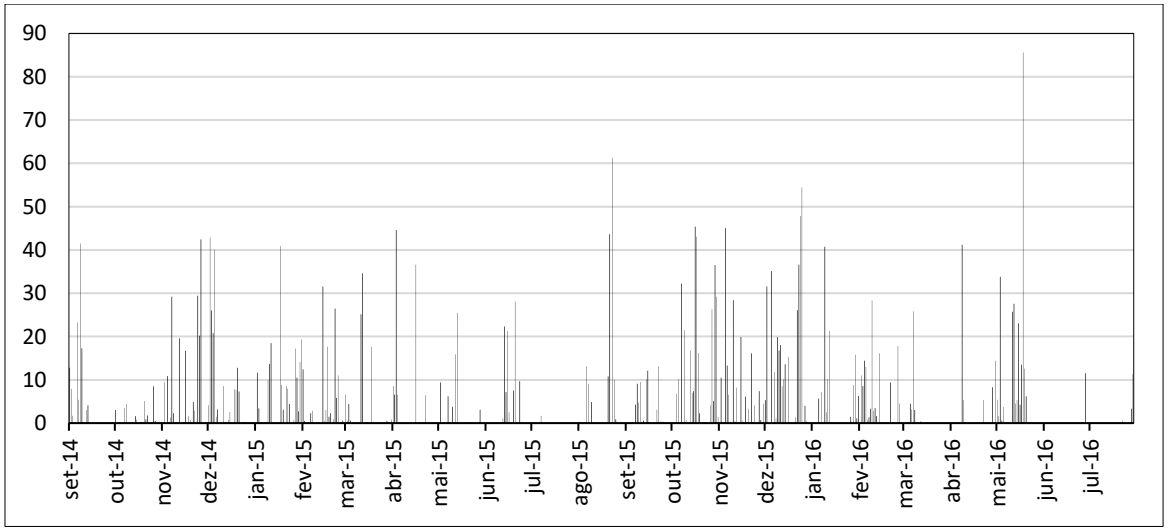


Figura 6 – Método de perfuração dos poços



A área de estudo possui uma estação climatológica automática, que fornece diversos dados climatológicos, como Precipitação, Temperatura do ar e Evapotranspiração potencial. A Figura 7 mostra a precipitação durante o período analisado.

Figura 7 - Precipitação na área durante o período todo analisado



Observa-se que no segundo ano hidrológico há uma elevação nos valores extremos, aumentando a quantidade de precipitação de um ano para o outro. No Ano Hidrológico 2014-2015 a precipitação total foi de 1239,50 mm e 1678,80 mm para o Ano Hidrológico 2015-2016, sendo um acréscimo de 35% na precipitação anual.

3.2.1. Monitoramento da oscilação do nível freático

O nível freático é considerado como a linha de água sob a superfície que pode oscilar, elevando-se ou rebaixando-se, contribuindo para a espessura da zona não saturada. Assim, quanto mais baixo o nível freático, mais espessa a zona não saturada, aceito também para o inverso, quanto mais alto o nível freático, menor a espessura da zona saturada.

Os poços foram cavados a partir de um trado para perfuração de solo e podem chegar a medir até 8 metros de profundidade. Após a perfuração, foi colocado um tubo de PVC de ½ pol. com o tamanho da perfuração executada mais uma quantidade que fica acima da superfície, servindo como a boca do poço. Do outro lado do tubo foi acoplado um piezômetro que permitia a estrada de água até atingir o nível estático do ambiente. As medições então foram feitas, a partir de uma fita métrica com uma ponteira possuindo um sensor de umidade, em intervalos regulares de 15 dias a cada amostragem para cada poço instalado.

3.3. Mapeamento da recarga

Os métodos para mensurar os dados obtidos eram: calcular primeiro/interpolar depois ou interpolar primeiro/calcular depois. O primeiro método consiste em calcular pontualmente e cada uma desses pontos vão formar a malha amostral que vai ser interpolada posteriormente, o segundo método refere-se a interpolar os dados brutos e depois calcular o resultado a partir de malhas previamente interpoladas.

O mapeamento da recarga foi realizado a partir da técnica calcular primeiro / interpolar depois (calculate first / interpolate later). Outros autores se utilizaram dessa técnica, como Stein et al. (1991) que analisou a umidade no solo e interpolou os dados obtidos por cokrigagem, em Becchini et al., (2000), os autores analisaram os dados de radiação solar que após estimados pontualmente foram interpolados e simulados.

O modelo utilizado na área consistiu em calcular pontualmente o método da variação da superfície livre para cada poço (ponto amostral) e essa rede de dados foi posteriormente interpolada pelo método do inverso do quadrado da distância.

O Inverso do quadrado da distância é um método determinístico onde os valores assinalados para os pontos não conhecidos são obtidos a partir da média ponderada dos valores conhecidos. As Equações 10, 11 e 12 sintetizam como o ponto desconhecido é estimado:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (10)$$

$$Pm_i = \frac{\sum_{j=1}^{NP} \frac{P_j}{(d_{ij})^b}}{\sum_{j=1}^{NP} \frac{1}{(d_{ij})^b}} \quad (11)$$

$$Pm = \frac{\sum_{i=1}^{NC} Pm_i}{NC} \quad (12)$$

Onde b é uma potência normalmente próxima de 2 no método do inverso do quadrado da distância. O método é conhecido no meio acadêmico ambiental e foi utilizado em Mello et al. (2003).

3.3.1. Estimativa da recarga direta dos poços de monitoramento

Os dados obtidos a partir dos poços de monitoramento foram organizados em tabelas e interpolados para se obter os valores diários de oscilação do nível freático, assim foi possível estimar a recarga a partir do Método da Variação da Superfície Livre. A equação utilizada para a interpolação dos dados foi a seguinte para cada intervalo de dias a ser estimado:

$$VE = \left(\frac{VF_i - VI_i}{ND+1}\right) * NS + VI_i \quad (13)$$

Onde *VE* é o valor a ser estimado dentro do intervalo, VFi é o valor final do intervalo, VIi é o valor inicial do intervalo, ND é o número de dias do intervalo, NS é o número do dia na sequência analisada, ou seja, se analisados 15 dias, a sequências

de dias vai de 1 a 15, assim se necessário estimar o 6° dia da sequência, o NS é 6. Com isso, foi possível a obtenção dos valores diários. Após a utilização desses dados com a equação do método, foi possível estimar a recarga pontual para cada poço para os anos de 2014 a 2016.

Os dados que foram obtidos no período de dois anos hidrológicos, ou seja, iniciando em setembro e finalizando em agosto, compuseram uma série temporal. Os anos hidrológicos estudados foram 2014-2015 e 2015-2016. Essas séries temporais, ou também chamadas de séries históricas, são observações com intervalos definidos, e período total determinado. Elas auxiliam no entendimento da dinâmica do fenômeno geográfico a ser analisado e possibilitam a criação de cenários futuros. Essas séries apresentam características particulares, como tendência, ciclo, sazonalidade e ruído (erro ou incerteza) (SOLDERA, 2013).

A tendência presente na série temporal é o item que valida a direção do deslocamento da mesma, o ciclo é a repetição aparente encontrada no período estudado, a sazonalidade denota flutuações de mesmo comprimento periódicas na série e enfim, o erro é que aquilo que não é explicado pelos outros fatores da série. Portanto, a partir das séries temporais é possível estabelecer modelos determinísticos ou estocásticos, esses modelos podem abranger a característica temporal do período como um todo ou nas frequências que são observadas. Assim é possível investigar o ponto gerador da série, quais os possíveis dados futuros, descrever as características apresentadas pelo fenômeno através de gráficos e descobrir periodicidades relevantes na amostragem proposta (BEZERRA, 2006).

4 Resultados e Discussões

4.1. Recarga estimada dos poços de monitoramento

Assim, podemos observar nas figuras 8, 9, 10, 11 e 12 a representação das oscilações freáticas e as precipitações nas bacias presentes na área.

Figura 8 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G1 na Bacia do Guarantã

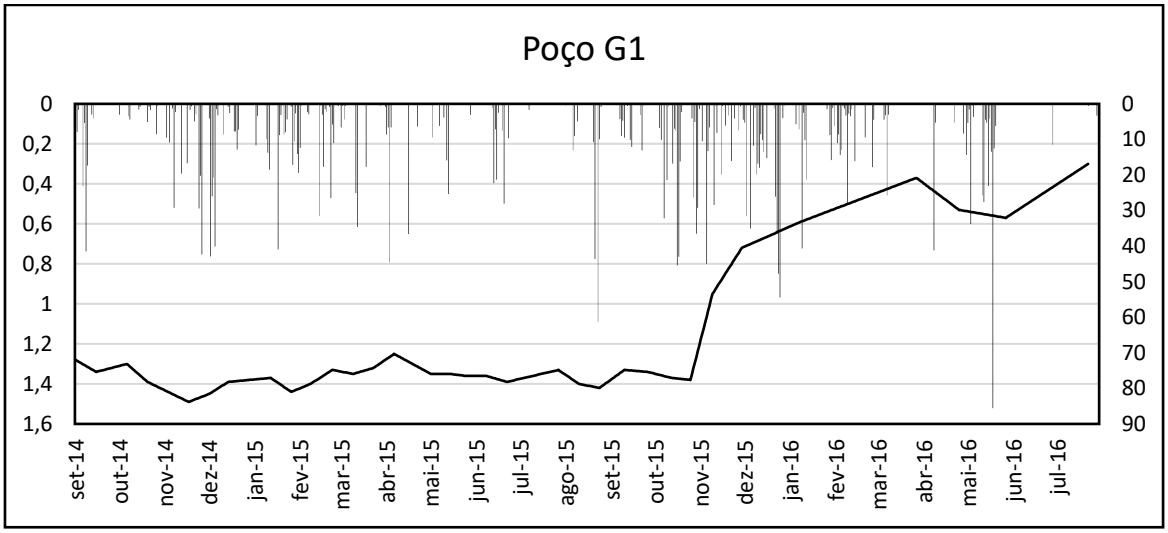


Figura 9 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço P1 na Bacia do Passarinho

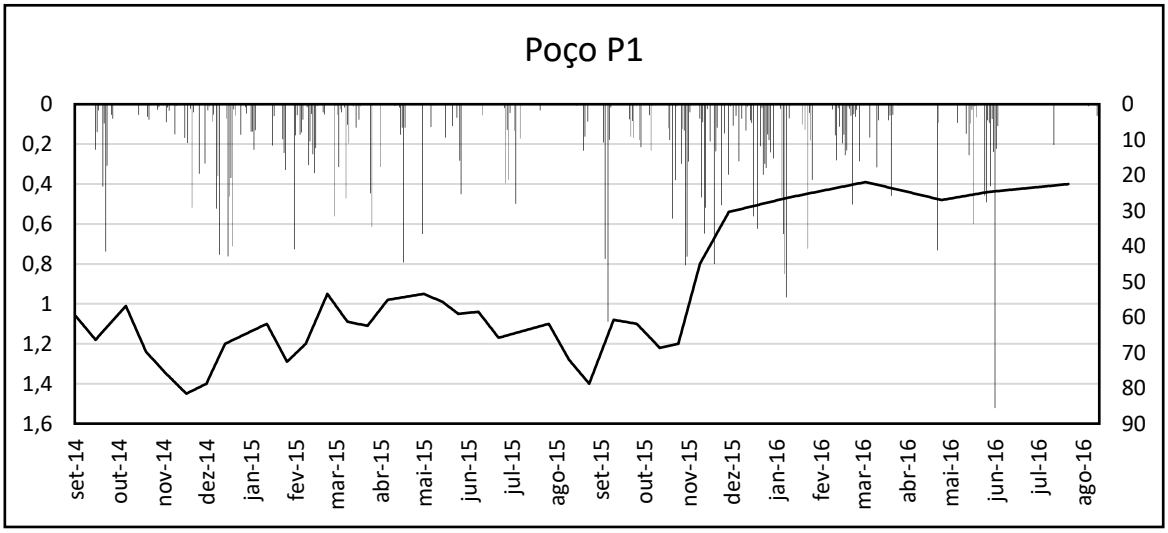


Figura 10 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B1 na Bacia do Bugre

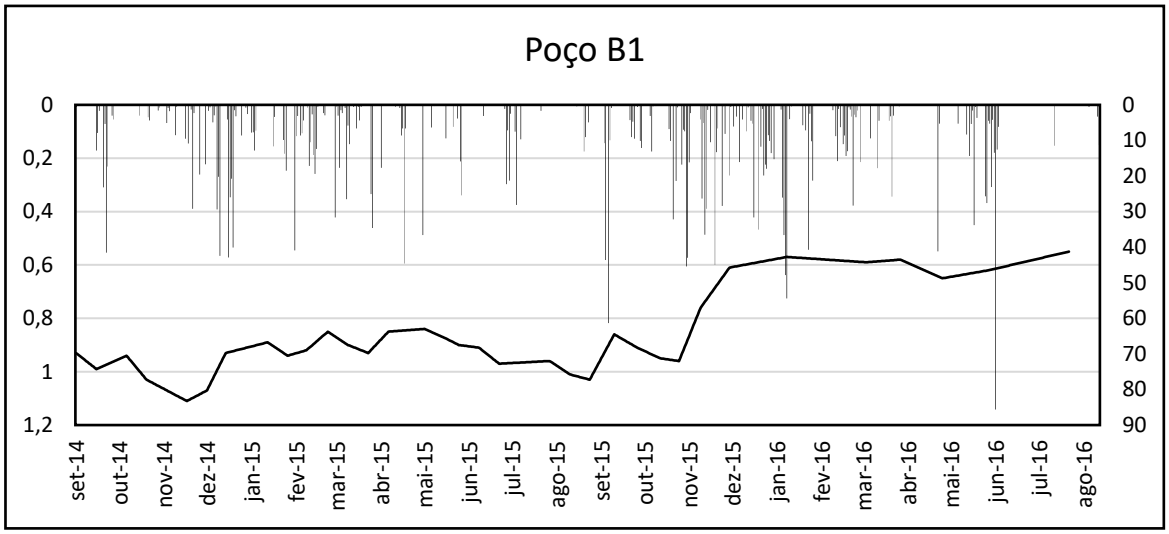


Figura 11 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S2 na Bacia do Santana

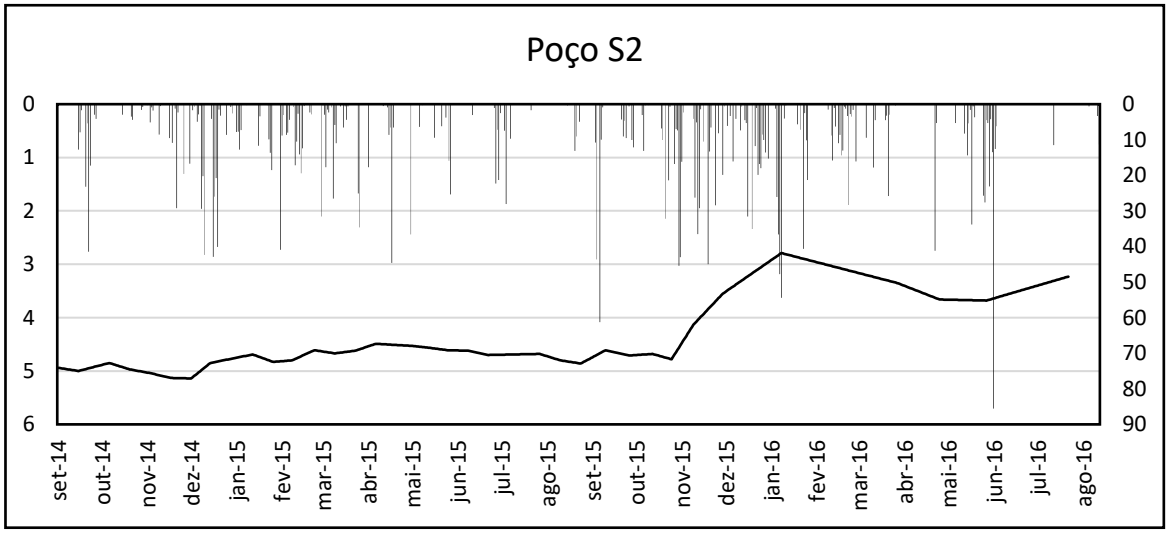
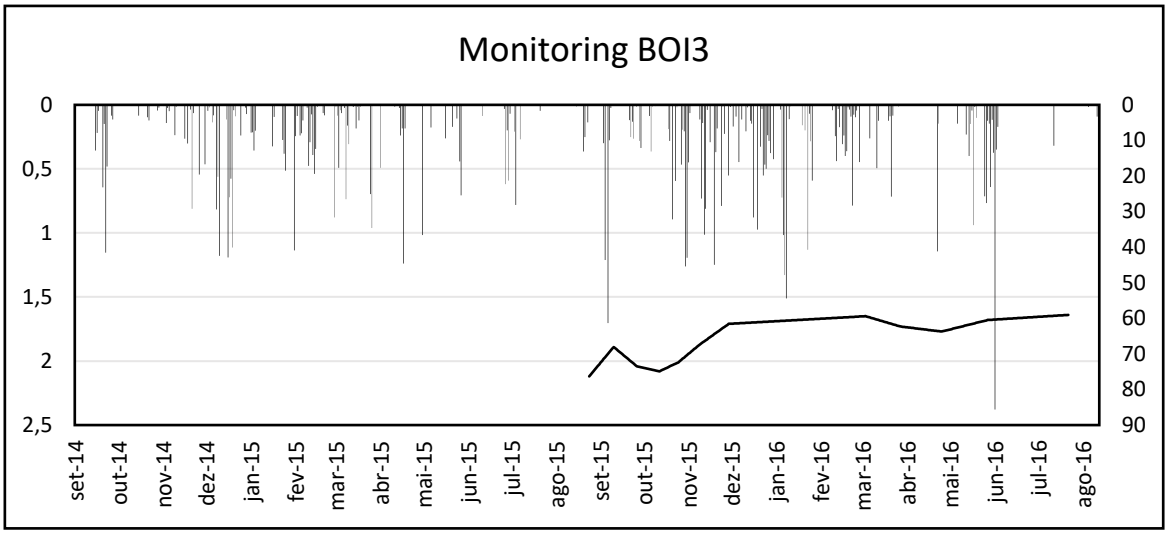


Figura 12 - Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI3 na Bacia do Boi



Observa-se nas figuras 8, 9, 10, 11 e 12 um padrão para os poços, nos quais há uma elevação do nível freático ao iniciar o segundo ano hidrológico analisado. O método da variação da superfície livre foi aplicado para cada série temporal de cada poço analisado na área de estudo, gerando um gráfico com os valores do nível freático e da precipitação do período, e um gráfico com os valores do nível freático, as linhas extrapoladas para cada uma das recargas estimadas e os valores de recarga, conforme apresentado nas Figuras 13, 14, 15, 16 e 17 que demonstram isso para um poço de cada bacia da área estudada, sendo as bacias do Passarinho, Guarantã, Bugre, Santana e Boi, respectivamente.

Figura 13 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço P1 na Bacia do Passarinho

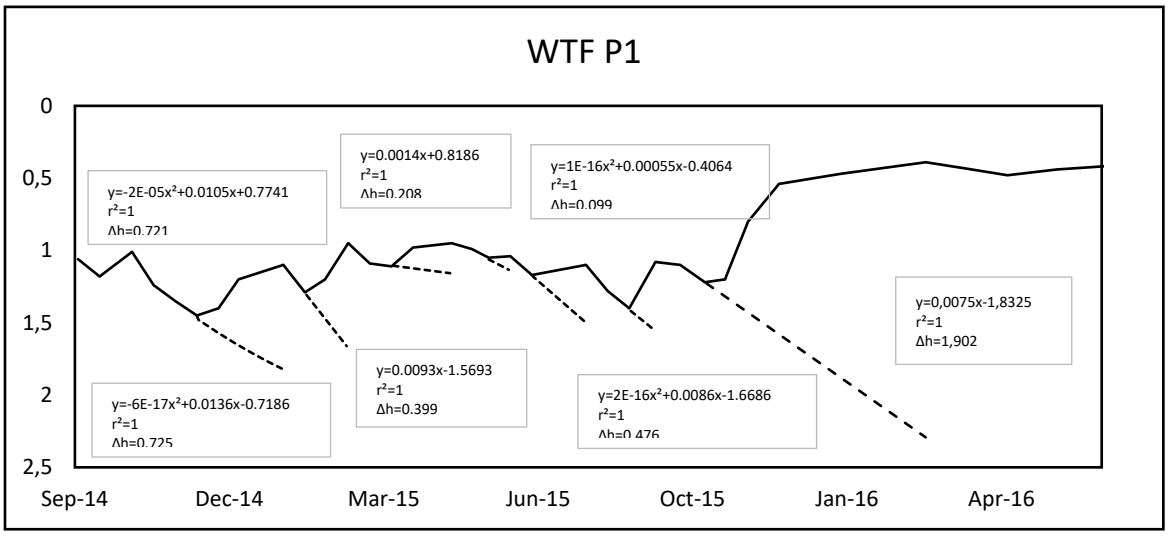


Figura 14 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço G1 na Bacia do Guarantã

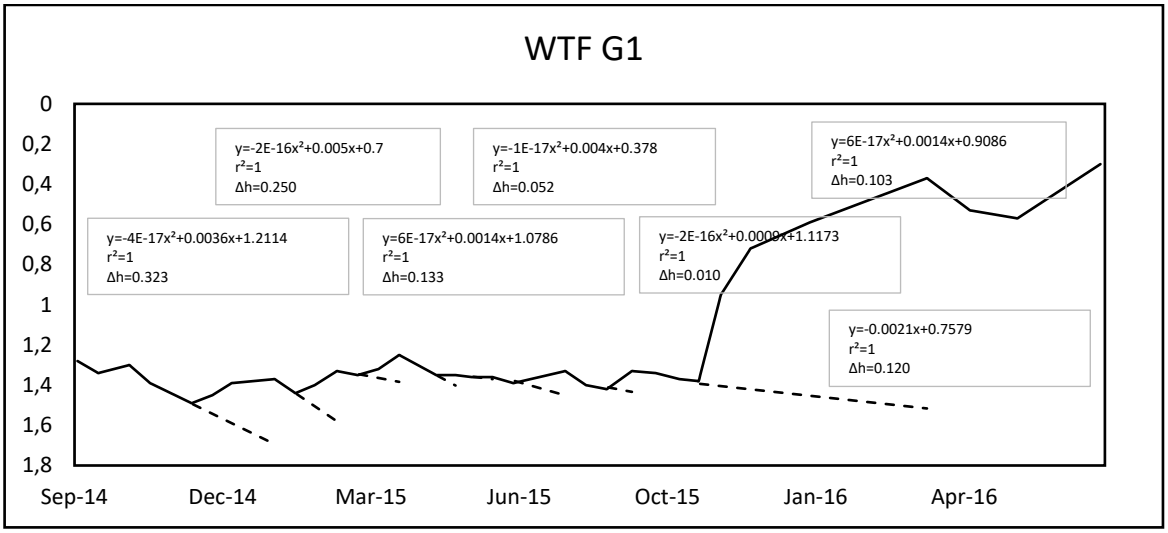


Figura 15 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço B1 na Bacia do Bugre

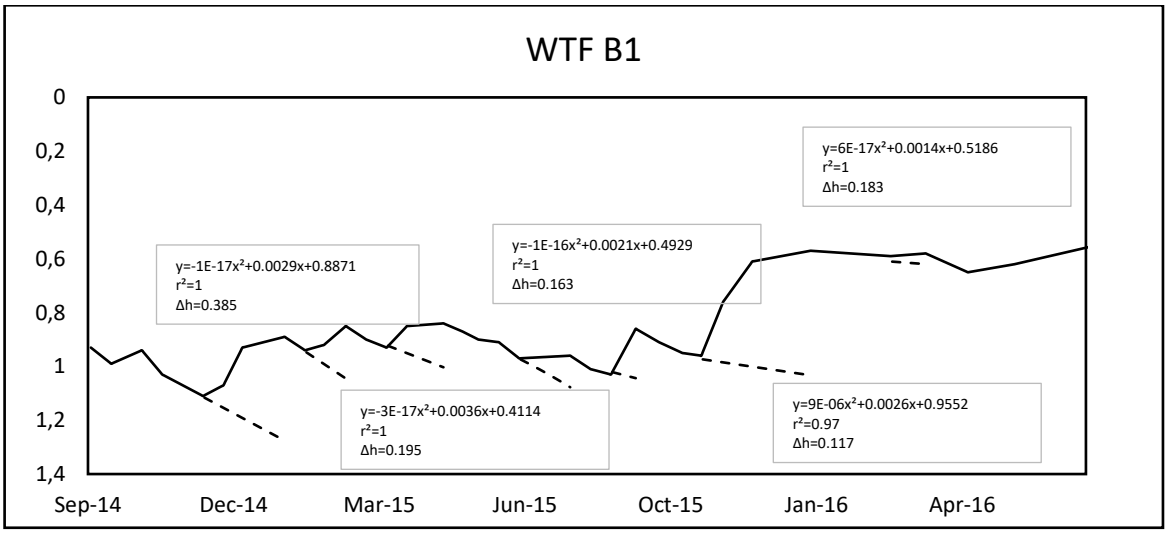


Figura 16 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço S2 na Bacia do Santana

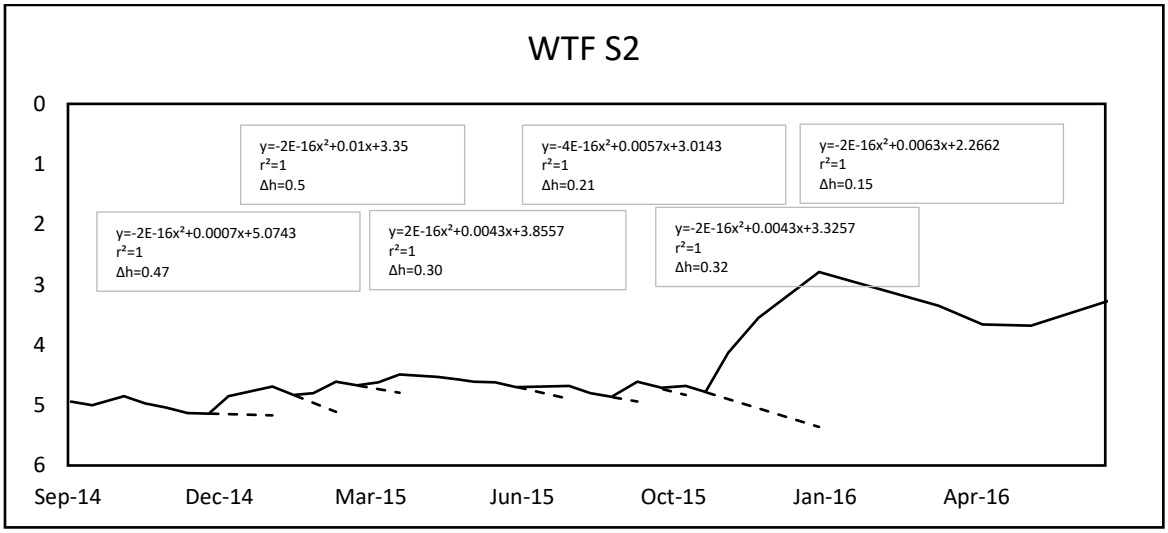
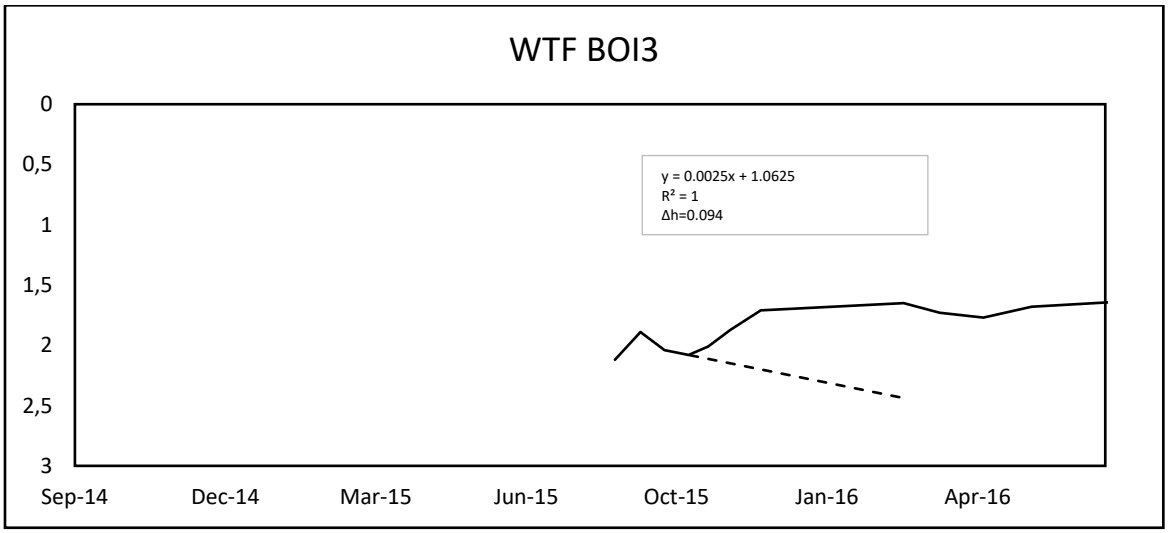


Figura 17 – Aplicação do método da variação da superfície livre para o poço S2 na Bacia do Santana



Os dados obtidos podem ser observados nas tabelas seguintes. A Tabela 1 representa os dados de recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Passarinho. As Tabelas 2, 3, 4 e 5 representam, respectivamente, os dados de recarga estimados para as Bacias do Guarantã, Bugre, Santana e Boi.

