



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DOS FATORES
CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE ÁGUA
SUBTERRÂNEA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU**

Marcela Barcelos Barbosa

Ouro Preto, março de 2020

**APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DOS
FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE
ÁGUA SUBTERRÂNEA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Reitora

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe

Prof. Ms. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 361

APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DOS FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU

Marcela Barcelos Barbosa

Orientadora

Prof.^a Dr.^a Maria Augusta Gonçalves Fujaco

Co-Orientador

Dr.^a Maria Antonieta de Alcântara Mourão

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 400, ano 2019/1

OURO PRETO

2020

Universidade Federal de Ouro Preto – <http://www.ufop.br>
Escola de Minas - <http://www.em.ufop.br>
Departamento de Geologia - <http://www.degeo.ufop.br/>
Campus Morro do Cruzeiro s/n - Bauxita
35.400-000 Ouro Preto, Minas Gerais
Tel. (31) 3559-1600, Fax: (31) 3559-1606

Direitos de tradução e reprodução reservados.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser gravada, armazenada em sistemas eletrônicos, fotocopiada ou reproduzida por meios mecânicos ou eletrônicos ou utilizada sem a observância das normas de direito autoral.

Revisão geral: Marcela Barcelos Barbosa

Catálogo elaborado pela Biblioteca Prof. Luciano Jacques de Moraes do
Sistema de Bibliotecas e Informação - SISBIN - Universidade Federal de Ouro Preto

B238a	Barbosa, Marcela Barcelos Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes das variações do nível de água subterrânea do Sistema Aquífero Bauru [manuscrito] / Marcela Barcelos Barbosa - 2020. 56 f.; il. color.; graf.; tabs.; mapas. Orientadora: Profa. Dra. Maria Augusta Gonçalves Fujaco Coorientadora: Profa. Dra. Maria Antonieta Alcântara Mourão. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. 1. Hidrogeologia. 2. Geoprocessamento. 3. Hidrogeologia. 4. Águas subterrâneas. I. Fujaco, Maria Augusta Gonçalves. II. Mourão, Maria Antonieta Alcântara. III. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. III. Título. CDU: 556.38
--------------	---

<http://www.sisbin.ufop.br>

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: APLICAÇÃO DO GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DOS FATORES
CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE ÁGUA DO SISTEMA
AQUÍFERO BAURU.

AUTOR: Marcela Barcelos Barbosa

ORIENTADORA: Maria Augusta Gonçalves Fujaco

CO-ORIENTADORA: Maria Antonieta de Alcântara Mourão

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Profª Drª Maria Augusta G. Fujaco  DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Luis de Almeida P. Bacellar  DEGEO/UFOP

Ms. Clivihk Renna Camacho  CPRM

Ouro Preto, 03 103 12020

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus guias espirituais por me conduzirem até aqui.

À minha mãe por ser meu maior exemplo de dedicação e garra, ao meu pai por me ensinar a ver a vida com outros olhos, e ao meu padrinho por todo amor e por nunca medir esforços para me apoiar. Esta conquista dedico a vocês.

À minha irmã por me ensinar uma nova forma de amar. A todos meus familiares em especial Thalles, Thayna e Harley.

Aos meus avós pelo amor incondicional, em especial a vó Helenita.

Ao meu companheiro André, pela compreensão, paciência e amor.

Às minhas orientadoras, pela dedicação, incentivo e conhecimentos transmitidos. Sem vocês este trabalho não seria possível.

Aos amigos de Ouro Preto, Thaysa, Ana, Gabi, Carolinas, Mari, Elis, Dorval, Galdino, Cachu, Jeff, Dell, João e Detinha pelos laços de amizade construídos e por me acolherem nos momentos felizes e difíceis.

Às empresas nas quais tive a oportunidade de trabalhar e me desenvolver profissionalmente, Tetra Tech e Geological Survey of Saxon/Germany, em especial aos supervisores Manuel e Simone.

Ao CNPq e à CPRM por possibilitarem a realização deste trabalho, em especial ao Everton.

Por fim à Universidade Federal de Ouro Preto e ao Departamento de Geologia pelo ensino gratuito e de qualidade. A todos os professores e técnicos que tornam isso possível, ao PET e todos os seus membros por mostrarem a necessidade de romper as barreiras da universidade para com a comunidade, em especial a Adi por ser mais que uma tutora e ressignificar esta caminhada.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	ix
SUMÁRIO	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.4 ÁREA DE ESTUDO.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 AQUÍFEROS	5
2.2 SISTEMA AQUÍFERO BAURU	7
2.2.1 Contexto Estratigráfico	7
2.2.2 Contexto Geotectônico.....	9
2.2.3 Caracterização Hidrogeológica	11
2.2.4 Classificação Hidrológica dos Solos.....	12
2.3 MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	15
2.4 O USO DO GEOPROCESSAMENTO APLICADO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.1 METODOLOGIA	19
3.1.1 Aquisição de Dados e Bases Temáticas	21
3.1.2 Análise estatística de séries temporais	24
3.1.3 Espacialização dos dados em ambiente SIG	25
3.1.4 Análise Multicritério	25
4 FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE ÁGUA QUE INFLUENCIAM NA DISPONIBILIDADE HIDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL.....	31
4.1 INTRODUÇÃO	32

4.1.1	GEOLOGIA.....	33
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	34
4.2	METODOLOGIA	35
4.2.1	Descrição das etapas metodológicas	35
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.4	CONCLUSÕES	46
5	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
	APÊNDICES.....	50

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Delimitação do Sistema Aquífero Bauru com base no mapa geológico do Estado de São Paulo.	4
Figura 2.1 - Tipos de aquíferos quanto á sua porosidade (Fonte: Borghetti <i>et al.</i> , 2004).	6
Figura 2.2 - Tipos de aquíferos quanto à características hidráulicas. (Fonte: Borghetti <i>et al.</i> , 2004).	7
Figura 2.3 - Proposta clássica de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru proposta por Soares <i>et al.</i> (1980).	9
Figura 2.4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná e a distribuição no tempo das diversas unidades do seu registro estratigráfico (Fonte: Milani, 2004).	10
Figura 2.5 - Mapa pedológico do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo (adaptado de Rossi, 2017).	13
Figura 2.6 - Estrutura de armazenamento de dados geográficos em um SIG (Fonte: Feitosa <i>et al.</i> , 2008).	18
Figura 3.1 - Fluxograma ilustrando as etapas metodológicas do estudo.	20
Figura 3.2 - Mapa indicando a localização dos poços de monitoramento da rede RIMAS no sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo.	21
Figura 3.3 - Exemplo do perfil construtivo de um poço de monitoramento no município de Assis - SP pertencente à rede RIMAS.	22
Figura 4.1 - Delimitação do Sistema Aquífero Bauru com base no mapa geológico do Estado de São Paulo.	32
Figura 4.2 - Proposta clássica de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru proposta por Soares <i>et al.</i> (1980).	34
Figura 4.3 - Fluxograma ilustrando as etapas metodológicas do estudo.	36
Figura 4.4 - Mapa indicando a localização dos poços de monitoramento no sistema aquífero Bauru e seus respectivos tempos de resposta aos eventos de chuva.	42
Figura 4.5 - Como exemplo de poços que apresentaram respostas rápidas aos eventos de chuva têm-se o poço 3500027321. Em a) grafico mostrando o comportamento das séries de	

precipitação e variação do nível d'água para o período de estudo; b) gráfico de correlação cruzada indicando uma resposta de 2 meses; e c) perfil litológico do poço apresentando sequências predominantemente arenosas. 43

Figura 4.6 - Poço 3500027325: a) gráfico mostrando o nível d'água praticamente constante até 2016; b) gráfico de correlação cruzada indicando que não há correlação; e c) perfil litológico do poço indicando que o mesmo atinge os basaltos da Formação Serra Geral.....44

Figura 4.7 - Poço 3500027887: a) gráfico mostrando o comportamento das séries de precipitação e variação do nível d'água para o período de estudo; b) gráfico de correlação cruzada indicando que não há correlação entre as séries; e c) perfil litológico do poço indicando a presença de uma camada de 28m de argila entre as zonas não saturada e saturada. 45

Figura 4.8 - Poço 3500029467: a) gráfico mostrando o comportamento das séries de precipitação e variação do nível d'água para o período de estudo; b) gráfico de correlação cruzada indicando que não há correlação entre as séries; e c) perfil litológico do poço indicando a presença de uma camada de 8m de solo argiloso e uma camada de 16m de argilito entre as zonas não saturada e saturada.. 46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Classificação Hidrológica de solos para as condições brasileiras (adaptada de Sartori, 2005).....	14
Tabela 3.1- Pesos atribuídos aos fatores analisados e os valores de suas respectivas classes.	266
Tabela 4.1- Pesos atribuídos aos fatores analisados e os valores de suas respectivas classes.	39
Tabela 4.2- Compilação dos dados para cada poço de monitoramento após o cruzamento dos dados de meio físico.	141
Tabela 4.3- Resultado da análise multicritério utilizando o método WLC..	42

Resumo

O Sistema Aquífero Bauru é caracterizado como um aquífero sedimentar, de condição predominantemente livre, cuja recarga está associada à infiltração direta da precipitação. Este aquífero destaca-se como a principal fonte de abastecimento público e privado da região oeste do Estado de São Paulo, um importante polo industrial e agrícola do Brasil. Visando ampliar o conhecimento a respeito dos aquíferos de maior relevância do país e identificar os efeitos associados às intervenções antrópicas e às variações pluviométricas, foi implantada em 2009, pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM, uma ampla rede de monitoramento. Neste contexto, o presente estudo contempla a investigação e análise multitemática dos fatores intervenientes na correlação entre a resposta do nível d'água subterrânea e os eventos de chuva, incluindo as alterações antropogênicas, com o propósito de ampliar o conhecimento da potencialidade do sistema aquífero Bauru. Foram analisadas séries temporais de monitoramento do nível d'água subterrânea e de chuva, e avaliados os fatores que poderiam influenciar nesta relação, tais como: composição do perfil litológico acima do filtro em cada poço, a espessura da zona não saturada, a capacidade específica do poço, o número de poços de produção instalados em um raio de 5km, e os tipos de solo e cobertura encontrados na região. A análise das séries temporais se deu por meio da correlação simples entre as séries de nível d'água, a fim de verificar semelhança entre as mesmas, e correlação cruzada visando determinar a influência da precipitação no nível estático dos poços, de forma a estimar o tempo necessário para que a água se infiltre no solo e recarregue o aquífero, provocando um aumento do nível estático. Após as análises estatísticas foi realizada a espacialização dos dados no GIS e efetuada análise multicritério, atribuindo pesos às diferentes variáveis consideradas para explicar a correlação das séries temporais estudadas. Com base na identificação das interações e influências dos fatores supracitados, pôde-se concluir que existe uma correlação entre o nível d'água subterrânea e a pluviometria, e que os fatores preponderantes desta análise correspondem ao perfil litológico acima do filtro, a capacidade específica dos poços e a quantidade de poços de produção localizados em raio de 5 km. Séries com respostas rápidas aos eventos de chuva, de modo geral, associaram-se a sequencias litológicas essencialmente arenosas, capacidades específicas acima de $0,29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ ou com número de poços de produção no entorno abaixo de 10. Enquanto a ausência de correlação ou respostas muito lentas às precipitações associaram-se aos poços cujo perfil litológico possuía camadas de argila que poderiam causar confinamento ou apresentavam vazão específica inferior a $0,29\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ associada a um grande número de poços de produção nas imediações. Além disso, observou-se um grande rebaixamento do nível d'água durante o período de estiagem severa entre 2013 e 2015, correspondendo ao mesmo período da crise hídrica no Estado de São Paulo.

Palavras chave: Gestão de águas subterrâneas; Geoprocessamento; Aquífero Bauru

Abstract

The Bauru Aquifer System is characterized as a sedimentary aquifer, of predominantly free condition, whose recharge is associated with the direct infiltration of precipitation. The aquifer is the main source of public and private water supply in the western portion of São Paulo state, a Brazilian industrial and agricultural pole. Aiming to enhance knowledge regarding the most important aquifers in Brazil and to identify the effects associated with anthropic interventions and pluviometric variations, a broad network monitoring system as implemented in 2009 by the Brazilian Geological Survey (CPRM). In this context, the present study contemplates the investigation and multi-thematic analysis of the intervening factors of the correlation between groundwater level response, rainfall events and anthropogenic alterations, with the purpose of increasing the knowledge of the potentiality of the Bauru aquifer system. Time series of groundwater and rainfall data were also analyzed and evaluated in order to identify the factors that could influence this relationship, such as: composition of the lithological profile above the filter in each well, thickness of the unsaturated zone, specific capacity of the well, number of production wells installed within a 5km radius, soil types and cover in the region. The time series analysis was conducted by using simple correlation between the groundwater level series to verify their similarities, and cross correlations to determine precipitation influence on the wells static level, in order to estimate the necessary time for water to infiltrate and recharge the aquifer, increasing the static level. Subsequently, the data was spatialized using ArcGIS and a multicriteria analysis was performed, assigning weights to the different variables in order to explain the time series correlations. Based on the identification of the interactions and influences of the aforementioned factors, a correlation between groundwater level and the rainfall was identified. This correlation is mainly affected by the lithological profile above the filter, the specific capacity of the wells and the number of production wells located within a radius of 5 km. Series with rapid responses to rainfall events were generally associated with essentially sandy lithographic sequences, specific capacities above $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ or with the number of production wells below 10. On the other hand, the absence of correlation or very slow response to rainfall was associated with wells whose lithographic profile had clay layers that could lead to confinement, or had a specific capacity lower than $0.29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ associated with a large number of production wells in the surroundings. Additionally, there was a significant water level decrease during a severe drought between 2013 and 2015, corresponding to the same period of the water crisis in the State of São Paulo.

Key words: Groundwater management; Geoprocessing; Bauru Aquifer

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A água subterrânea corresponde a mais de 95 % das reservas de água doce exploráveis do globo, ainda que o volume disponível dessas reservas seja menor se comparado ao das águas superficiais. Assim sendo, os reservatórios de água subterrânea desempenham um papel imprescindível no abastecimento público e privado, tal como na irrigação para a produção de alimentos e suprimento de água para comunidades, vilas, indústrias e cisternas autônomas de residências (Hirata et al. 2010). Apesar da percepção comum de sua abundância e de serem naturalmente mais protegidas quanto à contaminação do que as águas superficiais, a água subterrânea não é inesgotável e responde de forma dinâmica, a curto e a longo prazo, às pressões decorrentes de mudanças climáticas, exploração intensiva e às modalidades de uso e ocupação dos terrenos. Além disso, a interação de fatores climatológicos e hidrogeológicos, condiciona as formas de recarga, abastecimento e circulação, influenciando na qualidade das águas subterrâneas (Rebouças, 1999). Deste modo, o conhecimento fragmentado e por vezes insuficiente a respeito dos aquíferos pode conduzir a sobre-exploração e a graves conflitos pelo uso da água.

Segundo Rebouças *et al.* (2006) o uso dos aquíferos se intensificou a partir da década de setenta e segue crescendo por diversos fatores como os avanços da hidrogeologia e das técnicas de perfuração de poços; a redução dos custos de extração; a menor susceptibilidade climática; a qualidade das águas subterrâneas; o aumento da demanda; e a degradação das águas superficiais.

De acordo com um levantamento acerca do uso da água subterrânea para abastecimento público realizado no Estado de São Paulo pela CETESB (2013), 462 municípios paulistas, isto é, cerca de 72% são, total ou parcialmente, abastecidos por águas subterrâneas, atendendo a uma população de cerca de 5,5 milhões de pessoas (DAEE, 2015). Neste sentido, o monitoramento destes sistemas é uma ferramenta fundamental para promover o entendimento necessário sobre o potencial local dos sistemas aquíferos e definir qualquer situação de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Dentre os aquíferos que abastecem o Estado de São Paulo, destaca-se o Sistema Aquífero Bauru (SAB) que se caracteriza como a principal fonte de exploração de águas subterrâneas para abastecimento público e privado da região oeste do Estado de São Paulo (DAEE, 1990). O SAB é constituído pelas unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru (Soares *et al.*, 1980), depositados durante o cretáceo na Bacia do Paraná.

A partir de dados do monitoramento realizado neste sistema aquífero nos últimos oito anos pela Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), projetada e operada pela CPRM –

Serviço Geológico Brasileiro é possível observar oscilações significativas nos níveis de água, com respostas diferenciadas temporalmente e espacialmente.

Portanto, propõe-se um estudo da área do SAB localizada no Estado de São Paulo com o objetivo de ampliar o conhecimento e entender melhor a dinâmica desta unidade aquífera, fornecendo assim informações que permitam subsidiar a gestão do seu uso. O estudo integrou as informações obtidas de 4002 poços tubulares da Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrânea (RIMAS) e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) monitorados pela CPRM e 21 estações pluviométricas operadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), além de mapas de uso e ocupação e de solos do Estado de São Paulo. Para tal, serão utilizadas técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, bem como análises estatísticas que possibilitem o estabelecimento da relação das variações de nível d'água com a pluviosidade, as formas de uso e ocupação dos terrenos, a topografia, os tipos de solos e as características da zona não saturada em termos de espessura e composição.

1.2 JUSTIFICATIVA

O sistema aquífero Bauru abrange os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás e parte do Paraguai, com área total de 370.000 km². Trata-se de um aquífero sedimentar, de condição predominantemente livre (DAEE, 1976) cuja recarga natural está associada à infiltração direta da precipitação nos sedimentos Bauru. A descarga ocorre formando as diversas nascentes na quebra topográfica da chapada que marca o contato desse aquífero com a unidade Serra Geral (UFMG/CDTN/UFMT, 2006 e Soldera, 2017).

O SAB apresenta exploração intensa e grande modificação antrópica de sua área de exposição. Tal fato impõe a implantação de medidas preventivas e/ou proativas para assegurar a qualidade e a quantidade de águas subterrâneas, na busca pelo uso sustentável associado a uma ação integrada de gerenciamento. Segundo Manoel Filho (2000), os conflitos pelo uso da água são iminentes em diversas regiões de domínio do SAB e prever a resposta deste (em termos de quantidade e qualidade) quanto às atividades de exploração e às interferências antrópicas ao meio, em tempo hábil para gerar políticas racionais de uso dos recursos hídricos é uma questão complexa.

Neste contexto a proposta deste estudo, contempla a investigação e análise multitemática do meio físico, incluindo as alterações antropogênicas percebidas neste, com o propósito de ampliar o conhecimento da potencialidade do sistema aquífero Bauru, a partir da identificação das interações e influências dos diversos fatores quanto a sua ocorrência e dinâmica de fluxo. Assim, as informações geradas deverão fornecer bases para a criação de um modelo geológico estruturado que permita compreender a dinâmica interna da referida unidade aquífera e assim a exploração sustentável da mesma.

Ademais, deve-se mencionar a escassez deste tipo de estudos, os quais dão enfoque à gestão de águas subterrâneas no Brasil, sobretudo por meio de modelos que avaliem a disponibilidade hídrica do aquífero considerando as influências climáticas e de uso e ocupação do solo.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho corresponde à compreensão da interferência de diversos fatores relacionados ao meio físico, como o clima, solos, geologia e hidrogeologia, e aspectos socioeconômicos, como o uso dos recursos hídricos e as formas de uso e ocupação dos terrenos, na recarga e reservas renováveis do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo.

Para atingir a proposta supracitada tem-se como objetivos específicos:

- Avaliar a evolução do nível d'água no SAB a partir das séries temporais de chuva, no período de 2010 a 2017, com criação de mapas temáticos temporais;
- Identificar os efeitos da estiagem severa, ocorrida entre 2013 a 2015, nos níveis de água subterrânea;
- Analisar as diferenças nos tempos de respostas dos poços da RIMAS no sistema aquífero Bauru aos eventos de precipitação a partir das características e espessura dos solos e da zona não saturada, das formas de uso e ocupação dos solos e da intensidade de exploração dos recursos hídricos subterrâneos;
- Caracterizar espacialmente o sistema aquífero Bauru e relacionar os efeitos das pressões sofridas em termos climatológicos e socioeconômicos.

1.4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a porção do sistema aquífero Bauru situada no Estado de São Paulo – Figura 1.1 – que abrange aproximadamente todo o oeste do território do estado, apresentando uma área de cerca de 96.880 km². Os limites do SAB no Estado de São Paulo compreendem a oeste e noroeste o Rio Paraná, a norte o Rio Grande, a sul o Rio Paranapanema e áreas de afloramento da Formação Serra Geral, que delimitam também o aquífero na região leste (DAEE,2005).

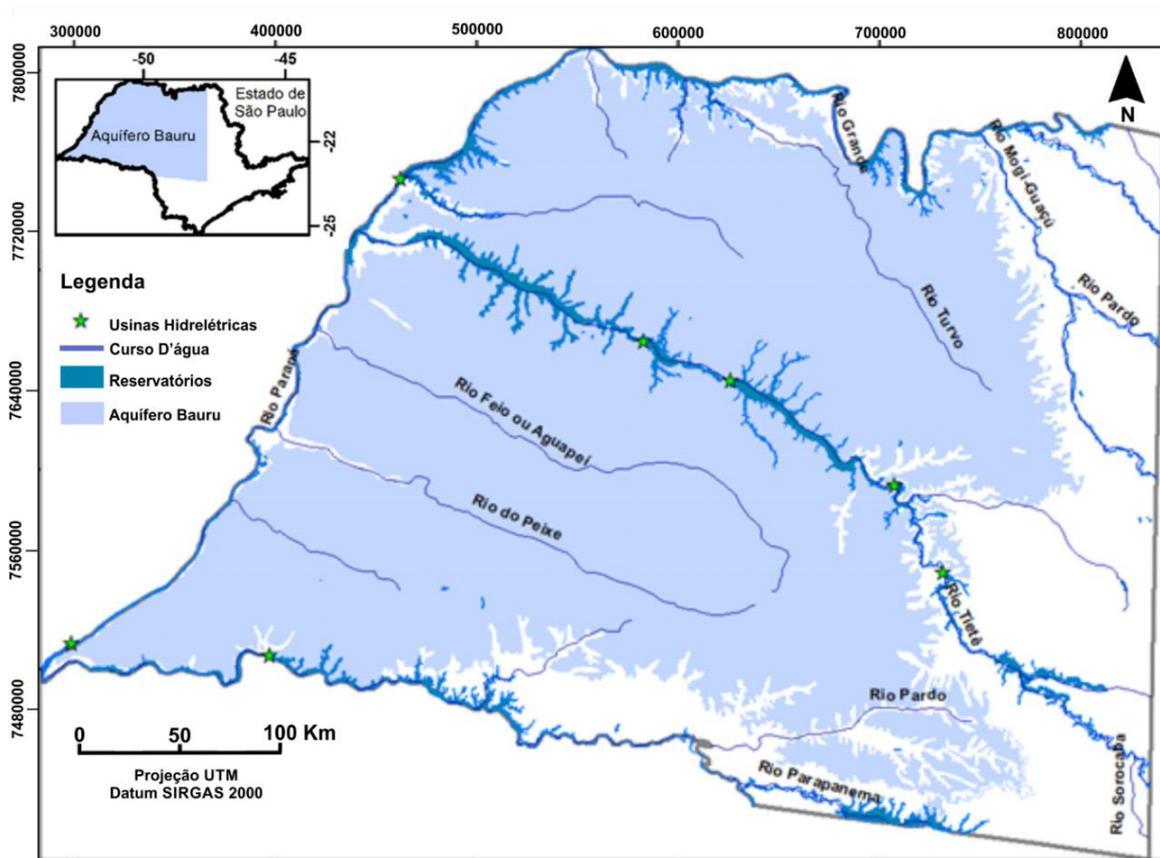


Figura 1.1 - Delimitação do Sistema Aquífero Bauri com base no mapa geológico do Estado de São Paulo.

2.1 AQUÍFEROS

Baseado em estudos de Villela (1975) pode-se definir aquífero como formações geológicas constituídas por rochas capazes de armazenar e transmitir quantidades significativas de água, em decorrência de fatores como porosidade e permeabilidade. Os poros e fraturas existentes nas rochas representam vazios nos quais a água subterrânea é armazenada e para que esta água possa fluir e ser explorada é necessário que eles estejam interligados – conceito da transmissividade.

Segundo Iritani & Ezaki (2008, p. 16):

Ao se infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma porção do terreno chamada de zona não saturada (ZNS) ou zona de aeração, onde os poros são preenchidos parcialmente por água ou ar. Parte da água infiltrada no solo é absorvida pelas plantas e por outros seres vivos ou evapora e volta para a atmosfera. O restante da água, por ação da gravidade, continua em movimento descendente.

O restante da água que se acumula em zonas mais profundas e preenche os poros das rochas compõem a zona saturada (ZS). A água que penetra por esta zona saturada e fica armazenada nos vazios de solos e rochas é também denominada água subterrânea. O volume de água que uma rocha pode armazenar está associado à sua porosidade. Para Iritani & Ezaki (2008) “normalmente depósito de sedimentos inconsolidados (cascalho, areia, silte, argila), apresentam porosidade maior do que as rochas (arenito, calcário, folhelho, rochas fraturadas etc.)”. Assim sendo, quanto mais homogêneo e isotrópico for o meio em relação ao tamanho dos grãos e a distribuição destes, maior será a capacidade de um aquífero armazenar e transportar água.

Segundo Borghetti *et al.* (2004) os aquíferos podem ser classificados em relação à forma de armazenar e conduzir água como aquífero poroso, fissural e cárstico (figura 2.1).

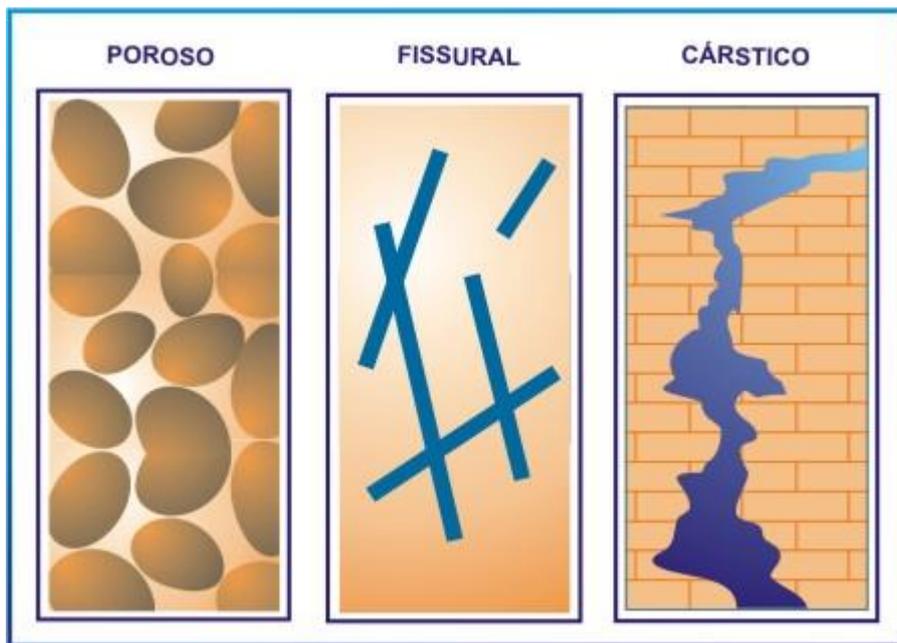


Figura 2.1 - Tipos de aquíferos quanto á sua porosidade (Fonte: Borghetii *et al.* 2004).

O aquífero poroso em geral apresenta rochas sedimentares e sedimentos não consolidados constituídos de grãos minerais onde a circulação da água se dá através dos poros formados entre os grãos, embora também possa ocorrer em meios fraturados. Estes integram os mais importantes aquíferos devido ao grande volume de água que armazenam e por sua ocorrência em grandes áreas. O aquífero fissural por sua vez está associado principalmente às rochas ígneas e metamórficas. A capacidade destas rochas em armazenar água está relacionada à quantidade de fraturas/descontinuidades existentes no maciço rochoso, assim quanto maior o número de fraturas nas rochas maior será a capacidade de fornecimento de água. Já os aquíferos cársticos são definidos por (Iritani & Ezaki, 2008, p. 21):

[...] rochas carbonáticas, como os calcários, sofrem lento processo de dissolução quando em contato com águas ácidas que infiltram por meio das fraturas da rocha. As águas ácidas são formadas pela combinação da água da chuva ou de rios com o dióxido de carbono (CO₂), proveniente da atmosfera ou da decomposição da matéria orgânica presente no solo. Com a progressiva dissolução destes condutos, formam-se cavidades, que podem resultar em galerias com rios subterrâneos e cavernas. Neste aquífero chamado cárstico, a água flui por condutos e canais.