Tabela 1 – Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Passarinho

POÇO	X	Y	2014-2015 (mm)	2015-2016 (mm)
P1	684449,6934	7477322,671	258,54	285,20
P2	684135,8791	7477439,45	117,68	503,40
P3	684198,7931	7477377,773	195,00	459,30

Tabela 2 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Guarantã

POÇO	X	Y	2014-2015 (mm)	2015-2016 (mm)
G1	679455.386	7477065.832	106,50	149,80
G2	680224.4425	7477584.988	228,00	305,30
G3	680727.8645	7477178.086	239,00	277,80
G4	680805.7172	7477162.761	262,00	39,80
G5	680865.3709	7477257.294	289,00	407,70
G6	681634.4433	7477686.675	231,70	27,00
G7	682015.9679	7477648.878	286,60	198,80
G8	682269.3544	7477714.501	240,00	341,60
G9	682114.7911	7477755.12	136,90	234,40
G10	681652.3168	7477146.998	ND	Sem Recarga

Tabela 3 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Bugre

POÇO	X	Y	2014-2015 (mm)	2015-2016 (mm)
B1	683073,0293	7476665,982	103,20	82,00
B2	682959,7873	7476896,603	89,10	160,08
B3	683036,0384	7476918,941	102,00	137,50
B4	683155,9205	7476728,109	171,10	150,20
B5	683506,5647	7476855,664	201,10	186,72
B6	683400,0003	7477213,572	222,70	268,08
B7	683434,3571	7477422,476	393,20	278,04
B8	683498,6171	7477302,088	253,40	222,00
B9	682788,6587	7475230,315	ND	261,00
B10	683347,3507	7475092,991	ND	55,00
B11	683697,5063	7475259,308	ND	152,60
B12	683631,157	7475485,934	ND	Sem Recarga

Tabela 4 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Santana

POÇO	X	Y	2014-2015 (mm)	2015-2016 (mm)
S1	680906,1546	7476200,256	285,40	404,10
S2	680847,855	7476305,056	179,50	365,70
S3	681024,5676	7476486,792	196,08	261,70
S4	681244,8362	7476274,844	182,64	138,70
S5	681795,9362	7476510,789	172,50	207,40
S6	681858,346	7476492,321	184,30	256,76
S7	681394,776	7476192,203	180,10	163,60
S8	681266,4371	7475762,921	231,20	390,60
S9	681281,1265	7475789,325	199,90	300,90
S10	681242,3826	7475811,938	128.70	339,10
S11	681052,4684	7475985,87	404,50	257,70
S12	680374,5897	7475274,078	331,20	414,90
S13	679801,2337	7475319,653	163,44	349,40
S14	680562,3666	7475463,882	ND	834,90
S15	680225,4616	7475182,822	ND	235,80
S16	680449,5814	7475045,152	ND	487,90
S17	680708,8188	7475106,408	ND	519,10

Tabela 5 - Estimativa de Recarga estimados para a Bacia do Ribeirão do Boi.

POÇO	X	Y	2014-2015 (mm)	2015-2016 (mm)
BOI_D	681074,1435	7474878,222	ND	486,40
BOI1	681057,3913	7474885,289	ND	284,60
BOI2	681036,9351	7474694,046	ND	227,70
BOI3	681189,8651	7474862,774	ND	94,40
BOI4	681139,6619	7474725,269	ND	276,90
BOI5	681094,8493	7474446,049	ND	215,50
BOI6	681032,5054	7474692,770	ND	77,04
BOI7	681207,0875	7474371,391	ND	190.08
BOI8	681201,3851	7474332,364	ND	222,00

Além das bacias citadas acima, a área ainda possui o termo BG que que representa os poços que não apresentaram recarga no período analisado. Os valores ND nas tabelas acima representam período onde não houve dados, pela inexistência dos poços no período, já o valor onde se observa “Sem Recarga” não houve recarga, entretanto há a existência de dados de oscilação.

A Tabela 6 sumariza os valores de recarga encontrados em uma análise estatística com os valores de Média, Mediana, Quartis, Máximos, Mínimos, Desvios Padrão, Variância, Assimetria e Curtose.

Tabela 6 – Análise estatística da recarga estimada

	2014-2015	2015-2016	2014-2016
Média	211,13	276,33	250.09
Mediana	199,90	261,00	231.45
Quartil 1 (25%)	171,10	186,72	171.45
Quartil 3 (75%)	253,40	349,40	288.63
Máximo	404,50	834,90	834.90
Mínimo	89,10	27,00	27.00
Desvio Padrão	77,43	146,05	126.66
Variância	5994,88	21330,76	16043.84
Assimetria	0,65	1,20	1.48
Curtose	0,48	3,15	4,57

A média para todos os valores é de 250,09 mm, com a maior parte dos valores variando entre 171,45 mm a 288,63 mm. Entretanto é possível analisar alguns valores que saem do padrão, sendo os extremos, 27 mm e 834,9 mm.

4.2. Análise do Ano Hidrológico 2014-2015

O valor médio de recarga estimado para esse Biênio é de 211,13 mm. A precipitação média para o mesmo período foi de 1239,5 mm. Assim, é possível afirmar que o valor de recarga estimado representa 17% da precipitação total no período. Entretanto, na Tabela 7 observa-se esse percentual para todos os poços de monitoramento que estavam operando no período.

Tabela 7 - Percentuais de recarga em relação a precipitação do Ano Hidrológico 2014-2015.

Santana (%)		Guarantã (%)		Bugre (%)		Passarinho (%)	
S1	23	**G1**	09	**B1**	08	**P1**	21
S2	14	**G2**	18	**B2**	7	**P2**	9
S3	16	**G3**	19	**B3**	8	**P3**	16
S4	15	**G4**	21	**B4**	14		
S5	14	**G5**	23	**B5**	16		
S6	15	**G6**	19	**B6**	18		
S7	15	**G7**	23	**B7**	32		
S8	19	**G8**	19	**B8**	20		
S9	16	**G9**	11				
S10	10						
S11	33						
S12	27						
S13	13						

Na tabela 7 verifica-se que os valores estão variando entre 7% a 33%.

4.3. Análise do Ano Hidrológico 2015-216

Para o segundo período analisado, o valor de recarga média foi de 276,3 mm. Isto está diretamente relacionado ao aumento da precipitação que foi de 1678,8 mm para esse período, totalizando 16% da precipitação para o período analisado.

A Tabela 8 apresenta esses percentuais para todos os poços de monitoramento que estavam operando nesse período.

Tabela 8 - Percentuais de recarga em relação a precipitação do Ano Hidrológico 2015-2016.

Santana		Bugre		Guarantã		Passarinho	
S1	24	**B1**	5	**G1**	9	**P1**	17
S2	22	**B2**	10	**G2**	18	**P2**	30
S3	16	**B3**	8	**G3**	17	**P3**	27
S4	08	**B4**	9	**G4**	23		
S5	12	**B5**	11	**G5**	24		
S6	15	**B6**	16	**G6**	2		
S7	10	**B7**	17	**G7**	12		
S8	23	**B8**	13	**G8**	20		
S9	18	**B9**	16	**G9**	14		
S10	20	**B10**	3				
S11	15	**B11**	9				
S12	25						
S13	21						
S14	50						
S15	14						
S16	29						
S17	31						

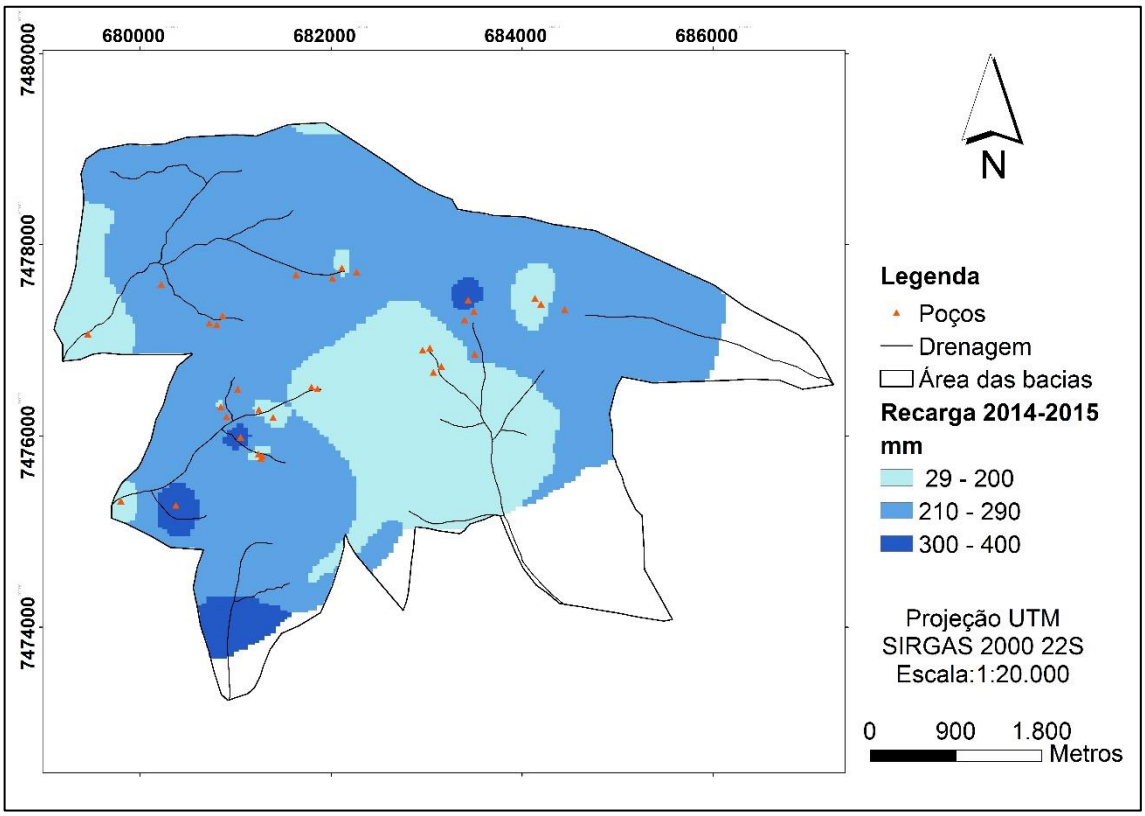
A variação da recarga nesse cenário vai de 3% a 50%

4.4. Espacialização dos dados de recarga direta

Foi explorado o conceito de calcular primeiro / interpolar depois, assim os dados de recarga foram primeiro calculados a partir do método da variação da superfície livre para cada poço analisado e depois, interpolados pelo método do inverso do quadrado da distância (Inverse Distance Weighting – IDW), método que considera a distância entre os dados amostrados. Assim, foi possível, verificar espacialmente como está

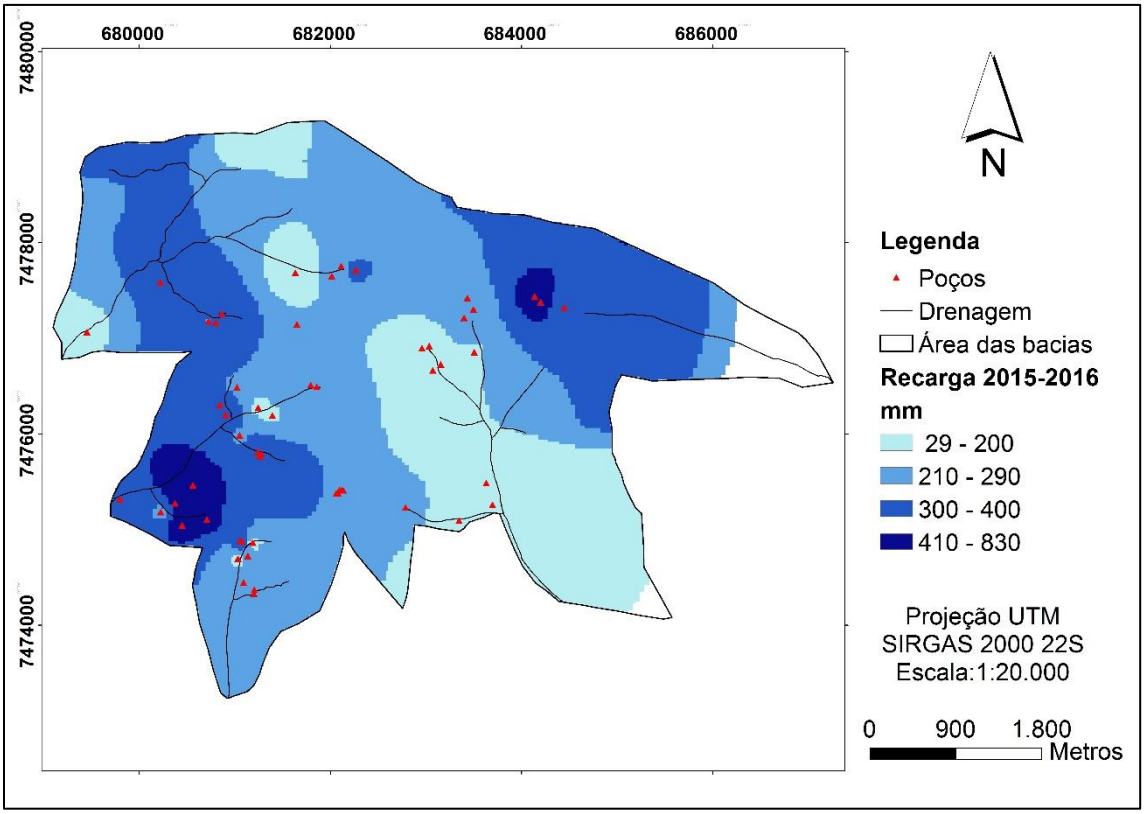
distribuída a recarga. A figura 18 mostra os dados de recarga estimados para o ano hidrológico 2014-2015.

Figura 18 – Mapa da recarga para o ano hidrológico 2014-2015.



Podemos observar na Figura 9 que existem alguns dados com valores altos formam regiões separadas na área. Isso pode-se dar pelos aspectos físicos presentes nesses pontos, ou se trata de uma incerteza, um dado que foi coletado ou estimado erroneamente, entretanto esses pontos são pequenos em relação à amostragem toda. Uma amostragem maior pode melhorar a análise atual. A Figura 19 mostra os dados de estimativa de recarga para o ano hidrológico 2015-2016, sendo observável a maior amostragem, pois novos poços foram construídos nesse período.

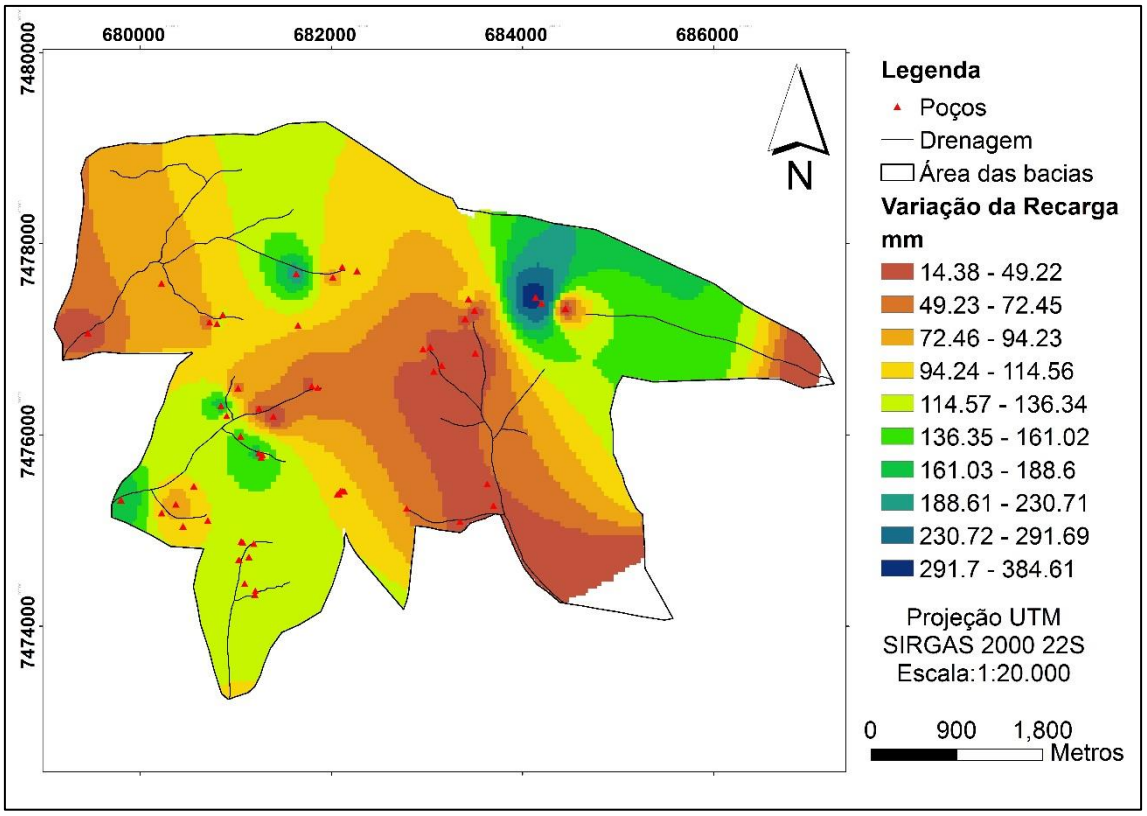
Figura 19 – Mapa da recarga para o Ano Hidrológico 2015-2016



Houve maior precipitação nesse período que o analisado anteriormente, como foi comentado no item sobre análise dos dados climatológicos. O aumento da amostragem de um período para o outro também melhora a interpolação de dados, diminuindo a diferença dos valores extremos com os valores estimados pela interpolação.

A partir dos dados processados, foi possível criar um mapa (Figura 20) com as diferenças de um ano hidrológico para o outro.

Figura 20 - Mapa da diferença da recarga entre os anos hidrológicos 2014-2015 e 2015-2016 (mm)



Pode-se observar que na Figura 20 houve um aumento médio em toda a extensão da área de estudo, as maiores regiões apresentam aumento 90 a 140 mm de um ano para o outro e que as maiores diferenças se encontram nos poços P2 e P3 na Figura 13, e isso pode ser notado também nas Figuras 18 e 19. A menor variação na recarga se encontra em grande parte na Bacia do Bugre na parte central da área estudada.

Os eventos extremos contidos nesse trabalho podem ter ocorrido por diversos motivos, como declividades naturais do terreno, recargas indiretas, represamento natural ou artificial entre outros, eles foram utilizados no trabalho para mostrar a heterogeneidade do dado analisado. Outra componente importante a ser citada é a Rodovia Castelo Branco, SP-280, que passa pela região, agindo como uma espécie de barreira subterrânea para os fluxos subterrâneos e a dinâmica da recarga na área.

Na comparação com os valores encontrados em outros trabalhos para a recarga no mesmo aquífero mostram que o período analisado foi de recessão na pluviosidade, os poços devem ser analisados em outros períodos para se obter um modelo mais fiel à realidade encontrada em campo, agregando assim outros atributos físicos.

Os valores encontrados na área para a recarga média são de 16,5% para a área estudada situada no centro-oeste paulista, e esse valor pode ser comparado a outros encontrados na literatura. É notável observar que o período analisado consta um período de seca atípica (2014-2015) e um período de recuperação (2015-2016). Sendo assim, Bertol (2007) encontrou o valor médio de 29% para o Sistema Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais para o período de 2005-2006, 10 anos antes do trabalho atual.

Entretanto, podemos também analisar trabalho utilizando-se o mesmo método para outros aquíferos, como em Martelli (2012) onde os autores encontraram uma taxa de 25% em relação a precipitação na área da cidade de Cacequi –RS para o Sistema Aquífero Guarani, ainda no mesmo aquífero observamos que Lucas (2012) encontrou valores de recarga direta de 9 a 20% na Bacia do Ribeirão da Onça, e em Simon et al. (2017), os autores encontram valores de recarga em relação a precipitação entre 13 e 17% para o Sistema Aquífero Guarani.

5 Conclusões

Esse trabalho demonstrou a espacialização da recarga para dois anos hidrológicos que possuíram regimes próximos de precipitação, entretanto demonstraram uma reação da oscilação freática e recarga grande. Observa-se que o valor médio de recarga é de 16 % em relação à precipitação, e visando que o aquífero está retornando a sua normalidade após um evento de seca pode-se supor que a frequência da série temporal de recarga vai seguir o mesmo padrão nos próximos eventos de precipitação.

O método utilizado se mostrou eficiente quando utilizado em pequenas profundidades, mesmo sofrendo grande influências das dinâmicas do solo e do escoamento superficial.

Observa-se que o aumento dos poços ofereceu uma melhor interpolação dos dados, assim para estudos futuros considera-se a possibilidade de aumentar a quantidade de poços analisados, para a melhora dos resultados. Com esse aumento pode-se ainda possibilitar outras formas de interpolação, que necessitam de maiores pontos de amostragem, entretanto possuem melhor precisão na estimativa.

5.1. Considerações Finais

A recarga nos apresenta a quantidade da precipitação que realmente se torna recursos hídricos subterrâneas possíveis de se ser explorados para as diversas atividades humanas, seja para consumo como para as diversas atividades comerciais. Esse dado é importante na gestão dos recursos hídricos pois nos ajuda a ter noção da disponibilidade desse recurso. Com isso é possível a construção de um planejamento a longo prazo com uma consciência sustentável para o uso das águas subterrâneas. Um planejamento a longo prazo pode evitar situações como a crise hídrica no estado de São Paulo, por ter um panorama mais verdadeiro da situação desses recursos, e ser possível utilizar a água subterrânea como alternativa a falta dos recursos superficiais.

Entendendo melhor os processos e as quantidades das águas subterrâneas nos permitem traçar estudos que nos ajudem a entender melhor a relação entre as águas subterrâneas e as águas superficiais e entendendo melhor essa dinâmica podemos entender a poluição das águas superficiais e subterrâneas e como se dá a transição dessa poluição entre esses recursos. Assim, é possível evitar ou remediar rapidamente no caso de uma pluma de poluição, contribuindo para um melhor planejamento.

Esses estudos também são um instrumento importante para a tomada de decisão dos gestores públicos visto que eles fomentam as bases para a legislação ambiental voltada a água no país e podem ser fundamentais para as mudanças e futuras ementas que serão criadas nessas leis.

Além disso, podemos ainda observar que a recarga e outras características das águas subterrâneas são fundamentais para o planejamento local, seja rural ou urbano, do dimensionamento da irrigação ou drenagem. Se possuirmos uma área onde observa-se baixa recarga e há um cultivo que necessita um grande aporte de água, pode-se criar a partir de tal informação um estudo para irrigação eficiente nessa área. Da mesma forma, se houver uma área com aumento da recarga e necessita-se reduzir a quantidade de água pode-se buscar uma solução com a drenagem, seja em uma área de cultivo ou uma área urbana para se evitar inundações.

Referências Bibliográfica

ADHIKARY, S. K.; CHAKY, T.; DAS GUPTA, A.; RAHMAN, M. M. **Estimating Shallow groundwater recharge from precipitation and water levels observations.** Proceedings of the 1st International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development, 2012.

BALEK, J. **Groundwater Recharge Concepts.** In: SIMMERS, I. Estimation of Natural Groundwater Recharge. Springer, Dordrecht, 510p.

BARISON, M. R.; KIANG, C. H. **Parâmetros Hidrogeoquímicos Regionais do Sistema Aquífero Bauru no estado de São Paulo**. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004. Disponível em: httpwww.google.com.brurlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CDIQFjAF&url=http%3A%2F%2Faguassubterraneas.abas.org%2Fasubterraneas%2Farticle%2Fdownload%2F23569%2F15647&ei=uI_qVNnsAsOgNuWsgsgJ&usg=AFQjCNF. Acesso em: 22 de Fevereiro de 2015.

BECCHINI, L.; DUCCO, G; DONATELLI, M.; Stein, A. **Modelling, Interpolation and Stochastic simulation in space and time of global solar radiation**. Agriculture, ecosystems and Environment. Vol. 81. Págs. 29-42. 2000.

BERTOL, G. A. **Avaliação da recarga anual no Aqüifero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais.** (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

BEZERRA, M. I. S. **Apostila de análise de séries temporais.** Apostila para o curso de Estatística, DMEC/ FCT/ UNESP, Presidente Prudente. 2006. 84p.

BOUGUERRA, M. L. **As batalhas da água.** Por um bem comum da humanidade. São Paulo: Editora Vozes, 2003.

CAICEDO, N.L. Água Subterrânea. In: TUCCI, C.E.M. (Org). **Hidrologia:** ciência e aplicação. 4° ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre. 2007. 943 p.

DELIN, G. N.; HEALY, R. W.; LORENZ, D. L.; NIMMO, J. R. **Comparison of local- to regional-scale estimates of groud-water recharge in Minnesota, USA**. Journal of Hydrology. Vol. 334. Pags.231-249. 2007.

DINIZ FILHO, J. B.; CARVALHO JÚNIOR, E. B.; STEIN, P.; MELO JÚNIOR, G. J.; CARVALHO, M. F. B.; ROSÁRIO, F. F.; RIBEIRO FILHO, J. C.; CABRAL, N. M. T.; CARVALHO, A. K. N. **Atributos e modelo hidrogeológico conceitual do Aquífero carbonático raso em áreas da Bacia Potiguar – RN/Brasil.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal, 2008.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). **Hidrogeologia:** Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, LABHID – UFPE.1997. 389 p.

GOMES, L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do balanço**

hídrico em zona saturada. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2008. 167p.

GONÇALVES, V. F. M.; SANTAROSA, L. V.; MANZIONE, R. L. **Mapeamento da recarga de águas subterrâneas no Sistema Aquífero Bauru (SAB) em área de proteção ambiental durante o ano de 2014/15**. XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campinas, 2015.

HAYASHI, M.; FARROW, C. R. **Watershed-scale response of groundwater recharge to inter-annual and inter-decadal variability in precipitation (Alberta, Canadá).** Hydrogeology Journal. Vol. 22. Págs. 1825-1839. 2014.

HEALY, R. W. **Estimating groundwater recharge.** United Kingdom: Cambridge University Press, 2010. 245p.

HEUVELINK, G. B. M. **Error Propagation in Environmental Modelling with GIS**. London: Taylor & Francis, 1998. 126p.

KRESIC, N.; MILKSZEWSKI, A. **Hydrogeological Conceptual Site Models**. New York: CRC Press, 2013. 584p.

LUCAS, M. C. **Influência da precipitação e do uso do solo sobre a taxa de recarga em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2012. 154p.

MANZIONE, R. **Águas Subterrâneas:** Conceitos e Aplicações sob uma visão multidisciplinar. Jundiaí: Paco Editorial, 2015. 383p.

MELO, A. C. G., DURIGAN, G. **Estação Ecológica de Santa Bárbara:** Plano de Manejo. Instituto Florestal/Secretaria do Meio Ambiente. 2011. Disponível em: http://www.ambiente.sp.gov.br/consema/files/2011/11/oficio_consema_2010_121/Plano_de_Manejo_da_Estacao_Ecologica_Santa_Barbara.pdf. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2015.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M.S. **Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas.** Revista Brasileira de Ciências do solo. Vol. 27. Págs. 925-933. 2003.

PAULA E SILVA, F.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. **Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo.** Águas subterrâneas. Vol. 19. N°2. Págs. 19-36. 2005.

ROLIM, G.S.; CAMARGO, M.B.P.; LANIA, D.G.; MORAES, J.F.L. **Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo.** Bragantia. Vol. 66. N°4. Págs.711-720. 2007.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.** Hydrogeology Journal, Vol. 10. Issue 2. Págs. 18-39. 2002.

SIMON, F. W.; REGINATO, P. A. R.; KIRCHHEIM, R. E.; TROIAN, G. C. **Estimativa de recarga do Sistema Aquífero Guarani por meio da aplicação do método da variação da superfície livre na Bacia do rio Ibicuí – RS.** Águas Subterrâneas. Vol. 31 (2). Págs. 12-29. 2017.

SOLDERA, B. C. **Modelagem de séries de monitoramento de nível freático em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) sob influência de diferentes usos agrícolas de terra.** (Dissertação). Faculdade de Ciências Agronômicas – FCA. UNESP. Botucatu, 2013.

STEIN, A.; STARITISKY, G.; BOUMA, J. **Simulation of Moisture Deficits and Areal Interpolation by Universal Cokriging**. Water Resources Research. Vol 27. Págs 1963-1973.1991.

TOWNLEY, L. R. Shallow groundwater systems. In: DILLON, P.; SIMMERS, I. **Shallow Groundwater Systems.** Balkema, Rotterdam. 232 págs. 1998.

XU, Y.; BEEKMAN, H. E. **Groundwater Recharge Estimation in Southern Africa.** UNESCO IHP Series No.64. Cape Town: UNESCO, 2003.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. **Water Balance in Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring.** Journal of Hidrology. Págs. 261-269. 2007. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0022169407 003034. Acesso em: 02 de março de 2015.

WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; TROEGER, U. **Recharge contribution to the Guarani Aquifer System estimated from the water balance method in a representative watershed.** Anais da Academia Brasileira de Ciências. Vol. 87(2). Págs. 595-609. 2015.

Apêndice A - Oscilação dos níveis freáticos e precipitação dos poços

Figura A1 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço P1 da Bacia do Passarinho

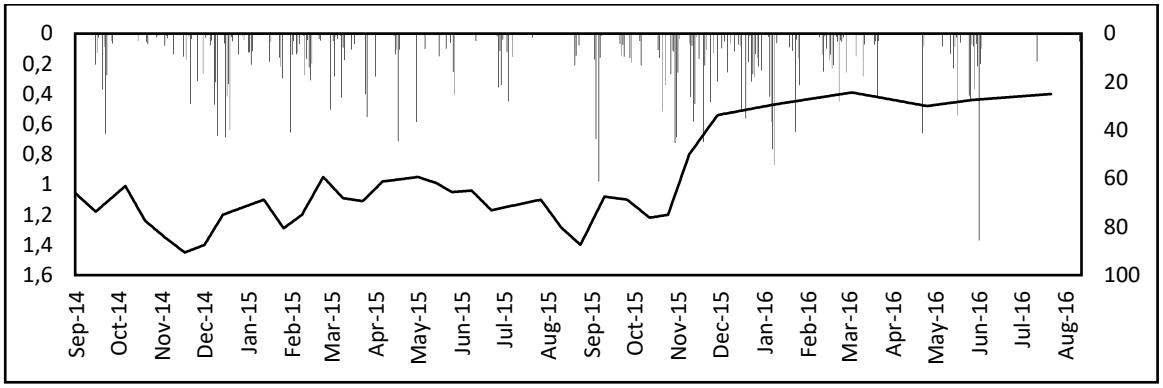


Figura A2 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço P2 da Bacia do Passarinho

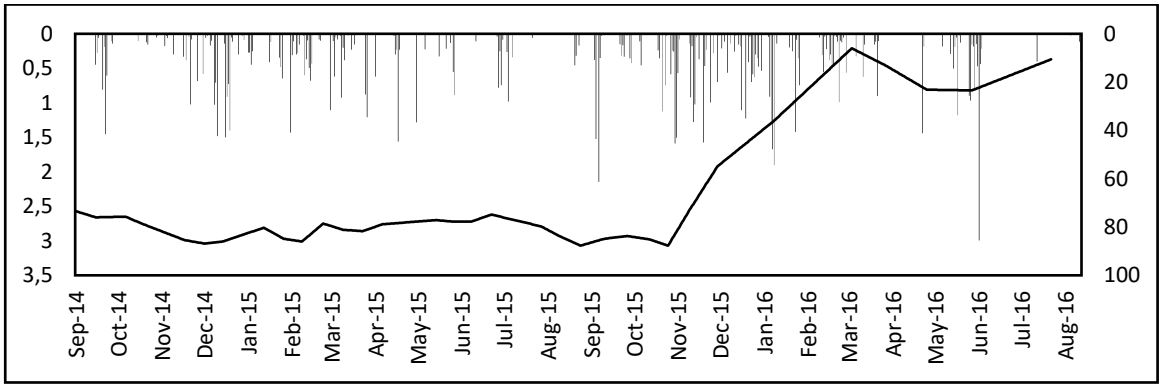


Figura A3 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço P3 da Bacia do Passarinho

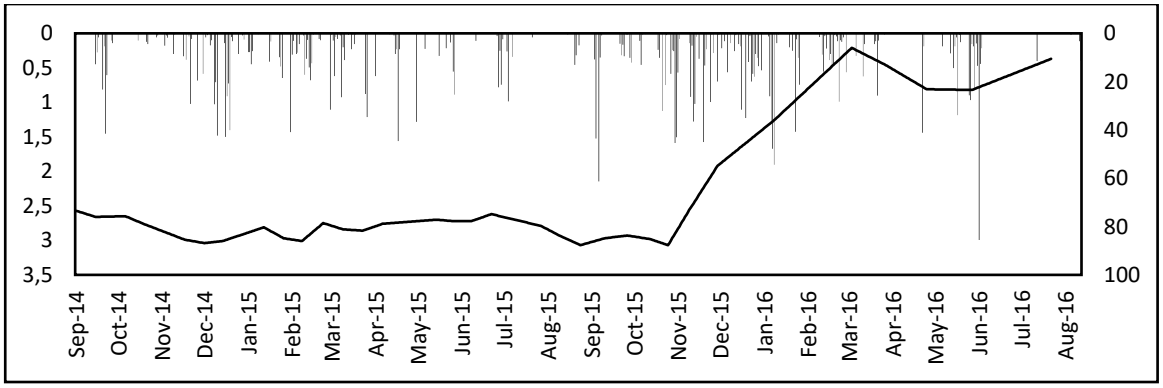


Figura A4 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G1 da Bacia do Guarantã

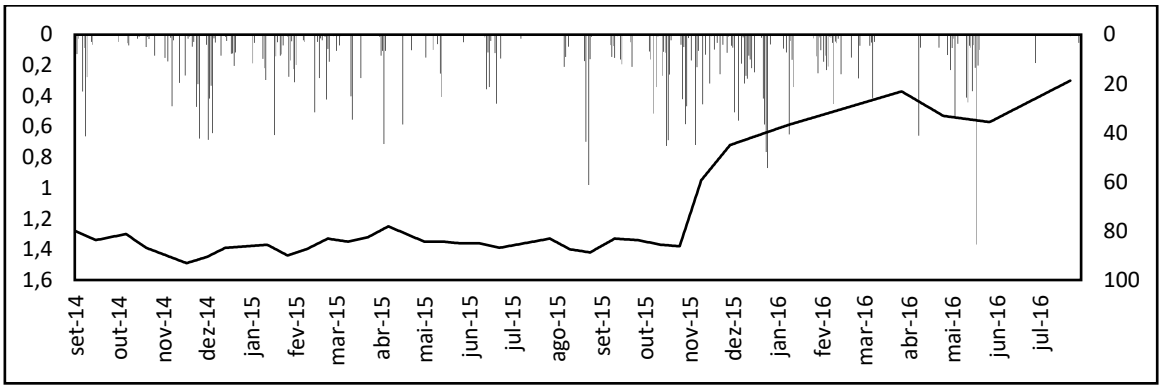


Figura A5 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G2 da Bacia do Guarantã

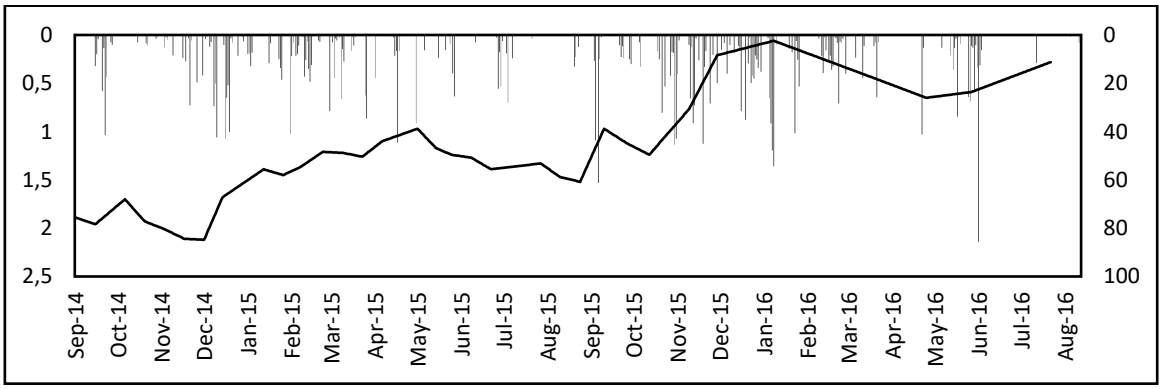


Figura A6 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G3 da Bacia do Guarantã

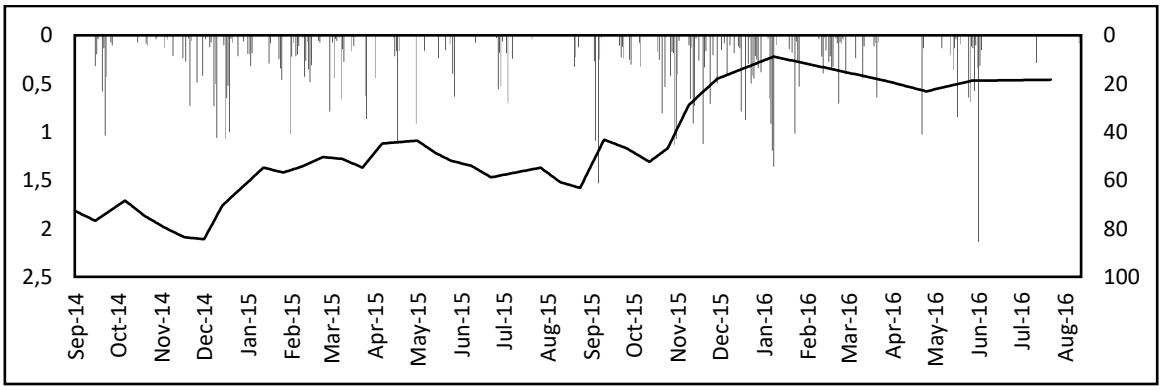


Figura A7 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G4 da Bacia do Guarantã

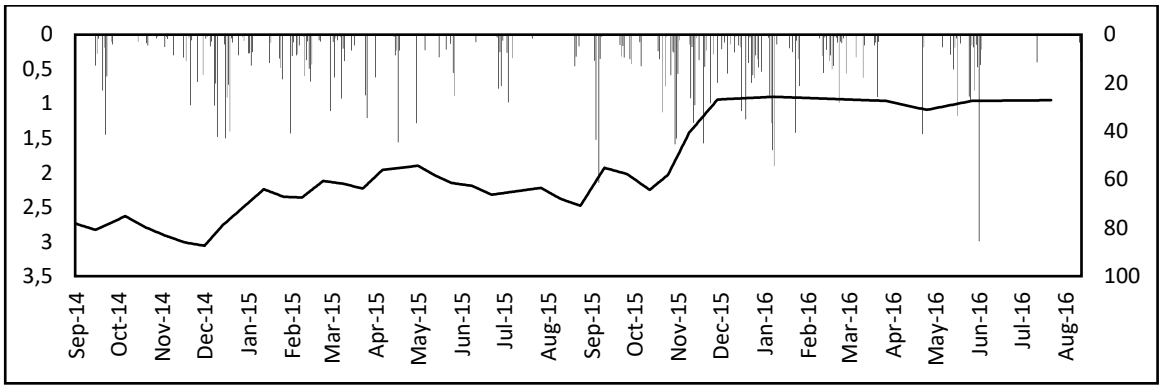


Figura A8 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G5 da Bacia do Guarantã

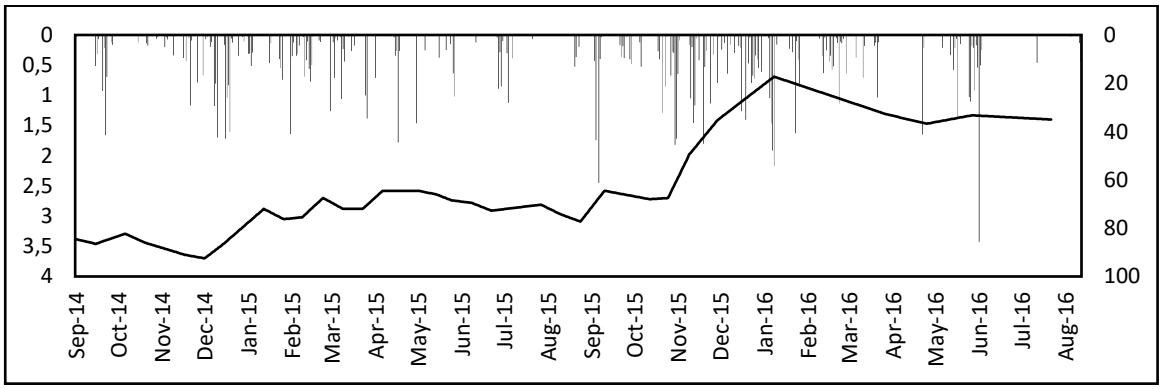


Figura A9 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G6 da Bacia do Guarantã

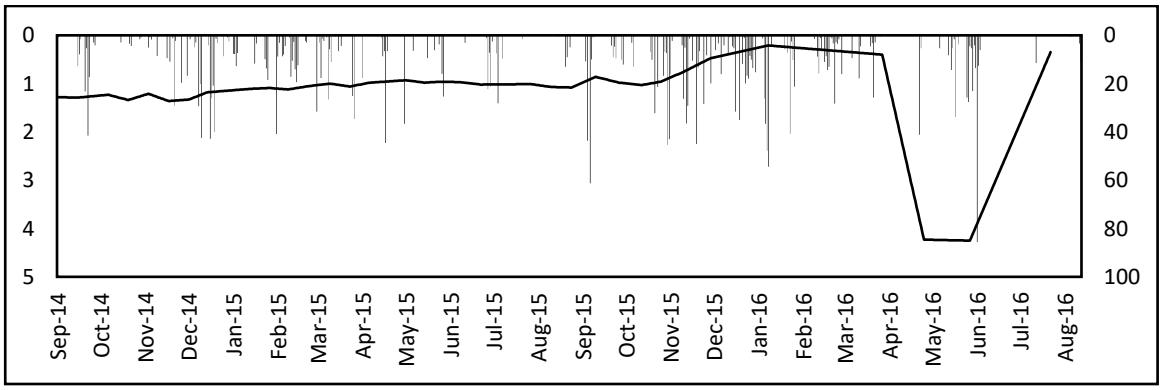


Figura A10 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G7 da Bacia do Guarantã

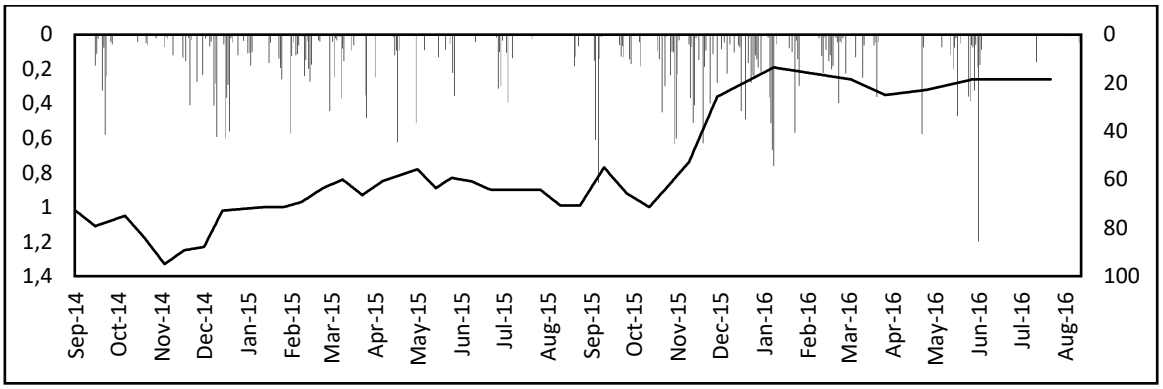


Figura A11 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G8 da Bacia do Guarantã

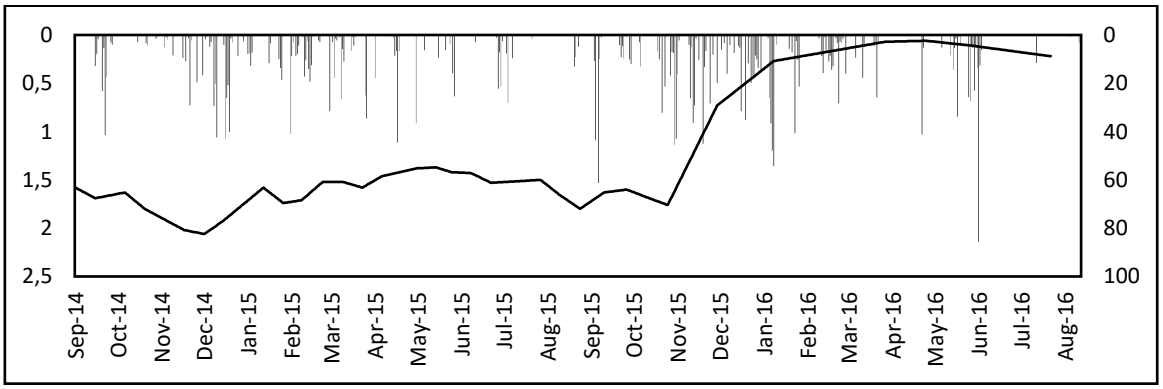


Figura A12 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço G9 da Bacia do Guarantã

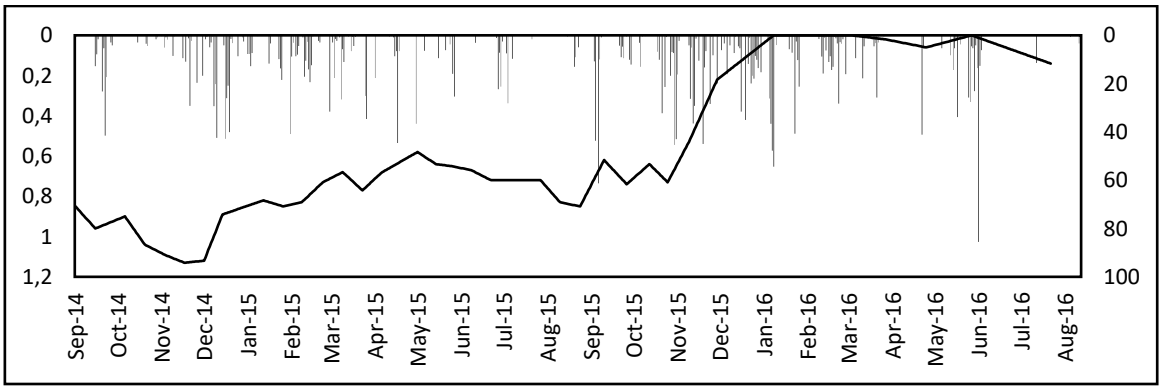


Figura A13 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço GDIV da Bacia do Guarantã

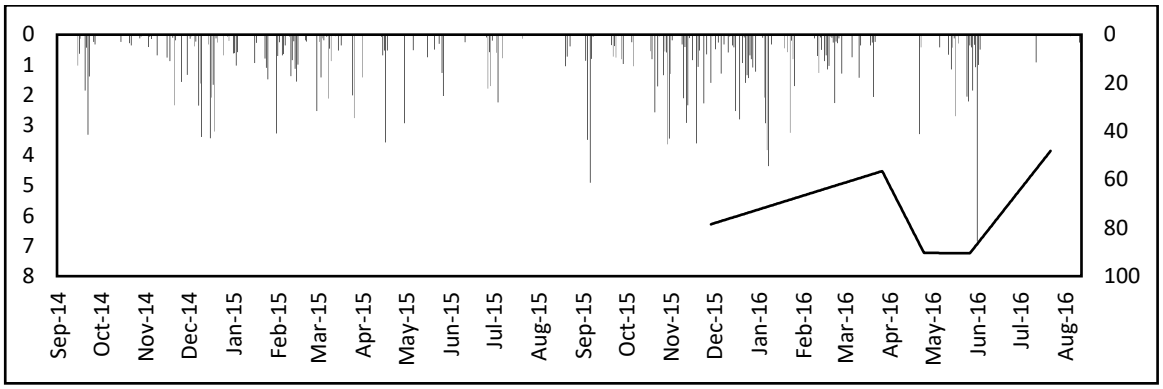


Figura A14 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B1 da Bacia do Bugre

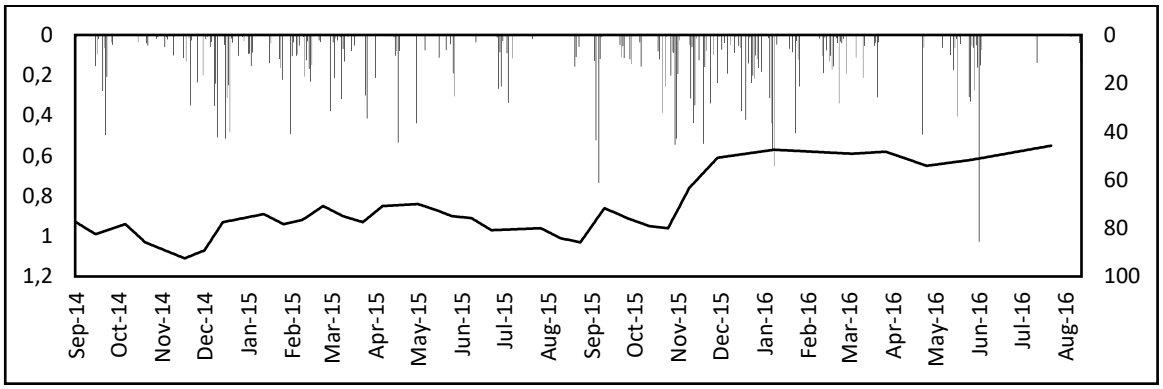


Figura A15 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B2 da Bacia do Bugre

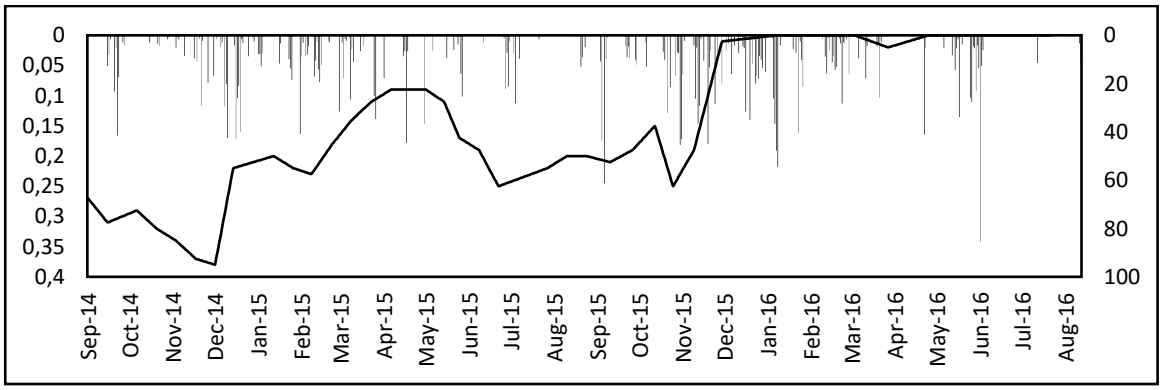


Figura A16 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B3 da Bacia do Bugre