Os aquíferos também podem ser classificados por suas características hidráulicas, podendo ser livres ou confinados – figura 2.2. Aquíferos livres, ou não confinados, ocorrem mais próximos à superfície e a zona saturada tem conexão hidráulica direta com a zona não saturada, estando submetidos apenas à pressão atmosférica. Assim, a água que se infiltra no solo atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente os aquíferos livres. Já os aquíferos confinados estão em uma profundidade maior e são limitados no topo e na base por camadas de rocha de baixa permeabilidade, como argilas, folhelhos,

rochas ígneas, entre outras. Neste caso, os aquíferos estão submetidos a uma pressão maior que a da atmosfera devido ao fato de possuírem uma camada confinante acima deles. Para seu abastecimento a água deve atravessar a camada de baixa permeabilidade, em um processo lento, ou penetrar em áreas em que este encontra-se livre.

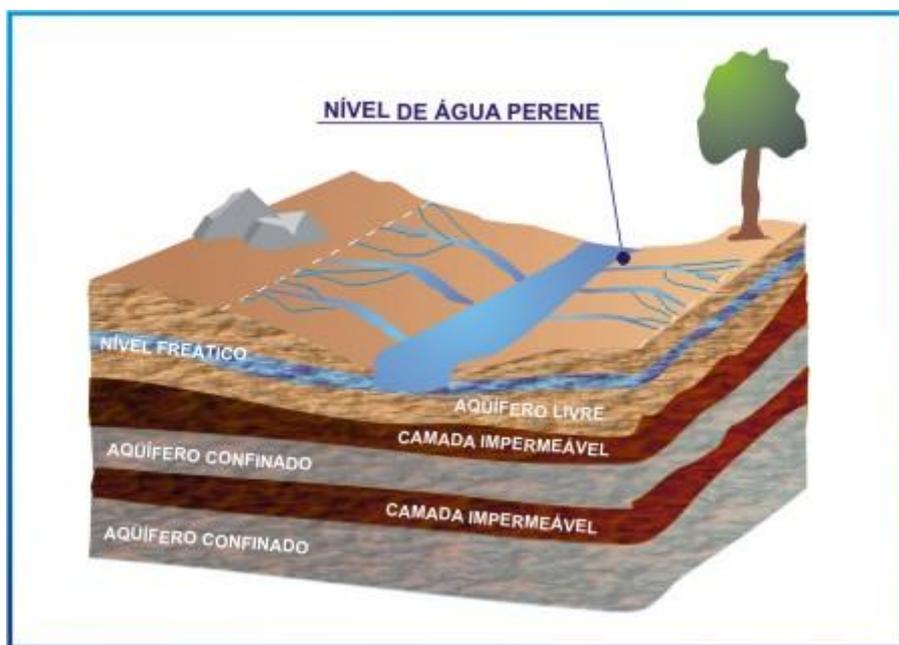


Figura 2.2- Tipos de aquíferos quanto às características hidráulicas. (Fonte: Borghetti *et al.* 2004).

As áreas onde se dão o abastecimento dos aquíferos são chamadas de áreas de recarga, representadas normalmente por áreas onde afloram as formações geológicas. Já os locais onde a água retorna à superfície são chamados de áreas de descarga, representadas pelas nascentes ou por áreas próximas ao nível de córregos e rios.

2.2 SISTEMA AQUÍFERO BAURU

2.2.1 Contexto Estratigráfico

O Aquífero Bauru é constituído pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru, depositados na Bacia Bauru, designação efetuada por Fernandes (1992). A bacia continental intracratônica Bauru depositou-se no Neocretáceo por compensação isostática após os derrames basálticos da Formação Serra Geral e retrata o último episódio significativo de deposição da unidade geotectônica supracitada (Franzini & Mourão, 2012).

A Bacia Bauru é composta pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru (Soares *et al.* 1980) e sua sedimentação ocorreu em duas fases principais, a primeira em condições essencialmente desérticas e, a segunda, em clima semiárido, com maior presença de água. Estas fases compreendem, respectivamente, depósitos de lençóis secos de areias com dunas eólicas e com interdunas úmidas, e depósitos de sistemas fluviais e leques aluviais com pantanal interior bem definido (Fernandes, 1998).

2.2.1.1 Grupo Bauru

O Grupo Bauru foi introduzido na literatura geológica por Gonzaga de Campos (1905 in Mezzalira, 1974), sob denominação “Grés de Bauru”, passando à caracterização de Formação Bauru nas décadas de 50 e 60 e somente no final da década de 70 e início de 80, é elevado à categoria de Grupo. Pode-se destacar os estudos litológicos e sedimentológicos de subdivisão estratigráfica da unidade Bauru de Almeida & Barbosa (1953) e Mezzalira & Arruda (1965).

As bases da estratigrafia do Grupo Bauru surgiram nas décadas seguintes, por meio de mapeamentos geológicos regionais de caráter litoestratigráfico. Neste período, onde a unidade Bauru é apresentada na categoria de Grupo, destacam-se os seguintes trabalhos: Suguio (1973), Coimbra (1976), DAEE (1976), Landin & Soares (1976), Brandt Neto *et al.* (1978), Soares *et al.* (1980), dentre outros.

No presente trabalho utilizou-se a proposta de Soares *et al.* (1980) e Almeida *et al.* (1980), que subdividiram o Grupo Bauru em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília – Figura 2.3. A escolha se baseia no fato de que a maioria dos trabalhos relacionados ao tema, utilizaram-se também desta subdivisão para caracterizar as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru.

Outras subdivisões do Grupo Bauru foram efetuadas posteriormente, podendo-se destacar os trabalhos de Fernandes (1992), Fernandes & Coimbra (1994) e Fernandes (1998), que passaram a definir a Formação Caiuá como Grupo e subdividiram a Formação Adamantina.

A Formação Caiuá é caracterizada por apresentar notável uniformidade litológica. É constituída predominantemente de arenitos compostos de quartzo, feldspato, calcedônia e opacos, ocasionalmente com caráter subarcosiano. É comum a ocorrência de matriz fina e ocasionalmente cimento carbonático ou silicoso (Almeida *et al.*, 1980).

A Formação Santo Anastácio é representada por arenitos marrom avermelhados e arroxeados, de granulometria fina à média, seleção moderada a ruim, com grãos arredondados a subarredondados, envoltos por película limonítica. A mineralogia é composta essencialmente por quartzo, podendo ocorrer subordinadamente feldspato, calcedônia e opacos (Soares *et al.*, 1980).

A Formação Adamantina ocorre por ampla extensão no oeste do Estado de São Paulo, compondo a maior parte da Bacia Bauru. Esta formação abrange um conjunto de litofácies, as quais apresentam como característica principal a presença de bancos de arenitos de granulometria fina a muito fina, cor rósea a castanho, alternando com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho avermelhado a cinza-castanho. São comuns ocorrências de seixos de argilitos da própria unidade, cimento carbonático e nódulos carbonáticos (Soares *et al.*, 1980).

Já a Formação Marília é caracterizada por dois conjuntos de arenitos. Um sendo arenitos finos a médios, com arenitos muito finos subordinados e níveis de seixos, mal selecionados, arredondamento

moderada a ruim e esfericidade predominantemente baixa. Outro sendo arenitos grosseiros a conglomeráticos, frequentemente com grãos finos, grânulos esparsos e níveis de seixos, grãos subangulares, mal selecionados e com baixa esfericidade (Soares *et al.*, 1980).

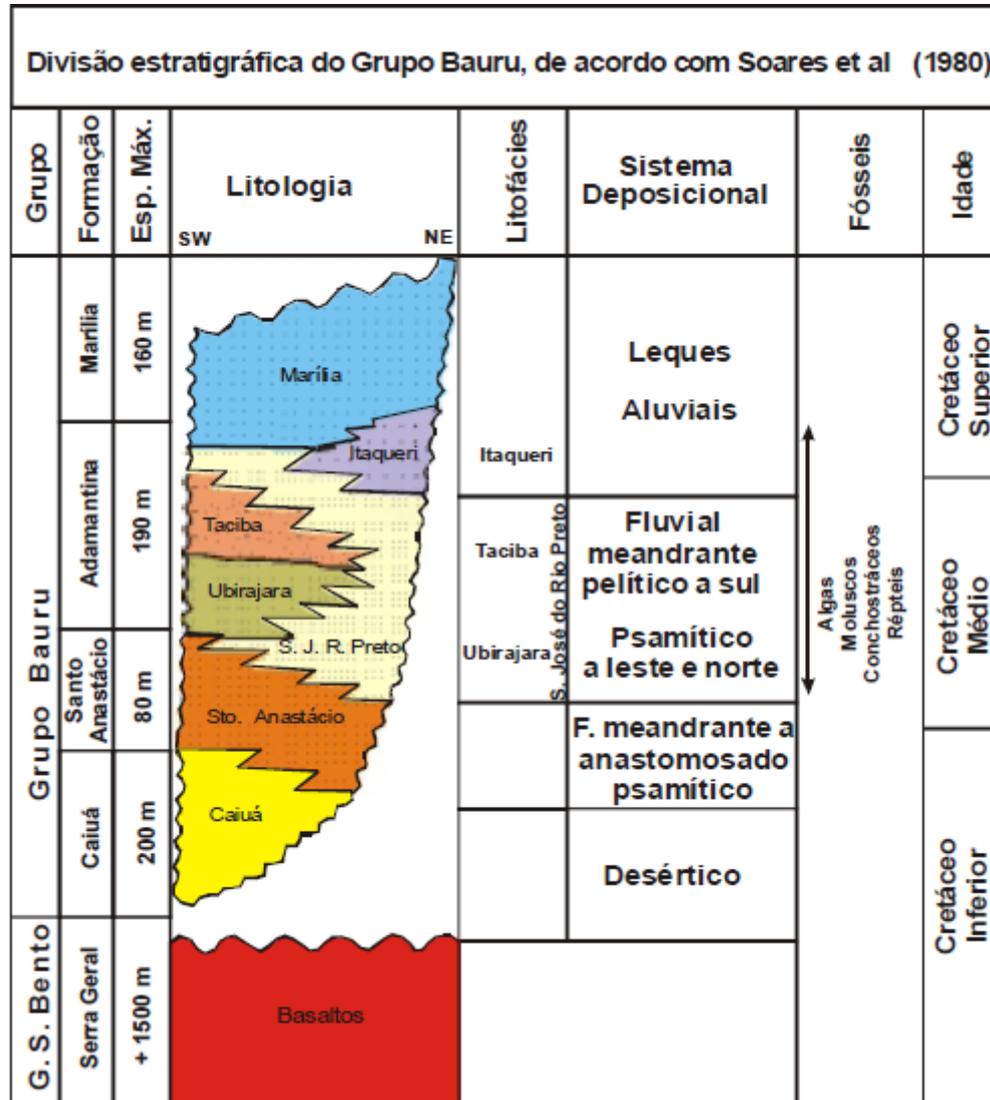


Figura 2.3 - Proposta clássica de subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru proposta por Soares *et al.* (1980).

2.2.2 Contexto Geotectônico

Regionalmente, a área de estudo localiza-se na Bacia do Paraná – figura 2.4 –, uma unidade geotectônica estabelecida sobre a porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana a partir do Devoniano Inferior/Siluriano (IPT,1981). Trata-se de uma bacia intracratônica sul-americana, desenvolvida totalmente sobre crosta continental, na qual o registro lítico-sedimentar a magmático abrange do Mesopaleozóico ao Cenozoico (Cabral Jr., 1991). As unidades da sequência cretácea suprabasáltica foram consideradas como pertencentes à Bacia do Paraná, embora fossem tratadas em diversas oportunidades como acumuladas em sítio

deposicional de características singulares (Arid 1970, Coimbra 1976, Suguio 1981, Saad *et al.* 1988, Fúlvaro & Barcelos 1992). No início do Cretáceo Inferior ocorreram a ruptura do megacontinente Gondwana e a abertura do Oceano Atlântico Sul. Estes eventos deram origem ao "magmatismo Serra Geral" e promoveram mudanças significativas na evolução da Plataforma Sul-Americana, criando-se condições para a sedimentação intracratônica. A porção norte da Bacia do Paraná, comportou-se como área negativa relativamente aos soerguimentos marginais e à zona central da bacia, marcando o início de uma fase de embaciamentos localizados em relação à área da bacia como um todo. Nesta área deprimida acumulou-se o Grupo Bauru, no Cretáceo superior (Soares *et al.*, 1980).

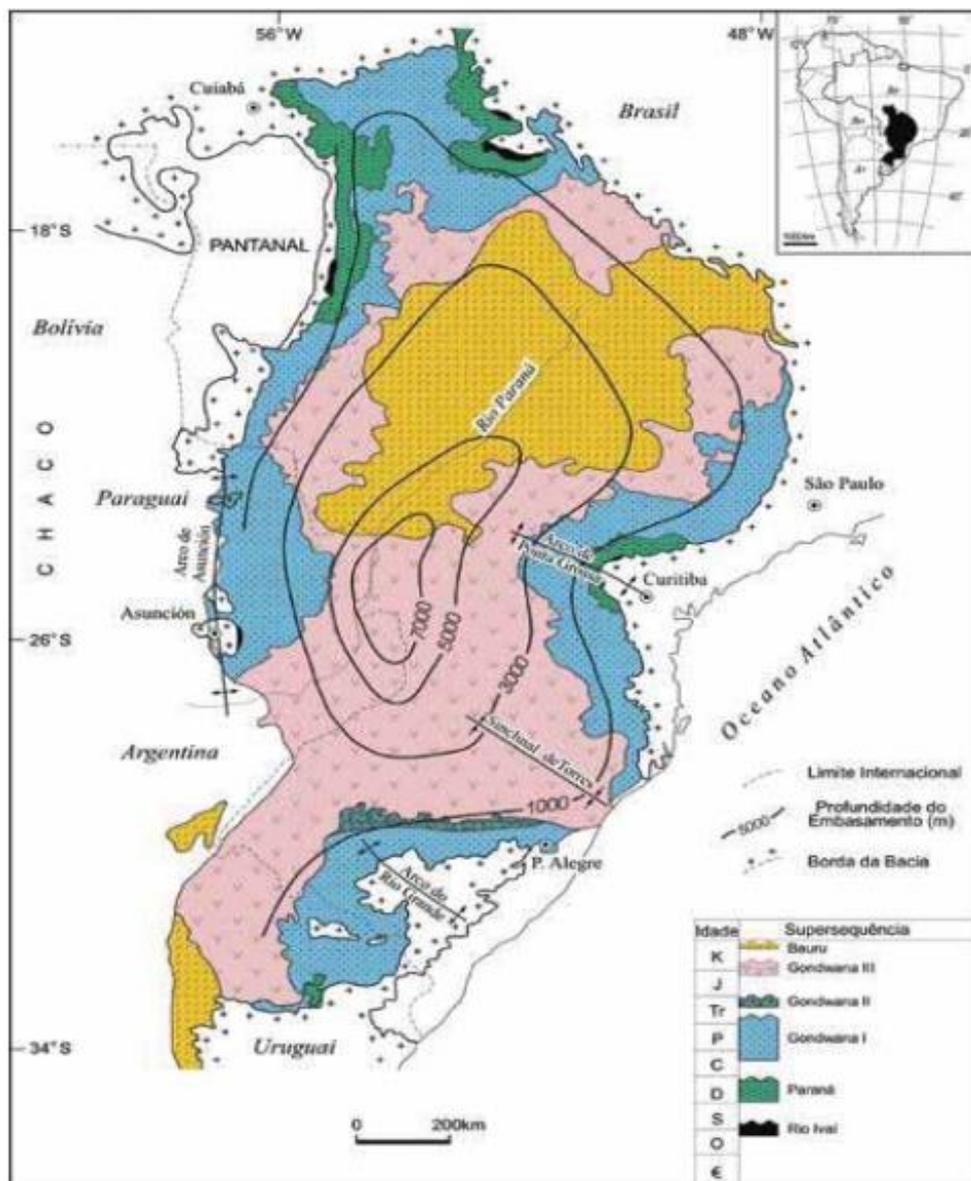


Figura 2.4 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná e a distribuição no tempo das diversas unidades de seu registro estratigráfico (Fonte: Milani, 2004).

2.2.3 Caracterização Hidrogeológica

Os aquíferos pertencentes ao Grupo Bauru possuem uma grande importância para o desenvolvimento econômico e social em sua área de ocorrência, na região oeste do Estado de São Paulo.

Para Mezzalira (1974), o sistema aquífero Bauru pode ser caracterizado como um ótimo reservatório e para situações em que as perfurações atinjam o substrato basáltico, defende um aumento da produtividade dos poços. No entanto, Rebouças (1976) propõe que o sistema aquífero Bauru apresenta natureza livre, compondo zonas aquíferas e encontra-se assentado sobre um substrato cristalino com o qual raramente têm relações hidráulicas, exceto em áreas onde o topo do basalto apresenta fraturas ou vesículas abundantes. Carvalho (1980) sugere a existência de uma rede de comunicações hidráulicas entre os sistemas aquíferos Bauru e Botucatu, por meio da barreira de derrames basálticos da Formação Serra Geral, devido ao fato dos poços perfurados no Grupo Bauru que penetram o basalto apresentarem valores de vazão relativamente maiores do que aqueles que não penetram os basaltos.

Posteriormente, em estudos realizados pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (1979b) o sistema aquífero Bauru foi subdividido em duas unidades hidroestratigráficas: Bauru Médio/Superior (Formações Adamantina e Marília) e Bauru Inferior/Caiuá (Formações Caiuá e Santo Anastácio). Essa subdivisão foi feita considerando-se as condições de armazenamento e circulação das águas.

O aquífero Bauru Médio/Superior é descrito como unidade hidrogeológica contínua e não uniforme, livre a localmente confinada, apresentando porosidade granular e extensão regional. Constitui-se de bancos de arenitos finos intercalados com lamitos e siltitos na base e de arenitos grosseiros imaturos com abundantes nódulos e cimento calcíferos no topo. Apresenta baixa permeabilidade se comparada à unidade hidroestratigráfica Bauru Inferior/Caiuá e zoneamento de potencial exploratório definido a partir da espessura do aquífero e de suas características litológicas: as camadas de sedimentação intermediária e de topo apresentam vazão variável entre 3,0 e 20 m³/h, enquanto porções mais restritas na base do pacote sedimentar exibem vazões entre 20 e 50 m³/h. De modo geral, a média da vazão de produção dos poços é de 8 m³/h. (DAEE, 2005a).

A unidade hidroestratigráfica Bauru Inferior/Caiuá ocorre no extremo sudoeste do estado, sendo caracterizada como contínua e uniforme, livre a localmente semiconfinada, apresentando porosidade granular, boa permeabilidade e elevado potencial. As vazões dos poços variam de 20 a 200 m³/h, com média de 30 m³/h. A espessura saturada média é de 80 metros (DAEE, 2005a).

Segundo Barcha (1980), essa produtividade heterogênea do sistema aquífero Bauru se deve a uma combinação da textura, teor de cimento, porosidade e permeabilidade da rocha.

O estudo dos vários aspectos do aquífero, tais como superfície de contato com os basaltos da Formação Serra Geral, espessura saturada, potenciometria e potencialidade, que propiciou a confecção do Mapa Hidrogeológico do Estado de São Paulo (DAEE, 2005b) baseou-se em um compilado de dados de 1099 poços cadastrados no DAEE. As principais conclusões obtidas neste trabalho são:

- As cotas topográficas da base do aquífero são de aproximadamente 600 m de altitude nas áreas próximas às Cuestas Basálticas, com tendência de diminuição no sentido oeste da área de ocorrência, atingindo até 100 m acima do nível do mar;
- A espessura saturada média do aquífero é da ordem de 75 m;
- Em tese, para o Bauru Médio/Superior predominam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m, com média de 0,57 m³/h/m, dentro de uma faixa de variação de 0,022m³/h/m e 4,9 m³/h/m. Para a unidade aquífera Bauru Inferior/Caiuá os valores apresentados são superiores a 1,6 m³/h/m;
- A condutividade hidráulica varia de 0,002 m/d a 3,66 m/d e a transmissividade de 0,14 a 328 m²/dia, predominando valores inferiores a 50 m²/dia para a unidade aquífera Bauru Médio/Superior. Já a unidade aquífera Bauru Inferior/Caiuá apresenta valores de transmissividade superiores a 200 m²/dia, dados também observados por Iritani *et al.* (2000)
- A porosidade efetiva estimada é de 5% para o Bauru Médio/Superior e de 10 a 15% para o Bauru Inferior/Caiuá (DAEE, 1979b).

Em termos hidroquímicos, conforme uma revisão acerca dos trabalhos na área realizada por Campos (1993), as águas do Grupo Bauru foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Em relação ao pH, prevalecem os meios neutros a levemente básicos. Possuem baixa salinidade, com valores médios de resíduo seco inferiores a 240 mg/l, sendo predominante a faixa de 100 a 200 mg/l (CETESB, 1994; CETESB, 2001).

Segundo CETESB (1994), as águas com menor concentração salina ocorrem nos vales baixos, especialmente a jusante dos principais rios interiores, enquanto as águas com concentração salina mais elevada ocorrem ao longo dos espigões de Pompéia - Adamantina e Valparaíso - Mirandópolis.

2.2.4 Classificação Hidrológica dos Solos

O Estado de São Paulo possui mapas de solos para todo seu território, desde 1949, e o mais recente trabalho foi realizado por Rossi (2017). Este mapa de solos constitui-se de 247 unidades de mapeamento, representadas por unidades de mapeamento simples (uma classe de solos), por associação de duas ou mais classes e/ou por grupamentos de solos, pertencentes a 12 classes de 1º nível taxonômico (Ordem): Argissolo, Cambissolo, Chernossolo, Espodossolo, Gleissolo, Latossolo, Luvisso, Neossolo, Nitossolo, Organossolo, Planossolo e Plintossolo; e 25 classes do 2º nível taxonômico (Subordem):

Argissolos Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos; Cambissolos Húmicos e Háplicos; Chernossolos Argilúvicos; Espodosolos Humilúvicos; Gleissolos Melânicos, Tiomórficos, Háplicos e Sálicos; Latossolos Amarelos, Brunos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos; Luvisolos Háplicos; Neossolos Litólicos, Quartzarênicos, Regolíticos e Flúvicos; Nitossolos Vermelhos; Organossolos Tiomórficos e Háplicos; Planossolos Háplicos; e Plintossolos Pétricos, além da classe de Afloramento Rochoso.

A partir deste trabalho é possível reconhecer como principais grupos de solos presentes no sistema aquífero Bauru os Argissolos vermelho-amarelos, Gleissolos, Latossolos vermelhos e Neossolos arenoquartzosos – figura 2.5.

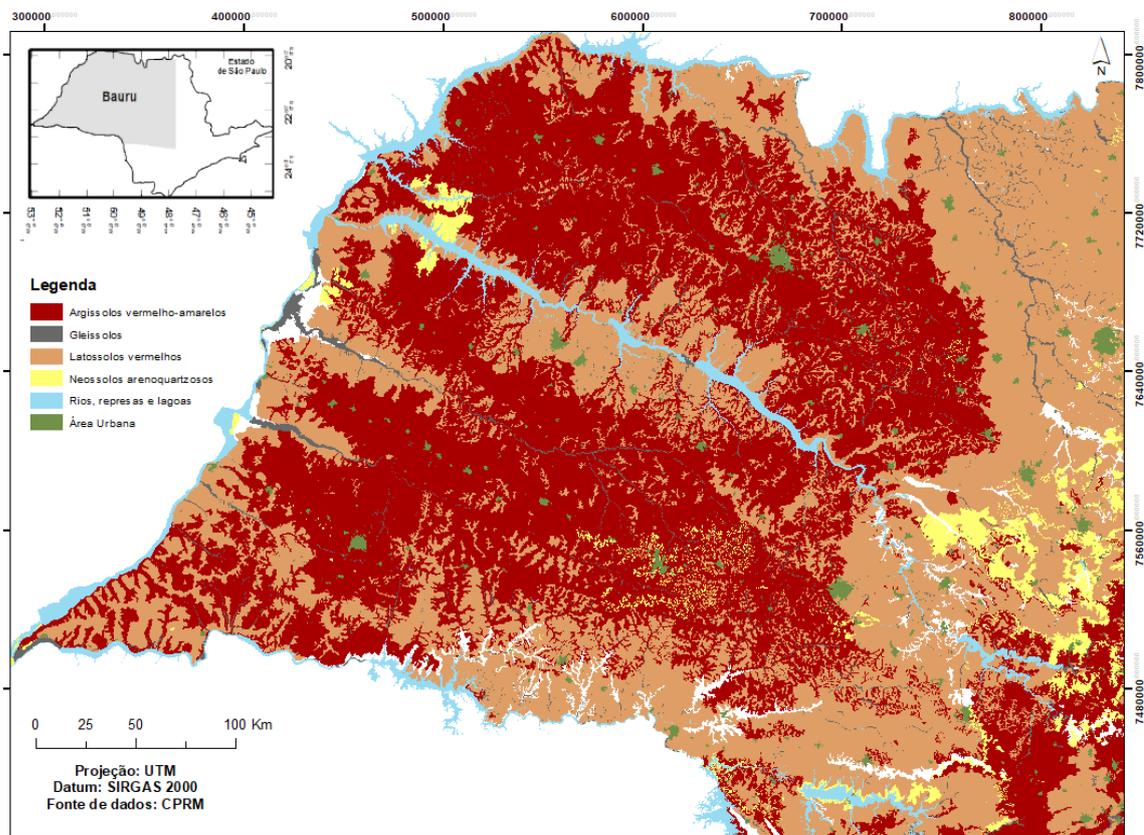


Figura 2.5 - Mapa pedológico do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo (adaptado de Rossi, 2017).

Existem alguns modelos disponíveis que permitem classificar hidrologicamente o tipo de solo, sendo o modelo do Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA) um dos mais utilizados. A metodologia do SCS classifica os solos dos Estados Unidos em quatro grandes grupos, conforme sua capacidade de infiltração e de escoamento superficial, atribuindo a cada grupo uma letra, A, B, C e D, nesta mesma ordem, representando o aumento do escoamento superficial e consequentemente a redução da taxa de infiltração de um grupo para outro (Sartori *et al.*, 2005). Os grupos hidrológicos do solo foram definidos com base na premissa

de que os perfis de solo que apresentavam textura, espessura, quantidade de matéria orgânica, estrutura e grau de expansão semelhantes responderiam de forma análoga a uma chuva de duração e intensidade consideráveis.

Sendo assim, apoiando-se no trabalho de Sartori *et al.* (2005), que propõe uma extensão para a classificação hidrológica do solo com base nos métodos desenvolvidos pelo SCS e por Lombardi Neto *et al.* (1989), serão apresentadas na tabela 1 as principais características para cada classe de solo em nível de ordem para as unidades representativas dos grandes grupos presentes no sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo.

Tabela 2.1- Classificação Hidrológica de solos para as condições brasileiras (adaptada de Sartori, 2005).

Grupo Hidrológico	Características	Tipo de solo
A	Solos muito profundos (prof. > 200 cm) ou profundos (100 a 200 cm); Solos com alta taxa de infiltração e com alto grau de resistência E tolerância à erosão; Solos porosos com baixo gradiente textural (< 1,20); Solos de textura média; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione alta macroporosidade em todo o perfil; Solos bem drenados ou excessivamente drenados; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: média/média, argilosa/ argilosa e muito argilosa/muito argilosa.	Latossolo vermelho, de textura argilosa ou muito argilosa e com alta macroporosidade;
B	Solos profundos (100 a 200 cm); Solos com moderada taxa de infiltração, mas com moderada resistência e tolerância a erosão; Solos porosos com gradiente textural variando entre 1,20 e 1,50; Solos de textura arenosa ao longo do perfil ou de textura média com horizonte superficial arenoso; Solos de textura argilosa ou muito argilosa desde que a estrutura proporcione boa macroporosidade em todo o perfil; Solos com argila de atividade baixa (Tb), minerais de argila 1:1; A textura dos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/arenosa, arenosa/média, média/argilosa.	Neossolo quartzarênico; argissolo vermelho amarelo de textura arenosa/média, média/argilosa; argilosa/argilosa ou argilosa/muito argilosa que não apresentam mudança textural abrupta.

Continua

Continuação Tabela 2.1- Classificação Hidrológica de solos para as condições brasileiras (adaptada de Sartori, 2005).

Grupo Hidrológico	Características	Tipo de solo
C	Solos profundos (100 a 200 cm) ou pouco profundos (50 a 100 cm); Solos com baixa taxa de infiltração e baixa resistência e tolerância à erosão; São solos com gradiente textural maior que 1,50 e comumente apresentam mudança textural abrupta; Solos associados a argila de atividade baixa (Tb); A textura nos horizontes superficial e subsuperficial pode ser: arenosa/média e média/argilosa apresentando mudança textural abrupta; arenosa/argilosa e arenosa/muito argilosa.	Argissolo pouco profundo, mas não apresentando mudança textural abrupta ou argissolo vermelho amarelo profundo e apresentando mudança textural abrupta.
D	Solos com taxa de infiltração muito baixa oferecendo pouquíssima resistência e tolerância a erosão; Solos rasos (prof. < 50 cm); Solos pouco profundos associados à mudança textural abrupta ou solos profundos apresentando mudança textural abrupta aliada à argila de alta atividade (Ta), minerais de argila 2:1; Solos argilosos associados à argila de atividade alta (Ta); Solos orgânicos.	Gleissolo, argissolo vermelho amarelo pouco profundo e associado à mudança textural abrupta.