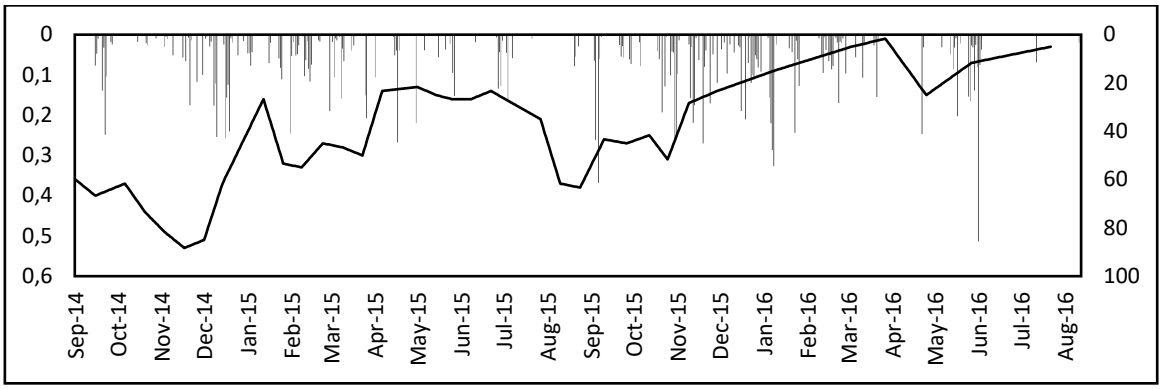


Figura A17 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B4 da Bacia do Bugre

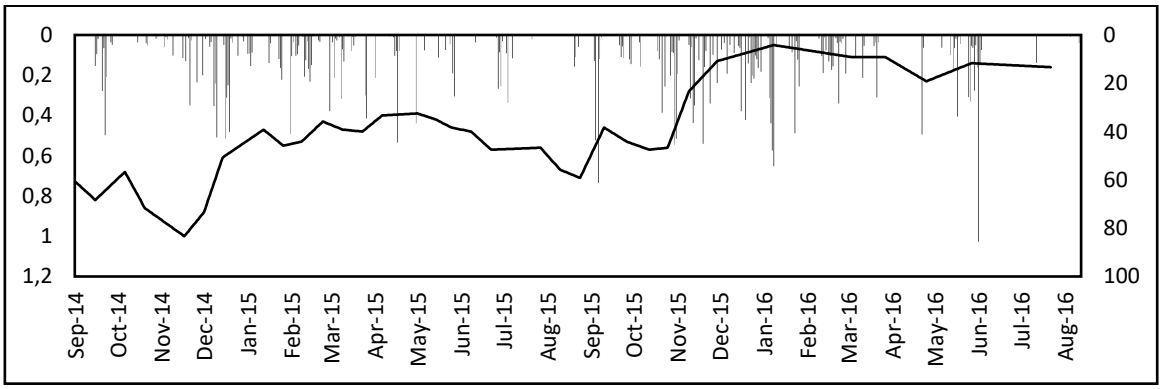


Figura A18 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B5 da Bacia do Bugre

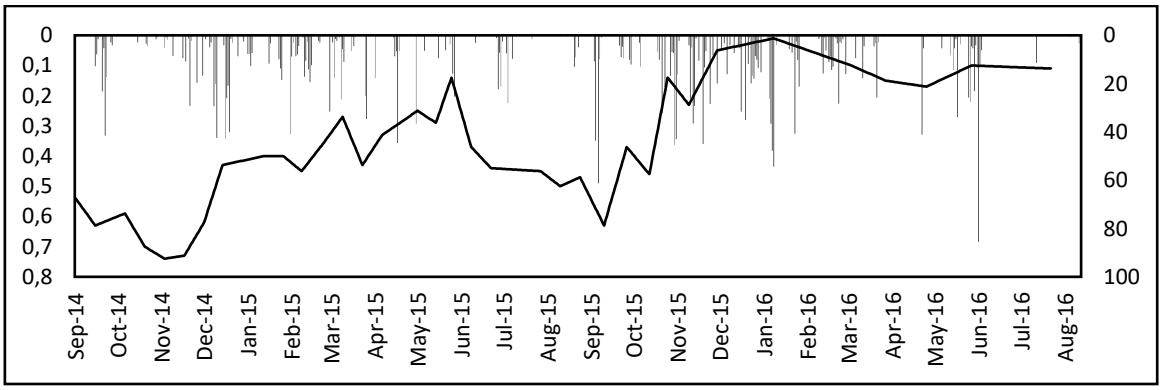


Figura A19 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B6 da Bacia do Bugre

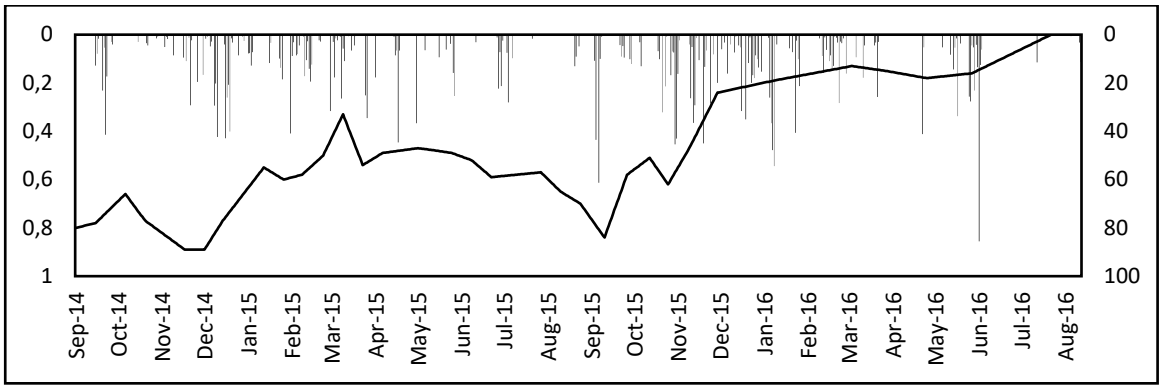


Figura A20 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B7 da Bacia do Bugre

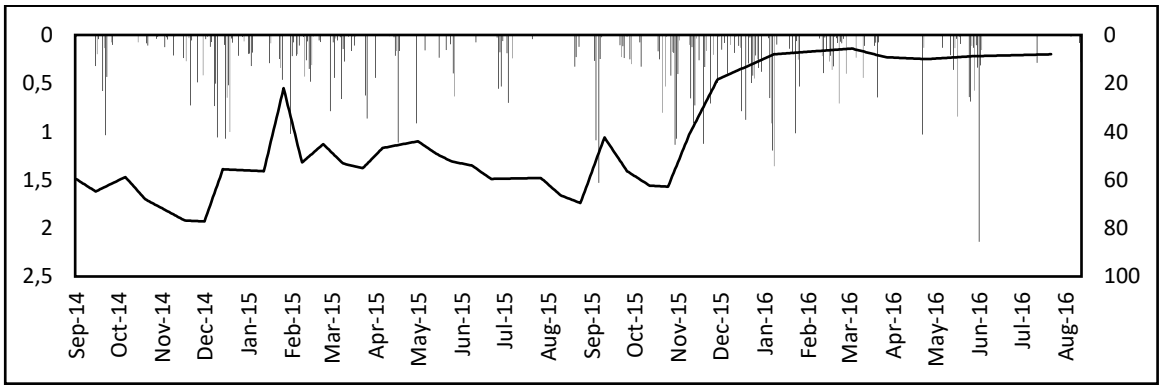


Figura A21 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B8 da Bacia do Bugre

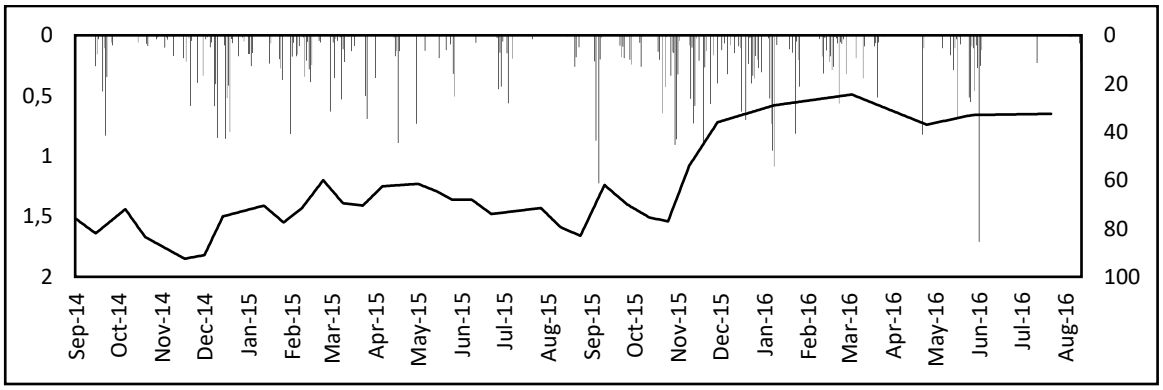


Figura A22 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B9 da Bacia do Bugre

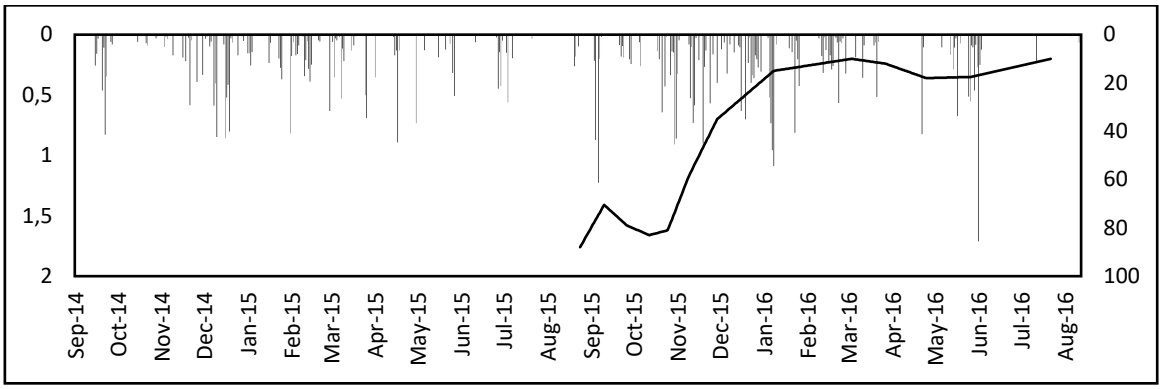


Figura A23 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B10 da Bacia do Bugre

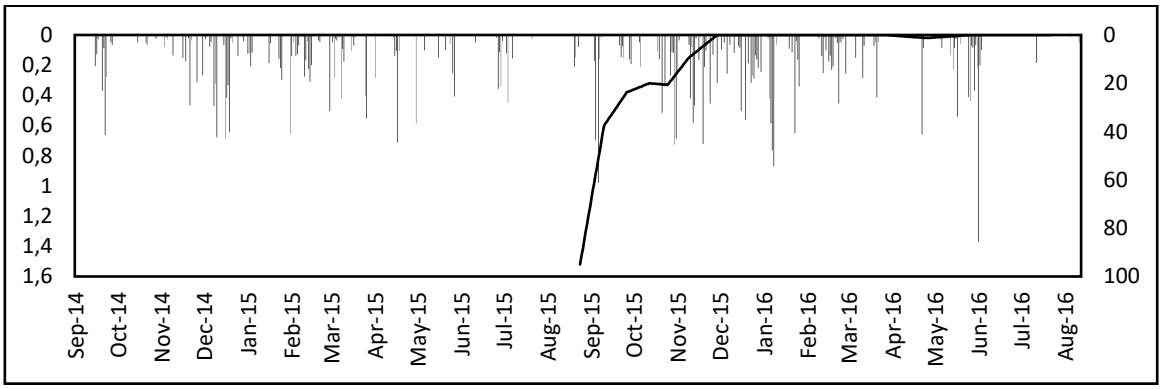


Figura A24 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B11 da Bacia do Bugre

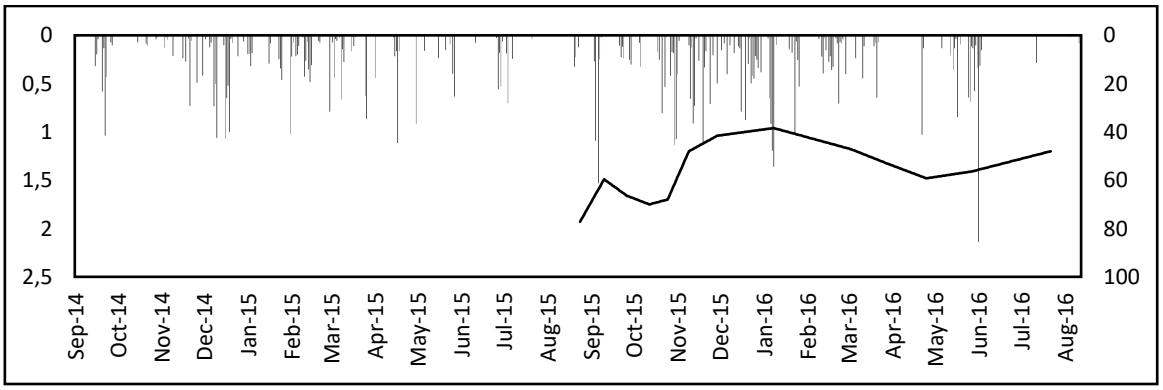


Figura A25 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço B12 da Bacia do Bugre

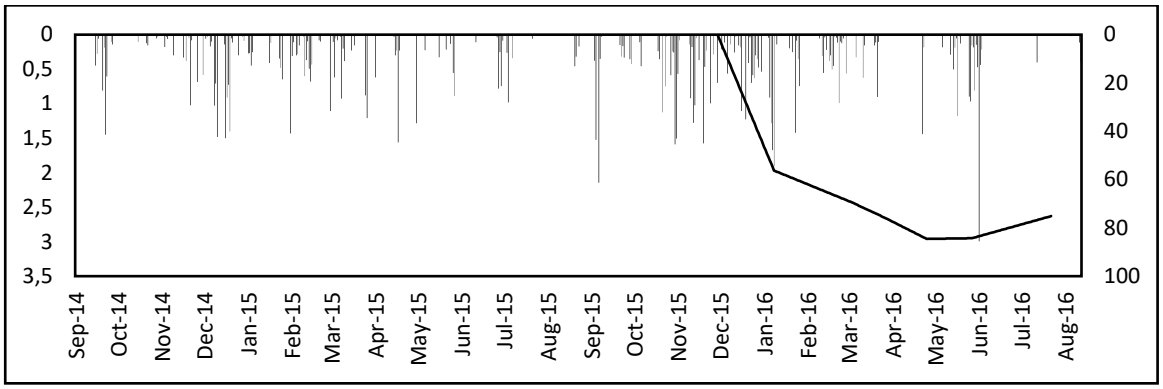


Figura A26 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S1 da Bacia do Santana

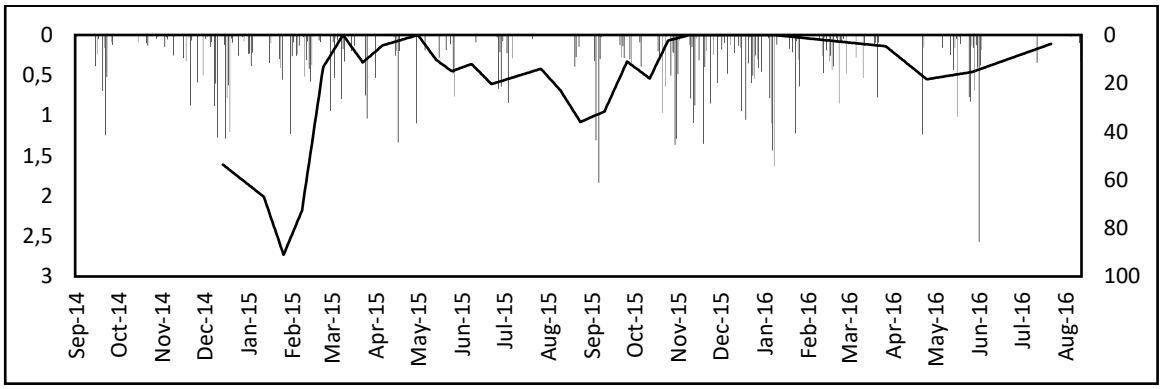


Figura A27 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S2 da Bacia do Santana

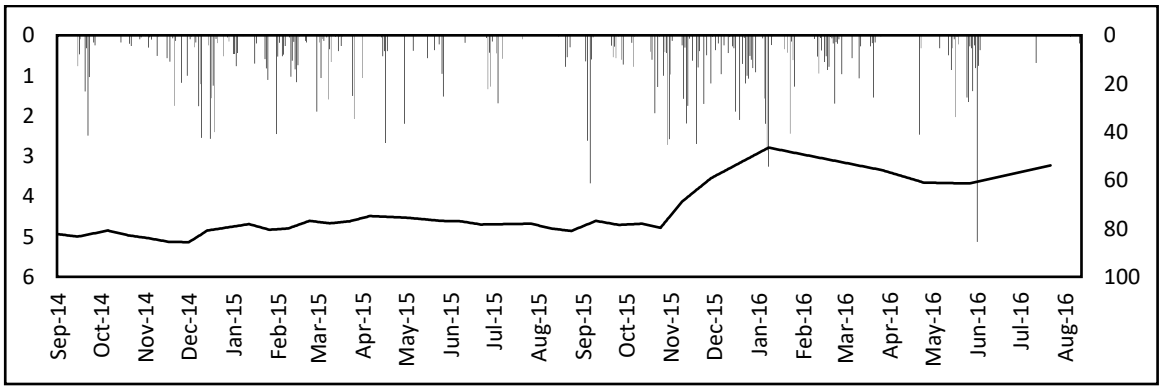


Figura A28 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S3 da Bacia do Santana

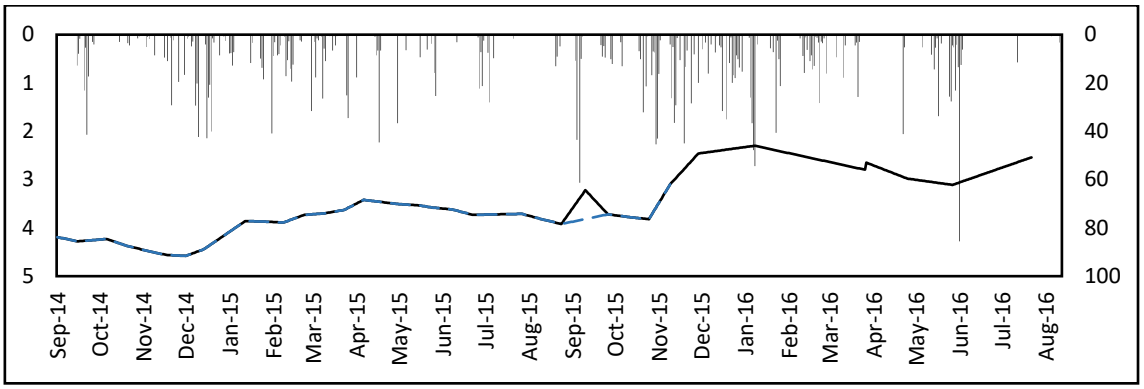


Figura A29 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S4 da Bacia do Santana

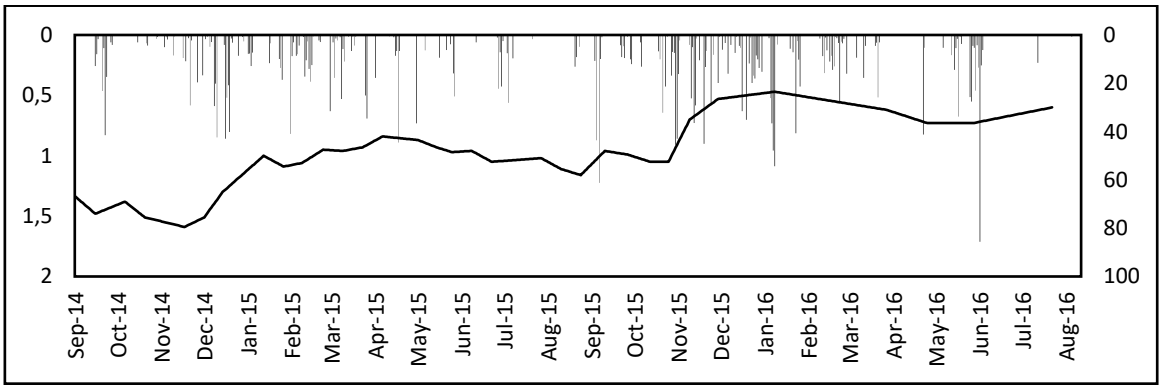


Figura A30 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S5 da Bacia do Santana

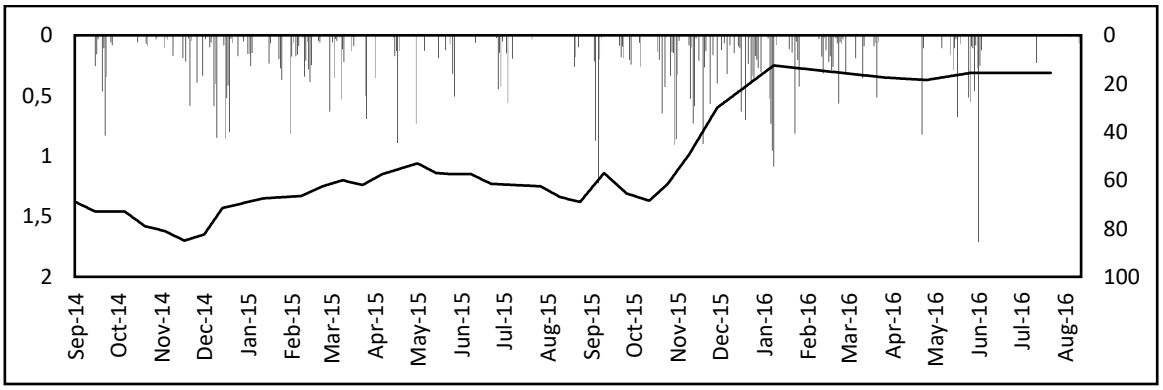


Figura A31 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S6 da Bacia do Santana

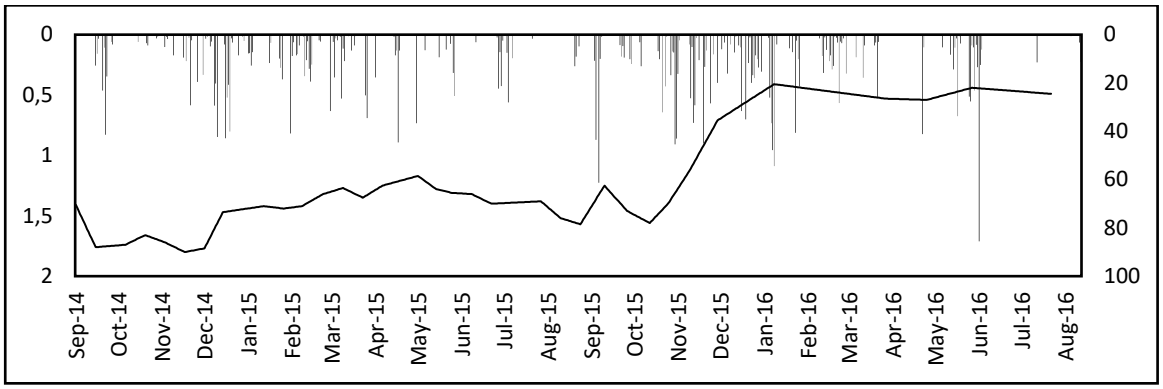


Figura A32 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S7 da Bacia do Santana

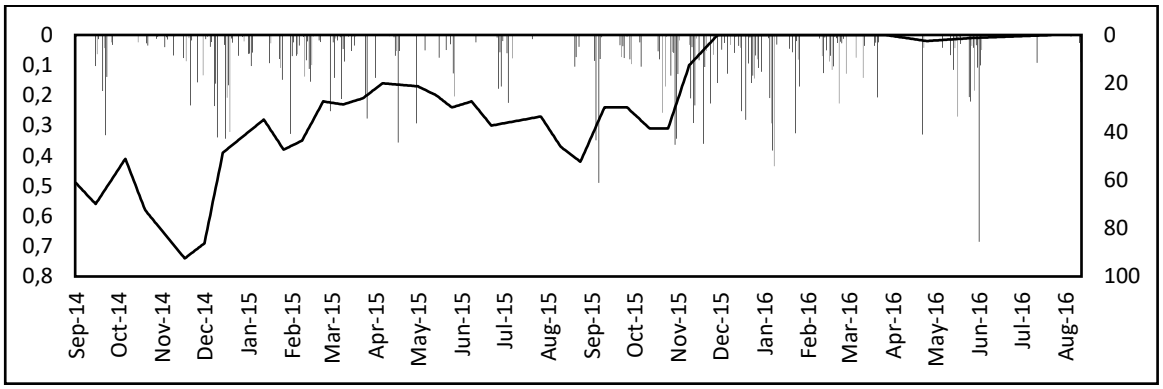


Figura A33 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S8 da Bacia do Santana

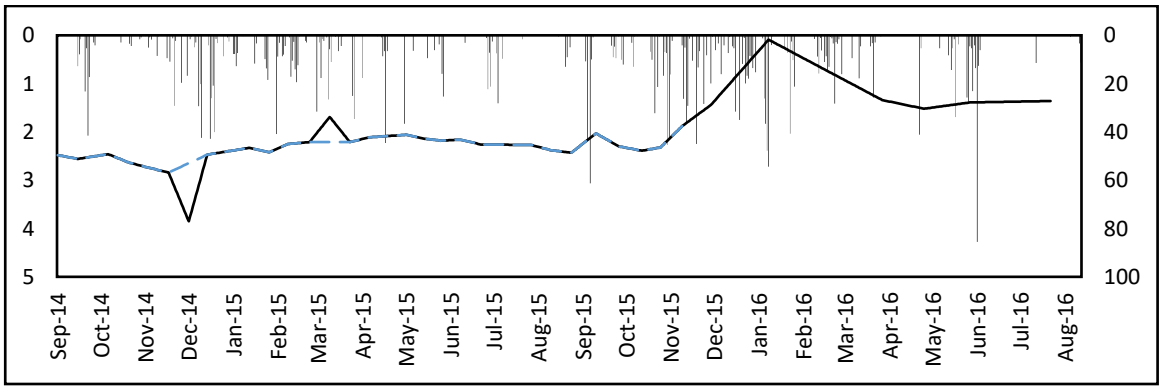


Figura A34 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S9 da Bacia do Santana

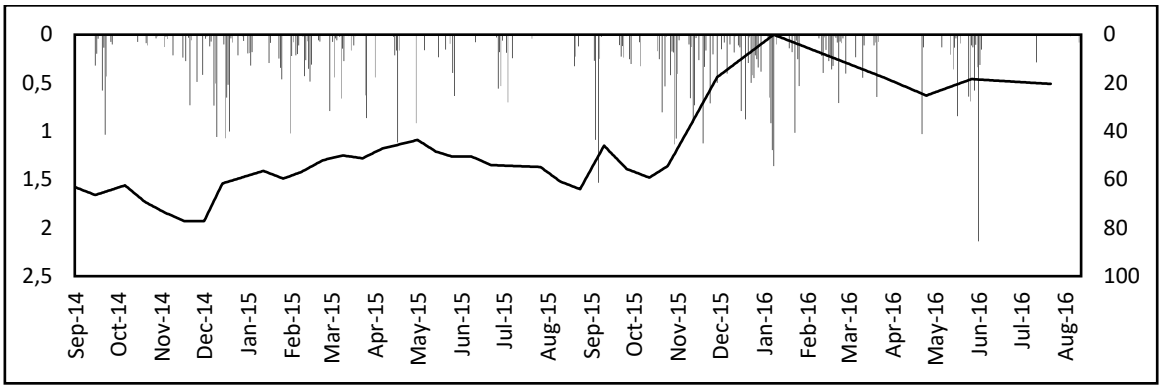


Figura A35 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S10 da Bacia do Santana

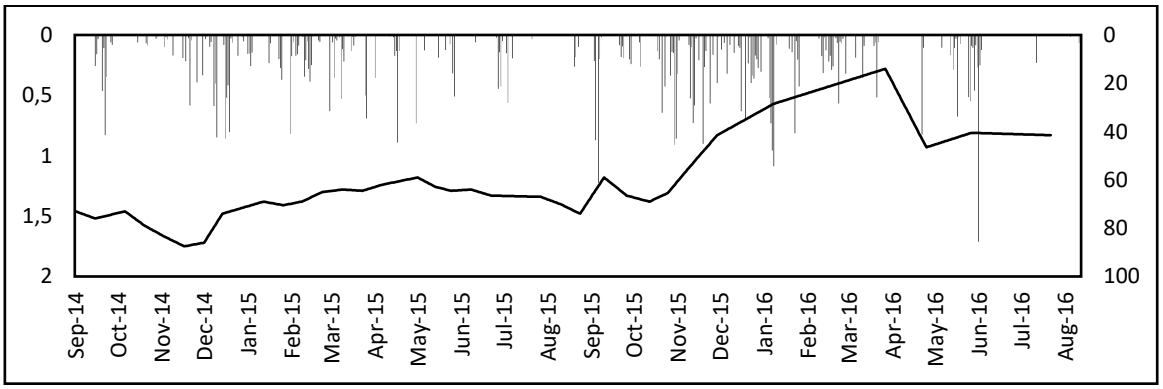


Figura A36 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S11 da Bacia do Santana

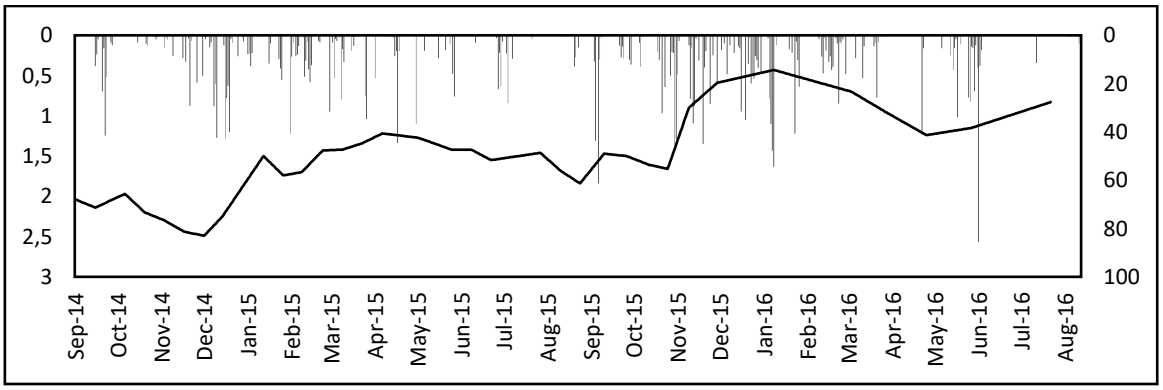


Figura A37 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S12 da Bacia do Santana

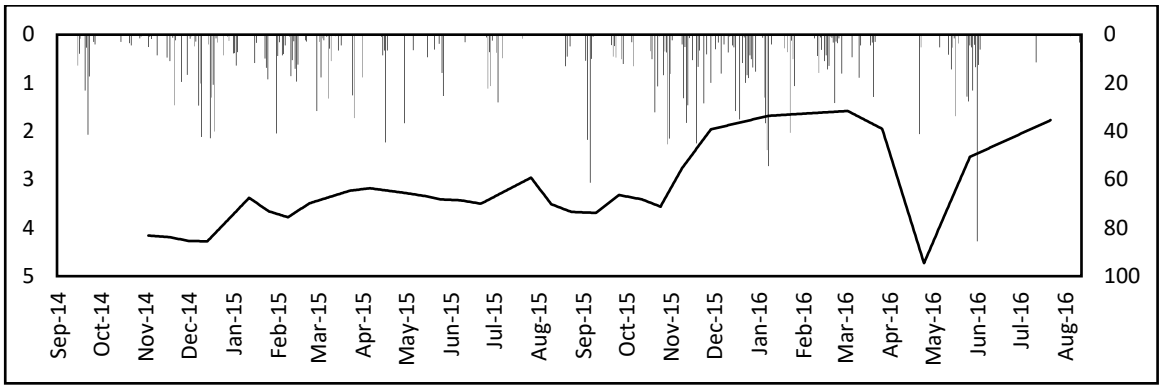


Figura A38 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S13 da Bacia do Santana

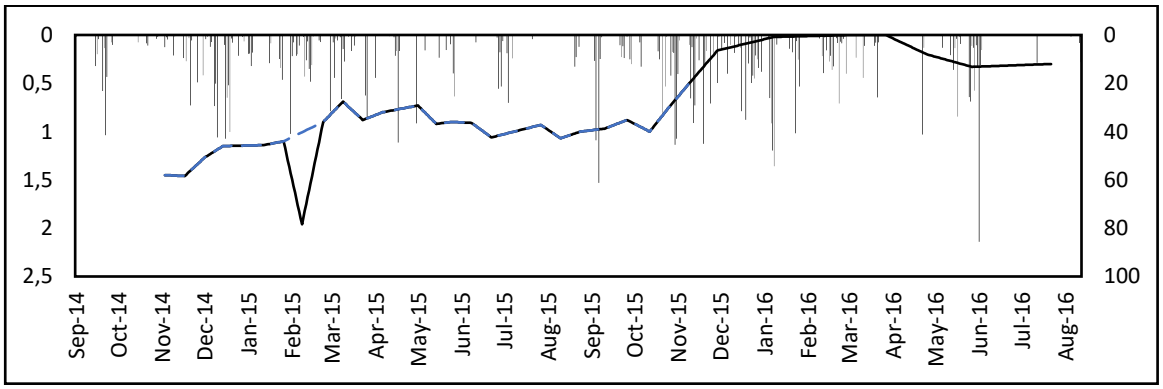


Figura A39 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S14 da Bacia do Santana

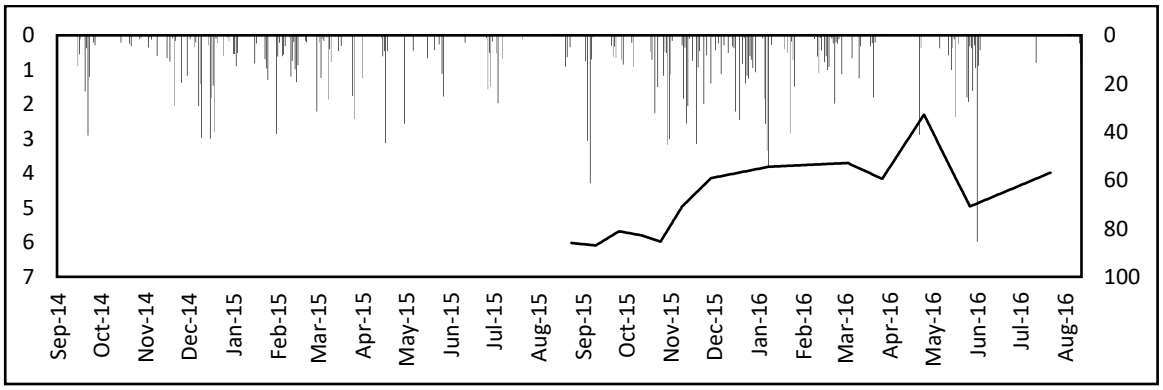


Figura A40 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S15 da Bacia do Santana

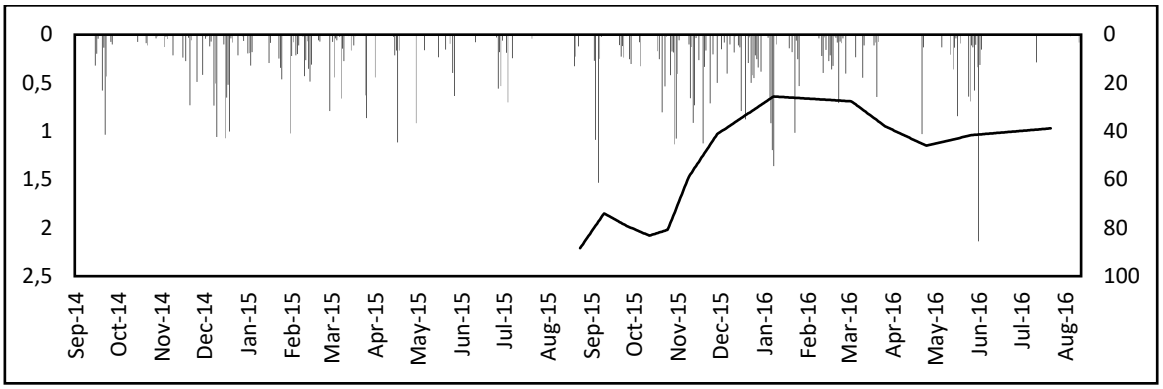


Figura A41 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S16 da Bacia do Santana

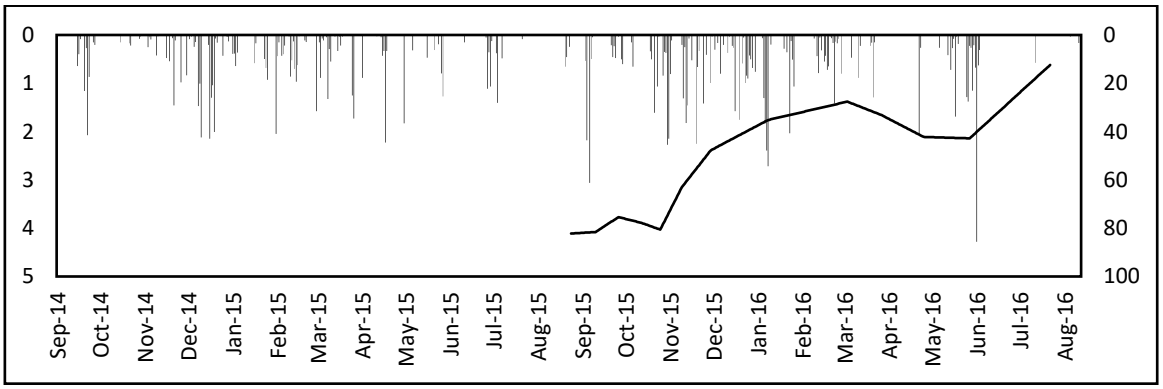


Figura A42 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço S17 da Bacia do Santana

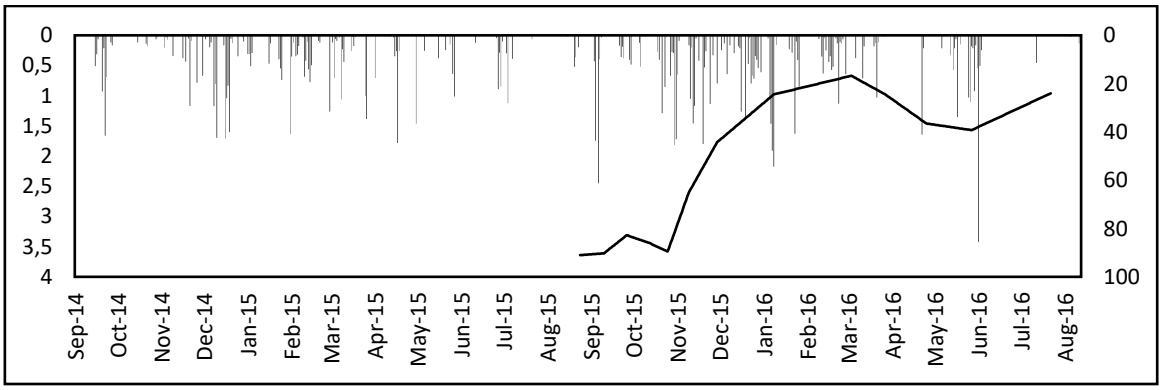


Figura A43 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI_D da Bacia do Boi

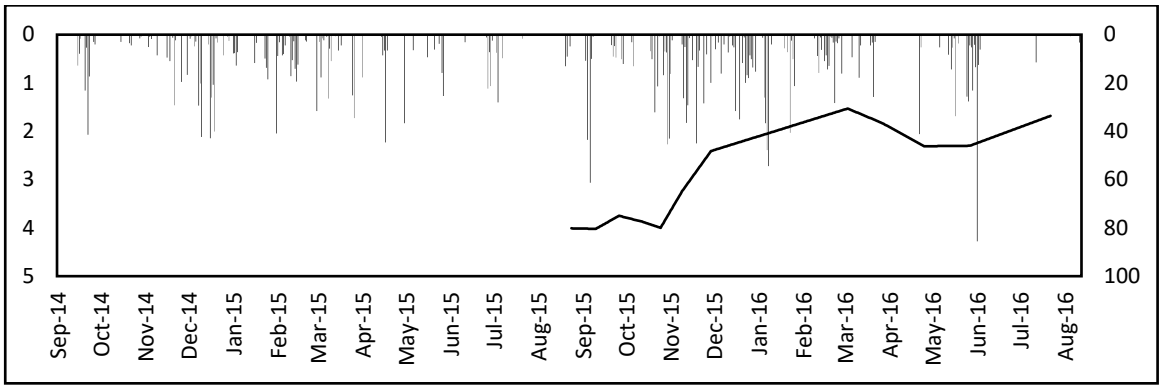


Figura A44 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI1 da Bacia do Boi

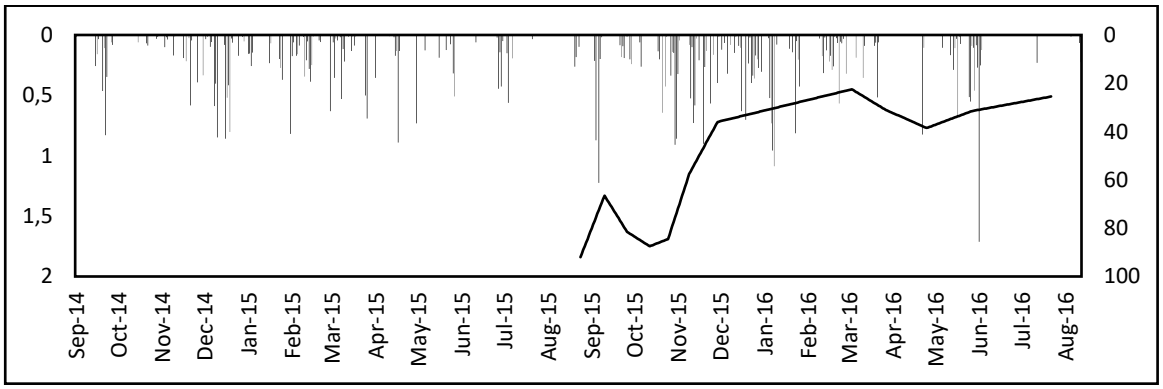


Figura A45 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI2 da Bacia do Boi

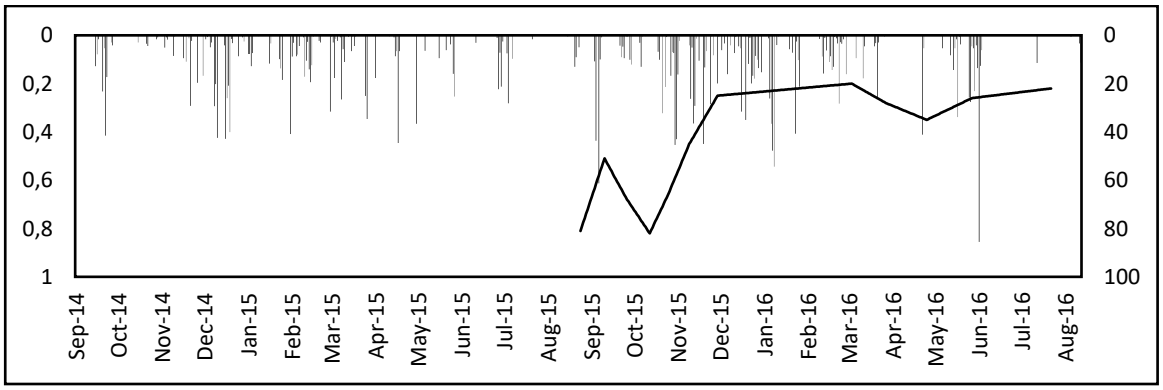


Figura A46 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI3 da Bacia do Boi

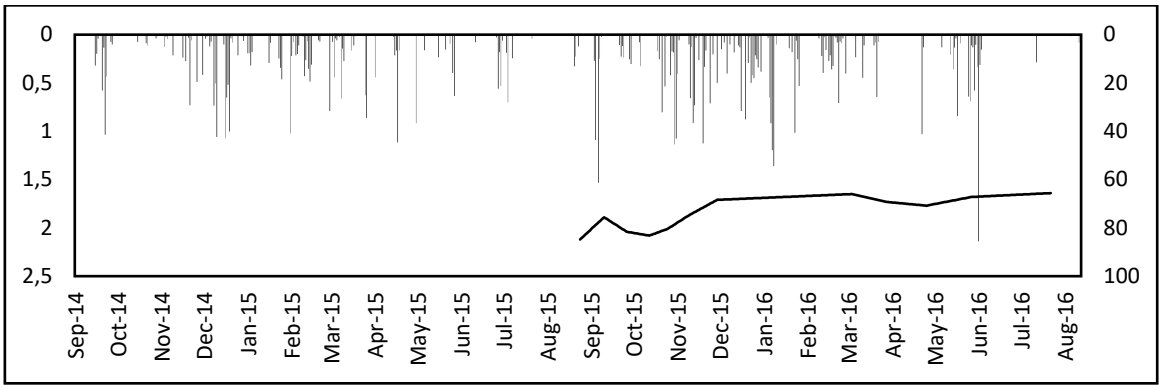


Figura A47 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI4 da Bacia do Boi

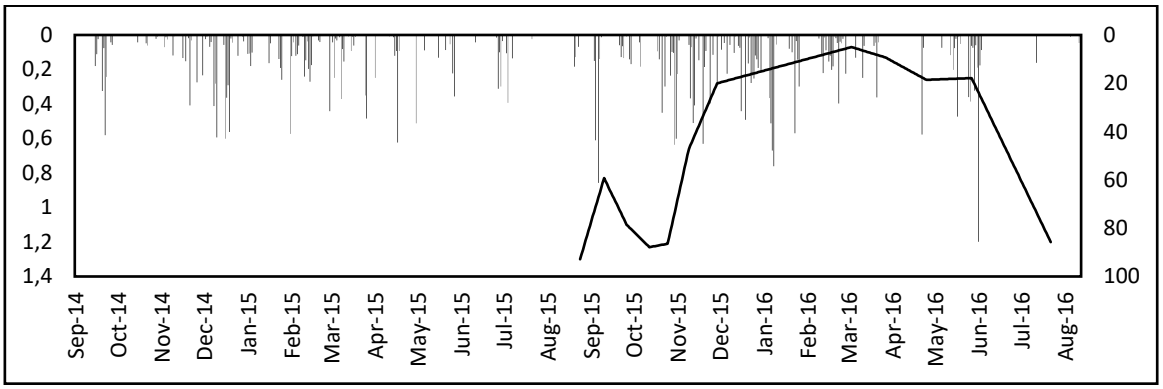


Figura A48 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI5 da Bacia do Boi

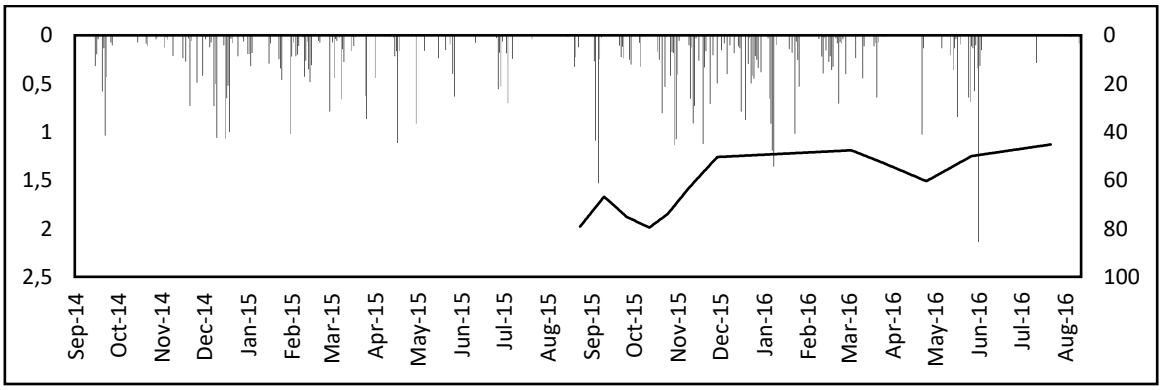


Figura A49 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI6 da Bacia do Boi

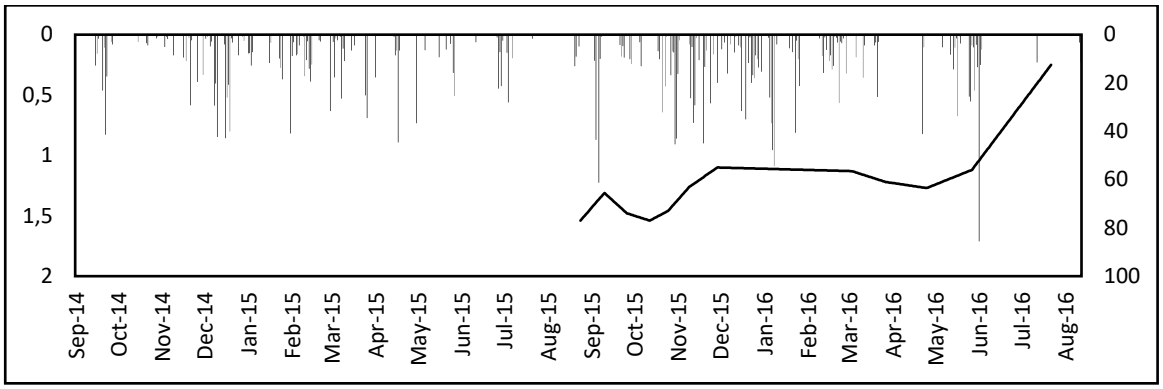


Figura A50 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI7 da Bacia do Boi

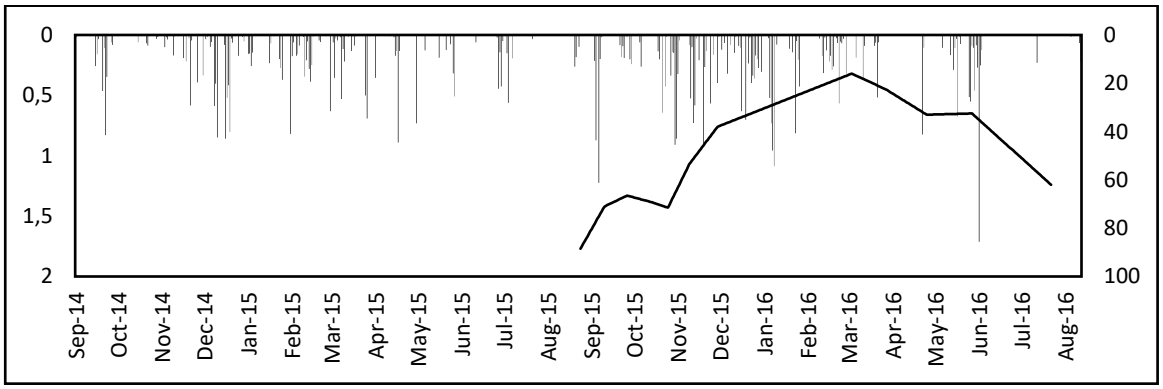


Figura A51 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BOI8 da Bacia do Boi