2.3 MONITORAMENTO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A água subterrânea pode ser considerada um dos mais importantes recursos naturais existentes no nosso planeta. É um recurso abundante, porém limitado e susceptível à variações sazonais e efeitos antrópicos.

Segundo UNEP/WHO (1996), a *International Organization for Standardization (ISO)* define o monitoramento como “um processo programado de amostragem, medições e armazenamento de dados sobre várias características da água”, subsidiando a tomada de decisões e avaliando a eficácia dessas decisões na proteção, manutenção, melhoria e remediação dos recursos hídricos. Ainda para Tuinhof *et al.* (2004), um monitoramento bem elaborado e de longo prazo é capaz de fornecer uma base para o controle de impactos causados pela superexploração e pela carga de poluentes no aquífero.

Entretanto, para Uil *et al.* (1999), somente o monitoramento da água subterrânea não é suficiente para prover todas as informações necessárias ao correto gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo. Para tal é necessário um processo sistemático que englobe a coleta, armazenamento e interpretação de dados meteorológicos, litologia, composição do solo e integração com as águas superficiais, além de informações sobre fontes potenciais de poluição dos recursos hídricos.

Para Feitosa *et al.* (2008) podem ser considerados dois tipos de monitoramento, o básico e o específico. O monitoramento básico tem como principal objetivo informar sobre a variação temporal e espacial da reserva, dos recursos e da qualidade da água do aquífero ao longo da sua exploração. O monitoramento específico, por sua vez, considera quatro tipos (Foster e Gomes, 1989): (1) monitoramento de detecção a fim de flagrar uma contaminação; (2) monitoramento preventivo, para avaliar o risco de contaminação, ou defensivo, para orientar a remediação do dano já produzido; (3) monitoramento de avaliação, para compreensão de determinado processo e (4) monitoramento de vigilância.

Para a implantação de uma rede de monitoramento é necessária a construção de um modelo conceitual preliminar do sistema aquífero que caracterize de forma consistente o estágio de conhecimento da circulação das águas subterrâneas, da hidrogeoquímica e da conectividade com as águas superficiais a fim de definir os objetivos do monitoramento (Feitosa *et al.*, 2008).

Além disso, a *European Communities* (2003), propõe que a rede de monitoramento deve ser implantada gradualmente, primeiramente com base em um modelo conceitual sobre a delimitação tridimensional do corpo hídrico a ser monitorado, suas características químicas e hidrológicas e sua vulnerabilidade a fontes de poluição e super exploração. Com a avaliação dos dados obtidos, é possível melhorar o modelo conceitual e também o próprio monitoramento. Este processo continua até que os objetivos propostos sejam atingidos com elevado nível de confiança, a um custo possível.

Sendo assim, a partir do levantamento realizado por Dias *et al.* (2008) é possível fazer uma síntese das etapas envolvidas no desenvolvimento de um programa de monitoramento:

- Definição dos objetivos do monitoramento;
- Projeto de rede (seleção de pontos de monitoramento, parâmetros a serem determinados, frequência de amostragem);
- Operação do monitoramento (coleta, análise, interpretação o, controle de qualidade); e
- Avaliação dos resultados frente aos objetivos para validação do monitoramento.

2.4 O USO DO GEOPROCESSAMENTO APLICADO ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Para Zaidan (2017) o geoprocessamento é um termo recente e pode ser considerado como um ramo de atividades. O mesmo define geoprocessamento como:

[...] “o conjunto de técnicas e métodos teóricos e computacionais relacionados com a coleta, entrada, armazenamento, tratamento e processamento de dados, a fim de gerar novos dados e ou informações espaciais ou georreferenciadas.”

Entende-se por informações georreferenciadas aquelas que tem o atributo da localização, isto é, estão ligadas a uma posição específica do globo terrestre por meio de suas coordenadas.

Ainda para Zaidan (2017) os Sistemas de Informações Geográficas, popularmente chamados SIG's ou GIS (*Geographic Information System*), podem ser classificados como uma das geotecnologias que se encontram dentro do ramo de atividades do geoprocessamento. Há uma tendência em associar o termo SIG a um simples *software*, entretanto a palavra sistema implica que o SIG possui vários componentes interrelacionados como equipamentos (*hardware*), aplicativos (*software*), o pessoal especializado (*peopleware*) e o banco de dados (*dataware*) (Silva, 2003), o que faz de um SIG um sistema completo e operacional.

Câmara & Davis Jr. (2001) definem um SIG como:

[...] “ferramentas computacionais para geoprocessamento, chamadas de sistemas de Informação Geográfica (GIS), que permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciado, tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos”.

Os SIG's armazenam dados geográficos em camadas interrelacionadas por uma referência espacial, de forma que cada plano temático corresponde a um nível de informação que representa diferentes aspectos do objeto de estudo. Tomados em conjunto, os diferentes planos temáticos integram uma base de dados geográficos na qual podem ser correlacionados, analisados e combinados entre si. Cada símbolo está relacionado a elementos gráficos e seus respectivos atributos, como por exemplo, a coordenada de um poço de monitoramento, que pode ser correlacionada com informações sobre a hidrografia, litologia e relevo em um mesmo ponto.

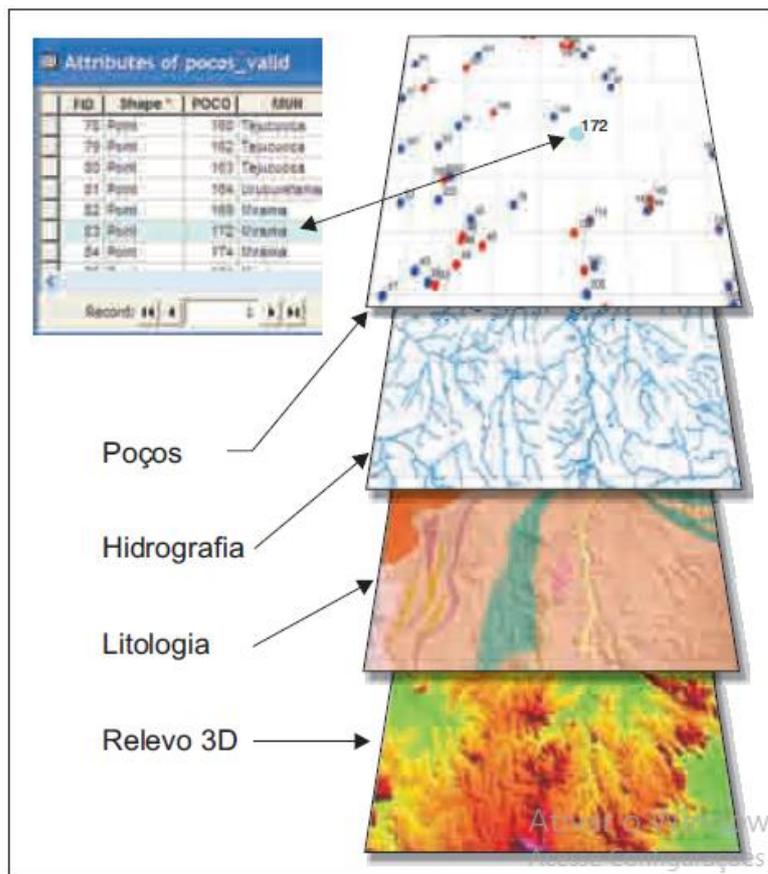


Figura 2.6 - Estrutura de armazenamento de dados geográficos em um SIG (Fonte: Feitosa *et al.*, 2008).

Assim sendo, a aplicação de ferramentas de geoprocessamento nas pesquisas hidrogeológicas vem sendo cada vez mais utilizadas por especialistas, por possibilitarem a exploração e análise dos dados espaciais, gerando informação, facilitando o manuseio dos dados e apresentação dos resultados em diferentes formas, alta qualidade e rápida disseminação, automatização de tarefas rotineiras e visão da totalidade do fenômeno estudado (GOMES, 2008). Além disso, SIG representa uma gama de ferramentas de baixo custo e que podem ser empregadas em variados tipos de estudos, sejam eles para estimar o cálculo da recarga de aquíferos (Galvão *et al.* 2018), a vulnerabilidade (Lima *et al.* 2017), favorabilidade à exploração (Vidal *et al.*, 2005; Murthy 200), potencialidade (Souza 2003; Sener *et al.* 2005; Lemacha 2008; Musa *et al.* 2009; Lima *et al.* 2009), ou voltados para a gestão e monitoramento de águas subterrâneas (Lima 2004; Prado 2004; Soldera 2017; Lazzarotto *et al.* 2017; Manzione 2018).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METODOLOGIA

Para que se possa analisar a interferência da variação pluviométrica, do uso e ocupação da terra e da exploração de águas subterrâneas por meio de poços tubulares na disponibilidade hídrica de um sistema aquífero, são necessários dados de diversos tipos, formatos e fontes, distribuídos no tempo e no espaço. Desta forma, estes dados precisam, primeiramente, serem compilados, organizados e tratados.

Na fase inicial realizou-se a revisão bibliográfica, a qual consistiu em uma pesquisa mais aprofundada sobre a aplicação de geotecnologias no monitoramento de níveis freáticos, dando ênfase aos trabalhos desenvolvidos no sistema aquífero Bauru. Paralelamente foram coletados/organizados dados secundários básicos gerados pela CPRM e fontes diversas como o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE e Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO. Os dados coletados podem ser classificados didaticamente em: (1) séries de monitoramento de nível d'água para poços e estações pluviométricas pertencentes à Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas – RIMAS e à Rede Hidrometeorológica Nacional, de propriedade tanto pela CPRM quanto da Agência Nacional de Águas – ANA; (2) informações geológicas e hidrogeológicas a respeito do aquífero Bauru, geradas pela CPRM no âmbito da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS ou obtidas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS ou em publicações diversas; mapa pedológico do Estado de São Paulo (Rossi, 2017); (3) imagens de radar SRTM, as quais se encontram disponíveis para *download* no site da USGS; e estudos e shapes temáticas resultantes do projeto Geodiversidade, realizado pela CPRM, no Estado de São Paulo (Peixoto, 2010).

As séries temporais foram tratadas a partir de análises estatísticas de correlações simples e cruzada através do software *Statistica Trial 13*, possibilitando a avaliação do comportamento das variáveis chuva e nível d'água. As demais informações foram armazenadas em um banco de dados georreferenciado no *software ArcGIS 10.3* e submetidas à análise multicriterial para estabelecimento dos fatores preponderantes nas diferentes relações verificadas entre a precipitação e o nível d'água. O método escolhido de análise multicritério corresponde à Combinação Linear Ponderada – *WLC (Weight Linear Combination)* (Gomes, 2008), que consiste na atribuição de pesos a cada um dos fatores e notas às suas respectivas classes, segundo as regras de decisão previamente definidas no contexto do objetivo a ser alcançado. O fluxograma da figura 3.1 esquematiza as etapas metodológicas deste estudo.

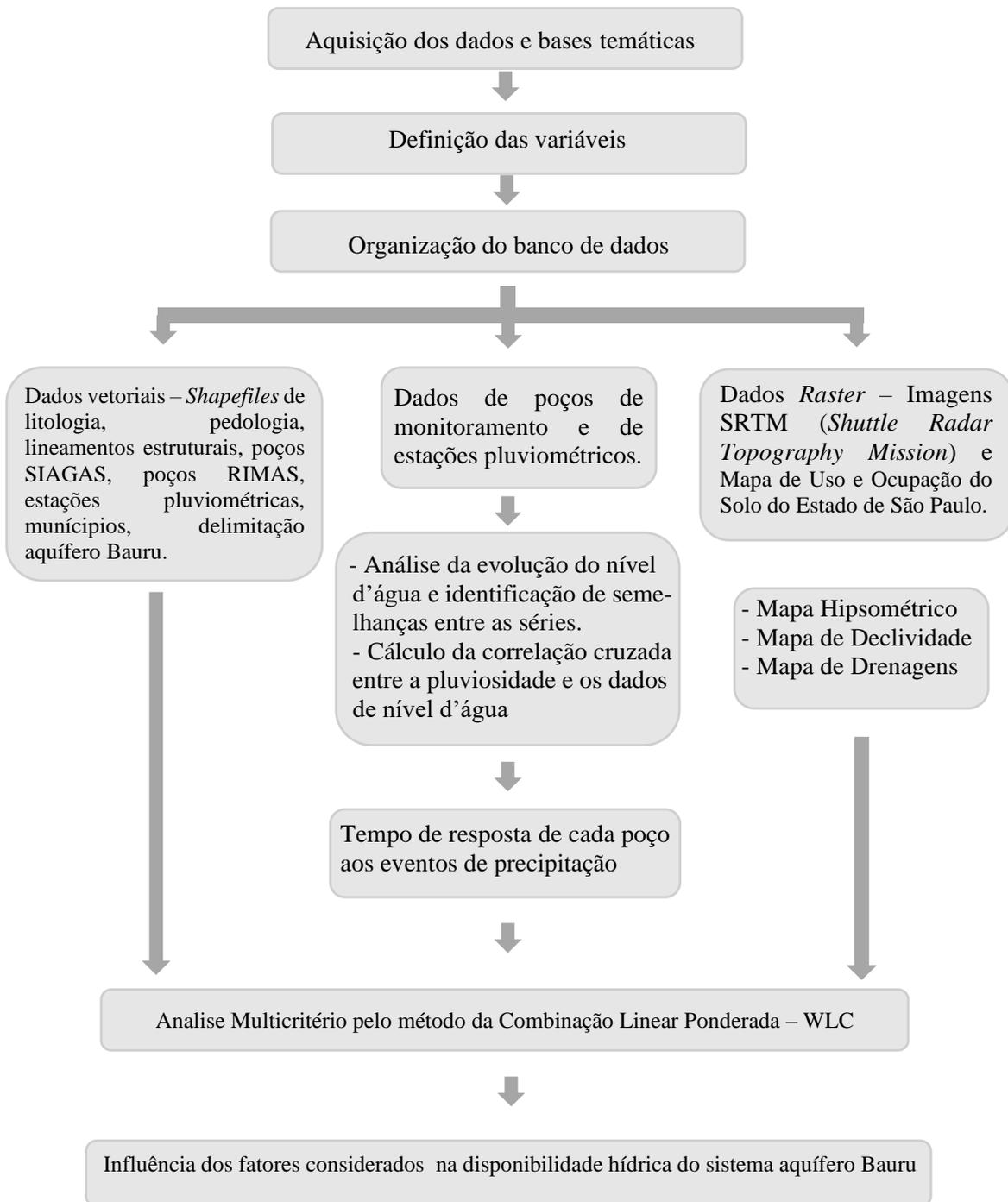


Figura 3.1- Fluxograma ilustrando as etapas metodológicas do estudo

3.1.1 Aquisição de Dados e Bases Temáticas

3.1.1.1 Dados de poços

Os dados de poços que compõem o banco de dados utilizados no presente trabalho foram obtidos de duas fontes distintas:

- 13 poços monitorados pela rede RIMAS;
- 3989 poços cadastrados no SIAGAS;

Todos os poços encontram-se na porção do sistema aquífero Bauru localizada no Estado de São Paulo – figura 3.2.

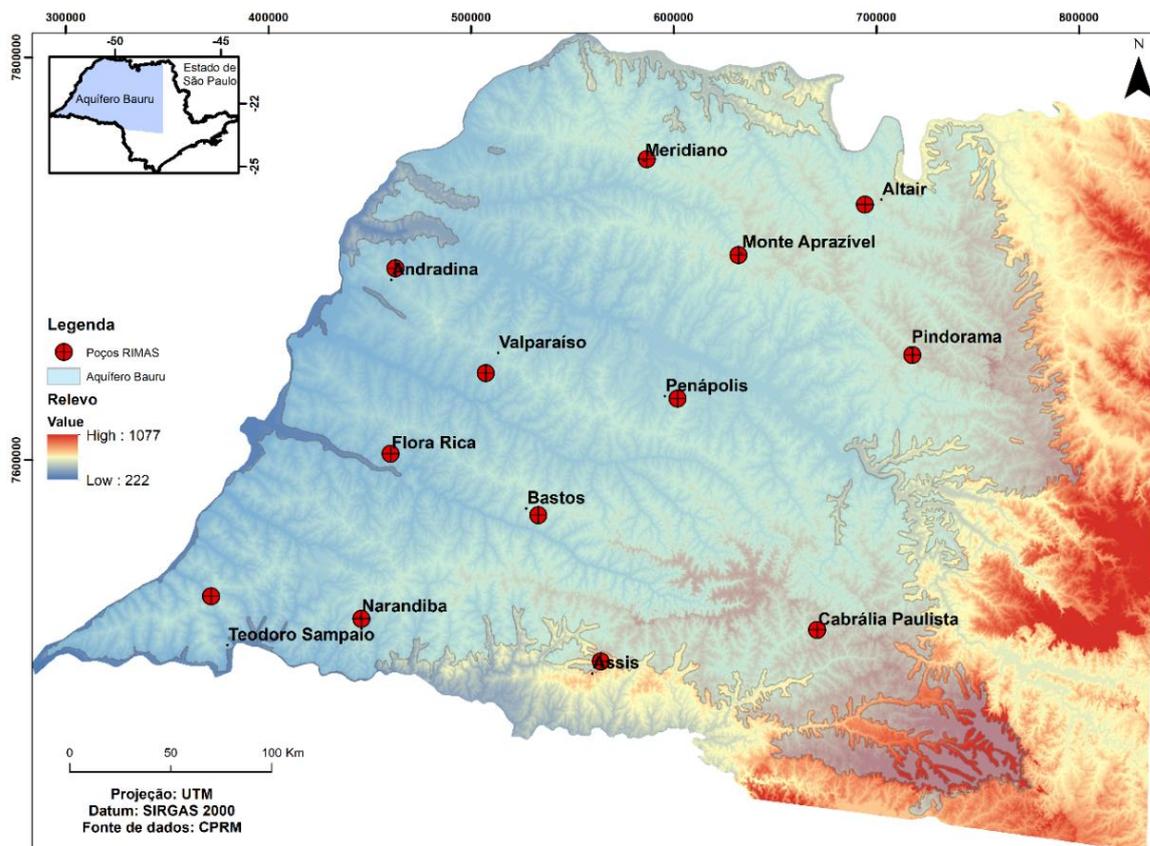


Figura 3.2 - Mapa indicando a localização dos poços de monitoramento da rede RIMAS no sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo.

A rede RIMAS possui na área de estudo 13 poços equipados com medidores automáticos de nível d’água que fornecem medições diárias, monitorados durante o período de 2010 a 2018. Estes poços apresentam também o perfil construtivo com descrição litológica, hidrodinâmica e hidroquímica, conforme mostra a figura 3.3, cujos dados podem ser acessados pelo endereço eletrônico (<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/>). Esta rede de monitoramento, implementada e monitorada pela CPRM, apresenta confiabilidade suficiente para que as informações obtidas a partir dos poços monitorados no sistema aquífero Bauru sejam utilizados como referência para a evolução do nível estático no mesmo. Os poços monitorados pela rede RIMAS apresentam dados diários para os períodos seco, que na região varia de abril a outubro, e chuvoso, que varia de outubro a março. No período seco os níveis d’água subterrânea atingem as maiores profundidades e no período chuvoso

Barbosa, M.B. 2020. Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes da variação do nível de água...

os níveis estão mais rasos, portanto, os poços de monitoramento da rede RIMAS são de extrema importância para o desenvolvimento do presente trabalho, visto que servem como parâmetro para análises em ambas as situações.

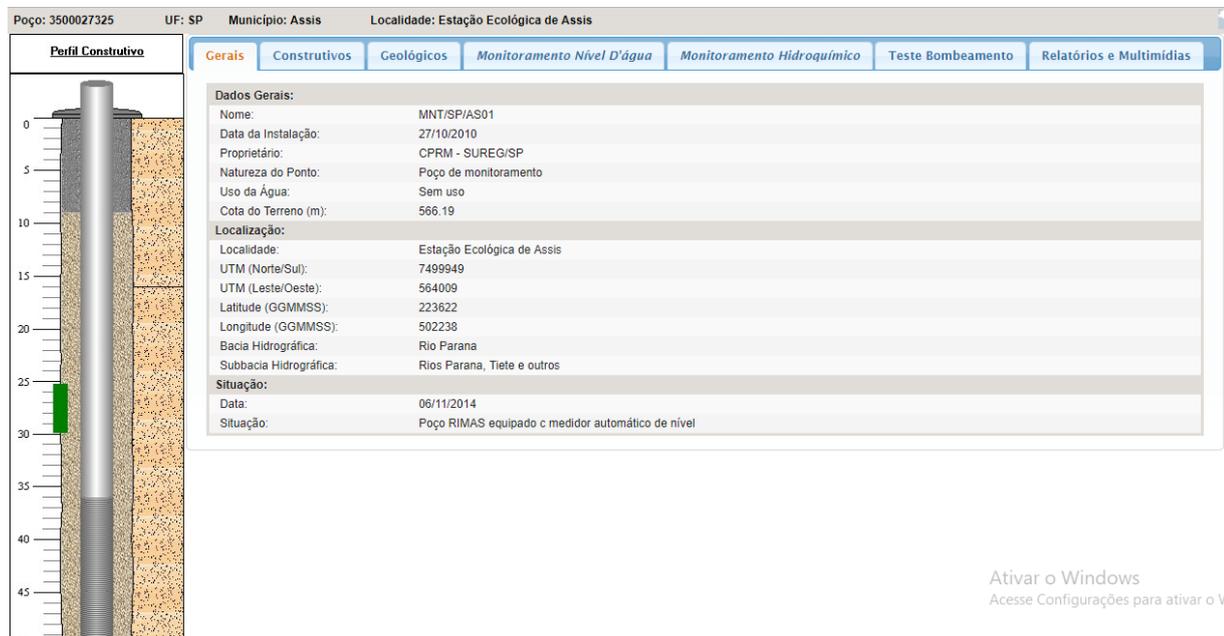


Figura 3.3- Exemplo do perfil construtivo de um poço de monitoramento no município de Assis - SP pertencente à rede RIMAS.

Já a rede SIAGAS possui 9628 poços cadastrados na área de estudo que podem ser consultados pela página (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>). Entretanto, após análise do banco de dados constatou-se que apenas 3989 poços apresentavam valores para NE e perfis construtivos, de forma que somente estes foram utilizados no presente trabalho. Além disso, as informações presentes no banco de dados SIAGAS apresentam uma grande variação temporal, o que demonstrou uma condição adversa à execução deste trabalho, visto que as medidas de nível d'água e outros parâmetros hidrogeológicos dependem diretamente da correlação temporal para uma análise consistente. No entanto, cabe ressaltar que o presente trabalho visa o estudo da inter-relação do fluxo subterrâneo de águas não só com a pluviosidade, como também o uso e cobertura do solo em escala regional.

Todos os dados coletados foram organizados no *Access* e *Excel* em forma de tabelas.

3.1.1.2 Dados pluviométricos

Os dados de estações pluviométricas utilizados neste trabalho foram adquiridos da página Hidroweb – (http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf), coordenada pela Agência Nacional de Águas – ANA o qual provém do banco de dados de duas redes distintas:

- 13 estações pluviométricas do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE;

- 7 estações pluviométricas do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO;

Além dessas redes, foram incluídos os dados de uma estação pluviométrica operada pela CPRM.

Como critério para seleção das estações supracitadas, adotou-se uma correlação espacial com os poços de monitoramento da rede RIMAS (máximo de 10 km) que também apresentam séries temporais para evolução do nível d'água a fim de verificar a influência do regime de chuvas na altura do nível estático. Totalizam-se um total de 21 estações pluviométricas com medições diárias para precipitação (mm) registradas em séries temporais, considerando-se considerando o mesmo período analisado para os poços tubulares.

Os dados pluviométricos da área de estudo são de suma importância para a proposta do trabalho, pois a intensidade das chuvas bem como a soma do volume total precipitado, caracteriza-se como um fator determinante nos processos de escoamento superficial e, conseqüentemente, na recarga do aquífero. Os dados coletados foram organizados no *Access* e *Excel* em forma de tabelas.

3.1.1.3 Dados de Sensoriamento Remoto

As imagens de satélite usadas neste estudo são:

- Imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*);

As imagens do satélite SRTM foram adquiridas na página da *United States Geological Survey (USGS)* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), que é responsável pela aquisição, armazenamento, processamento e distribuição dessas imagens. A projeção está em Universal Transversa de Mercator - UTM, Datum SIRGAS 2000. As imagens de radar foram utilizadas para caracterizar fisicamente toda a área do sistema aquífero Bauru, por meio de mapas temáticos (drenagem, declividade, hipsometria) e apresentam uma resolução espacial de 30 metros. Para abranger toda a área do SAB foram necessárias 16 cenas SRTM, as quais foram unidas numa única imagem, formando assim um mosaico único usando o *software* Envi 4.2.

3.1.1.4 Dados cartográficos

Os dados cartográficos adquirido para a realização do presente trabalho podem ser elencados a seguir:

- *Shapefiles* do projeto Mapa de Geodiversidade do Estado de São Paulo (Peixoto, 2010);
- Mapa pedológico do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000 (Rossi, 2017);

As *shapefiles* utilizadas para compor os mapas temáticos finais deste trabalho foram adquiridas do projeto Mapa de Geodiversidade do Estado de São Paulo. O Datum utilizado como sistema de referência espacial para todas as *shapefiles* foi o SIRGAS 2000, para que a base de SIG ficasse uniformizada no sistema de referência espacial mais atualizado no país. Este projeto foi desenvolvido pela CPRM e as informações técnicas produzidas pelo levantamento da Geodiversidade do Estado de São Paulo – em forma de mapa e SIG – encontram-se disponíveis para pesquisa e download no portal da CPRM/SGB no endereço eletrônico (<http://www.cprm.gov.br>).

O Mapa Pedológico do Estado de São Paulo foi adquirido na página do Instituto Florestal de São Paulo. Este mapa é de grande importância para o desenvolvimento do trabalho, visto que será utilizado como

critério para agrupamento de acordo com o tipo de solo sob o qual cada poço se encontra. Esse agrupamento foi realizado a partir de uma classificação hidrológica dos solos, com base em parâmetros como composição e textura, visto que essas características irão influenciar na capacidade de infiltração do mesmo e, por conseguinte, na recarga do sistema aquífero Bauru.

3.1.2 Análise estatística de séries temporais

As séries temporais podem também ser chamadas de séries históricas, pois constituem uma sequência de dados que são obtidos através de observações periódicas do evento de interesse. Segundo Bezerra (2006), os principais objetivos em analisar séries temporais consistem em investigar o mecanismo gerador da série temporal, descrever o comportamento das séries por meio de gráficos, procurando por periodicidades nas mesmas e fazer previsões de valores futuros da série, podendo ser a curto ou longo prazo. Em todos estes casos podem-se construir modelos probabilísticos ou estocásticos, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

No presente trabalho foram analisadas séries temporais de duas variáveis distintas, nível estático e precipitação, apresentando medições diárias durante o intervalo de 2010 a 2018.

3.1.2.1 Correlação simples

A primeira etapa da análise das séries de nível estático dos poços RIMAS consistiu na análise visual dos gráficos gerados a partir destas, a fim de identificar algum tipo de tendência ou a existência de um componente sazonal para cada série.

Outra ferramenta utilizada na identificação de semelhanças entre as curvas de nível estático de cada poço é a função de correlação simples. O coeficiente de correlação (ρ) de uma série temporal varia entre -1 e 1. Se (ρ) assume um valor próximo de 1, as duas variáveis medidas possuem uma alta correlação, mas se (ρ) é próximo à -1, a correlação é negativa. Quando (ρ) assume valor 0, não existe correlação entre as variáveis, ou seja, a correlação é nula. Sendo assim, foi feita a correlação das séries por meio do Excel obtendo uma matriz de correlação simples, a qual indicou por meio do coeficiente de correlação (ρ) a semelhança entre as séries. Essa correlação pôde ser comprovada a partir da análise visual dos gráficos entre as séries que apresentaram coeficiente de correlação próximo a 1.