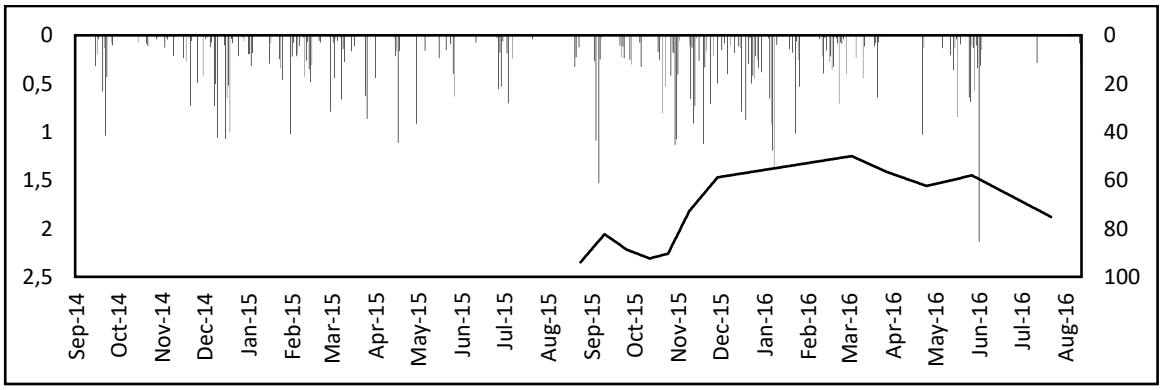


Figura A52 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BG1

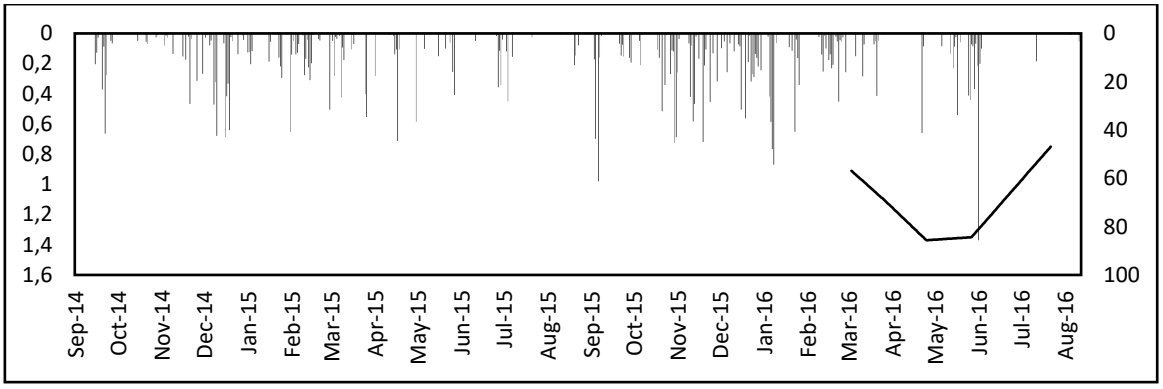


Figura A53 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BG2

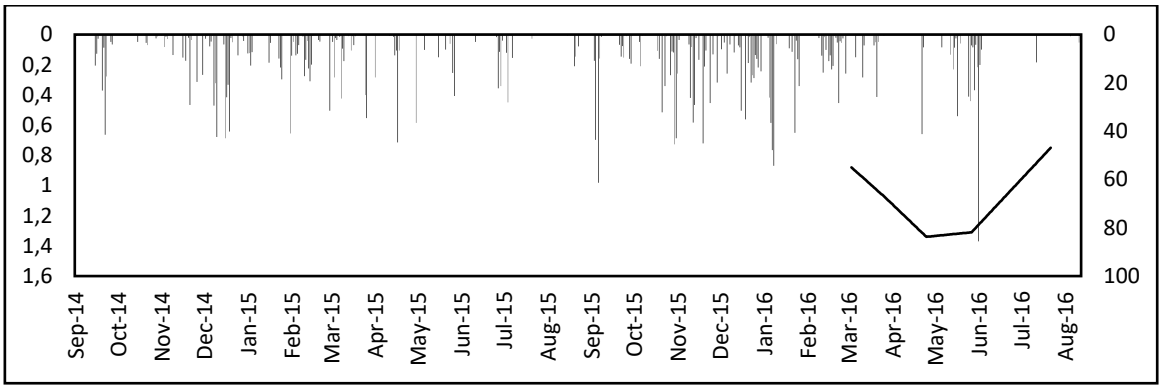


Figura A54 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BG3

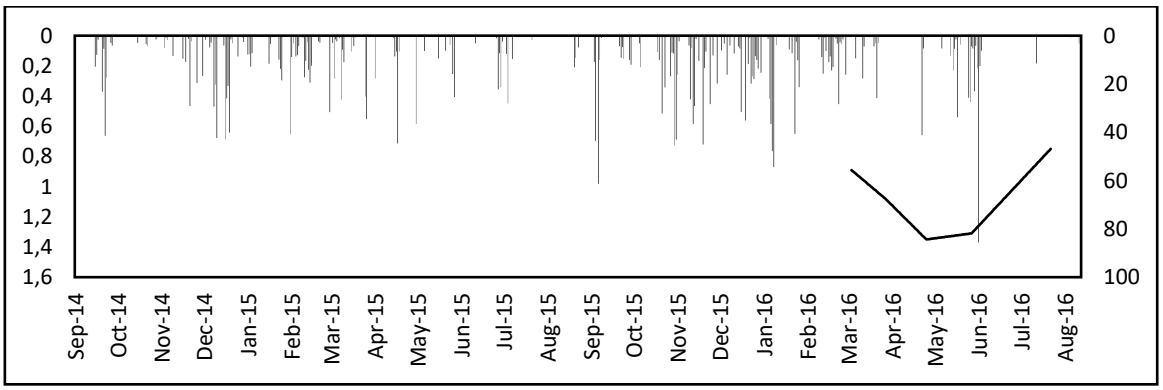


Figura A55 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BG4

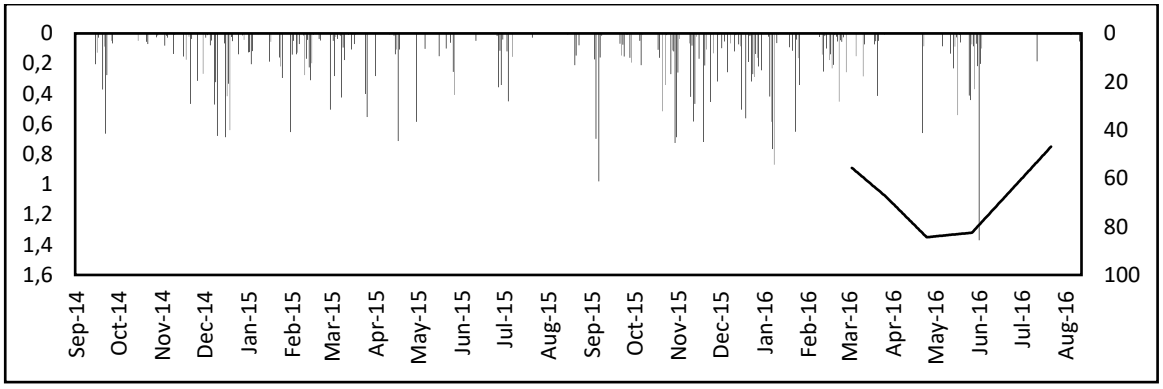
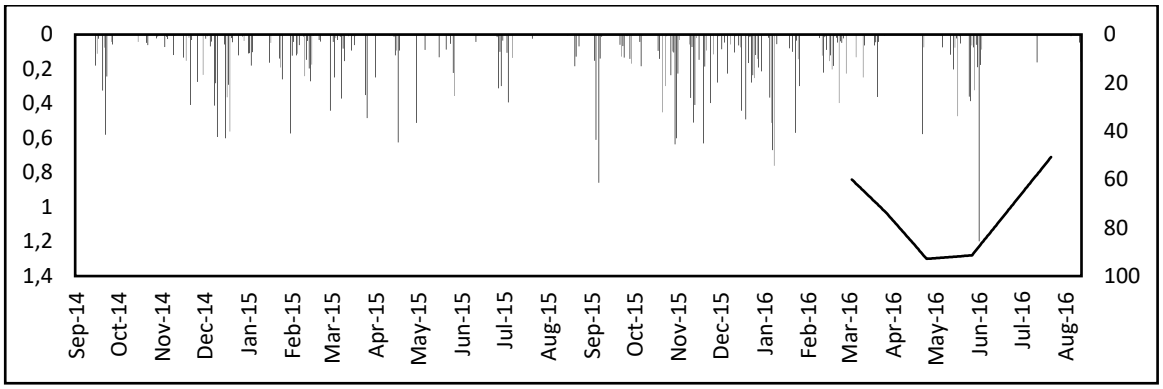


Figura A56 – Monitoramento da precipitação e do nível freático no poço BG5



Apêndice B - Método da Variação da superfície livre para os poços analisados

Figura B1 – Método da variação da superfície livre para o poço P1 na Bacia do Passarinho

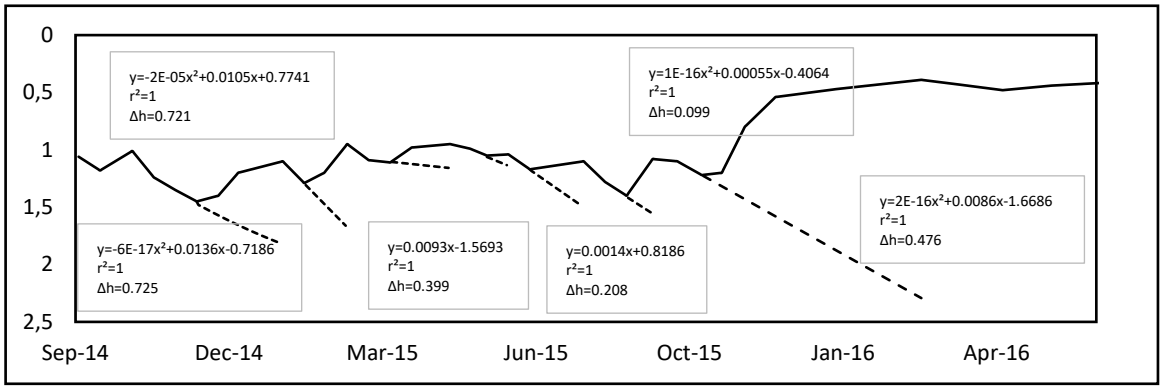


Figura B2 – Método da variação da superfície livre para o poço P2 na Bacia do Passarinho

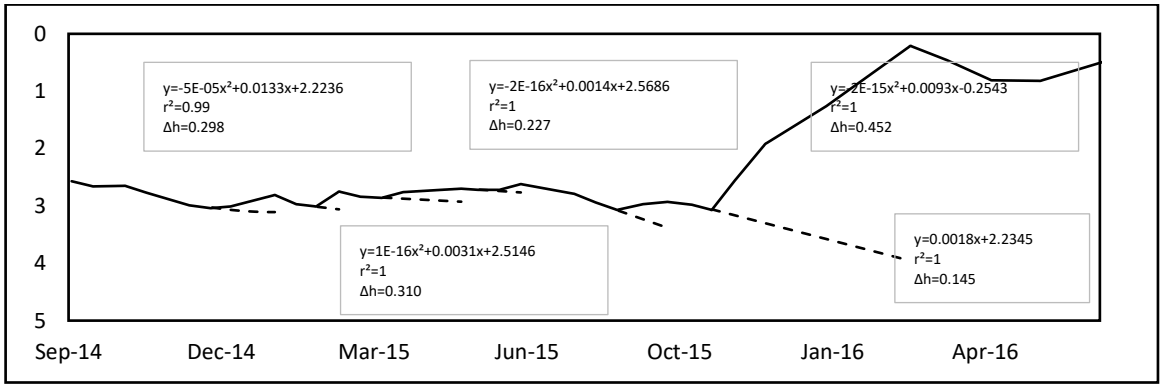


Figura B3 – Método da variação da superfície livre para o poço P3 na Bacia do Passarinho

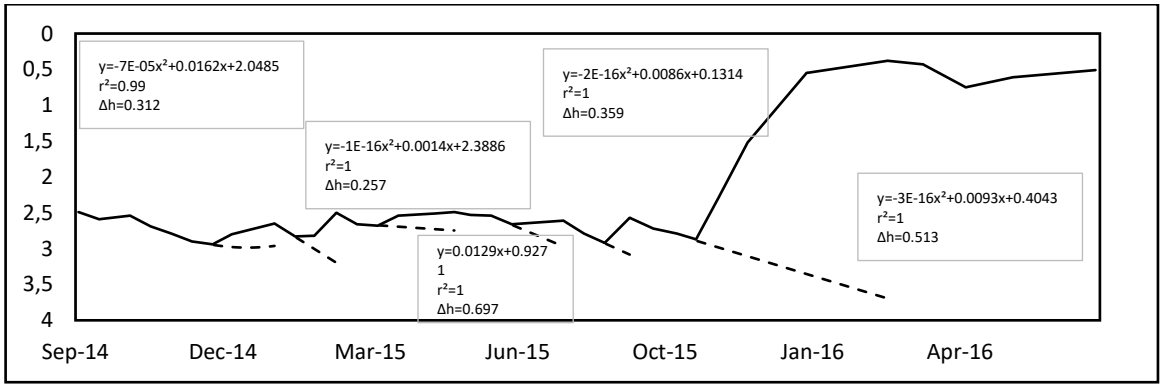


Figura B4 – Método da variação da superfície livre para o poço G1 na Bacia do Guarantã

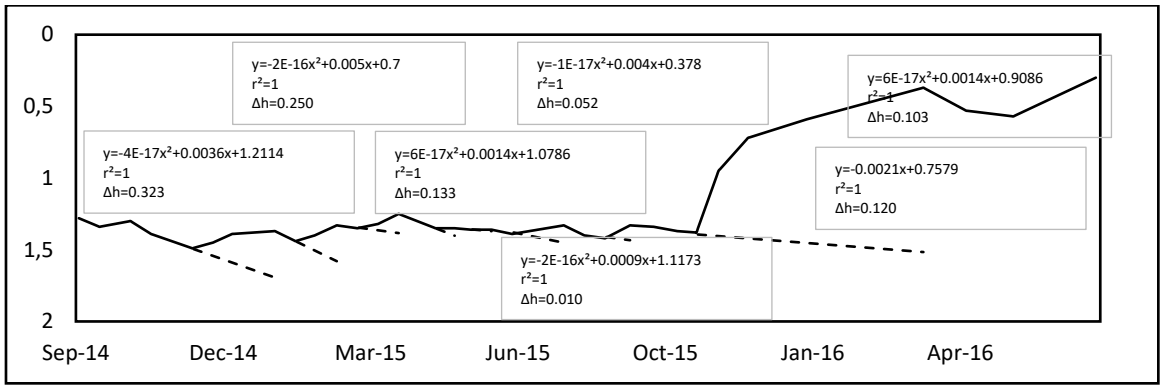


Figura B5 – Método da variação da superfície livre para o poço G2 na Bacia do Guarantã

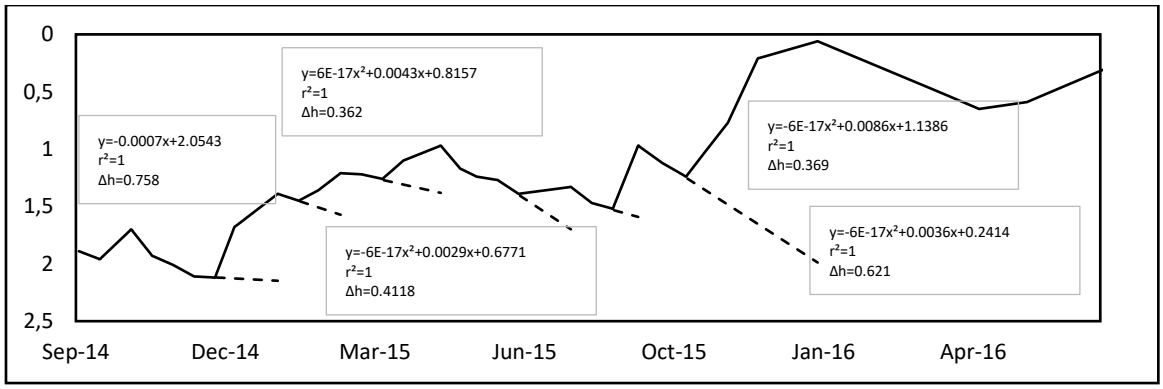


Figura B6 – Método da variação da superfície livre para o poço G3 na Bacia do Guarantã

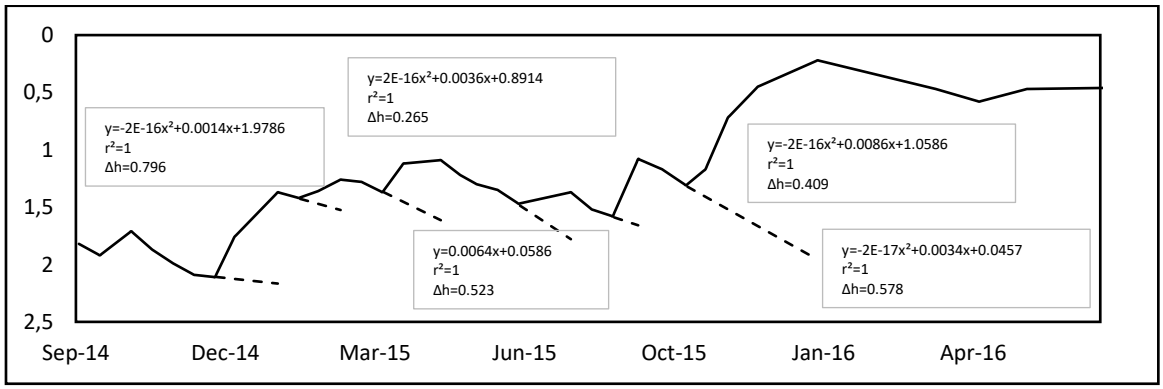


Figura B7 – Método da variação da superfície livre para o poço G4 na Bacia do Guarantã

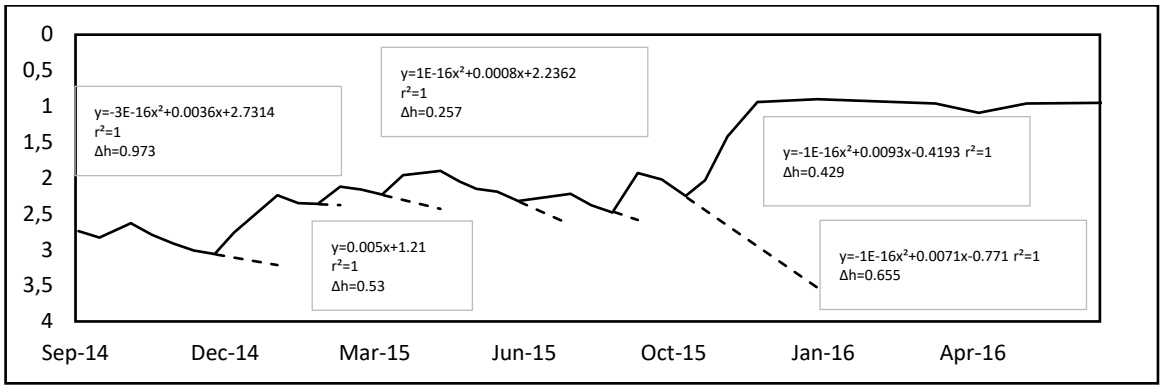


Figura B8 – Método da variação da superfície livre para o poço G5 na Bacia do Guarantã

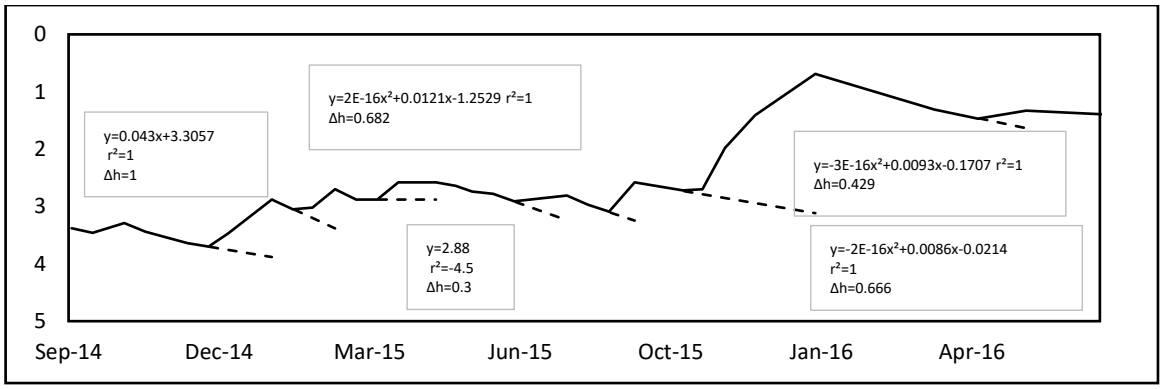


Figura B9 – Método da variação da superfície livre para o poço G6 na Bacia do Guarantã

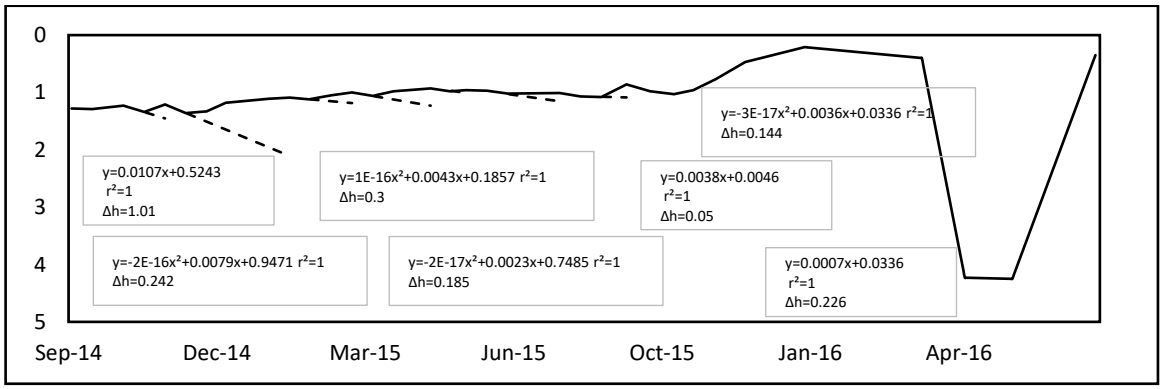


Figura B10 – Método da variação da superfície livre para o poço G7 na Bacia do Guarantã

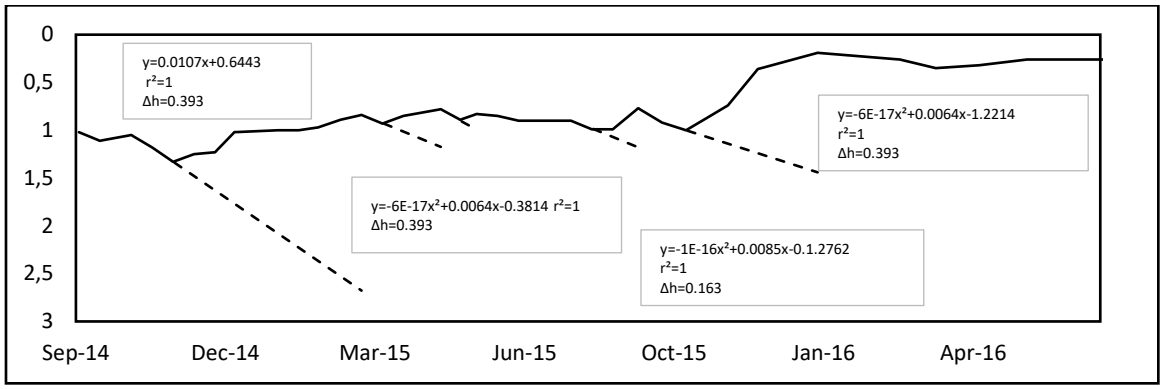


Figura B11 – Método da variação da superfície livre para o poço G8 na Bacia do Guarantã

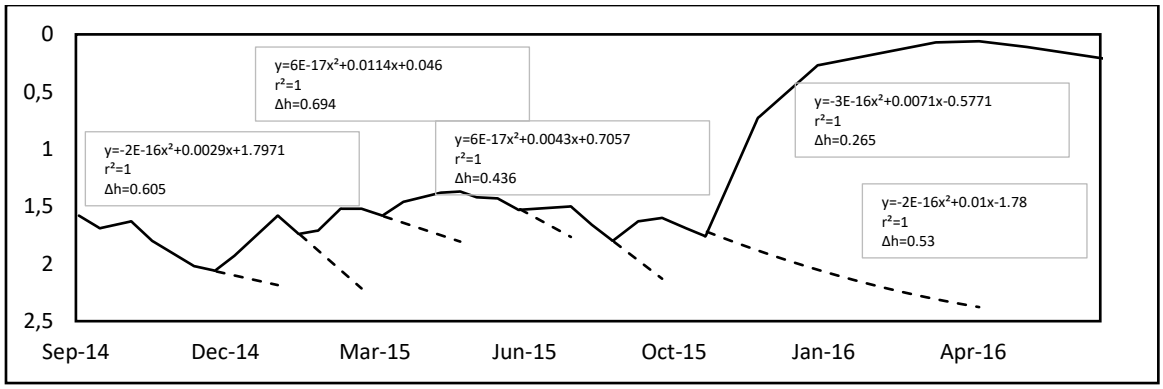


Figura B12 – Método da variação da superfície livre para o poço G9 na Bacia do Guarantã

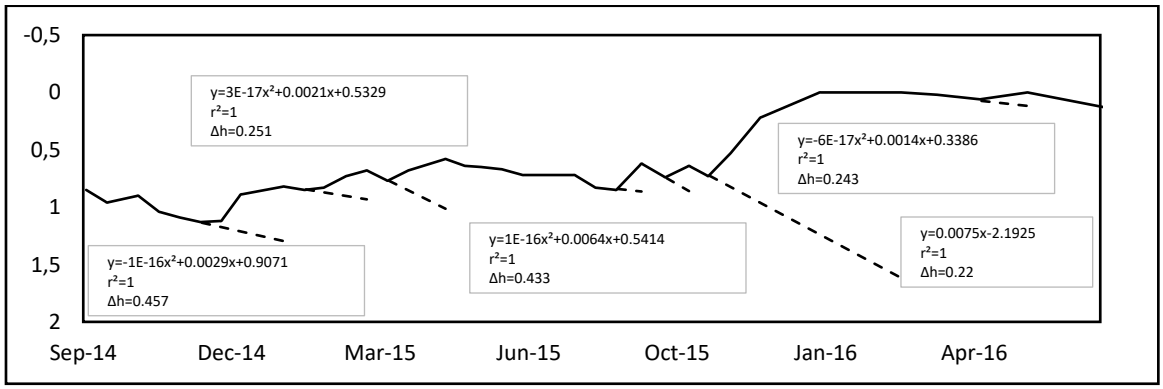


Figura B13 – Método da variação da superfície livre para o poço B1 na Bacia do Bugre

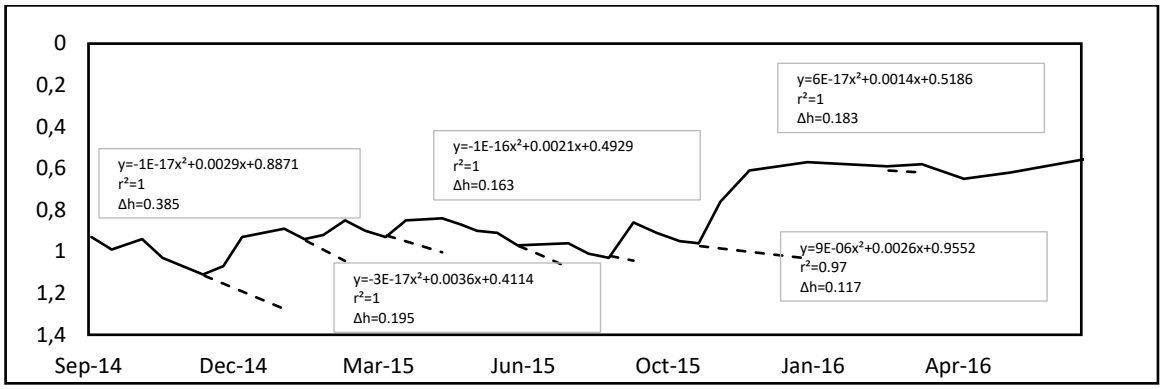


Figura B14 – Método da variação da superfície livre para o poço B2 na Bacia do Bugre

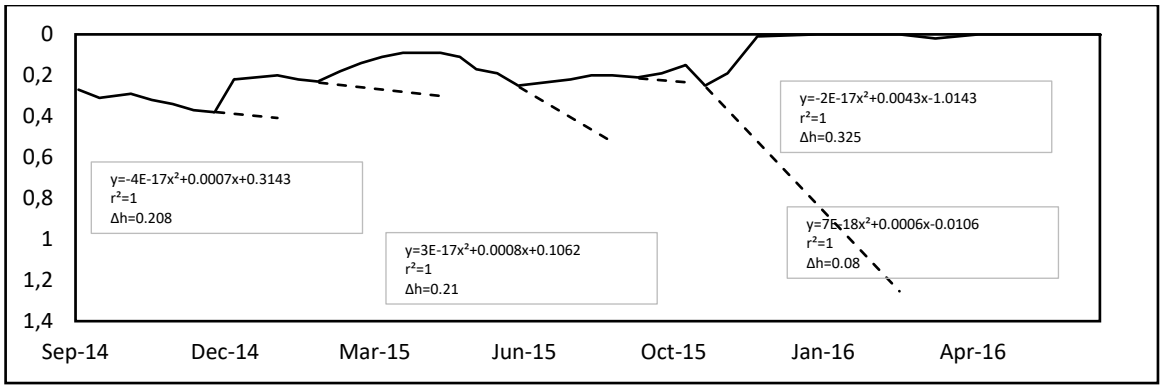


Figura B15 – Método da variação da superfície livre para o poço B3 na Bacia do Bugre

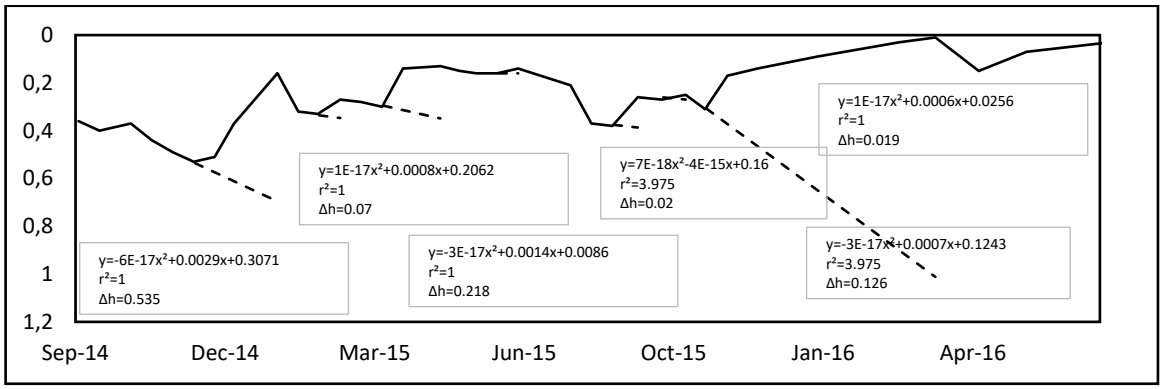


Figura B16 – Método da variação da superfície livre para o poço B4 na Bacia do Bugre

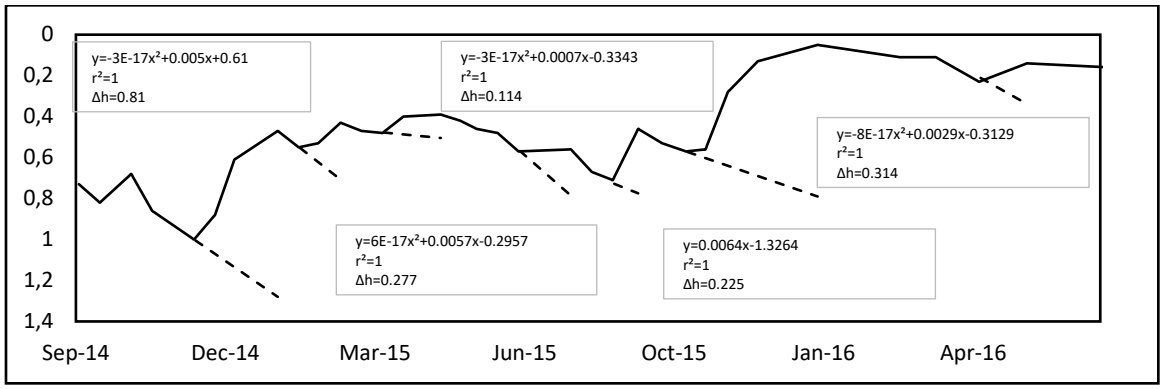


Figura B17 – Método da variação da superfície livre para o poço B5 na Bacia do Bugre

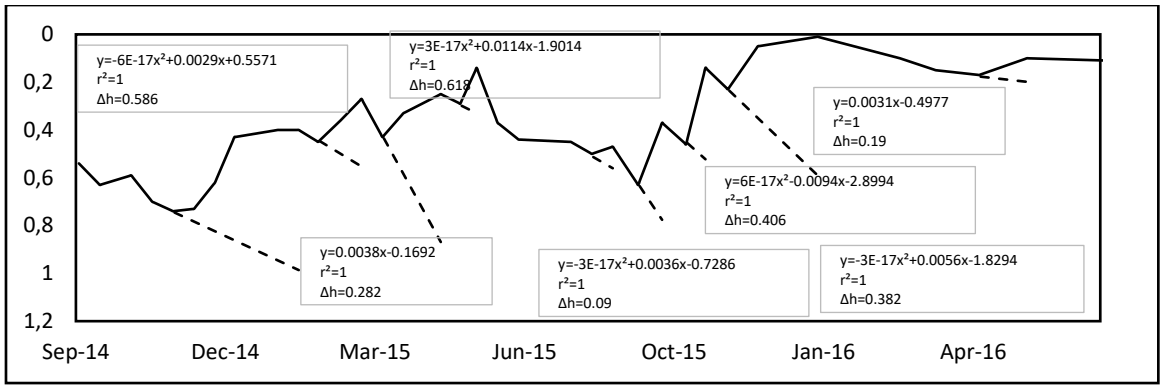


Figura B18 – Método da variação da superfície livre para o poço B6 na Bacia do Bugre

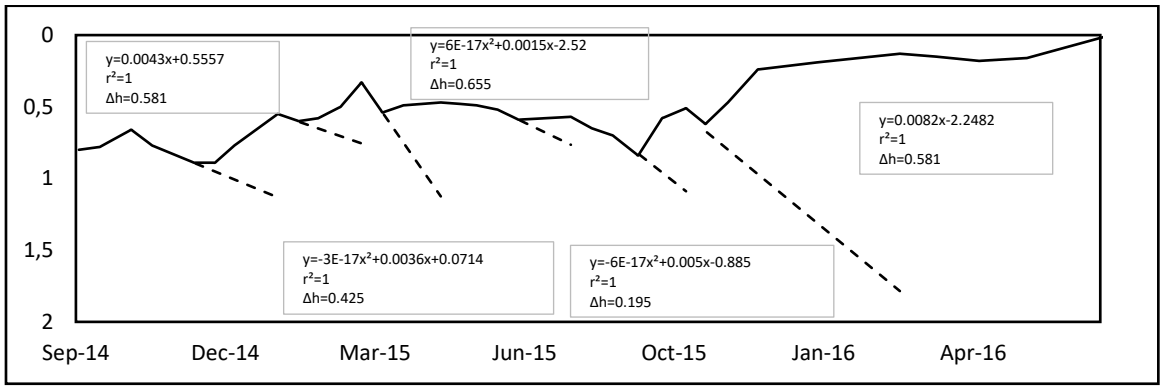


Figura B19 – Método da variação da superfície livre para o poço B7 na Bacia do Bugre

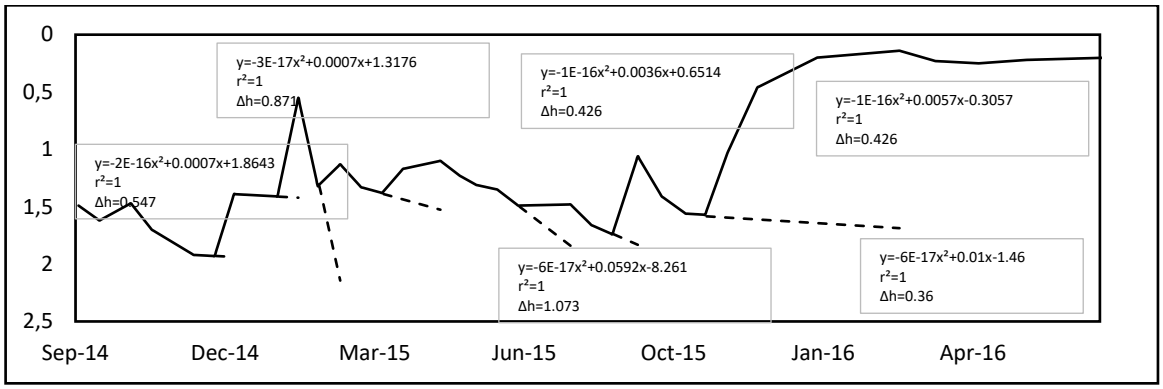


Figura B20 – Método da variação da superfície livre para o poço B8 na Bacia do Bugre

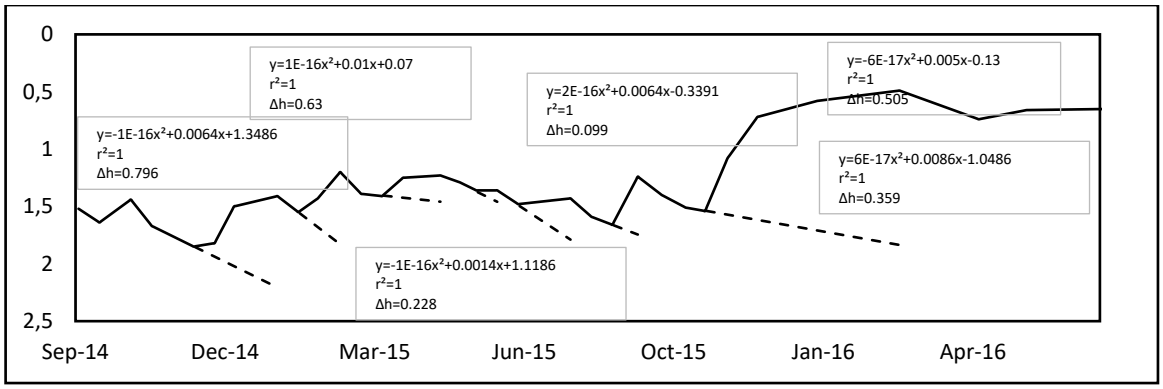


Figura B21 – Método da variação da superfície livre para o poço B9 na Bacia do Bugre

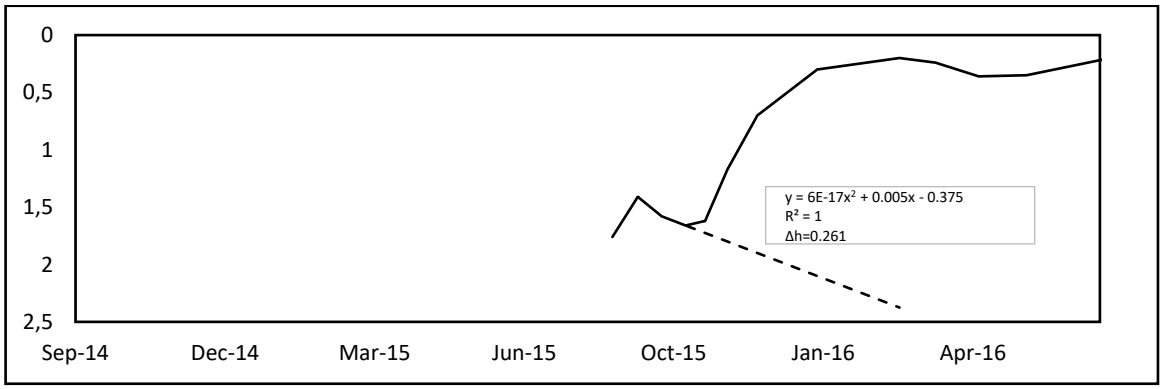


Figura B22 – Método da variação da superfície livre para o poço B10 na Bacia do Bugre

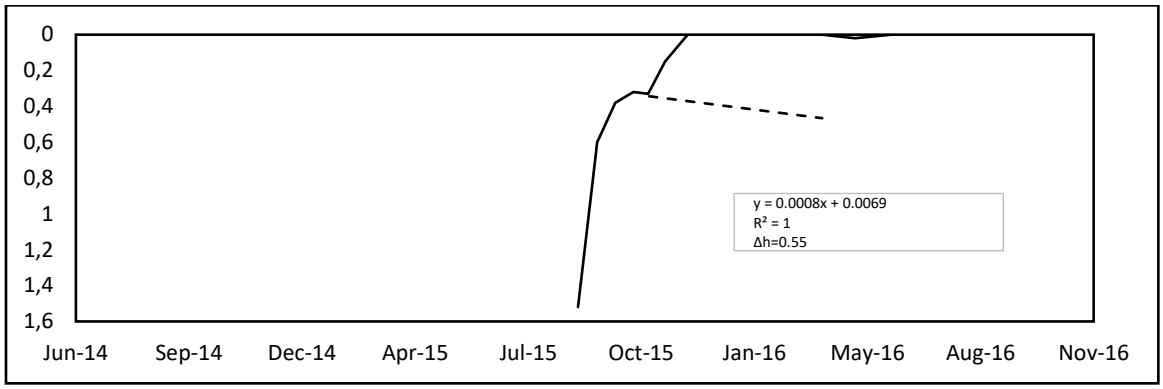


Figura B23 – Método da variação da superfície livre para o poço B11 na Bacia do Bugre

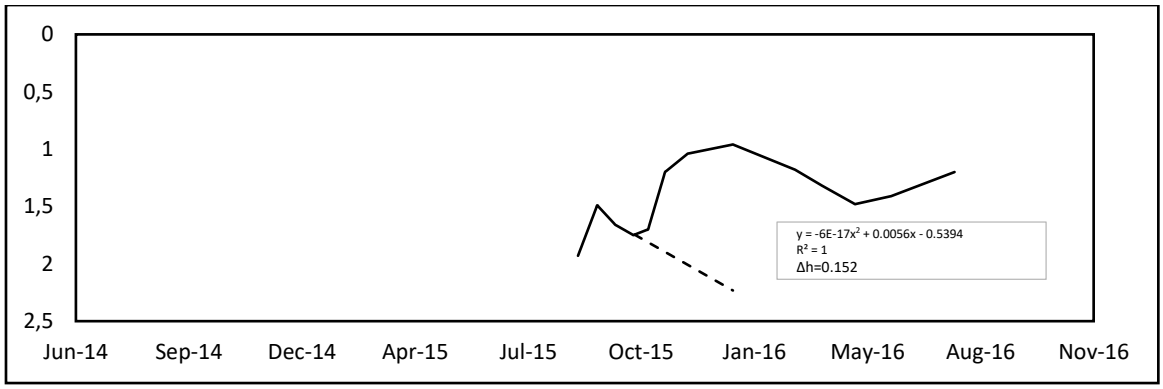


Figura B24 – Método da variação da superfície livre para o poço S1 na Bacia do Santana

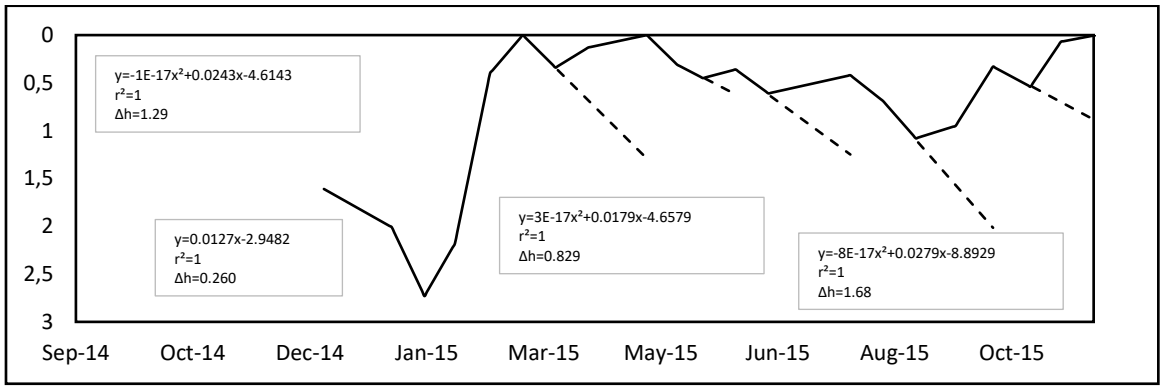


Figura B25 – Método da variação da superfície livre para o poço S2 na Bacia do Santana

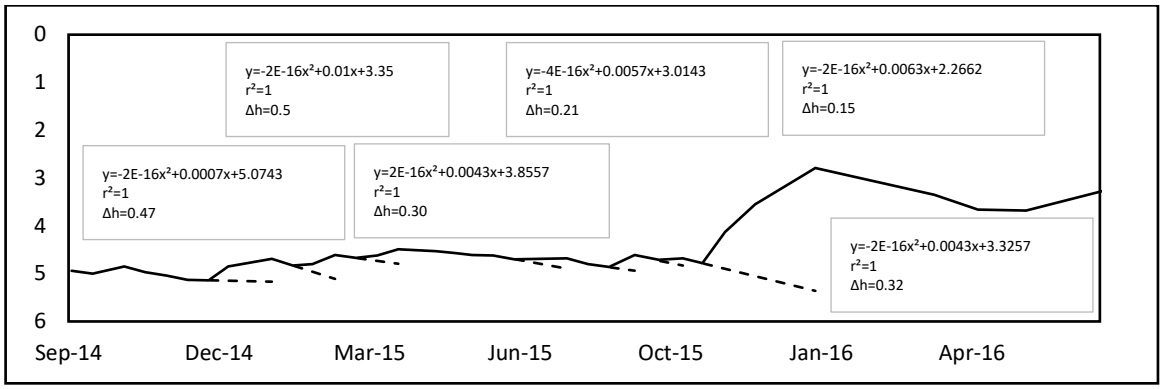


Figura B26 – Método da variação da superfície livre para o poço S3 na Bacia do Santana

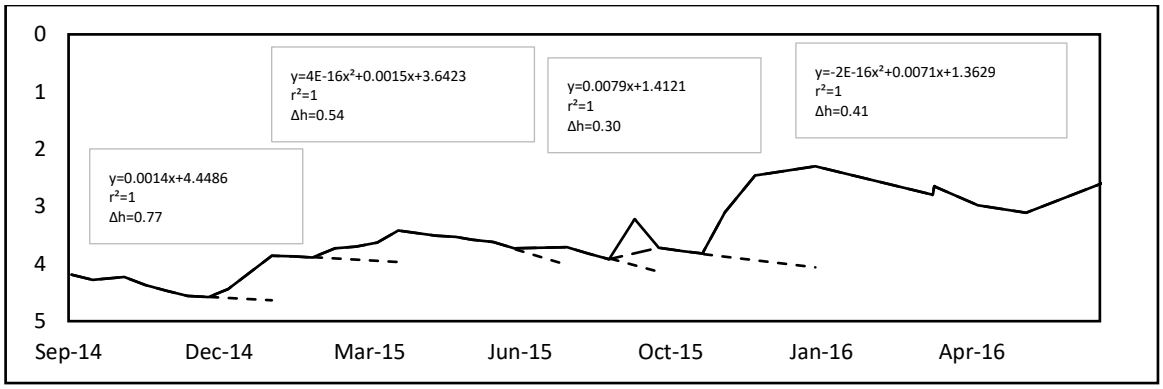


Figura B27 – Método da variação da superfície livre para o poço S4 na Bacia do Santana

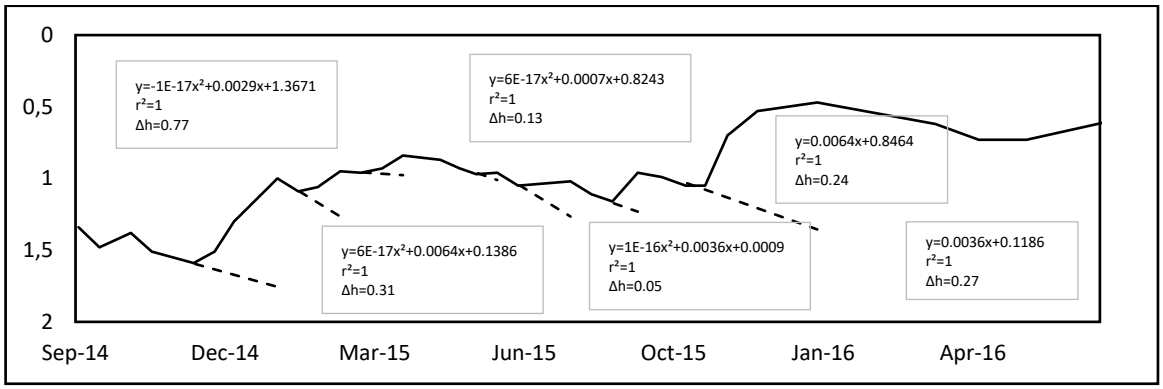


Figura B28 – Método da variação da superfície livre para o poço S5 na Bacia do Santana

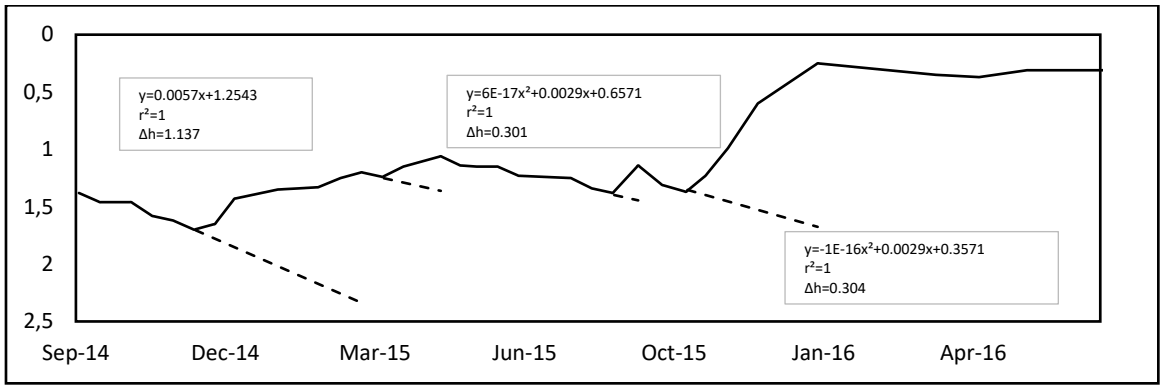


Figura B29 – Método da variação da superfície livre para o poço S6 na Bacia do Santana

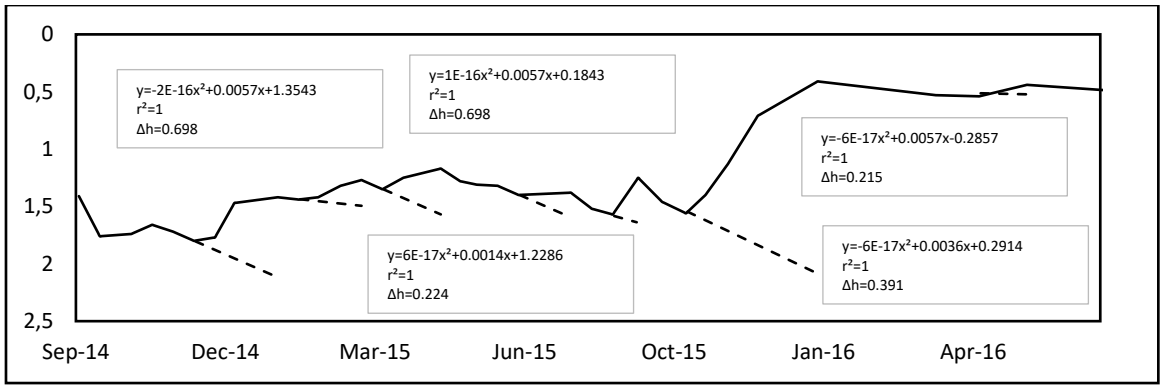


Figura B30 – Método da variação da superfície livre para o poço S7 na Bacia do Santana

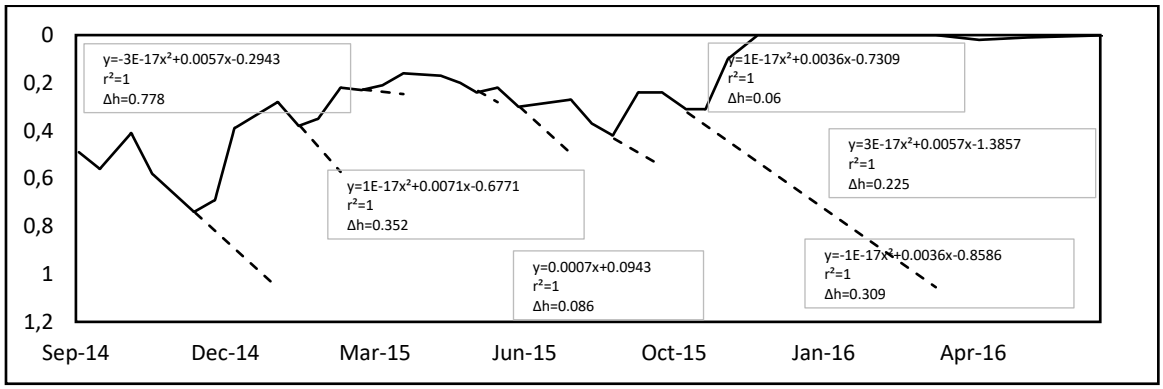


Figura B31 – Método da variação da superfície livre para o poço S8 na Bacia do Santana

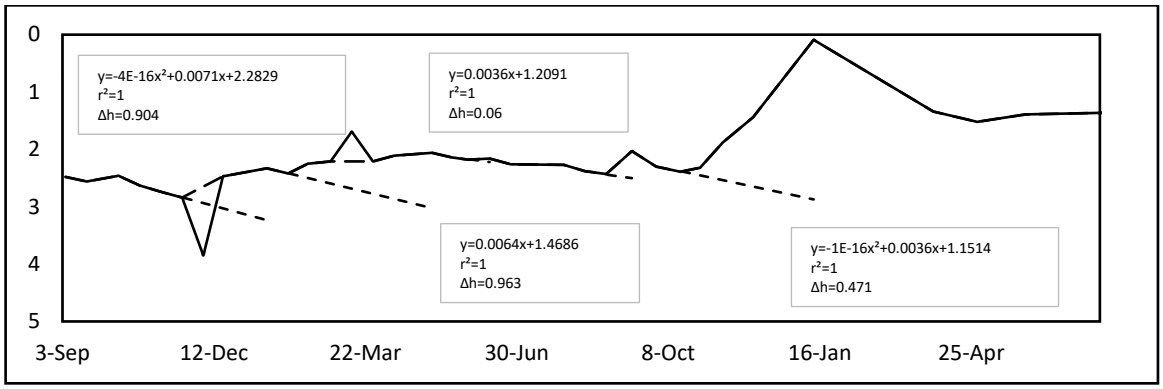


Figura B32 – Método da variação da superfície livre para o poço S9 na Bacia do Santana