3.1.2.2 Correlação cruzada

A partir dos dados coletados nos bancos de dados das redes supracitadas, as séries foram organizadas em valores mensais, de forma que se calculou a média mensal para os valores de nível estático e a somatória da precipitação mensal durante o intervalo de tempo trabalhado. Este procedimento foi realizado utilizando o *Microsoft Access*. Posteriormente estes dados foram tratados pelo software *Statistica Trial* utilizando a função da correlação cruzada. Esta função é utilizada para calcular e representar graficamente as correlações entre duas séries temporais em diferentes períodos. A representação gráfica dessas correlações pode auxiliar a determinação da similaridade de duas séries em função do deslocamento de uma em relação à outra. Neste

sentido, tal função foi aplicada a fim de determinar a influência da precipitação no nível estático dos poços a partir de uma correlação cruzada entre as séries temporais. Assim, espera-se que o padrão de correlação seja consistente e indique o tempo necessário para que a água proveniente da precipitação infiltre no solo e recarregue o aquífero, provocando um aumento do nível estático.

Cabe ressaltar que o tempo de resposta à precipitação tende a variar de poço para poço em função de fatores que podem influenciar a infiltração como a espessura e tipo de solo, espessura da zona não saturada, declividade do terreno, intensidade das chuvas, uso e ocupação do solo, entre outros. A correlação cruzada pode ser entendida como um critério adicional adotado para classificar as séries de NE/chuva, com base nos tempos de defasagem (*lags*) obtidos.

Essa interpretação quanto ao tempo de resposta do nível estático consiste em um dos principais objetivos deste trabalho e depende de uma análise integrada de parâmetros multivariados, sendo a correlação cruzada uma etapa primordial deste processo

3.1.3 Espacialização dos dados em ambiente SIG

Após a revisão bibliográfica e organização de toda a base de dados cedida pela CPRM, todos os dados foram espacializados utilizando o *software ArcGIS 10.3*.

Pode-se elencar como produtos desta etapa os seguintes itens:

- *Raster* de densidade de poços e de nível d'água;
- Mapa de declividade;
- Mapa hipsométrico;
- Mapa de solos;
- Mapa Litológico;
- Mapa de uso e ocupação do solo;

3.1.4 Análise Multicritério

Dado que as análises multicritério visam a comparação entre critérios, é necessário que as unidades destes possam ser convertidas em unidades comparáveis, isto é, serem normalizadas, conforme a metodologia desenvolvida por Gomes (2008). Após a seleção dos fatores a serem analisados, atribui-se valores às suas respectivas classes, em outras palavras, ponderando-as, dentro de uma escala pré-definida (por exemplo [0, 10]). Uma vez normalizados para um intervalo fixo, cada um dos fatores também é ponderado, segundo o grau de influência exercido sobre o objetivo proposto e, finalmente, realiza-se a combinação dos fatores entre si, aplicando um operador algébrico, que no caso do presente trabalho foi escolhida a Combinação Linear Ponderada (*WLC*, de *Weighted Linear Combination*). O operador *WLC* determina a adequabilidade de uma matriz de células, multiplicando o valor das células dos mapas de fatores normalizados fazendo-os corresponder ao peso atribuído a cada fator e adicionando pelos mapas os valores ponderados correspondentes a cada um dos fatores considerados na análise. A equação pode ser descrita da seguinte maneira de acordo com Vilaverde, 2016:

$$S_k = \sum(W_{k,i} * X_{k,i}) \quad (1)$$

Onde:

S_k : é o índice de adequabilidade por célula k;

$W_{k,i}$: é o peso do fator.

$X_{k,i}$: é o valor do critério i por célula k

O peso dos fatores $W_{k_1}, W_{k_2}, \dots, W_{k_3}$ reflete a importância relativa de cada critério para uma dada célula ou unidade geográfica.

Para atribuir peso às variáveis foi adotado o método de análise hierárquica, denominado *AHP (Analytic Hierarchy Process)*. Desta forma, foram gerados rasters para cada um dos fatores em questão, os quais foram normalizados e subsequentemente reclassificados por meio da ferramenta *raster calculator* do módulo *Spatial Analyst* do *ArcGIS 10.3*.

As variáveis consideradas nesta análise foram: composição do perfil litológico acima do filtro em cada poço, a espessura da zona não saturada, a capacidade específica do poço, o número de poços de produção instalados em um raio de 5km, os tipos de solo e cobertura. A litologia e declividade não foram consideradas uma vez que não houve uma variação significativa destas na localidade dos poços monitorados que pudesse influenciar na correlação.

A tabela 3.1 a seguir mostra os pesos atribuídos a cada fator e os valores de cada classe dos fatores analisados em uma escala ponderada de 0 a 10:

Tabela 3.1- Pesos atribuídos aos fatores analisados e os valores de suas respectivas classes.

Fator	Peso do fator ($W_{k,i}$)	Classes	Valor atribuído à cada classe ($X_{k,i}$)
Espessura da Zona Não Saturada	0,1	<10	10
		11-20	8
		21-30	5
		>30	3

Continua

Continuação tabela 1- Pesos atribuídos aos fatores analisados e os valores de suas respectivas classes.

Fator	Peso do fator ($W_{k,i}$)	Classes	Valor atribuído à cada classe ($X_{k,i}$)
Composição do perfil litológico acima ou no filtro	0,3	Areia	10
		Areia e material areno-argiloso	8
		Areia, material areno-argiloso e basalto	0
		Areia e argilito com provável confinamento	0
Uso e Ocupação do Solo	0,05	Área Florestal/Agrícola	8
		Pastagem	7
		Área Agrícola	7
		Área Florestal	10
		Área Urbana	4
		Área Urbana/Área Agrícola	6
Tipo de Solo	0,05	Argissolos Vermelho-Amarelos	5
		Latossolos Vermelho-Amarelos	10
		Área Antropizada	4
Capacidade Específica ($m^3/h/m$)	0,25	<0,28	4
		0,29-0,57	6
		0,58-0,86	8
		>0,87	10
Quantidade de poços em raio de 5km	0,25	<5	10
		6-10	7
		11-16	5
		>16	0

Os *rasters* resultantes da equação 1 traduzem a correlação entre a precipitação e a variação no nível de água, na qual os valores de cada classe foram multiplicados pelo peso do fator. Após esta etapa, a soma de todos os fatores foi realizada usando a equação 2:

$$C = (Pe * Ve) + (Pl * Vl) + (Po * Vo) + (Ps * Vs) + (Pc * Vc) + (Pp * Vp) \quad (2)$$

Em que: C = Correlação; Pe = Peso da espessura da zona não saturada; Ve = Valor da espessura da zona não saturada; Pl = Peso da composição do perfil litológico; Vl = Valor da composição do perfil litológico; Po = Peso do uso e ocupação do solo; Vo = Valor do uso e ocupação do solo; Ps = Peso do tipo de solo; Vs = Valor do tipo de solo; Pc = Peso da capacidade específica; Vc = Valor da capacidade específica; Pp = Peso da quantidade de poços em raio de 5 Km; e Vp = Valor da quantidade de poços em raio de 5 Km.

Os pesos relativos de valor zero foram designados considerando que as referidas subclasses interferem de forma negativa na relação chuva-nível.

O processo de recarga de aquíferos ocorre em geral pelo movimento de água que atinge a zona não saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico. Segundo Barreto *et al.* (2000), a presença da cobertura sedimentar ou pedológica pode favorecer o processo de infiltração de águas meteóricas, dependendo da espessura e das características de permeabilidade e porosidade dos sedimentos ou solos. Sendo assim, a espessura e composição da zona não saturada convertem-se em dois fatores de extrema importância para esta análise.

Os poços que apresentaram maior valor correspondem àqueles que apresentaram melhor correlação com os eventos de chuva, ou seja, exibiram respostas mais rápidas no aumento do nível d'água subterrânea. Os pesos foram atribuídos de acordo com as especificidades de cada variável. Quanto a:

- Espessura da zona não saturada: quanto mais espessa a zona não saturada, maior será o tempo de infiltração da água, e conseqüentemente mais lenta será a resposta do nível de água do poço;
- Composição do perfil litológico acima do filtro: em zonas não saturadas com composições mais arenosas a infiltração da água de chuva tende a ser mais rápida e eficiente. Conforme relatado anteriormente, a presença de argila faz com que a água seja liberada mais lentamente, podendo em alguns casos causar o confinamento do aquífero abaixo da camada de argila, visto que a água ficará retida entre os poros. Além disso, alguns autores como Carvalho (1980), sugerem a existência de uma rede de comunicações hidráulicas entre os sistemas aquíferos Bauru (arenitos) e Botucatu (Basaltos), o que faz com que os poços que atingem os basaltos

recebam contribuições da unidade aquífera Botucatu, o que diminuiria a correlação com as chuvas.

- Uso e ocupação do solo: Com base na tabela 1 que quantifica o escoamento superficial para os vários tipos e utilização do solo elaborada pelo SCS (1972, apud Lencastre e Franco, 1992), desenvolveu-se a classificação do fator ocupação do solo para a área em estudo ordenando as classes de acordo com a sua maior capacidade de infiltração de água no solo. A compactação natural ou devida a atividade antrópica, dificulta a entrada de água no solo, reduzindo assim a sua capacidade de infiltração e conseqüentemente aumentando o escoamento superficial. Áreas florestais estão associadas a solos menos compactados, pois impedem o impacto direto da precipitação no solo e a presença de raízes geram fissuras no solo o que permite uma maior infiltração e percolação da água. Já áreas de pastagem e agrícolas possuem solos mais compactados se comparados a áreas florestais devido a processos de circulação associados às formas de manejo, o que dificulta a percolação da água. Áreas desprovidas de cobertura vegetal, como polígonos urbanos e industriais tendem a ter grandes superfícies impermeabilizadas, nas quais predominam o escoamento superficial.
- Tipo de solos: Sartori *et al.*, (2005), baseando-se no modelo de classificação hidrológica de solos do *Soil Conservation Service (SCS)* do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), propõe uma adaptação para a classificação hidrológica dos solos brasileiros. Esta adaptação propõe que latossolos vermelho-amarelos possuem alta taxa de infiltração e alto grau de resistência e tolerância à erosão, enquanto argissolos vermelho-amarelos possuem taxa de infiltração mais baixa.
- Vazão específica: A vazão específica ou capacidade específica de um poço corresponde à razão entre a vazão e o rebaixamento do nível d'água determinado a partir do teste de bombeamento. Conforme demonstrado por Iritani *et. al.* (2000) existe uma correlação logarítmica entre este parâmetro e a transmissividade do aquífero que mostrou um coeficiente superior (94%) à correlação linear (89%), resultando na equação $T = 0,8685 Q/s^{1,1123}$. A partir desta correlação e assumindo-se que a qualidade dos poços é boa, pode-se associar a capacidade específica ao potencial produtivo do aquífero, de forma que quanto maior este parâmetro, maior seria a transmissividade do aquífero neste determinado ponto, e conseqüentemente o potencial produtivo.
- Quantidade de poços de produção em um raio de 5 km: estudos hidrogeológicos como o de Costa *et al.* (2009) e Albuquerque (2004) sugerem que a interferência entre poços pode reduzir o rendimento potencial dos poços envolvidos. Em severas circunstâncias, a interferência pode causar rebaixamentos significativos. Sendo assim, para este estudo, considerou-se que quanto maior o número de poços de produção no entorno, maior é a interferência no nível estático do poço de monitoramento, o que diminui a correlação com os eventos de chuva. Foi adotada a densidade de poços instalados em um raio de 5km, com base no cadastro do SIAGAS, tendo

como premissa que quanto maior esse valor maior a probabilidade de existir poços nas imediações visto que o inventário disponível não reflete a quantidade real de poços.

CAPÍTULO 4

FATORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL DE ÁGUA QUE INFLUENCIAM NA DISPONIBILIDADE HIDRICA DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

Resumo: O Sistema Aquífero Bauru (SAB) caracterizado como um aquífero sedimentar predominantemente livre, cuja recarga está associada à precipitação, destaca-se como a principal fonte de abastecimento do oeste do Estado de São Paulo sendo um dos aquíferos monitorados pela rede implementada pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Este estudo contempla a investigação e análise multitemática dos fatores intervenientes na correlação entre a resposta do nível d'água subterrânea e os eventos de chuva. Foram analisadas séries temporais do nível d'água subterrânea e de chuva, e avaliados os fatores que poderiam influenciar nesta relação, tais como: composição do perfil litológico, espessura da zona não saturada, capacidade específica, número de poços de produção no entorno, e tipos de solo e de cobertura da região. Foram realizadas correlações simples e cruzada, a fim de determinar a influência da precipitação no nível estático dos poços e estimar o tempo necessário para a recarga do aquífero. O SIG (Sistema de Informação Geográfica) mostrou-se uma ferramenta útil para explicar a correlação das séries temporais estudadas, possibilitando a aplicação de análise multicritério. Os resultados indicam uma correlação entre o nível d'água e a pluviometria com tempo de resposta variável decorrente da intensidade de interação dos fatores considerados. O método indicou tendências e os fatores preponderantes dessa análise, podendo ser aplicado a aquíferos que apresentem condições análogas. Adicionalmente, permitiu constatar significativo rebaixamento do nível d'água durante 2013 a 2015, correspondendo ao período de estiagem severa quando o Estado de São Paulo foi submetido a forte crise hídrica.

Palavras-chave: Gestão de águas subterrâneas. Precipitação. Sistema de Informação Geográfica. Aquífero sedimentar. Estado de São Paulo, Brasil.

Abstract: The Bauru Aquifer System, characterized as a sedimentary aquifer, of predominantly free condition, whose recharge is associated with the infiltration of precipitation, it is the main source of public and private water supply in the western portion of São Paulo State. The Bauru aquifer has been monitored as part of the Groundwater Monitoring Network, operated by the Brazilian Geological Service - CPRM. This study contemplates the investigation and multi-thematic analysis of the intervening factors of the correlation between groundwater level response and rainfall events. Time series of groundwater and rainfall data were also analyzed and evaluated in order to identify the factors that could influence this relationship, such as: composition of the lithological profile, thickness of the unsaturated zone, specific capacity, number of production wells installed around, soil types and cover in the region. The time series analysis was conducted by using simple and cross correlations to determine precipitation influence on the wells static level, in order to estimate the necessary time for water to recharge the aquifer. The GIS (Geographic Information System) has proved to be a useful tool to explain the correlation of the time series studied, performing a multi-criteria analysis. The results indicate a correlation between water level and rainfall, indicating trends and the preponderant factors of this analysis and can be applied to aquifers that present analogous condition; and there was a significant water level decrease during a severe drought between 2013 and 2015, corresponding to the same period of the water crisis in the State of São Paulo.

Keywords: Groundwater management. Rainfall. Geographic information systems. Sedimentary aquifer. São Paulo State, Brazil.

4.1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea corresponde a mais de 95 % das reservas de água doce exploráveis do globo, o que confere aos reservatórios de água subterrânea um papel imprescindível no abastecimento público, tal como na irrigação para a produção de alimentos e suprimento de água para comunidades, vilas, indústrias e cisternas autônomas de residências (Hirata *et al.* 2010).

Apesar da percepção comum de sua abundância e de serem naturalmente mais protegidas quanto à contaminação do que as águas superficiais, a água subterrânea não é inesgotável e responde de forma dinâmica, a curto e a longo prazo à exploração intensiva e às modalidades de uso e ocupação dos terrenos. Além disso, a interação de fatores climatológicos e hidrogeológicos, condiciona as formas de recarga, abastecimento e circulação, influenciando na qualidade das águas subterrâneas (Rebouças, 1999). Deste modo, o conhecimento fragmentado e por vezes insuficientes a respeito dos aquíferos pode

conduzir a sobre-exploração e a graves conflitos pelo uso da água.

De acordo com um levantamento acerca do uso da água subterrânea para abastecimento público, realizado no Estado de São Paulo pela CETESB (2013), 462 municípios paulistas, isto é, cerca de 72% são, total ou parcialmente, abastecidos por águas subterrâneas, atendendo a uma população de cerca de 5,5 milhões de pessoas (DAEE, 2015). Neste sentido, o monitoramento dos sistemas aquíferos é uma ferramenta fundamental para promover o entendimento necessário sobre o potencial local e auxílio no planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Dentre os aquíferos que abastecem o Estado de São Paulo, destaca-se o sistema aquífero Bauru (SAB) que se caracteriza como um aquífero sedimentar predominantemente livre, cuja recarga está diretamente associada à precipitação. Corresponde à principal fonte de exploração de águas subterrâneas para abastecimento público e privado da região oeste do Estado de São Paulo (DAEE, 1990) e apresenta uma área de cerca de 96.880 km² (Figura 4.1).

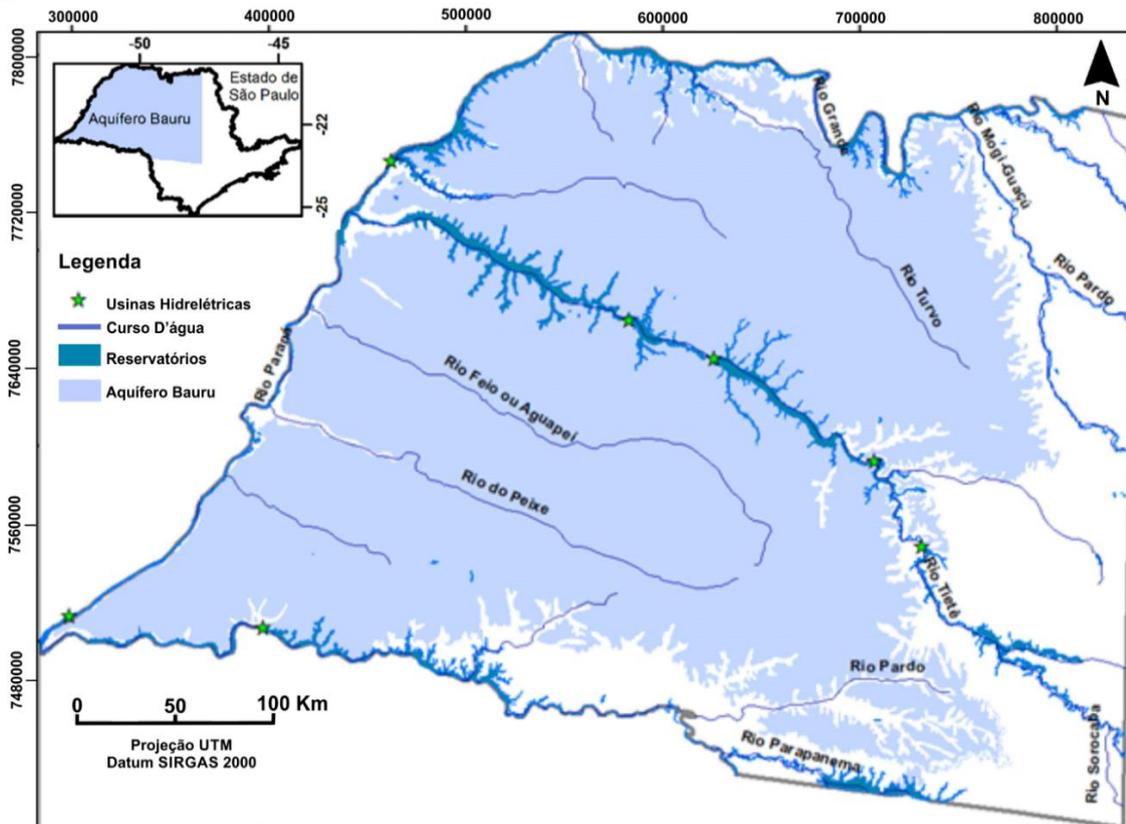


Figura 4.1 - Localização do Sistema Aquífero Bauru (SAB) no Estado de São Paulo.

Figure 4.1 – Bauru Aquifer System (SAB) location in São Paulo State.

Segundo Manoel Filho (2000), os conflitos pelo uso da água são iminentes em diversas regiões de domínio do SAB e prever a resposta deste quanto às atividades de exploração e às interferências antrópicas ao meio, em tempo hábil para gerar políticas racionais de uso dos recursos hídricos, é uma questão complexa.

A partir dos dados do monitoramento realizado no SAB entre 2010 e 2018 pela Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), projetada e operada pela CPRM – Serviço Geológico Brasileiro é possível observar oscilações significativas nos níveis de água, com respostas diferenciadas temporal e espacialmente.

Neste sentido, a proposta deste trabalho é ampliar o conhecimento e entender melhor a dinâmica desta unidade aquífera, buscando compreender a interferência dos diversos fatores relacionados ao meio físico, além das formas de uso e ocupação dos terrenos na disponibilidade hídrica do SAB no Estado de São Paulo. Para atingir esta proposta, analisou-se a evolução do nível d'água no SAB a partir de séries temporais de precipitação, no período de 2010 a 2018 e as diferentes respostas do sistema aquífero a estes eventos a partir das características do meio físico como: topografia; declividade; geologia; composição e espessura dos solos e da zona não saturada; uso e ocupação dos solos; aspectos hidráulicos determinados a partir de testes de bombeamento em poços tubulares; e a intensidade de exploração dos recursos hídricos subterrâneos. O estudo integrou as séries temporais de 2010 à 2018 dos 13 poços de monitoramento da RIMAS, dados de 3899 poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), registros de 20 estações pluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas (ANA), além de *shapefiles* do projeto mapa de Geodiversidade do Estado de São Paulo (Peixoto, 2010), do mapa pedológico do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000 (Rossi, 2017) e do mapa de uso e ocupação do Estado de São Paulo (IBGE, 2016).

4.1.1 GEOLOGIA

O Aquífero Bauru é constituído pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru de idade cretácea, sobrepostas aos derrames da Formação

Serra Geral, depositadas na Bacia Bauru, designação efetuada por Fernandes (1992). No presente trabalho utilizou-se a proposta de Soares et al. (1980) e Almeida *et al.* (1980), que subdividiram o Grupo Bauru em quatro formações: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília (Figura 4.2). A escolha por esta classificação se deve à sua funcionalidade e ao fato de que a maioria dos trabalhos relacionados ao tema, utilizaram-se também desta subdivisão litoestratigráfica.

A Formação Caiuá é caracterizada por apresentar notável uniformidade litológica, constituída predominantemente de arenitos compostos de quartzo, feldspato, calcedônia e opacos, ocasionalmente com caráter subarcosiano. É comum a ocorrência de matriz fina e ocasionalmente cimento carbonático ou silicoso (Almeida *et al.*, 1980).

A Formação Santo Anastácio é representada por arenitos marrom avermelhados e arroxeados, de granulometria fina à média, seleção moderada a ruim, com grãos arredondados a subarredondados, envoltos por película limonítica. A mineralogia é composta essencialmente por quartzo, podendo ocorrer subordinadamente feldspato, calcedônia e opacos (Soares *et al.*, 1980).

A Formação Adamantina ocorre por ampla extensão no oeste do Estado de São Paulo, compondo a maior parte da Bacia Bauru. Esta formação abrange um conjunto de litofácies, que apresentam como característica principal a presença de bancos de arenitos de granulometria fina a muito fina, cor rósea a castanho, alternando com bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, de cor castanho avermelhado a cinza-castanho. São comuns ocorrências de seixos de argilitos da própria unidade, cimento carbonático e nódulos carbonáticos (Soares *et al.*, 1980).

Já a Formação Marília é caracterizada por dois conjuntos de arenitos. O primeiro conjunto constituído por arenitos finos a médios, com arenitos muito finos subordinados e níveis de seixos, mal selecionados, arredondamento moderado a ruim e esfericidade predominantemente baixa. Outro constituído por arenitos grossos a conglomeráticos, frequentemente com grãos finos, grânulos esparsos e níveis de seixos, grãos subangulares, mal selecionados e com baixa esfericidade (Soares *et al.*, 1980).

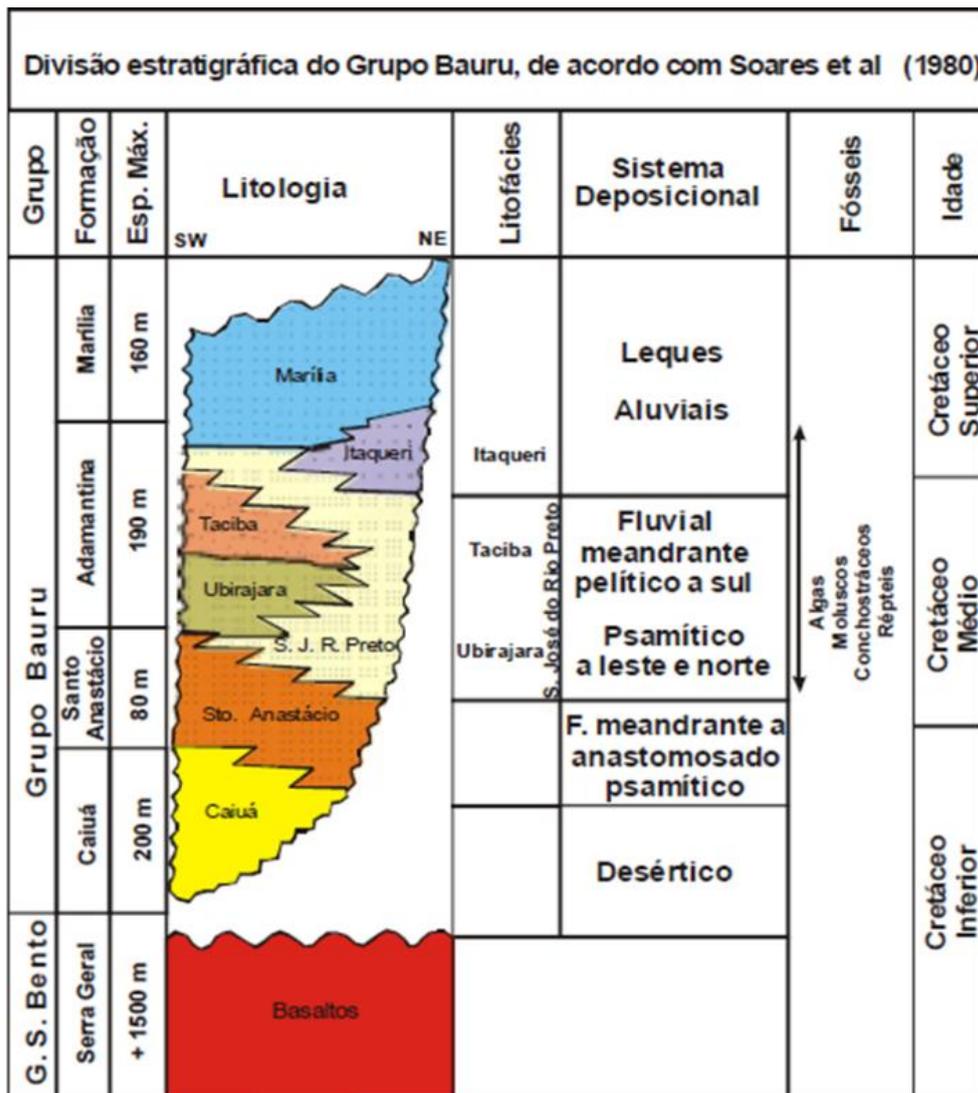


Figura 4.2 – Subdivisão da coluna estratigráfica do Grupo Bauru proposta por Soares *et al.* (1980).
Figure 4.2 – Stratigraphic column subdivision of Bauru group proposed for Soares *et al.* (1980).

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEO-LÓGICA

O SAB trata-se de um aquífero sedimentar, de condição predominantemente livre (DAEE, 1976) cuja recarga natural está associada à infiltração direta da precipitação nos sedimentos Bauru. Para Mezzalira (1974), o sistema aquífero Bauru pode ser caracterizado como um ótimo reservatório e nas situações em que o substrato basáltico é interceptado nas perfurações, Carvalho (1980) defende a possibilidade de aumento da produtividade dos poços. Bettu *et al.* (2006) também sugere a existência de uma rede de comunicações hidráulicas entre os sistemas aquíferos Bauru e Botucatu, por meio da barreira de derrames basálticos da Formação Serra Geral,

devido ao fato dos poços perfurados no Grupo Bauru que penetram o basalto apresentarem valores de vazão relativamente maiores do que aqueles que não atingem os basaltos. O Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (1979b) subdividiu o SAB em duas unidades hidroestratigráficas: Bauru Médio/Superior (Formações Adamantina e Marília) e Bauru Inferior/Caiuá (Formações Caiuá e Santo Anastácio). Essa subdivisão foi feita considerando-se as condições de armazenamento e circulação das águas.

O aquífero Bauru Médio/Superior apresenta extensão regional (DAEE, 1976) e é descrito como unidade hidrogeológica contínua e não uniforme, livre a localmente confinada, apresentando porosidade granular e extensão regional. A unidade hidroestratigráfica Bauru Inferior/Caiuá ocorre no

extremo sudoeste do estado, sendo caracterizada como contínua e uniforme, livre a localmente semiconfinada, apresentando porosidade granular, boa permeabilidade e elevado potencial (DAEE, 2005).