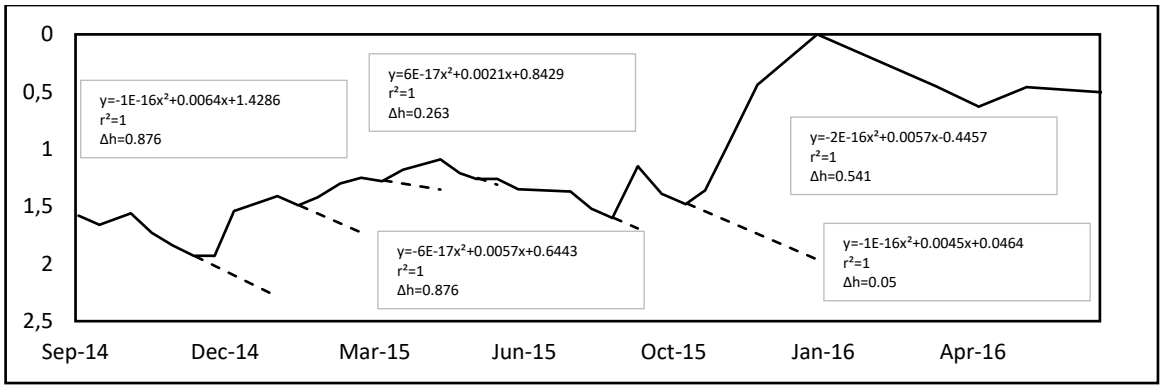


Figura B33 – Método da variação da superfície livre para o poço S10 na Bacia do Santana

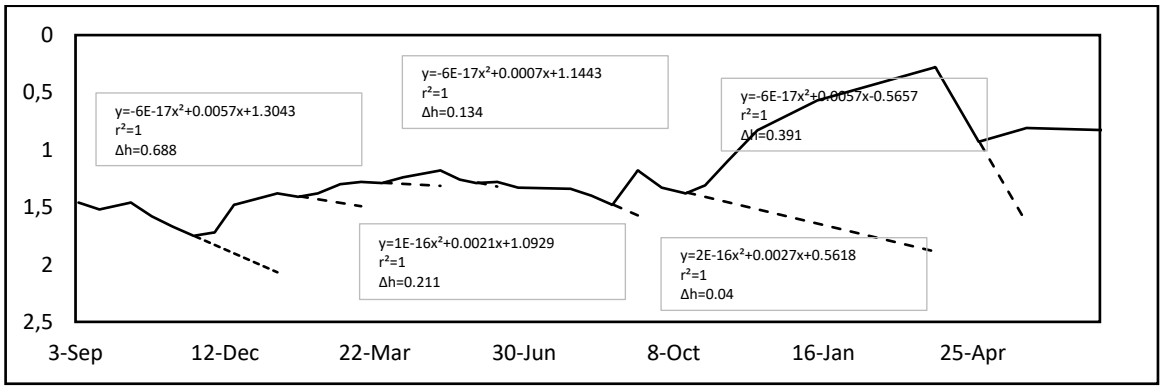


Figura B34 – Método da variação da superfície livre para o poço S11 na Bacia do Santana

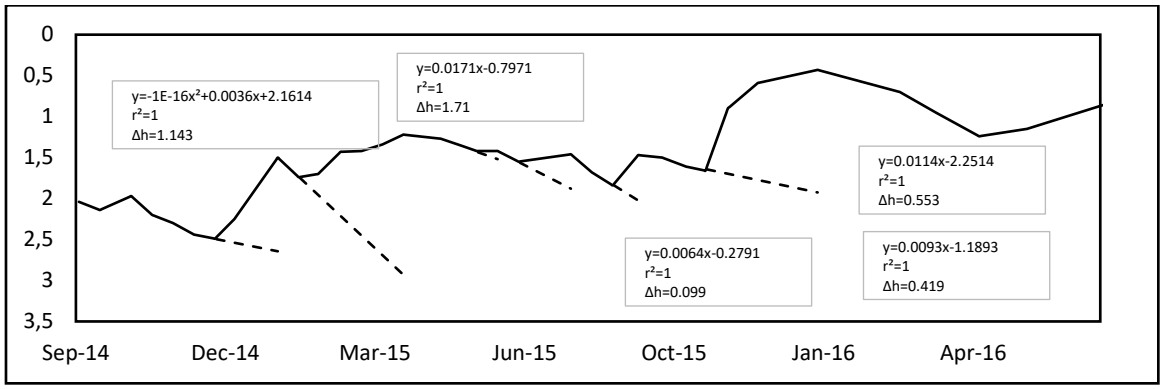


Figura B35 – Método da variação da superfície livre para o poço S12 na Bacia do Santana

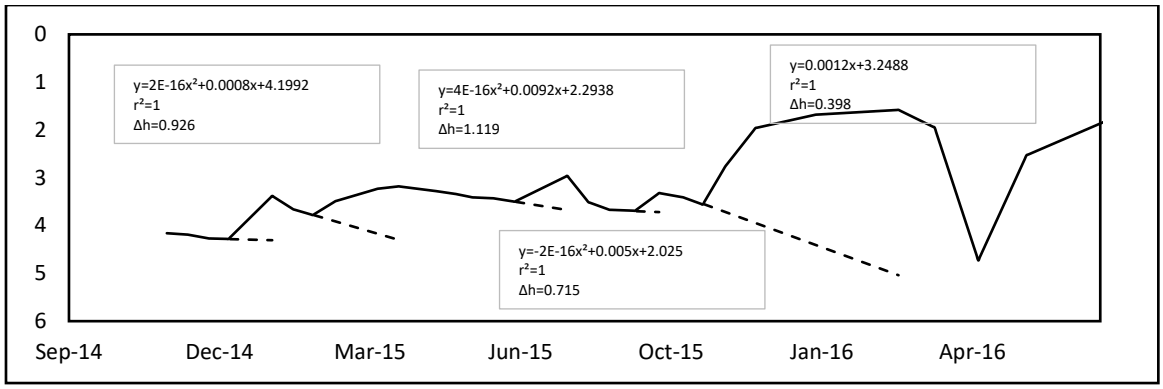


Figura B36 – Método da variação da superfície livre para o poço S13 na Bacia do Santana

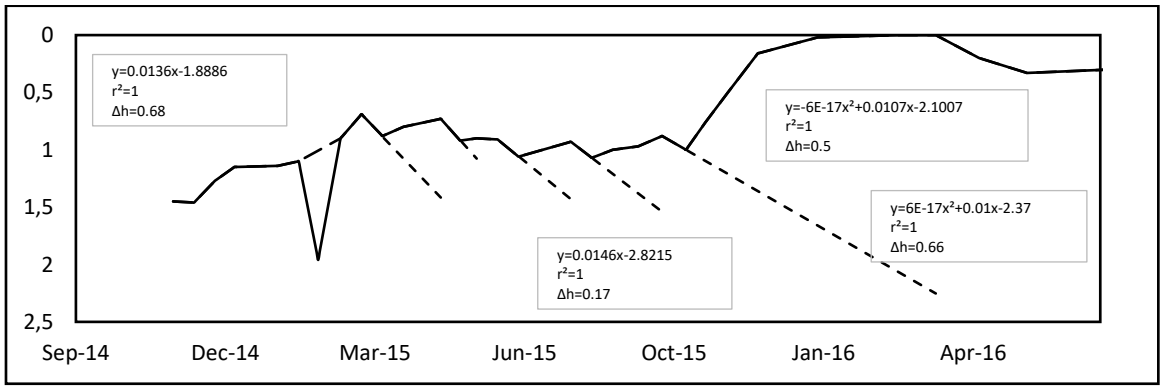


Figura B37 – Método da variação da superfície livre para o poço S14 na Bacia do Santana

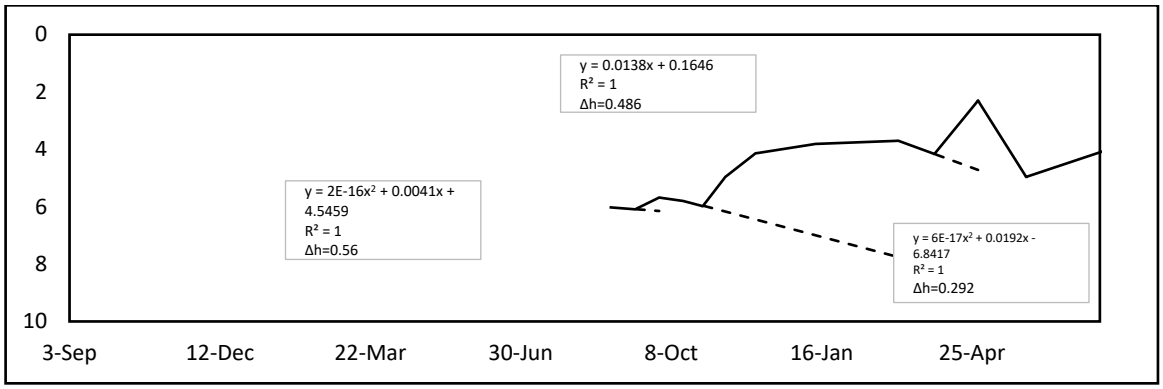


Figura B38 – Método da variação da superfície livre para o poço S15 na Bacia do Santana

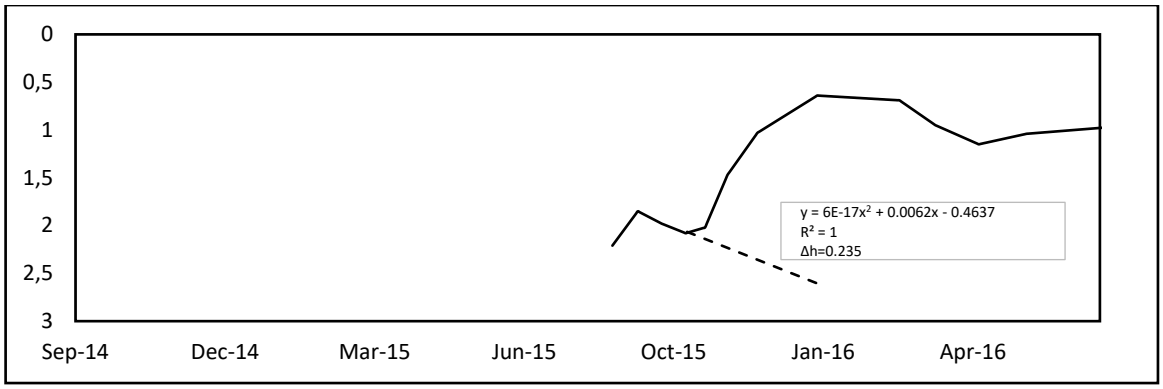


Figura B39 – Método da variação da superfície livre para o poço S16 na Bacia do Santana

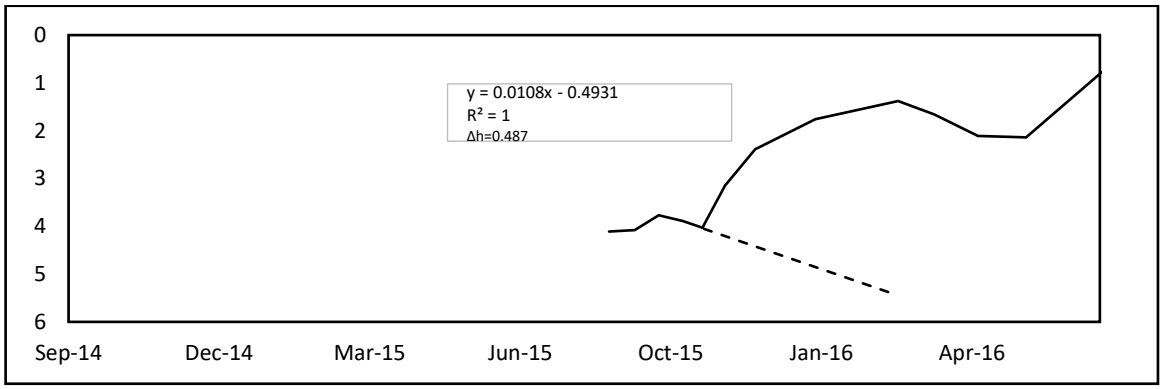


Figura B40 – Método da variação da superfície livre para o poço S17 na Bacia do Santana

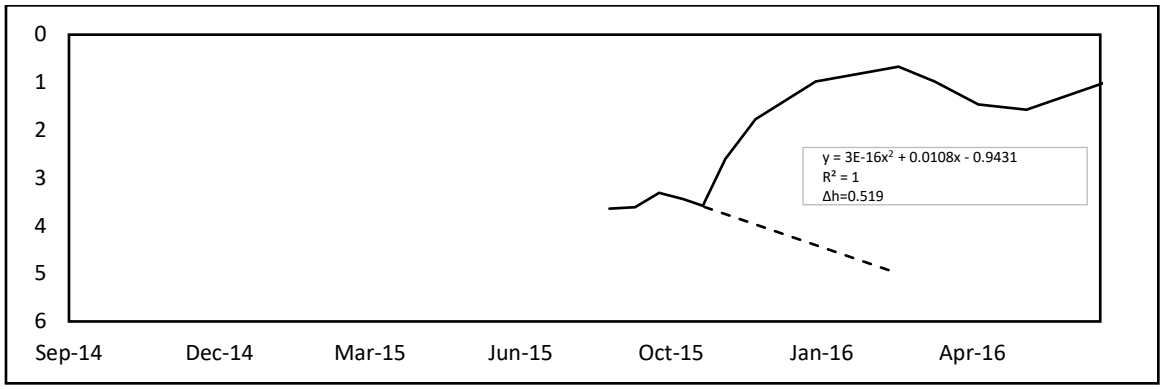


Figura B41 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI_D na Bacia do Boi

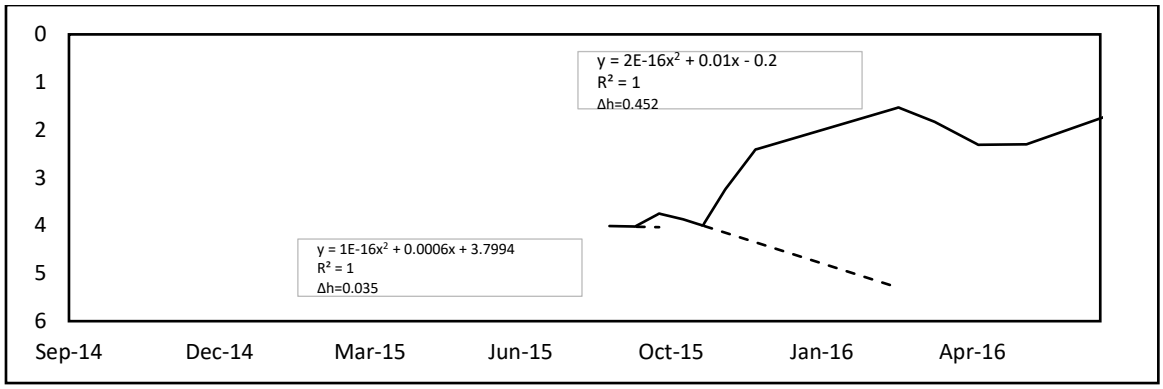


Figura B42 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI1 na Bacia do Boi

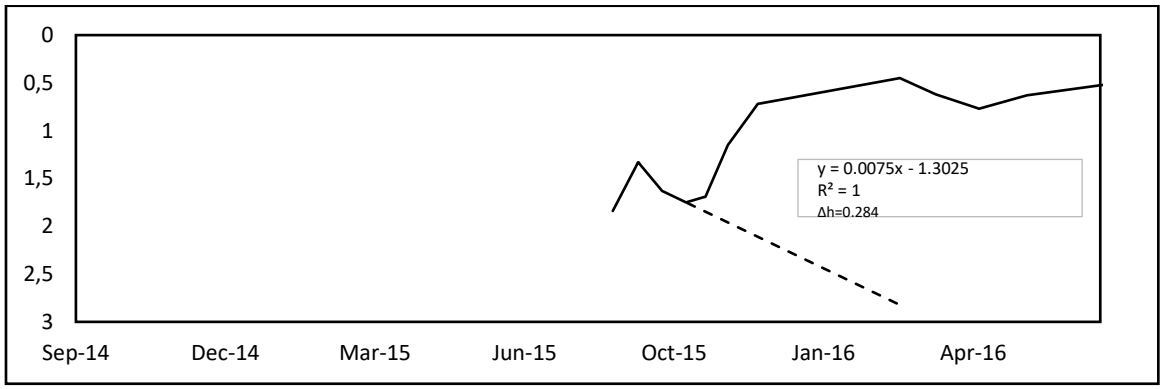


Figura B43 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI2 na Bacia do Boi

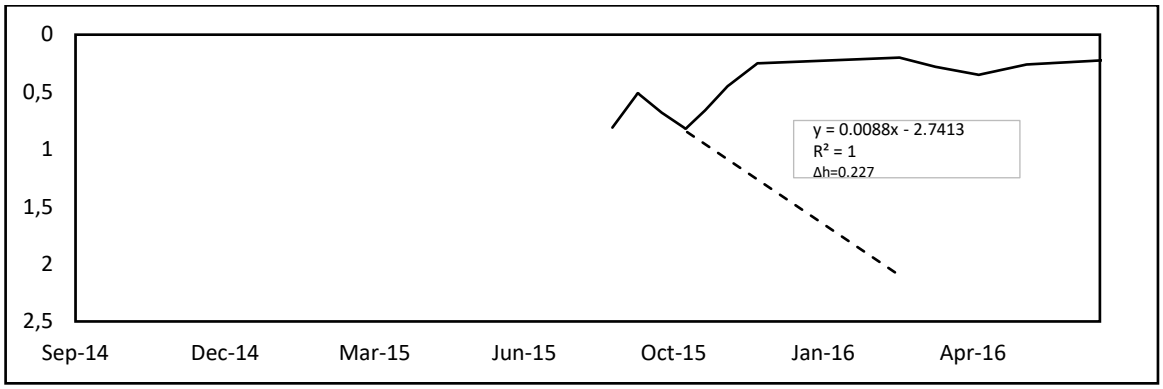


Figura B44 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI3 na Bacia do Boi

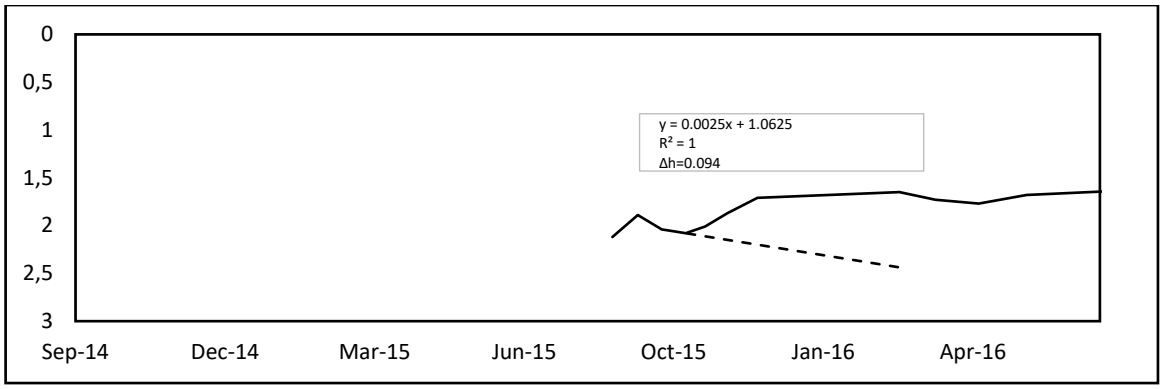


Figura B45 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI4 na Bacia do Boi

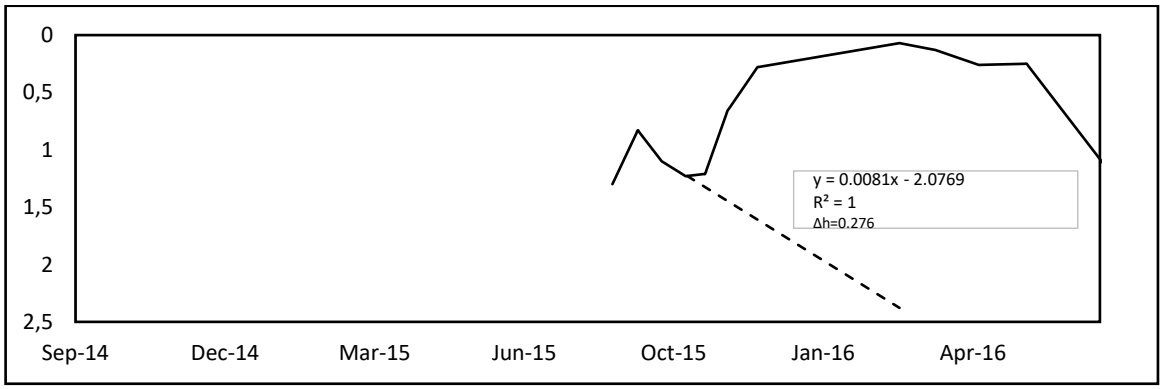


Figura B46 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI5 na Bacia do Boi

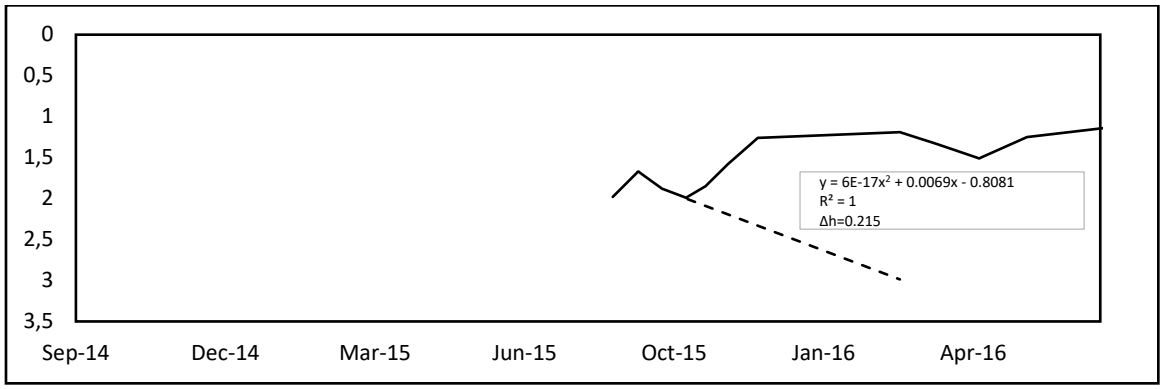


Figura B47 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI6 na Bacia do Boi

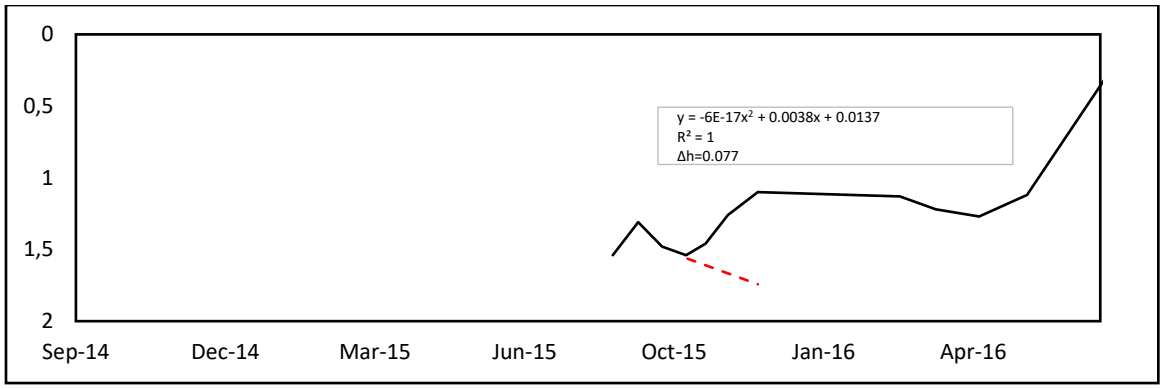


Figura B48 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI7 na Bacia do Boi

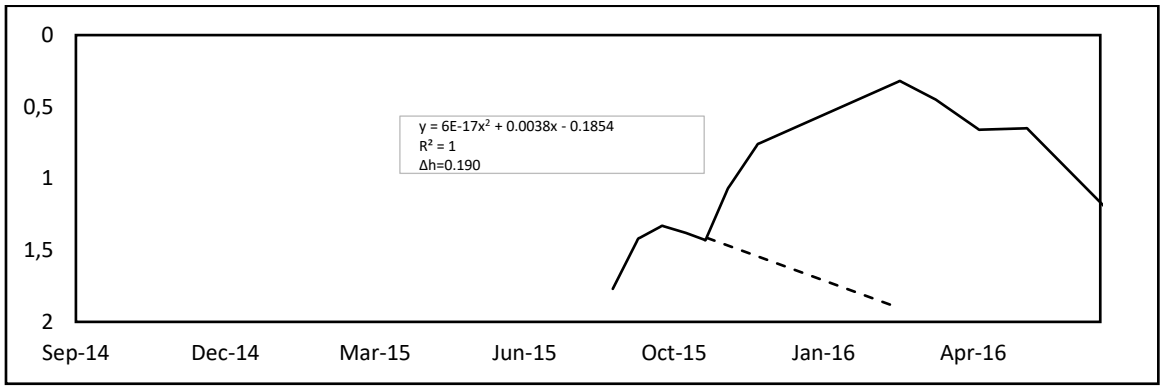
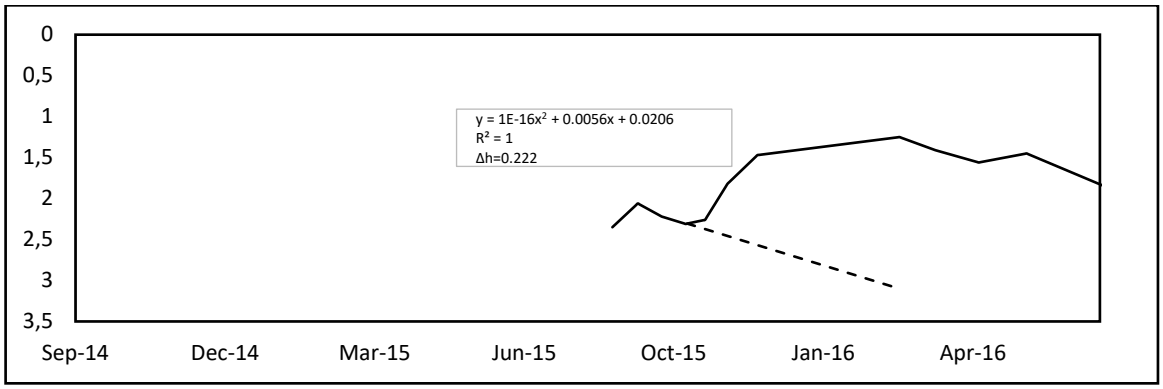



Figura B49 – Método da variação da superfície livre para o poço BOI8 na Bacia do Boi