A partir do compilado de dados de 1099 poços realizado pelo DAEE em 2005 foi possível concluir que: (1) a espessura saturada média do aquífero é da ordem de 75 m; (2) em tese, para o Bauru Médio/Superior predominam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m, com média de 0,57 m³/h/m, dentro de uma faixa de variação de 0,022m³/h/m e 4,9 m³/h/m. Para a unidade aquífera Bauru Inferior/Caiuá os valores apresentados são superiores a 1,6 m³/h/m; (3) a condutividade hidráulica varia de 0,002 m/d a 3,66 m/d e a transmissividade de 0,14 a 328 m²/dia, predominando valores inferiores a 50 m²/dia para a unidade aquífera Bauru Médio/Superior. Já a unidade aquífera Bauru Inferior/Caiuá apresenta valores de transmissividade superiores a 200 m²/dia, dados corroborados por Iritani *et al.* (2000); (4) a porosidade efetiva estimada é de 5% para o Bauru Médio/Superior e de 10 a 15% para o Bauru Inferior/Caiuá (DAEE, 1979b).

Em termos hidroquímicos, conforme revisão feita por Campos (1993) acerca dos trabalhos realizados na área as águas do Grupo Bauru foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas. Em relação ao pH, prevalecem os meios neutros a levemente básicos. Possuem baixa salinidade, com valores médios de resíduo seco inferiores a 240 mg/l, sendo predominante a faixa de 100 a 200 mg/l (CETESB, 1994; CETESB, 2001).

4.2 METODOLOGIA

Para analisar a influência dos fatores extrínsecos, como a variação pluviométrica, o uso e ocupação da solo e a exploração por meio de poços tubulares, na disponibilidade hídrica subterrânea de um sistema aquífero, é necessário estabelecer a análise integrada de dados multitemáticos, em formatos e fontes distintos, distribuídos no tempo e no espaço.

Primeiramente foram coletados/organizados os dados secundários

básicos gerados pela CPRM e por fontes diversas como o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE e Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO. Os dados coletados podem ser classificados em: (1) séries de monitoramento de nível d'água para poços pertencentes à Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas – RIMAS e estações pluviométricas referentes à Rede Hidrometeorológica Nacional, de propriedade da Agência Nacional de Águas – ANA; (2) informações geológicas e hidrogeológicas geradas pela CPRM no âmbito do projeto Geodiversidade do Estado de São Paulo (Peixoto, 2010), ou obtidas no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS ou do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE); e mapa pedológico do Estado de São Paulo (Rossi, 2017); e (3) imagens de radar SRTM, disponíveis no site do USGS.

As séries temporais foram tratadas a partir de análises estatísticas de correlações simples e cruzada através do *software Statistica Trial 13*, possibilitando a avaliação do comportamento das variáveis chuva e nível d'água. As demais informações foram armazenadas em um banco de dados georreferenciado no *software ArcGIS 10.3* e submetidas à análise multicriterial para estabelecimento dos fatores preponderantes nas diferentes relações verificadas entre a precipitação e o nível d'água. O método escolhido de análise multicritério corresponde à Combinação Linear Ponderada – *WLC (Weighted Linear Combination)* (Gomes, 2008), que consiste na atribuição de pesos a cada um dos fatores e notas às suas respectivas classes, segundo as regras de decisão previamente definidas no contexto do objetivo a ser alcançado. A seguir são listadas as variáveis envolvidas na análise e a metodologia empregada.

4.2.1 Descrição das etapas metodológicas

O Fluxograma de atividades (Figura 4.3) apresenta as etapas realizadas neste trabalho a fim de determinar os fatores que influenciam na disponibilidade hídrica do sistema aquífero Bauru .

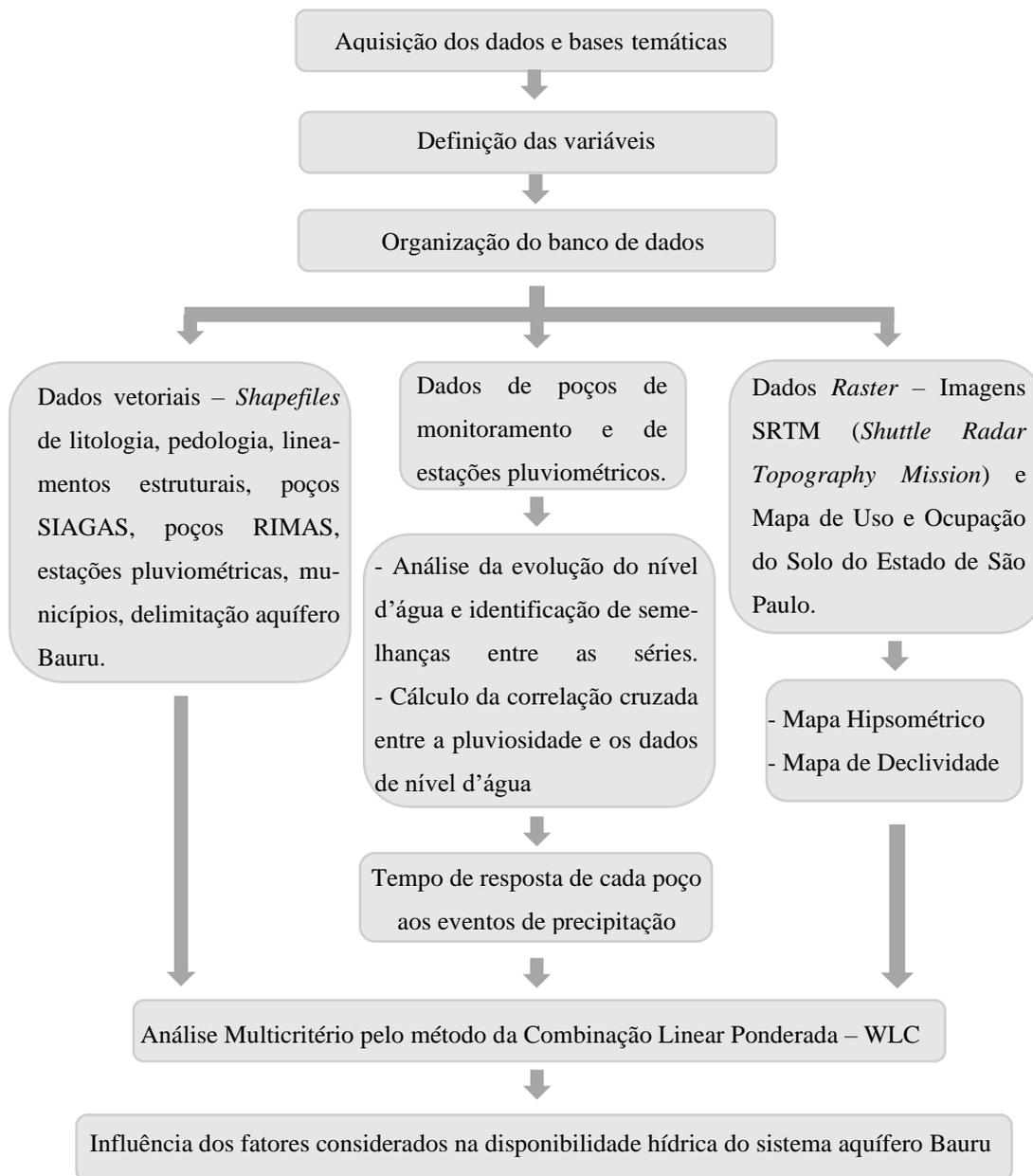


Figura 4.3 - Fluxograma exemplificando as etapas da metodologia aplicada

Figure 4.3 – Flowchart exemplify of research methodology

Os dados utilizados neste trabalho são de três tipos: (1) vetoriais, (2) numéricos (séries temporais) e (3) raster (matricial).

Os dados vetoriais correspondem às shapefiles utilizadas para compor os mapas temáticos finais e foram adquiridas do projeto Mapa de Geodiversidade do Estado de São Paulo (Peixoto, 2010) e do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (IEF, 2017). O Datum utilizado como sistema de referência espacial para todas as shapefiles foi o SIRGAS 2000.

As séries temporais empregadas podem ser classificadas em duas categorias: i) medições diárias do nível d’água de 13 poços,

por meio de medidores automáticos, no âmbito da rede RIMAS, para o período de 2010 a 2018 (CPRM, 2019); e ii) dados diários de chuva, obtidos no Hidroweb (ANA, 2019), provenientes de 21 estações pluviométricas, sendo 13 (treze) do Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo – DAEE; 7 (sete) do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas – CIIAGRO; e 1 (uma) da CPRM. Foi considerado o mesmo período analisado para os poços tubulares. Como critério para seleção das estações pluviométricas, adotou-se uma correlação espacial com os poços de monitoramento da

rede RIMAS (em raio máximo de 10 km de diâmetro) a fim de verificar a influencia do regime de chuva nas variações do nível estático

Os dados raster referem-se principalmente às imagens de satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 30 metros e ao Mapa de Uso e Ocupação do Estado de São Paulo (IBGE, 2019). Para abranger toda a área do SAB foram necessárias 16 cenas SRTM, as quais foram unidas numa única imagem e utilizadas para caracterizar fisicamente toda a área do sistema aquífero Bauru, por meio de mapas temáticos (drenagem, declividade, hipsometria).

4.2.1.1 Principais fatores condicionantes da relação entre a precipitação e a variação do nível d'água.

Seis parâmetros são propostos para avaliar a relação entre a precipitação e a variação do nível d'água, tais quais: espessura da zona não saturada, composição do perfil litológico acima do filtro em cada poço, capacidade específica do poço, densidade de poços de produção instalados em um raio de 5km, tipos de solo e uso e ocupação da terra. A litologia e declividade não foram consideradas uma vez que não houve uma variação significativa das mesmas que pudesse influenciar na correlação.

O processo de recarga de aquíferos ocorre em geral pelo movimento de água que atinge a zona não saturada sob forças gravitacionais, ou em uma direção específica por condicionamento hidráulico. Segundo Barreto *et al.* (2000), a presença da cobertura sedimentar ou pedológica pode favorecer o processo de infiltração de águas meteóricas, dependendo da espessura e das características de permeabilidade e porosidade dos sedimentos ou solos. Sendo assim, a espessura e composição da zona não saturada convertem-se em dois fatores de extrema importância para esta análise.

Em relação a espessura da zona não saturada, quanto maior for, mais tempo será decorrido para que a água se infiltre, e conseqüentemente mais lenta será a resposta do nível de água do poço a este incremento.

Quanto à composição do perfil litológico acima do filtro, admite-se que zonas não saturadas com composições mais arenosas tendem a apresentar infiltração da água de chuva mais rápida e eficiente. Enquanto que a presença de argila faz com que a água fique retida entre os poros e seja liberada mais lentamente, podendo em alguns casos causar o

confinamento do aquífero abaixo da camada de argila.

A vazão específica ou capacidade específica (Q/s) de um poço corresponde à razão entre a vazão e o rebaixamento do nível d'água determinado a partir do teste de bombeamento. Conforme demonstrado por Iritani *et al.* (2000) existe uma correlação logarítmica entre a capacidade específica dos poços e a transmissividade do aquífero. Os cálculos a partir da interpretação dos testes de bombeamento demonstraram que a correlação do logaritmo destes parâmetros apresentou coeficiente superior a 94%, o que resultou na equação $T = 0,8685 Q/s^{1,1123}$. A partir desta correlação pode-se associar a capacidade específica ao potencial produtivo do aquífero, de forma que quanto maior este parâmetro, maior seria a transmissividade do aquífero neste determinado ponto.

Estudos hidrogeológicos como o de Albuquerque (2004) e Costa *et al.* (2009) e sugerem que a interferência entre poços pode reduzir o rendimento potencial dos poços envolvidos. Em severas circunstâncias, a interferência pode causar rebaixamentos significativos. Sendo assim, para este estudo, considerou-se que quanto maior o número de poços de produção no entorno, maior é a interferência no nível estático do poço de monitoramento, o que diminui a correlação com os eventos de chuva. Foi adotada a densidade de poços instalados em um raio de 5km, com base no cadastro do SIAGAS, tendo como premissa que quanto maior esse valor maior a probabilidade de existir poços nas imediações visto que o inventário disponível não reflete a quantidade real de poços.

O tipo de solo também tem um impacto significativo na recarga dos aquíferos. Assim sendo, Sartori *et al.* (2005) baseando-se no modelo de classificação hidrológica de solos do *Soil Conservation Service* (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), propõem uma adaptação para a classificação hidrológica dos solos brasileiros. Esta adaptação classifica os solos em quatro grandes grupos, conforme sua capacidade de infiltração e de escoamento superficial a partir dos métodos desenvolvidos pelo SCS e por Lombardi Neto *et al.* (1989). atribuindo a cada grupo uma letra, A, B, C e D, nesta mesma ordem, representando o aumento do escoamento superficial e conseqüentemente a redução da taxa de infiltração de um grupo para outro. Apoiando-se nestes trabalhos foi possível enquadrar os solos encontrados no

domínio do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo e classifica-los hidrológicamente com base na premissa de que os perfis de solo que apresentavam semelhanças na textura, espessura, quantidade de matéria orgânica, estrutura e grau de expansão responderiam de forma análoga a uma chuva de duração e intensidade consideráveis.

O uso e ocupação do solo também condiciona consideravelmente o processo de infiltração de água no solo. A compactação natural ou devida a atividade antrópica, dificulta a entrada de água no solo, reduzindo assim a sua capacidade de infiltração e consequentemente aumentando o escoamento superficial. Com base nas referidas premissas e na tabela elaborada pelo SCS (1972, apud Lencastre e Franco, 1992), desenvolveu-se a classificação do fator ocupação do solo ordenando as classes de acordo com a sua maior capacidade de infiltração de água no solo. Áreas florestais estão associadas a solos menos compactados, pois previnem o impacto direto da precipitação no solo e adicionalmente a presença de raízes geram fissuras no solo o que permite uma maior infiltração e percolação da água. Já áreas de pastagem e agrícolas possuem solos mais compactados se comparados a áreas florestais devido a processos de circulação associados às formas de manejo, o que dificulta a percolação da água. Áreas desprovidas de cobertura vegetal, como polígonos urbanos e industriais tendem a ter grandes superfícies impermeabilizadas, nas quais predominam o escoamento superficial.

Cabe ressaltar que há a existência de uma rede de comunicações hidráulicas entre os sistemas aquíferos Bauru (arenitos) e Botucatu (Basaltos), conforme sugerido por Carvalho (1980), implica na condição de que poços que atingem os basaltos tendem a apresentar fraca correlação com as chuvas e os fatores previamente considerados não são aplicáveis.

4.2.1.2 Análise de séries temporais

As séries temporais podem também ser chamadas de séries históricas, pois constituem uma sequência de dados que são obtidos através de observações periódicas do evento de interesse. Segundo Bezerra (2006), os principais objetivos em analisar séries temporais consistem em investigar o mecanismo gerador da série temporal,

descrever o comportamento das séries por meio de gráficos, procurando por periodicidades nas mesmas e fazer previsões de valores futuros da série, podendo ser a curto ou longo prazo. Em todos estes casos pode-se construir modelos probabilísticos ou estocásticos, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência.

A partir dos dados diários coletados das redes supracitadas (nível d'água e chuva), as séries foram organizadas em valores mensais, de forma a calcular a média mensal para os valores de nível estático e a somatória da precipitação mensal durante o intervalo de tempo trabalhado. Este procedimento foi realizado utilizando a ferramenta *Access*, do pacote *Office*.

Posteriormente, estes dados foram tratados pelo *software Statistica Trial* utilizando a função da correlação cruzada, para determinar as correlações entre duas séries temporais em diferentes períodos. Neste sentido, tal função foi aplicada a fim de determinar a influência da precipitação no nível estático dos poços.

4.2.1.3 Análise Multicritério

Primeiramente os fatores supracitados foram selecionados com base no conhecimento empírico em relação às influências dos mesmos no fenômeno em estudo. A extração da classe dos fatores considerados em cada poço foi realizada por meio da ferramenta *Intersect* do módulo *Spatial Analyst* do *ArcGIS 10.3*, que sobrepondo os mapas temáticos, extrai o valor comum para determinada célula.

Dado que as análises multicritério visam a comparação entre critérios, é necessário que as unidades destes possam ser convertidas em unidades comparáveis, isto é, serem normalizadas, conforme a metodologia desenvolvida por Gomes (2008). Após a seleção dos fatores, realiza-se a análise, atribuindo valores às suas respectivas classes, isto é, ponderando-as, dentro de uma escala pré-definida (por exemplo [0, 10]). Uma vez normalizados para um intervalo fixo, cada um dos fatores também é ponderado, segundo o grau de influência exercido sobre o objetivo proposto e, finalmente, realiza-se a combinação dos fatores entre si, aplicando um operador algébrico, que no caso do presente trabalho foi escolhida a Combinação Linear Ponderada

(WLC, de *Weighted Linear Combination*). O operador WLC determina a adequabilidade de uma matriz de células, multiplicando o valor das células dos mapas de fatores normalizados fazendo-os corresponder ao peso atribuído a cada fator e adicionando pelos mapas os valores ponderados correspondentes a cada um dos fatores considerados na análise. A equação pode ser descrita da seguinte maneira de acordo com Vilaverde (2016):

$$S_k = \sum(W_{k,i} * X_{k,i}) \quad (2)$$

As variáveis consideradas nesta análise foram: composição do perfil litológico acima do filtro em cada poço, a espessura da zona não saturada, a capacidade específica do poço, o número de poços de produção instalados em

um raio de 5km, os tipos de solo e cobertura.

Para atribuir peso às variáveis foi adotado o método de análise hierárquica, denominado AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Desta forma, foram gerados rasters para cada um dos fatores em questão, os quais foram normalizados e subsequentemente reclassificados por meio da ferramenta raster calculator do módulo Spatial Analyst do ArcGIS 10.3.

A tabela 4.1 a seguir mostra os pesos atribuídos a cada fator analisado e os valores de cada classe em uma escala ponderada de 0 a 10. Os pesos relativos de valor zero foram designados considerando que as referidas subclasses interferem de forma negativa na relação chuva-nível.

Tabela 4.1 – Pesos atribuídos ao fatores analisados e os valores de suas respectivas classes:

Fator	Peso do fator ($W_{k,i}$)	Classes	Valor atribuído à cada classe ($X_{k,i}$)
Espessura da Zona Não Saturada	0,1		<10
			11-20
			21-30
			>30
Composição do perfil litológico acima ou no filtro	0,3		Areia
			Areia e material areno-argiloso
			Areia, material areno-argiloso e basalto
			Areia e argilito com provável confinamento
Uso e Ocupação do Solo	0,05		Area Florestal/Agrícola
			Pastagem
			Área Agrícola
			Area Florestal
			Área Urbana
Tipo de Solo	0,05		Área Urbana/Área Agrícola
			Argissolos Vermelho-Amarelos
			Latossolos Vermelho-Amarelos
Capacidade Específica (m ³ /h/m)	0,25		Área Antropizada
			<0,28
			0,29-0,57
			0,58-0,86
Quantidade de poços em raio de 5km	0,25		>0,87
			<5
			6-10
			11-16
		>16	0

Os rasters resultantes da equação 1 traduzem a correlação entre a precipitação e a variação no nível de água, na qual os valores de cada classe foram multiplicados pelo peso do fator. Após esta etapa, a soma de todos os fatores foi realizada usando a equação 2:

$$C = (Pe * Ve) + (Pl * Vl) + (Po * Vo) + (Ps * Vs) + (Pc * Vc) + (Pp * Vp) \quad (3)$$

Em que: C = Correlação; Pe = Peso da espessura da zona não saturada; Ve = Valor da espessura da zona não saturada; Pl = Peso da composição do perfil litológico; Vl = Valor da composição do perfil litológico; Po = Peso do uso e ocupação do solo; Vo = Valor do uso e ocupação do solo; Ps = Peso do tipo de solo; Vs = Valor do tipo de solo; Pc = Peso da capacidade específica; Vc = Valor da capacidade específica; Pp = Peso da quantidade de poços em raio de 5 Km; e Vp = Valor da quantidade de poços em raio de 5 Km.

Os poços que apresentaram maior valor correspondem àqueles que apresentaram melhor correlação com os eventos de chuva, ou seja, exibiram respostas mais rápidas no aumento do nível d'água subterrânea.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise visual das séries temporais para a variação do nível d'água e da precipitação, observou-se nos gráficos para cada série que houve uma diminuição no regime de chuvas entre 2013 e 2015. Associado a isso, percebe-se que a maioria dos poços de monitoramento experimentou um grande rebaixamento entre 2014 e 2016, dos quais muitos não recuperaram o nível estático anterior à diminuição do regime de chuvas.

Por meio das análises estatísticas de correlação cruzada foi possível determinar a correlação entre as séries de monitoramento de nível estático dos poços e de medições de chuva das estações pluviométricas mais próximas. Dentre os 13 poços de monitoramento analisados, 3 não apresentaram

correlação com as séries pluviométricas e 1 apresentou correlação muito baixa (14 meses). Os demais apresentaram tempos de respostas variando entre 2 e 6 meses. Estes resultados são expressos pelos gráficos de correlação cruzada gerados pelo programa *Statistica* que representam a influência de uma série temporal sob a outra. A correlação máxima é expressa quando se tem um lag negativo (defasagem, eixo y) – que expressa a variação do nível estático a um evento de precipitação anterior – e um valor positivo de correlação (eixo x) – o aumento das chuvas promove um incremento no nível estático dos poços, sendo uma relação diretamente proporcional.

Após as análises estatísticas das séries de monitoramento e a geração dos mapas temáticos, foi realizada uma interseção dos dados do meio físico com a localidade de cada poço com o objetivo de entender as influências destes fatores na relação entre o nível de água subterrânea e a pluviometria. A partir disso foi possível gerar a tabela 4.2 com um compilado das informações gerais para cada poço de monitoramento, incluindo o tempo de resposta aos eventos de precipitação.

Com base na identificação das interações e influências dos diversos fatores analisados expressos na tabela 4.2 definiu-se que os fatores preponderantes desta análise correspondem ao perfil litológico acima do filtro, a capacidade específica dos poços e a quantidade de poços de produção localizados em raio de 5 km. Em contrapartida, o uso e ocupação do solo, o tipo de solo e a espessura da zona não saturada, pouco influenciaram na relação entre a chuva e o nível d'água.

O raster gerado pela análise multicritério a partir do método *WLC* foi dividido em 6 classes de acordo com os valores obtidos conforme expressa a tabela 4.3. Os valores até 5 foram classificados como uma baixa correlação, os valores entre 5,1 e 6,5 foram classificados como uma correlação intermediária e os valores acima de 6,6 foram classificados como uma correlação alta.

Tabela 4.2 – Compilação dos dados para cada poço de monitoramento após o cruzamento dos dados de meio físico.

Poço	Município	Tempo de resposta	Espessura Zona Não Saturada (m)	Composição do perfil litológico acima do filtro	Uso e ocupação do solo	Solos	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Poços SIAGAS em raio de 5 Km
3500027320	Pindorama	Não apresentou correlação	28,207	Areia fina	Área Florestal/Agrícola	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,539	23
3500027321	Monte Aprazível	2 e 3 meses	21,92	Areia fina	Pastagem	Argissolos Vermelho-Amarelos	1,147	26
3500027322	Penápolis	3 e 4 meses	4,90	Areia fina e material arenoso	Área Agrícola	Latosolos Vermelhos	0,823	2
3500027323	Valparaíso	3 meses	8,41	Areia fina e material arenoso	Área Agrícola	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,133	3
3500027324	Andradina	5 meses	12,87	Areia fina	Pastagem	Latosolos Vermelhos	0,112	22
3500027325	Assis	Não apresentou correlação	29,67	Areia fina, material arenoso e basalto.	Área Florestal	Latosolos Vermelho-Amarelos	0,572	14
3500027887	Bastos	14 meses	3,85	Areia fina e 16 m de argila	Área Florestal/Agrícola	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,133	32
3500029466	Flora Rica	4 meses	43,32	Arenito fino e 12 m de solo areno-argiloso	Área Urbana	Área Urbana	0,046	13
3500029467	Narandiba	Não apresentou correlação	24,88	Arenito, 8 m de solo areno/argiloso e 16 m de argilito	Área Urbana	Latosolos Vermelhos	0,668	6
3500029468	Teodoro Sampaio	Não apresentou correlação	26,67	Arenito fino argiloso e 12 metros de solo areno/argiloso	Área Agrícola	Argissolos Vermelho-Amarelos	3,099	3
3500034018	Cabralia Paulista	6 meses	29,60	Arenito fino e arenito argiloso e 5 metros de solo	Área Urbana	Área Urbana	0,038	9
3500034019	Meridiano	2 e 3 meses	27,59	Arenito fino e 8 metros de solo	Área urbana/agrícola	Argissolos Vermelho-Amarelos	0,753	12
3500034021	Altaíra	3 meses	30,12	Arenito médio e 8 metros de solo	Área Agrícola	Latosolos Vermelhos	0,182	6

Tabela 4.3 - Resultado da análise multicritério utilizando o método *WLC*.

Poço	Tempo de Resposta	Resultado do cálculo dos <i>rasters</i> pelo método <i>WLC</i>	Correlação Esperada
3500027320	Não apresentou correlação	5,6	Média
3500027321	2 e 3 meses	6,6	Alta
3500027322	3 e 4 meses	8,7	Alta
3500027323	3 meses	7,5	Alta
3500027324	5 meses	5,6	Média
3500027325	Não apresentou correlação	5	Baixa
3500027887	14 meses	2,6	Baixa
3500029466	4 meses	5,9	Média
3500029467	Não apresentou correlação	4,9	Baixa
3500029468	Não apresentou correlação	8,9	Alta
3500034018	6 meses	6	Média
3500034019	2 e 3 meses	6,7	Alta
3500034021	3 meses	7,1	Alta

O mapa da figura 4.4 mostra a distribuição espacial dos poços de monitoramento na área do SAB em São Paulo e seus respectivos tempos de resposta aos eventos de precipitação.

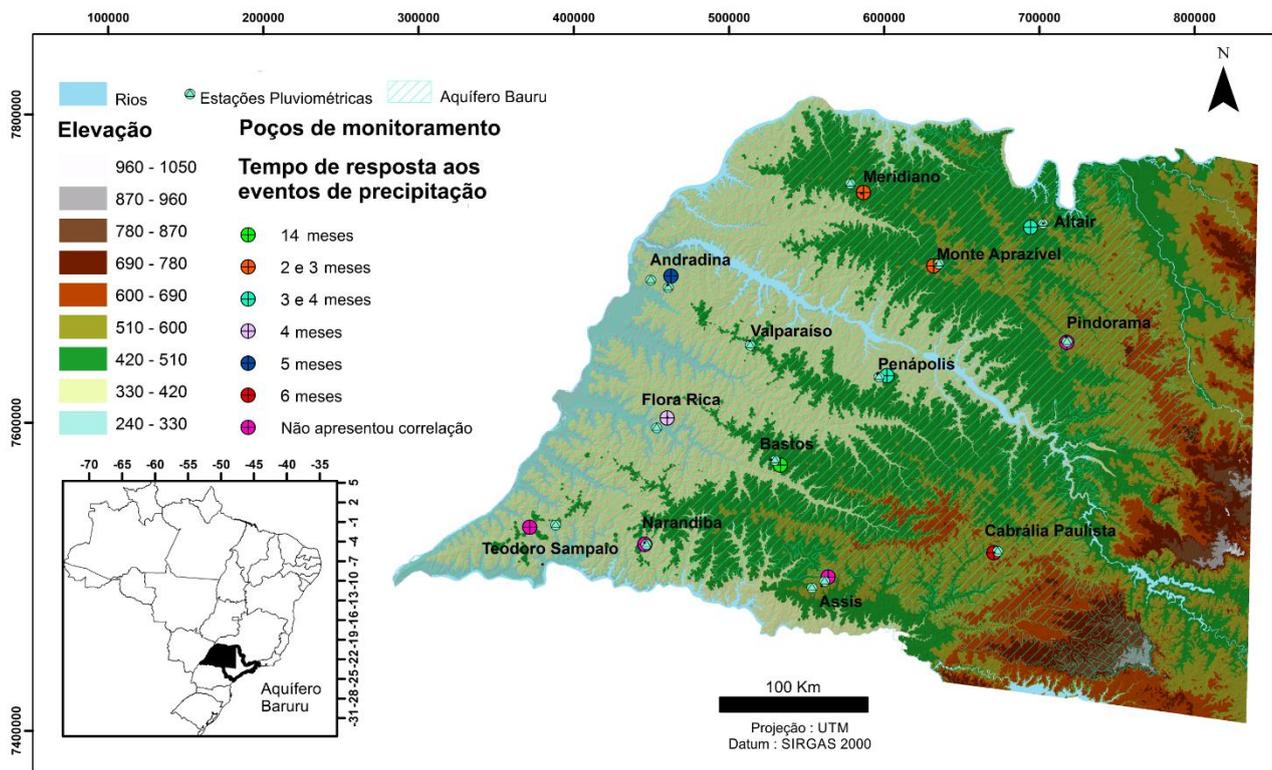


Figura 4.4 – Mapa indicando a localização dos poços de monitoramento no sistema aquífero Bauru e seus respectivos tempos de resposta aos eventos de chuva.

Figure 4.4 - Map indicating the location of the monitoring wells in Bauru aquifer system and their respective response times to rainfall events.

A análise multicritério proposta foi capaz de explicar o tempo estimado pelas correlações cruzadas, exceto para os poços 3500027320 e 3500029468. O primeiro poço apresentou um rebaixamento contínuo de 2010 à 2016, quando o nível sofreu um aumento significativo. Analisando-se apenas os parâmetros físicos e as séries temporais não foi possível explicar este comportamento no qual as chuvas não tiveram nenhuma influência. Enquanto que o segundo poço não apresentou correlação com a série de chuva devido a distância da estação pluviométrica de Teodoro Sampaio, que está localizada a mais de 16 km do poço de monitoramento.

Observou-se que séries com respostas rápidas aos eventos de chuva, de modo geral, associam-se a sequencias litológicas predominantemente arenosas, como é o caso dos poços 3500027321, 3500034019 e 3500034021, como mostra a figura 4.5. Também associam-se a capacidades específicas acima de 0,29m³/h/m quando o número de poços no entorno não supera 10. Isso

porque uma capacidade específica mais elevada mesmo com um número expressivo de poços de produção próximos ao poço de monitoramento, implica que não haja um rebaixamento expressivo do nível, desde que os volumes extraídos estejam abaixo da recarga.

Por outro lado, a ausência de correlação ou respostas muito lentas às precipitações vinculam-se a existência de camadas confinantes, que implicam que a recarga se processa de forma extremamente lenta ou não ocorre no local de instalação do poço; e á presença de basalto na seção filtrante indicando importantes fontes de contribuição do aquífero inferior. Comportamento semelhante foi também identificado em poços com vazão específica inferior a 0,29m³/h/m, associados a um grande número de poços de produção nas imediações o que denota extração de parte expressiva da componente de recarga.

Para melhor entendimento dos resultados, a seguir serão detalhados os poços que não apresentaram correlação com a pluviometria.

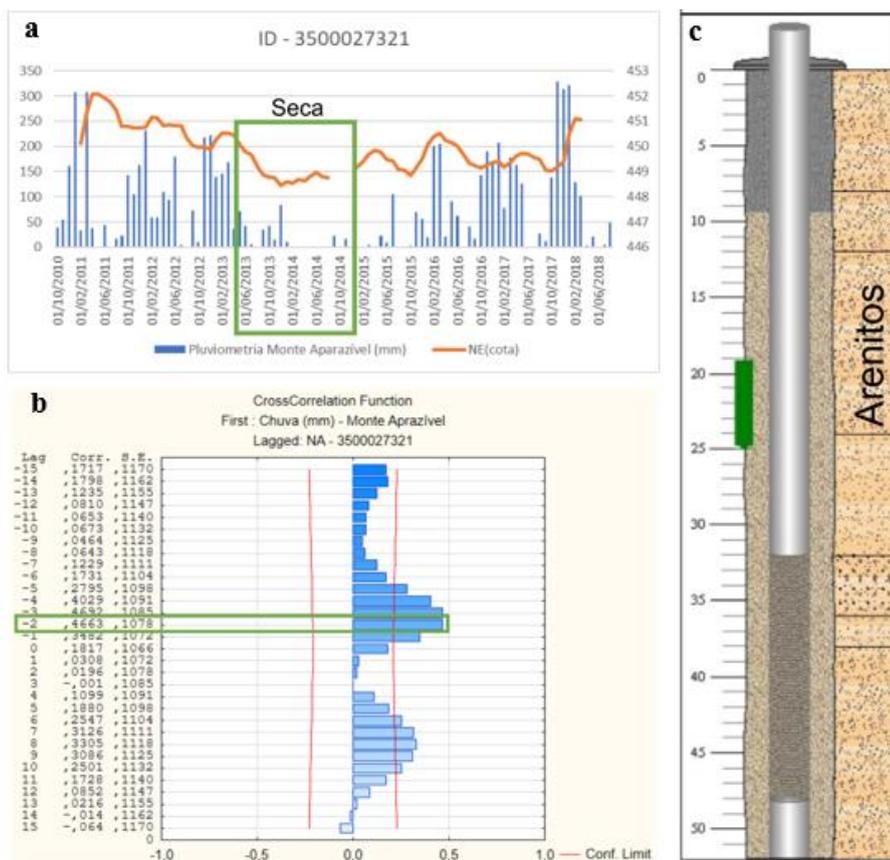


Figura 4.5 – Como exemplo de poços que apresentaram respostas rápidas aos eventos de chuva têm-se o poço 3500027321. Em a) grafico mostrando o comportamento das séries de precipitação e variação do nível d’água para o período de estudo; b) grafico de correlação cruzada indicando uma resposta de 2 meses; e c) perfil litológico do poço apresentando sequencias predominantemente arenosas.

Figure 4.5 – As an example of wells that presented quick responses to rain events, we have 3500027321. In a) graph showing the behavior of the precipitation series and water level variation for the study period; b) cross correlation graph indicating a 2-month response; and c) lithological profile of the well presenting predominantly sandy sequences.

No poço 3500027325 (figura 4.6), o nível estático manteve-se praticamente constante durante o período de 2010 à 2016, a partir do qual se nota um aumento expressivo. Este comportamento pode ser explicado principalmente pelo perfil litológico deste poço, que exibe uma sequencia predominantemente arenosa do Grupo Bauru e atinge os basaltos da Formação Serra Geral. Possivelmente o nível estático do poço monitorado sofre influencia do sistema aquifero inferior, o Botucatu. Esta hipótese é sustentada por alguns autores como Carvalho (1980) e Bettu et. al. (2006), que indicam a existência de uma rede de comunicações hidráulicas entre os sistemas aquíferos Bauru e Botucatu, em função de

fraturamentos e condições potenciométricas favoráveis. Além disso, análises químicas da água realizadas no monitoramento da RIMAS apresentaram concentração de sulfetos elevada, não concordante com águas do sistema aquífero Bauru.

Em relação a subida do nível a partir de 2016, é possível que tenha ocorrido uma diminuição da exploração, que associada à pequena espessura da zona saturada no sistema aquífero Bauru (apenas de 20 m), justificaria o fato de uma pequena variação no uso afetar o nível estático de forma mais expressiva.

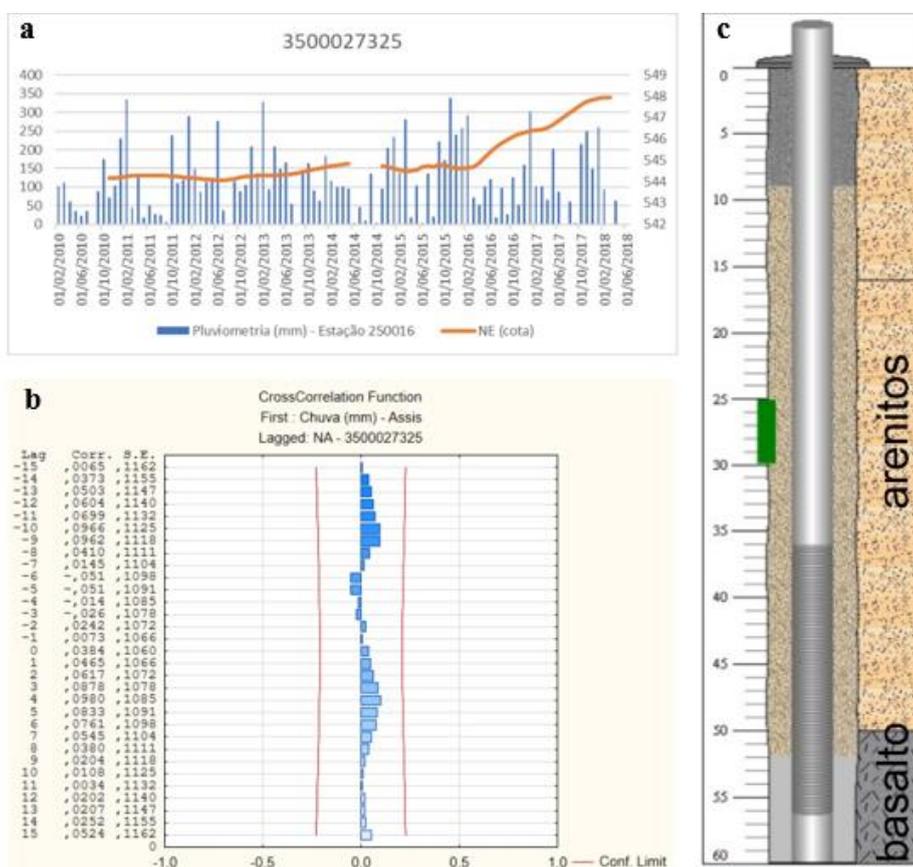


Figura 4.6 – Poço 3500027325: a) gráfico mostrando o nível d’água praticamente constante até 2016; b) gráfico de correlação cruzada indicando que não há correlação; e c) perfil litológico do poço indicando que o mesmo atinge os basaltos da Formação Serra Geral.

Figure 4.6 – Well 3500027325: a) graph showing the water level practically constant until 2016; b) cross correlation graph indicating that there is no correlation; and c) lithological profile of the well indicating that it reaches the basalts of Serra Geral Formation.

O poço 3500027887 apresentou variações no nível estático ao longo de todo período, entretanto a resposta em relação aos eventos de chuva foi de 14 meses. O que explica essa resposta tão lenta em relação ao nível d'água, além do fato de apresentar uma vazão

específica de 0,133m³/h/m e 32 poços de produção no raio de 5 km, é a composição do perfil litológico. A figura 4.7 mostra que existe uma camada de 28 m de argila entre a zona não saturada e a zona saturada, o que estaria dificultando a percolação da água até o filtro.

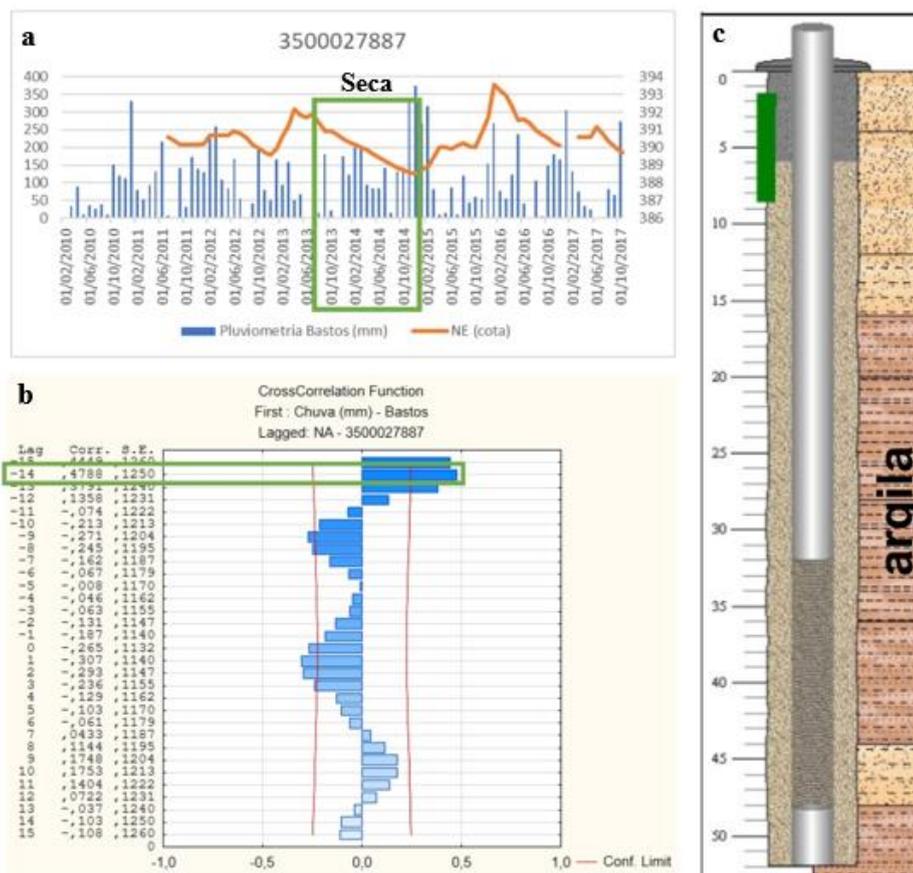


Figura 4.7 – Poço 3500027887: a) gráfico mostrando o comportamento das séries de precipitação e variação do nível d'água para o período de estudo; b) gráfico de correlação cruzada indicando que não há correlação entre as séries; e c) perfil litológico do poço indicando a presença de uma camada de 28m de argila entre as zonas não saturada e saturada.

Figure 4.7 - Well 3500027887: a) graph showing the behavior of the precipitation series and water level variation for the study period; b) cross correlation graph indicating that there is no correlation; and c) lithological profile of the well indicating the presence of a 28m layer of clay between the unsaturated and saturated zones.

O poço 3500029467, conforme observa-se nas variações do nível estático, também não apresentou correlação com a série pluviométrica. A figura 4.8 mostra que o perfil litológico deste poço é composto por 8 m de solo argiloso, que por si só dificultaria a passagem da água até o filtro, e por uma camada de 16 m de argilito, que estaria promovendo o confinamento da água acima do filtro, explicando a não correlação entre as séries de monitoramento de nível d'água e de

chuva A partir da análise dos gráficos também é possível estabelecer uma relação entre o rebaixamento do nível d'água percebido na maioria dos poços e o período de estiagem severa entre 2013 e 2015, correspondendo ao mesmo período da crise hídrica no Estado de São Paulo. Adicionalmente, poços em que o nível estático não retornou ao valor inicial em 2010, após o período de rebaixamento, tais como 3500027320, 3500027321, 3500027322 e 3500027324, podem indicar uma sobreexploração do aquífero.

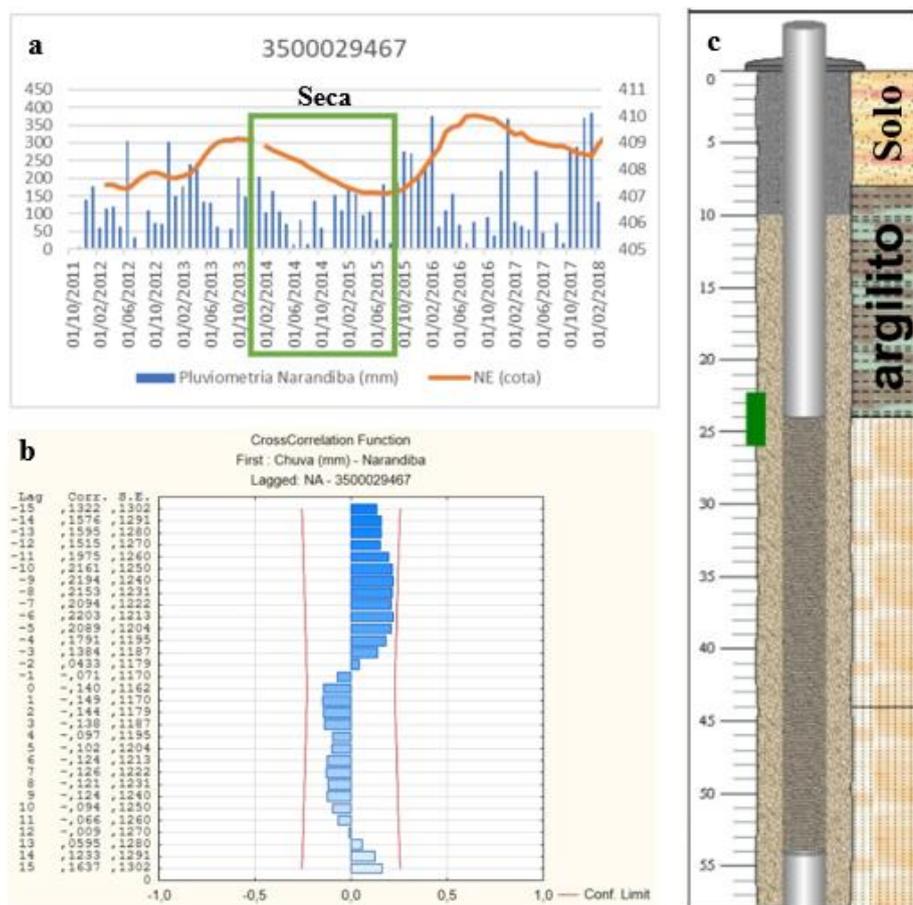


Figura 4.8 – Poço 3500029467: a) grafico mostrando o comportamento das séries de precipitação e variação do nível d’água para o período de estudo; b) grafico de correlação cruzada indicando que não há correlação entre as séries; e c) perfil litológico do poço indicando a presença de uma camada de 8m de solo argiloso e uma camada de 16m de argilito entre as zonas não saturada e saturada.

Figure 4.8 - Well 3500027467: a) graph showing the behavior of the precipitation series and water level variation for the study period; b) cross correlation graph indicating that there is no correlation; and c) lithological profile of the well indicating the presence of an 8m layer of clay soil and a 16m layer of argillite between the unsaturated and saturated zones.

O poço que não apresentou rebaixamento neste período foi o 3500029466. Como o poço está localizado em uma área urbana, mais precisamente em um campo de futebol, é possível que tenha havido perdas do sistema de abastecimento público para o aquífero ou mesmo o processo de irrigação do campo pode ter contribuído com a recarga do mesmo, o que explicaria a não influência da seca de 2013/2015.

4.4 CONCLUSÕES

A área que compreende o sistema

aquífero Bauru (SAB), englobando todo oeste do Estado de São Paulo, mostrou-se adequada para o estudo. A utilização de geotecnologias como SIG foi de suma importância na caracterização dos fatores que influenciam na disponibilidade hídrica desta unidade aquífera, tendo como vantagens o baixo custo.

O método escolhido utilizando ferramentas estatísticas e técnicas de geoprocessamento a fim de identificar as interações e influências dos diversos fatores do meio físico na relação entre a precipitação e a variação do nível d’água apresentou bons resultados se mostrando

adequado para o tipo de estudo realizado podendo ser aplicado como mais uma ferramenta para a gestão de águas subterrâneas.

Percebeu-se que os fatores preponderantes desta análise correspondem à composição do perfil litológico acima do filtro, a capacidade específica dos poços e a quantidade de poços de produção localizados em raio de 5 km. Fatores como a declividade e elevação do terreno e a litologia pouco influenciaram nesta relação. Isso se deve ao fato da área de estudo apresentar um relevo predominantemente plano, sem muitas variações altimétricas, e uma notável uniformidade litológica. Além disso, concluiu-se que o uso e ocupação da terra não foi um fator determinante na análise, visto que apresentou respostas variadas para a mesma classe se analisado isoladamente, não sendo possível uma correlação direta com a infiltração.

Séries com respostas rápidas aos eventos de chuva, de modo geral, associaram-se aos poços cuja composição do perfil litológico acima do filtro são essencialmente arenosas, o que permite a percolação da água proveniente da precipitação. Também se associaram a poços com capacidades específicas acima de $0,29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ e com o número de poços de produção no entorno inferior a 10, o que garante a disponibilidade hídrica do aquífero naquele ponto.

Por outro lado, a ausência de correlação ou respostas muito lentas às precipitações associaram-se aos poços cujo perfil litológico acima do filtro possuía camadas de argila e argilitos que estariam causando o confinamento local do aquífero; ou a poços que atingiam os basaltos da Formação Serra Geral e estariam recebendo contribuições da unidade aquífera inferior Botucatu. Além disso, observou-se que apresentavam vazão específica inferior a $0,29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ associada a um grande número de poços de produção nas imediações.

Assim sendo, pode-se dizer que o sistema aquífero Bauru apresenta condição por vezes confinada, e tem sua recarga associada principalmente à precipitação, mas também pode receber contribuições do aquífero inferior por meio de uma rede de

comunicações hidráulicas dadas principalmente por fraturas. Além disso, é possível perceber em alguns pontos do aquífero evidências de sobreexploração indicada pela curva da evolução do nível d'água de alguns poços que não se recuperaram após o episódio da seca severa entre 2013 e 2015 que representou uma crise hídrica de grandes proporções no Estado de São Paulo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O sistema aquífero Bauru, de extensão regional por todo oeste paulista, apresenta exploração intensa e grande modificação antrópica conforme exposto neste trabalho, o que reforça a necessidade da implantação de medidas para assegurar o uso sustentável desta unidade aquífera associadas a uma ação integrada de gerenciamento. Além disso, percebe-se que prever a resposta deste aos eventos de precipitação (em termos de quantidade) quanto às pressões sofridas pela exploração e interferência antrópica somada aos fatores físicos do meio resulta em um quadro complexo.

Com base na análise das séries de monitoramento das chuvas e do nível d'água subterrânea do sistema aquífero Bauru no período de 2010 a 2018, foi possível mostrar a relação temporal da pluviometria com a recarga desta unidade aquífera e identificar os efeitos da estiagem severa, ocorrida entre 2013 e 2015. Para isso, foram aplicadas ferramentas estatísticas e técnicas de geoprocessamento a fim de identificar as interações e influências dos diversos fatores do meio físico (litologia, declividade, elevação do terreno, solo, uso e ocupação da terra, composição e espessura das zonas saturada e insaturada, densidade de poços de produção no entorno, além da vazão específica de cada poço) na relação entre a precipitação e a variação do nível d'água. O método escolhido apresentou bons resultados e se mostrou adequado para o tipo de estudo realizado podendo ser aplicado como mais uma ferramenta para a gestão de águas subterrâneas ferramentas

A partir das análises estatísticas de correlação cruzada observou-se que dos 13 poços de monitoramento analisados, 3 não apresentaram correlação com as séries pluviométricas e 1 apresentou correlação muito baixa (14 meses). Os demais apresentaram tempos de respostas variando entre 2 e 6 meses. Enquanto a análise multicritério realizada pelo método *WLC* foi capaz de explicar este resultado para a maioria dos poços indicando os fatores preponderantes desta análise, que correspondem à composição do perfil litológico acima do filtro, a capacidade específica dos poços e a quantidade de poços de produção localizados em raio de 5 km. Fatores como a declividade, elevação do terreno e a litologia pouco influenciaram nesta relação, devido ao fato de que a área de estudo apresenta um relevo predominantemente plano, sem muitas variações altimétricas, e uma notável uniformidade litológica. Além disso, concluiu-se que o uso e ocupação da terra não foi um fator determinante na análise, visto que apresentou respostas variadas para a mesma classe se analisado isoladamente, não sendo possível uma correlação direta com a infiltração.

Os poços cuja composição do perfil litológico acima do filtro é essencialmente arenosa, em geral, apresentaram respostas rápidas aos eventos de chuva, visto que a infiltração da água proveniente da precipitação tende a ser mais rápida e eficiente. Respostas rápidas também se associaram a poços com capacidades específicas acima de $0,29 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ quando o número de poços de produção no entorno é inferior a 10, o que garante a disponibilidade hídrica do aquífero naquele ponto.

Por outro lado, a ausência de correlação ou respostas muito lentas às precipitações associaram-se aos poços cujo perfil litológico acima do filtro possuíam camadas de argila e argilitos. Isso faz com

que a água fique retida entre os poros e seja liberada mais lentamente, caso do poço 3500027887, que apresentou uma resposta de 14 meses, ou causa o confinamento local do aquífero, a exemplo do poço 3500029467, que não apresentou correlação. O poço que atinge os basaltos da Formação Serra Geral também não apresentou correlação com a precipitação pois estaria recebendo contribuições da unidade aquífera inferior Botucatu. Além disso, observou-se que de maneira geral os poços apresentavam vazão específica inferior a 0,29m³/h/m associada a um grande número de poços de produção nas imediações.

Portanto, pode-se dizer que o sistema aquífero Bauru apresenta condição por vezes confinada, e tem sua recarga associada principalmente à precipitação, embora também receba contribuições do aquífero Serra Geral por meio de uma rede de comunicações hidráulicas, dada principalmente pela existência de fraturas. Entretanto, é possível perceber em alguns pontos do aquífero evidências de sobreexploração indicada pela curva da evolução do nível d'água de alguns poços que não se recuperam após o episódio da seca severa entre 2013 e 2015, que ocasionou em uma crise hídrica de grandes proporções no Estado de São Paulo.

Em consequência das grandes pressões sofridas pelo SAB, como o avanço da urbanização bem como do setor agropecuário e do aumento na intensidade do uso da água subterrânea, recomenda-se a continuidade do monitoramento do nível d'água e da pluviometria. Além disso, recomenda-se também o planejamento de adensamento da rede em áreas mais críticas para que assim forneça dados suficientes para uma análise mais precisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M., & Barbosa, O. 1953. *Geologia das quadriculas de Piracicaba e Rio Claro, estado de São Paulo*. Ministério da Agricultura, Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia.
- Albuquerque, J. do P. T. 2004. Sustentabilidade de aquíferos. Mesa redonda. Tema: Sustentabilidade de aquíferos. *In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís, Maranhão. Anais em CD-ROM*.
- Almeida, M. A.; Stein, D. P.; Melo, M. S.; Bistrichi, C. A.; Ponçano, W. L.; Hasui, Y.; Almeida, F. F. M. 1980. Geologia do Oeste Paulista e Áreas Fronteiriças dos Estados de Mato Grosso do Sul e Paraná. *In: Anais do Congresso Brasileiro de Geologia. Camboriú. Sociedade Brasileira de Geologia - SBG. v.5, p. 2799-2812*.
- Arid, F. M., Castro, P. R. M., & Barcha, S. F. 1970. Estudos hidrogeológicos no município de São José do Rio Preto, SP. *Bol. Soc. Brasil. Geol.* **19**: 43-69.
- Barcha, S. F. 1980. *Aspectos geológicos e províncias hidrogeológicas da Formação Bauru na região norte-ocidental do Estado de São Paulo. São José do Rio Preto*. Tese de Livre Docência. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista, 209 p.
- Barreto, A. B. da C.; Monsore, A.L.; Leal, A.; Pimentel, J. 2000. *Hidrogeologia do Estado do Rio de Janeiro – Texto explicativo do Mapa de Favorabilidade Hidrogeológica do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: CPRM, DRM/RJ, 23p.
- Brandt Neto, M., Petri, S., Coimbra, A. M. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e ambiente de sedimentação da Formação Bauru. *In: Congresso Brasileiro de Geologia. v. 30, p. 557-566*.
- Bezerra, M. I. S. 2006. *Apostila de Análise de séries temporais. Curso de Estatística*. Available in <http://people.ufpr.br/lucambio/CE017/1S2010/5515941-Apostila-Series-Temporais.pdf>. 84p.
- Borghetti N.R.B., Borghetti J.R., Rosa Filho E.F. 2004. *Aquífero Guarani a Verdadeira Integração dos Países do Mercosul*. Curitiba, 214 p.
- Burrough, P. A. 1986. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press.193 p.
- Cabral Jr, M. 1991. *Avaliação do potencial metalogenético da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo para depósitos sedimentares fosfáticos, evaporíticos e de metais base*. PhD. Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 238p.
- Câmara G., Davis C., Monteiro A. M. V. 2001. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. São José dos Campos, INPE. 345p. (INPE-10506-RPQ/249)
- de Carvalho, M. 1980. Considerações sobre alguns aspectos hidrogeológicos da Formação Bauru. São Paulo. *Revista do Instituto Geológico – IG*, **1(1)**:35-52.
- Campos, H. C. N. S. 1993. *Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do Estado de São Paulo*. PhD Thesis. IGC - Universidade de São Paulo, São Paulo, 177p.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 1994. *Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 95p.

- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2001. *Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*. 97p.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2013. *Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. 242p.
- Coimbra, A. M. 1976. *Arenitos da Formação Bauru: Estudo de Áreas Fonte*. MS Dissertation. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo, 2v.
- Costa, M. L. M.; Batista, M. L. de C.; Ribeiro, M. M. R.; Albuquerque, J. do P. T.; Rêgo, J. C. 2009. Simulação da interferência entre poços como critério de outorga dos direitos de uso das águas subterrâneas. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Campo Grande, Mato Grosso do Sul.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE. 1976. *Estudo de Águas Subterrâneas, Regiões Administrativas 7,8, 9 - Bauru, São José do Rio Preto, Araçatuba*. São Paulo: v. 1 e 2.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. 1979b. *Estudo de Águas Subterrâneas - Regiões Administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília*. São Paulo: v.1 e 2.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. 1990. *Plano Estadual de Recursos Hídricos: Primeiro plano do Estado de São Paulo*. São Paulo, 140p.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. 2005a. *Síntese dos Planos de Bacia - Plano Estadual de Recursos Hídricos*. São Paulo: DAEE/Consórcio JMR ENGECORPS (Relatório nº 1/2005).
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. 2005b. *Mapa hidrogeológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000*. São Paulo.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE. 2015. *Orientações para o uso de águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. São Paulo.
- Dias, C. L., Barbour, E. D. A., Modesto, R. P., & Casarini, D. C. P. 2008. A importância do monitoramento das águas subterrâneas na gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Águas Subterrâneas*.
- European Communities - EC. 2003. *Guidance document nº 7 – Monitoring under the Water Framework Directive. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC)*. Working Group 2.7 - Monitoring Luxembourg. ISBN 92-894-5127-0 ISSN 1725-1087. 160p.
- Feitosa F.A.C. & Manuel Filho J.(eds.) *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. CPRM/REFO, LABHID-UFPE, Fortaleza, p. 341-367.
- Fernandes, L. A. 1992. *A Cobertura Cretácea Suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): Os Grupos Bauru e Caiuá*. MS Dissertation. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 129 p.
- Fernandes, L.A. 1998. *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. PhD Thesis. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 215p.
- Fernandes, L. A., Coimbra, A. M. 1994. O Grupo Caiuá (Ks): Revisão Estratigráfica e Contexto Depositional. *Revista Brasileira de Geociências*, **24 (3)**:164-176.
- Foster, S. S., Caminero Gomes, D. 1989. Monitoreo de la calidad de las aguas subterrâneas: una evaluación de métodos y costos. *In Monitoreo de la calidad de las aguas subterrâneas: una evaluación de métodos y costos*. CEPIS.

- Barbosa, M.B. 2020. Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes da variação do nível de água...
- Franzini, A.S., Mourão, M.A.A. 2012. *Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá nos Estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná*. Coord. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, v14, p. 19.
- Fulfaro, V. J., Barcelos, J. H. 1992. A tectônica pós deposicional e a reconstrução paleogeográfica: o exemplo no Grupo Bauru. *Simpósio Sobre Bacias Cretáceas Brasileiras*, 2, p 132-133.
- Galvão, P., Hirata, R., Conicelli, B. 2018. Estimating groundwater recharge using GIS-based distributed water balance model in an environmental protection area in the city of Sete Lagoas (MG), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, **77**:398.
- Gomes, M. Geoprocessamento em ambiente SIG aplicado à hidrogeologia. In: Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. (Org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2 ed. Recife: CPRM, LABHID- UFPE, 2008, v.1, p. 293-294.
- Hirata R.; Zobbi J.; Oliveira, F. 2010. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: Bicudo, C.; Tundisi, J; Scheuenstuhl, M. (Org.). *Águas do Brasil: análises estratégicas*. 1. ed. Instituto de Botânica, São Paulo, v.1, p. 144-164.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 1981. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. 2v.
- Iritani, M. A., Oda, G. H., Kakazu, M. C., Campos, J. E., Ferreira, L. M. R., Silveira, E. L., de Azevedo, A. A. B. 2000. Zoneamento das características hidrodinâmicas (transmissividade e capacidade específica) do Sistema Aquífero Bauru no estado de São Paulo–Brasil. *1st Joint World Congress on Groundwater*. Fortaleza, (CD-ROOM). 14p.
- Iritani, M. A.; Ezaki, S. 2008. *As águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. São Paulo. Secretaria do Estado do Meio Ambiente- SMA,103p.
- Jiang, H., Eastman, J. R. 2000. Application of Fuzzy Measures in Multi-Criteria Evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science* **14(2)**:173-184.
- Landim, P. M. B.; Soares, P. C. 1976. Estratigrafia da Formação Caiuá. *Anais do XXIX Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia*. Ouro Preto. v.2, p. 195-206.
- Lazzarotto, E. M., Franzini, A. S., dos Santos, G. N., Kuhn, I. A. 2017. O monitoramento do aquífero Caiuá no paraná pela rede RIMAS/CPRM. In: *XIX Congresso Brasileiro de guas Subterrâneas, 2016, Campinas, SP*. Anais... São Paulo: guas Subterrâneas.
- Lemacha, G. 2008. Mapping Groundwater Potential: A Guide for GIS Developers. Guides produced for WaterAid Ethiopia and RiPPLE, available on the RiPPLE. Disponível em: <http://www.rippleethiopia.org/documents/info/20081203-guide-for-planners>. Acesso em: 27 de novembro de 2018.
- Lima, L. A de; Silva Junior., G. C. da; Menezes, J. M; Seabra, V. da S. 2009. Favorabilidade de Aquíferos Fraturados – Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos – Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Insituto de Geociências, UFRJ*, **32(2)**: 51-61

- Musa, k. A; Akhir, J. M. Abdullah, I. 2009. Groundwater Prediction Potential Zone in Langat Basin using the Integration of Remote Sensing and GIS. *In: XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços*: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ps3/ps318b.asp>. Acesso em: 15 de novembro de 2018.
- Lencastre, A.; Franco, F. M. 1992. *Lições de Hidrologia, 2.ª edição*. Universidade Nova de Lisboa, 453p.
- Lima, A. A. D. 2004. *Hidrogeologia do sistema aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto (SP)*. MS Dissertation, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 102 p.
- Lombardi Neto, F.; Bellinazzi Júnior, R.; Galeti, P. A.; Bertolini, D.; Lepsch, I. F.; Oliveira, J.B. 1989. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. *Simpósio sobre terraceamento agrícola*. Campinas, Fundação Cargill. p. 99-124.
- Manoel Filho, J. 2000. Água subterrânea: história e importância. *In: Hidrogeologia: Conceitos e aplicações*. Org. por Feitosa, F.A.C. e Manoel Filho, J., CPRM/REFOUFPE, Fortaleza, p. 3-12.
- Manziona, R. L. 2018. Mapeamento das características dinâmicas do nível freático do Sistema Aquífero Bauru como instrumento de gestão de recursos hídricos. *Geologia USP. Série Científica*, **18(1)**: 227-240.
- Mezzalira, S. 1974. Contribuição ao conhecimento da estratigrafia e paleontologia do Arenito Bauru. *In Boletim do Instituto Geológico, Secretaria da Agricultura*. Vol. 51.
- Mezzalira, S., & Arruda, M. R. 1965. Observações geológicas na região do Pontal do Paranapanema, Estado de São Paulo. *Anais. Acad. Brás. Ci.*, **37**: 69-77.
- Milani, E. J. 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorell I, A.; Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. (Orgs), Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 265-279.
- Murthy, K. S. R. 2000. Ground water potential in a semi-arid region of Andhra Pradesh-a geographical information system approach. *International Journal of Remote Sensing*, **21(9)**: 1867-1884.
- Prado, R.B. 2004. *Geotecnologias aplicadas à análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra e qualidade da água do reservatório de Barra Bonita, SP, como suporte à gestão de recursos hídricos*. PhD Thesis. Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 172 p.
- Peixoto, C.A.B. 2010. *Geodiversidade do estado de São Paulo*. São Paulo: CPRM. Relatório e Mapa em SIG.
- Rebouças, A. C. 1976. *Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia do Paraná - Análise de préviabilidade*. Tese de Livre Docência. Universidade de São Paulo - USP. Instituto de Geociências, 143p.
- Rebouças, A.C.; Braga, B., Tundisi, J.G. 1999. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. São Paulo, *Acad. Bras. Cien./IEA-USP*, 717 p.
- Rebouças, A. C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. 2006. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 749p.
- Rossi, M. 2017. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado*. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.

- Barbosa, M.B. 2020. Aplicação do geoprocessamento na análise dos fatores condicionantes da variação do nível de água...
- Saad, A. R. C., V.A.; Cabral Jr, M.; Etchebehere, M.L.C.; Puleghini Filho, P.; Motta, J.F.M. & Paula e Silva, F. 1988. Cenários do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. *In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia*. Belém, p. 894-904.
- Sartori, A., Lombardi Neto, F., & Genovez, A. M. 2005. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, **10(4)**: 05-18.
- Sener, E; Davraz, A.; Ozcelik, M. 2005. An Integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations: A case study in Burdur, Turkey. *Hydrogeology Journal*, 826- 834 p.
- Silva, A. D. B.2003. *Sistema de Informações Georreferenciadas: conceitos e fundamentos*. 1ª Edição. Campinas: UNICAMP, 240 p.
- Soares, P. C.; Landim, P.M.B.; Fúlfaro, V.J.; Sobreiro Neto, A. F. 1980. Ensaio de Caracterização Estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, **10 (3)**:177-185.
- Soldera, B.C. 2017. Monitoramento dos Níveis Freáticos do Aquífero Bauru (Formação Adamantina) no Município de Assis – SP. 1. ed. São Paulo: ABAS, 2017. v1, 88p .
- Souza, A.L.N.; Fernandes, V.H.; Carvalho, L.G.; Antunes, M.A.H. 2003. Ferramentas de geoprocessamento para estudos de potencial hidrogeológico. *In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21*, Belo Horizonte.
- Suguio, K. 1973. *Formação Bauru: Calcários e Sedimentos Detríticos Associados*. PhD Thesis. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. São Paulo, 2 v.
- Suguio, K. 1981. Fatores paleoambientais e paleoclimáticos e subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru. *In: Mesa redonda: a Formação Bauru no Estado de São Paulo e regiões adjacentes, São Paulo, Sociedade Brasileira de Geologia*. p 15-26.
- Tuinhof, A.; Foster S; Kemper K; Garduno H; Nanni M. 2004. Sustainable Groundwater Management: Concepts and Tools. Groundwater Monitoring: Requirements for managing aquifer response and quality threats. GW Mate. Briefing Note Series Briefing Note 9. World Bank. Global Water Partnership Associate Program. 10p.
- UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais); CDTN (Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear) e UFMT (Universidade Federal do Mato Grosso). 2006. Avaliação dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari, Minas Gerais, Brasil. Proyecto para la Protección Ambiental y Desarrollo Sostenible Del Sistema Acuifero Guaraní, Fondo de Universidades, SG/OEA, Belo Horizonte. Informe Final.
- UNEP/WHO. 1996. Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes. Organização Mundial da Saúde. Genebra.
- Uil, H.; Geer, F.C; Geherels J.C. Kloosterman. 1999. State of art on monitoring and assessment of groundwaters. UN/ECE Task Force on Monitoring and Assesemt. Working Programme 1996/1999. Volume 4. The Netherlands Institute of Applied Geoscience: Lelystad. 84 p.

Vidal, A. C., Rostirolla, S.P., Kiang, C.H. 2005. Análise de favorabilidade para a exploração de água subterrânea na região do Médio Tietê, Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, **35(4)**: 475-481.

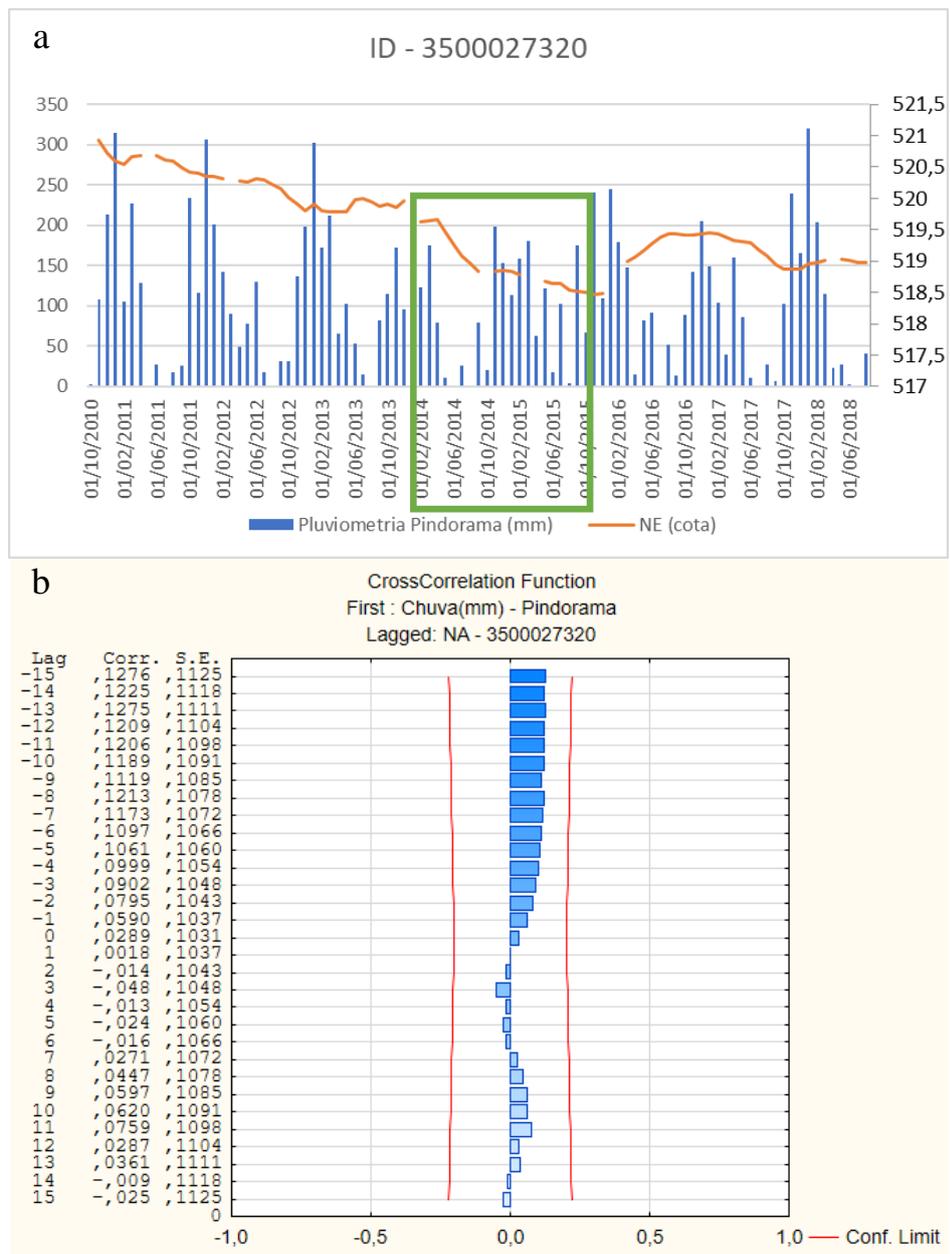
Villela, S. M., & Mattos, A. 1975. Hidrologia aplicada. In *Hidrologia aplicada*. McGraw-Hill. 245 p.

Zaidan, R.T. 2017. Geoprocessamento conceitos e definições. *Revista de Geografia – PPGeo - UFJF. Juiz de Fora*, **7(2)**: 195-201.

Apêndices

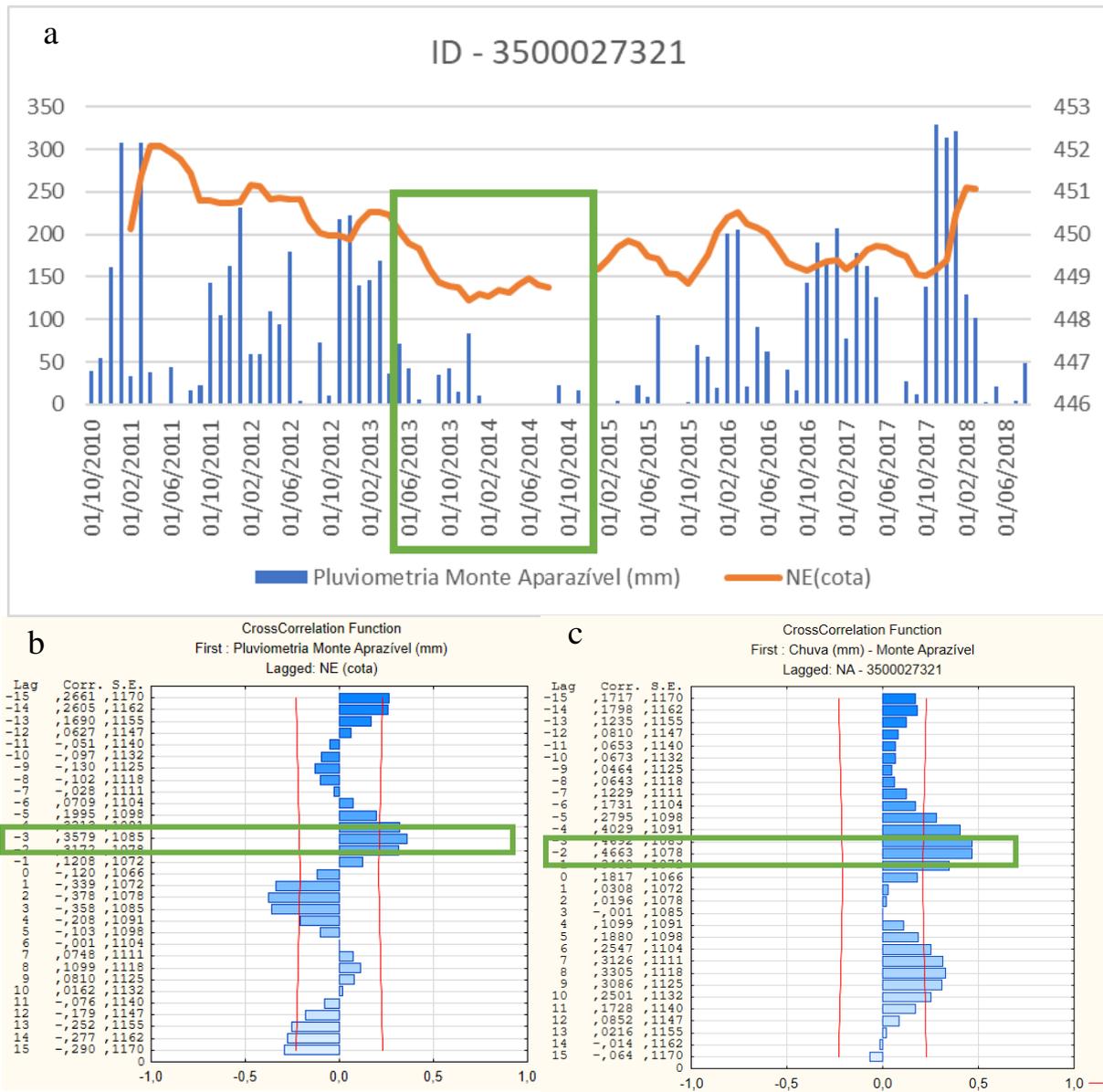
A seguir serão apresentados os gráficos resultantes das análises das séries temporais para os poços de monitoramento e respectivas estações pluviométricas:

- Poço 3500027320 – Localizado no município de Pindorama, não apresentou correlação com a série pluviométrica da rede CIIAGRO. Observou-se neste poço um rebaixamento contínuo desde 2010 até o início de 2016, com destaque para o período entre o final de 2013 e 2015, em que o nível diminuiu significativamente.



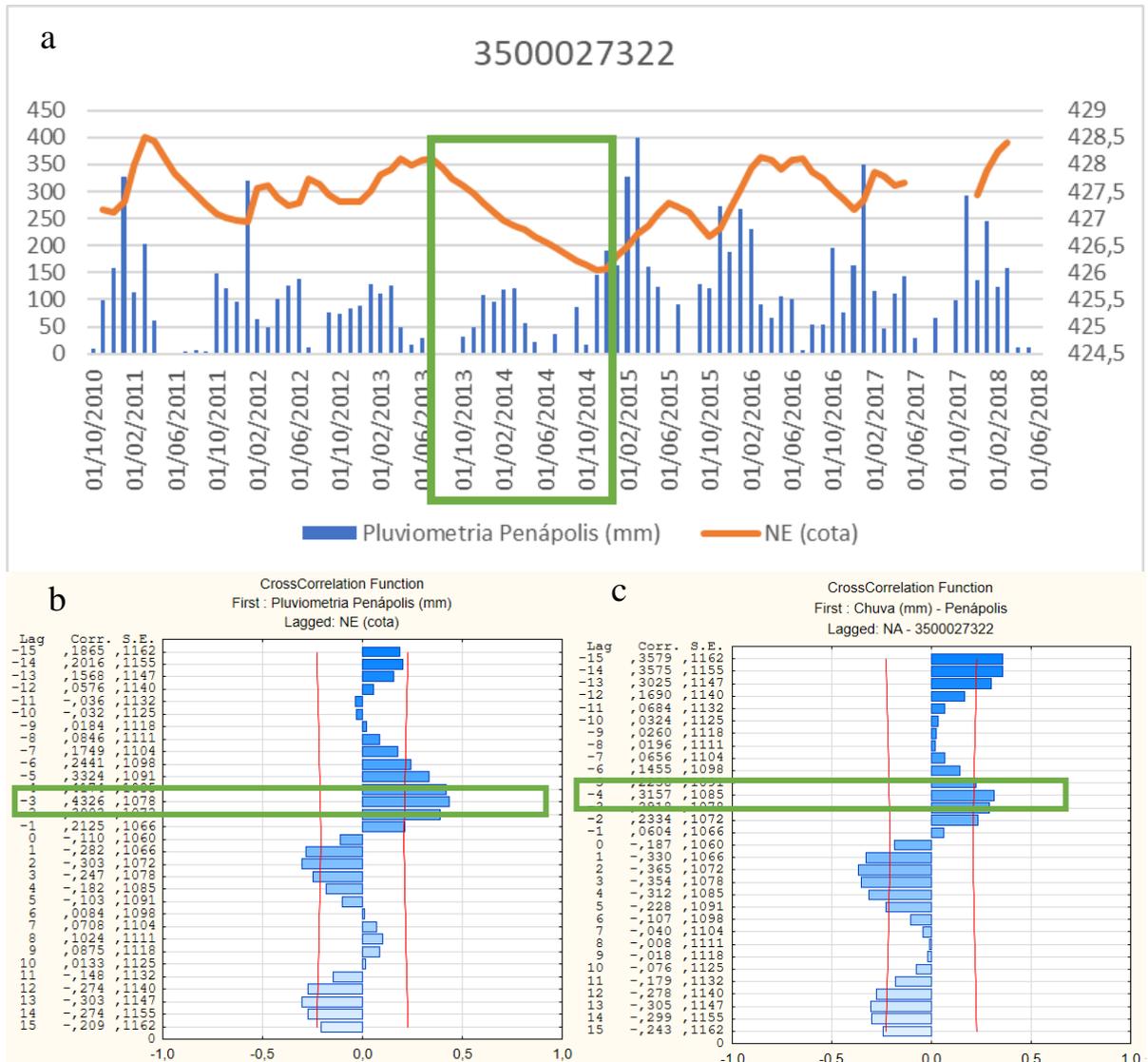
Apêndice 1- a) Gráfico representando a série temporal do nível d'água subterrânea do poço 3500027320. b) Gráfico de correlação cruzada da estação CIIAGRO - não apresentou correlação.

- Poço 3500027321 – Localizado no município de Monte Aprazível, apresentou correlação de 3 e 2 meses com as séries pluviométricas das estações do DAEE e CIAGRO, respectivamente. Observou-se neste poço um rebaixamento significativo entre 2013 e 2015.



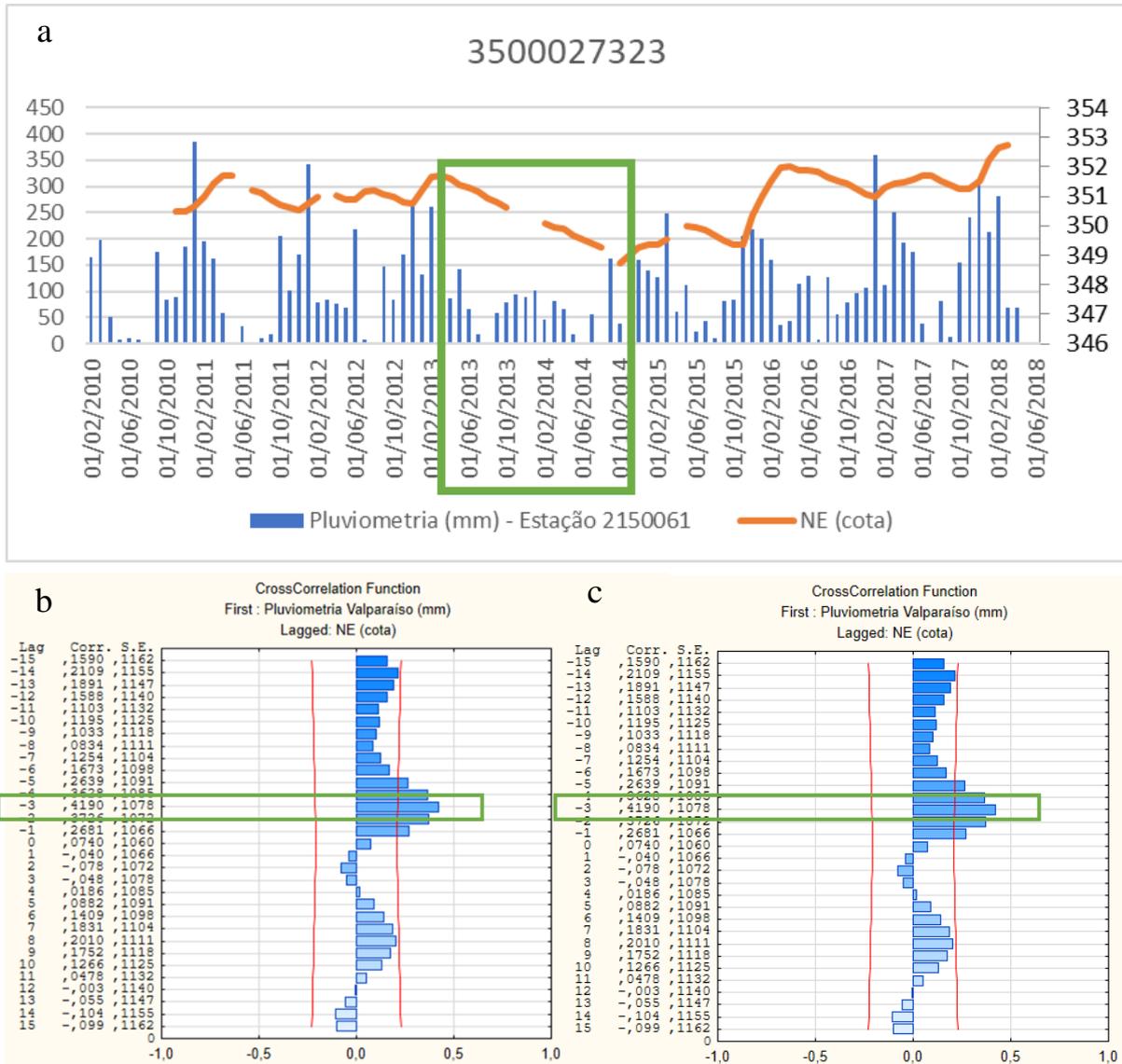
Apêndice 2 – a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027321; b) Correlação cruzada estação DAEE – 3 meses; c) Correlação cruzada estação CIAGRO – 2 meses.

- Poço 3500027322: localizado no município de Penápolis, apresentou correlação de 3 e 4 meses com as séries das estações pluviométricas DAEE e CIIAGRO, respectivamente.



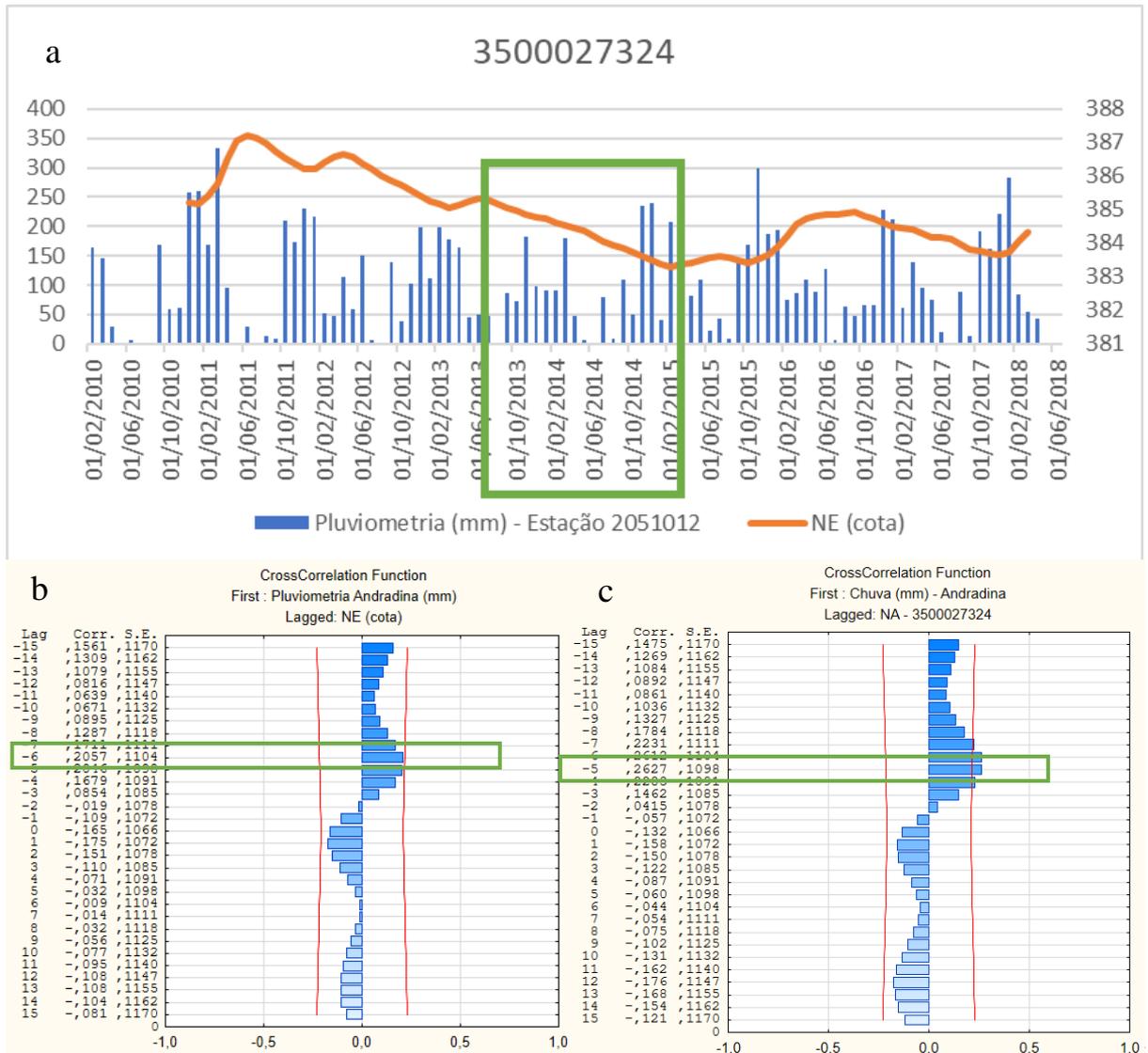
Apêndice 3- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027322; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE - 3 meses; c) Gráfico de correlação cruzada estação CIIAGRO - 4 meses.

- Poço 3500027323: localizado no município de Valparaíso, apresentou correlação de 3 meses com as séries das estações pluviométricas DAEE e CIIAGRO. Este poço apresentou rebaixamento expressivo durante o período de 2013 e 2015.



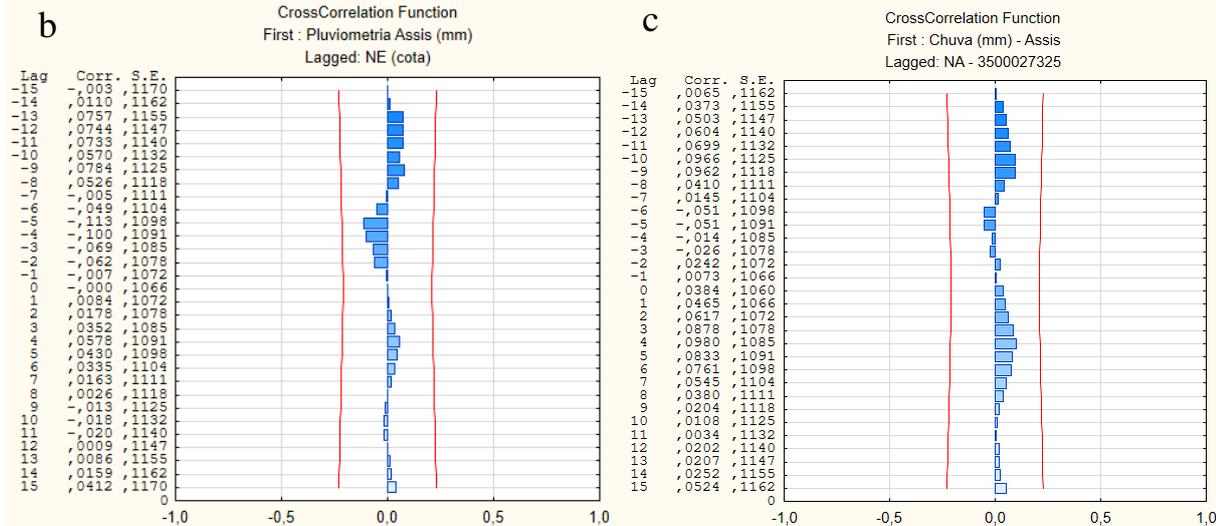
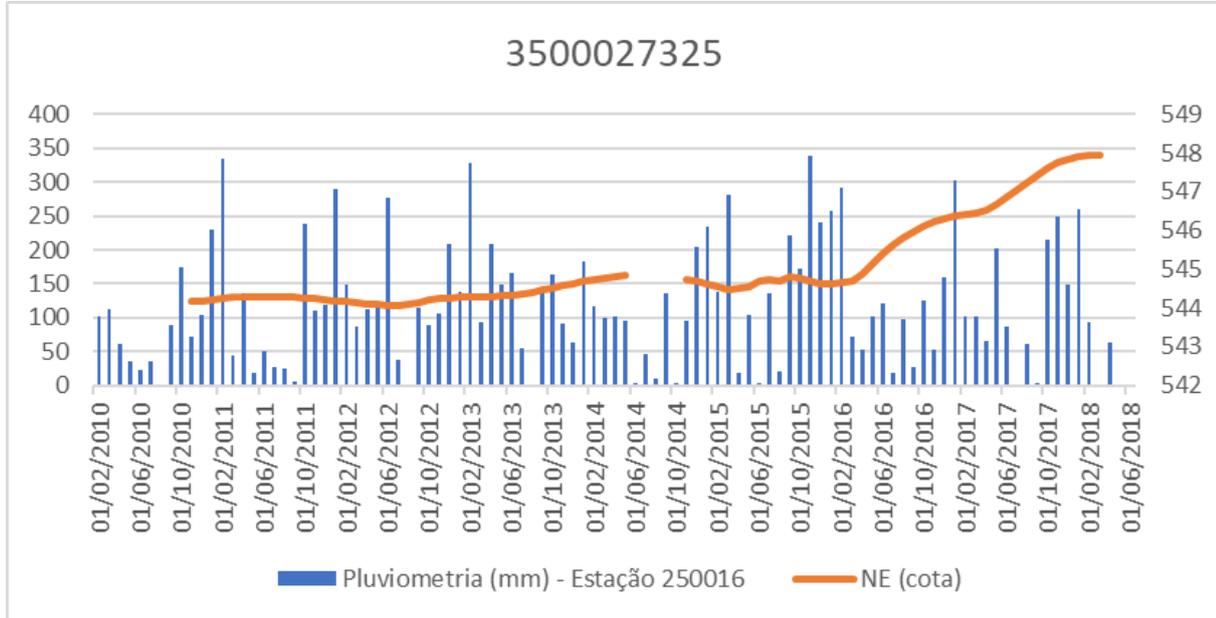
Apêndice 4- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027323; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE – 3 meses; c) Gráfico correlação cruzada estação CIIAGRO – 3 meses.

- Poço 3500027324: localizado no município de Andradina, apresentou correlação de 6 e 5 meses com as séries das estações pluviométricas DAEE e CIIAGRO, respectivamente. Observou-se neste poço um rebaixamento contínuo desde 2010 até o início de 2016, com destaque para o período entre 2013 e 2015, em que o nível diminuiu significativamente.



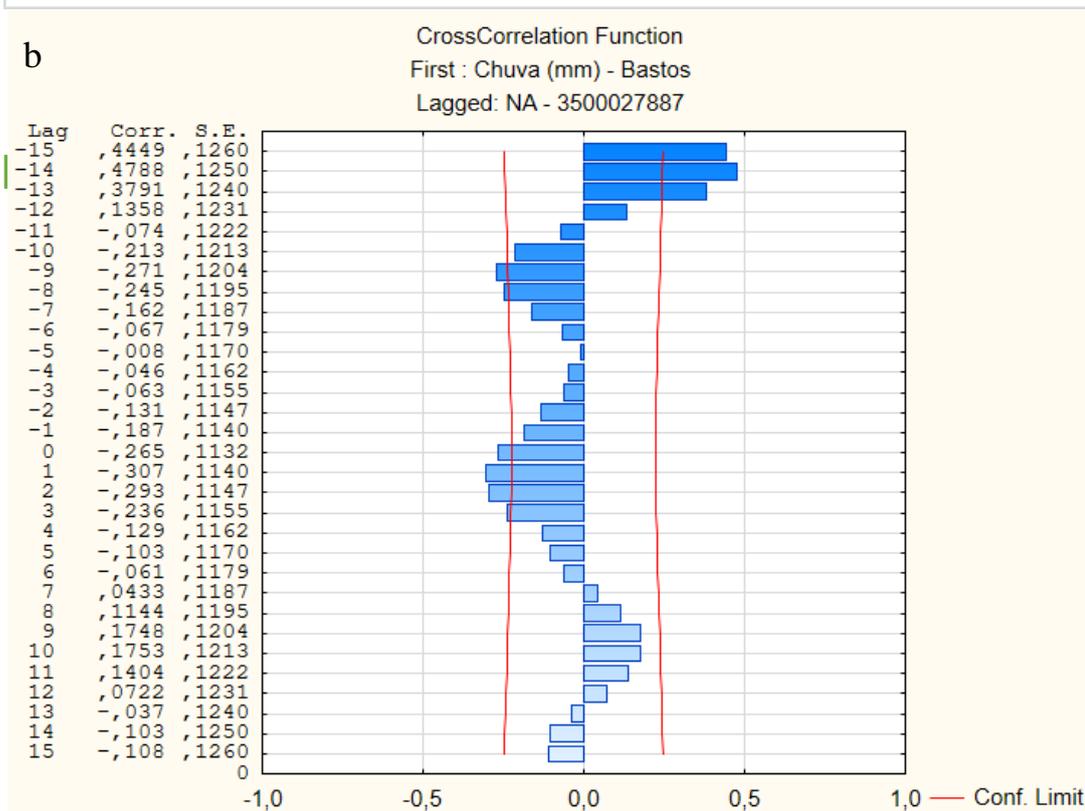
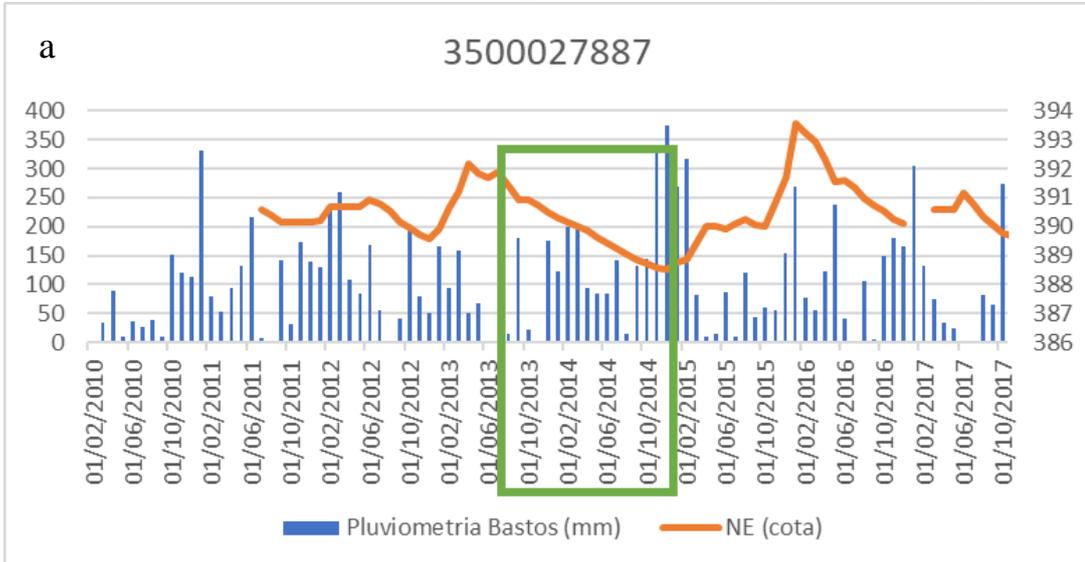
Apêndice 5- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027324; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE - 6 meses; c) Gráfico de correlação cruzada estação CIIAGRO - 5 meses.

- Poço 3500027325: localizado no município de Assis, não apresentou correlação com as séries das estações pluviométricas DAEE e CIIAGRO. Observou-se que o nível deste poço se manteve praticamente constante durante o período de 2010 a 2016.



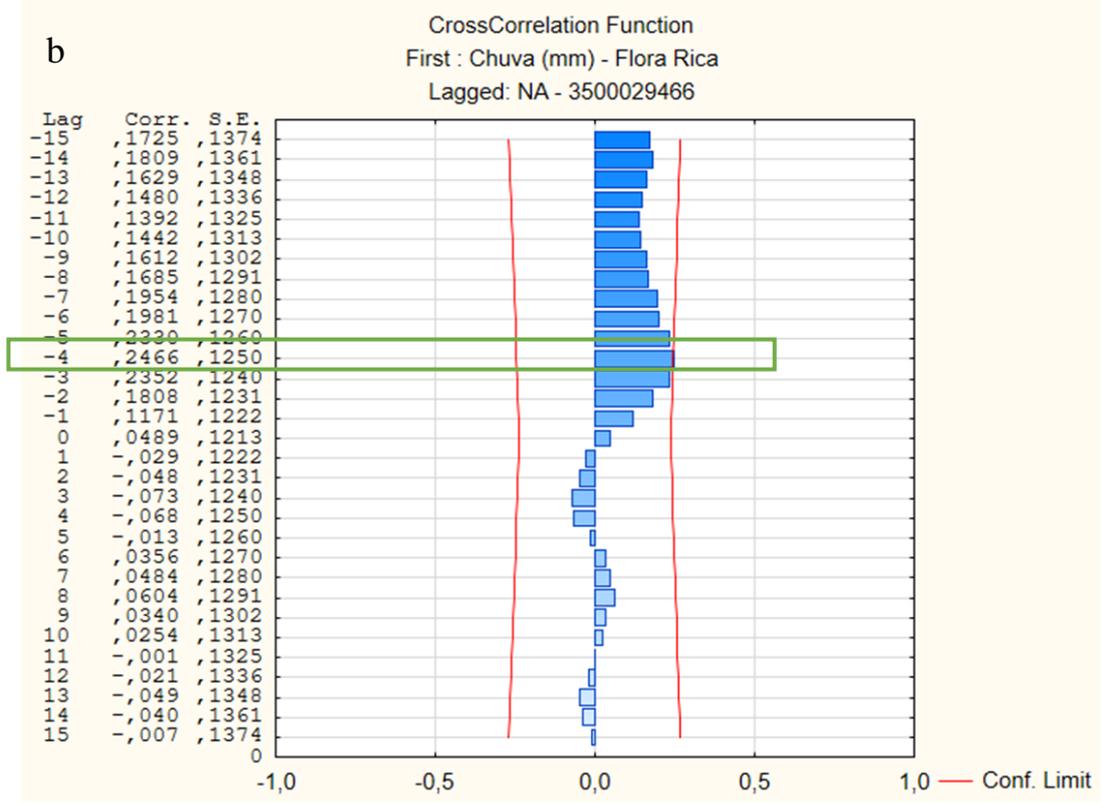
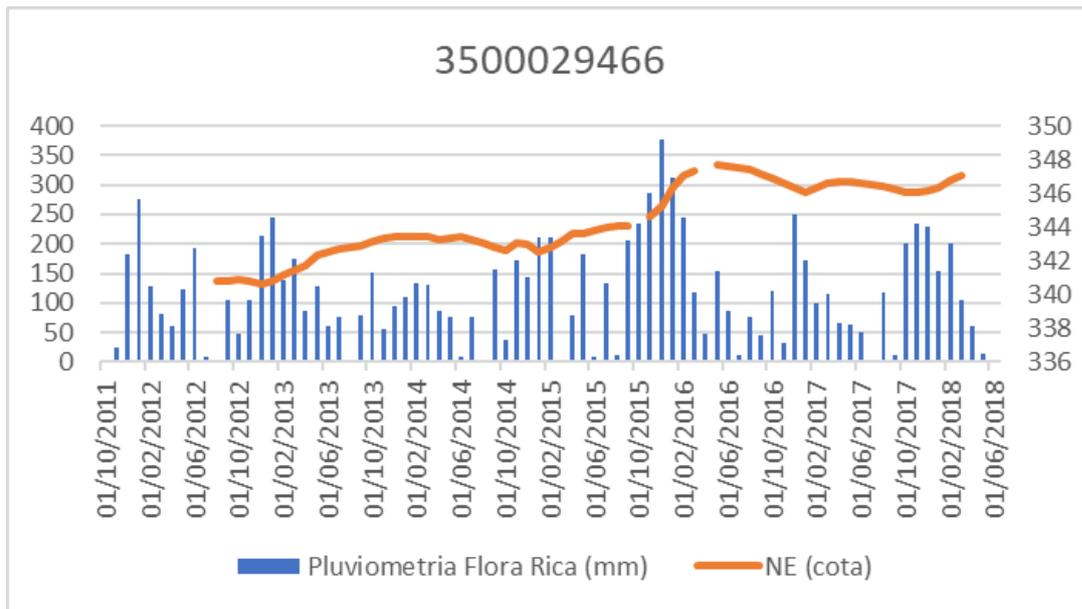
Apêndice 6- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027325; b) e c) Gráficos de correlação cruzada estação DAEE e CIIAGRO - não apresentaram correlação.

- Poço 3500027887: localizado no município de Andradina, apresentou correlação de 14 meses com a série da estação pluviométrica DAEE. Observou-se neste poço um rebaixamento expressivo do nível entre 2013 e 2015.
- Poço 3500029466: localizado no município de Flora Rica, apresentou correlação de 4 meses



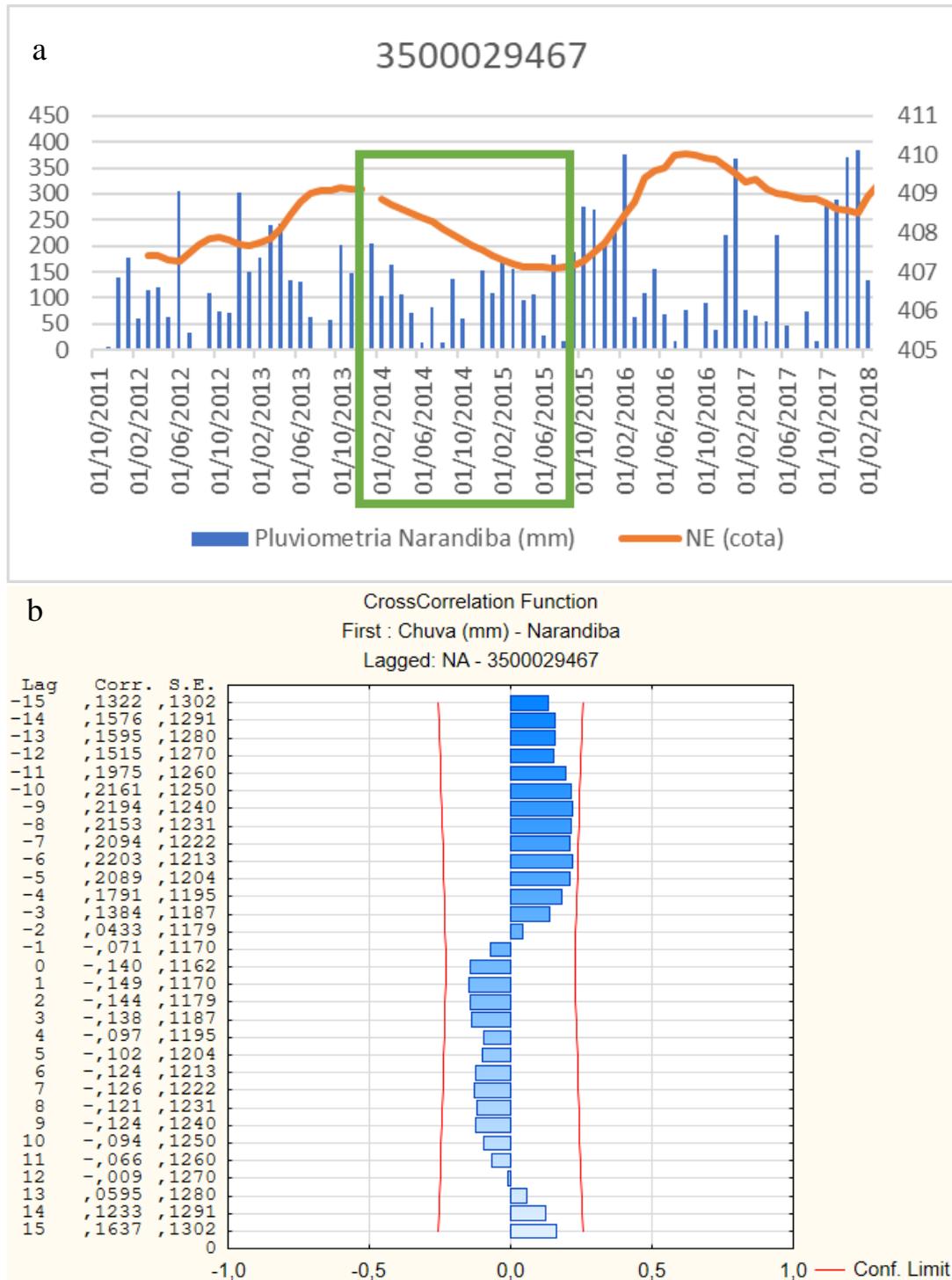
Apêndice 7- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500027887; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE - 14 meses.

com a série da estação pluviométrica DAEE. Observou-se neste poço um rebaixamento pouco expressivo entre 2014 e 2015.



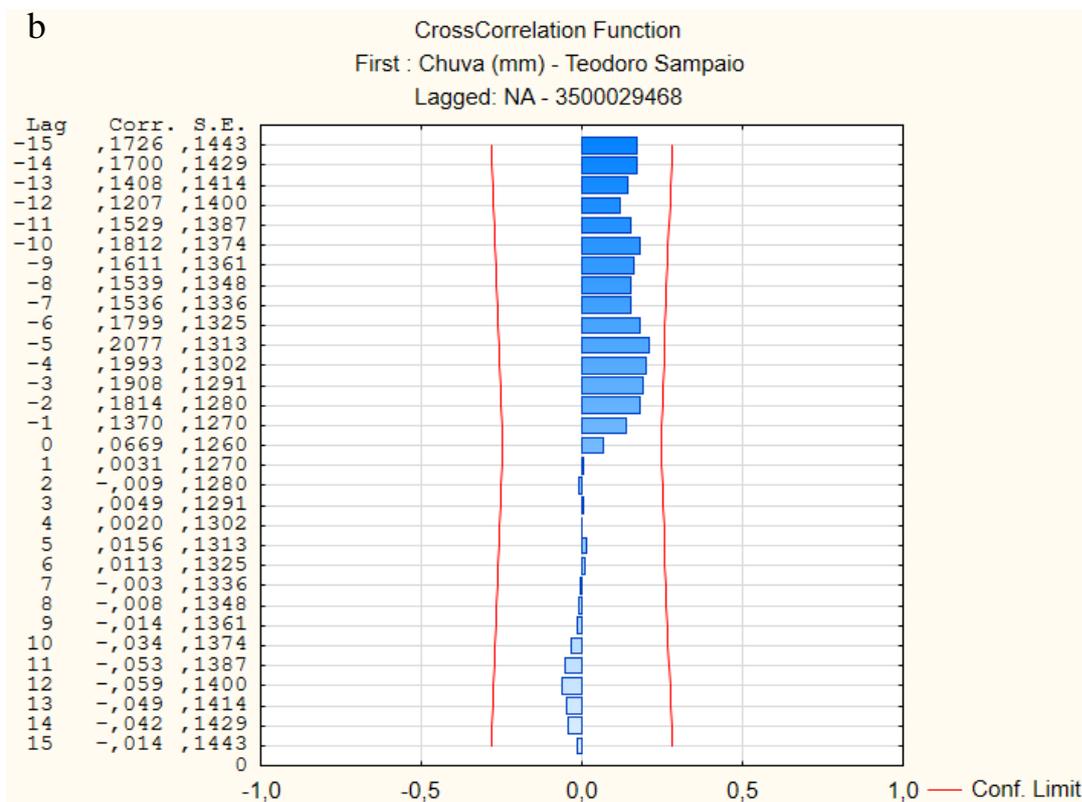
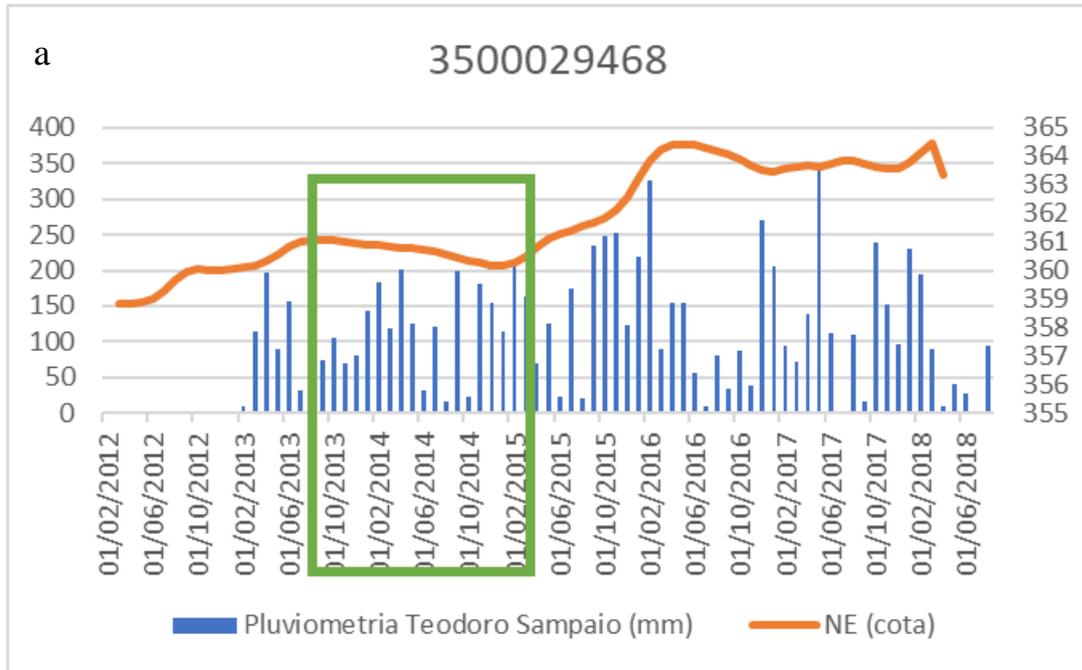
Apêndice 8- a) Gráfico representando a série temporal do nível d'água subterrânea do poço 3500029466; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE – 4 meses.

- Poço 3500029467: localizado no município de Narandiba, não apresentou correlação com a série da estação pluviométrica DAEE. Observou-se neste poço um rebaixamento expressivo entre o final de 2013 e 2015.



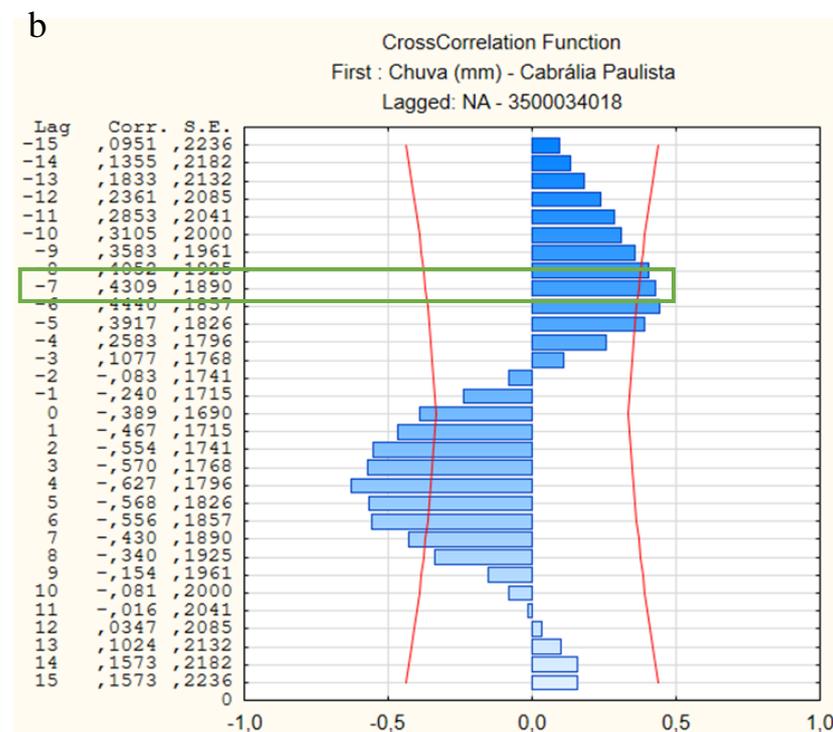
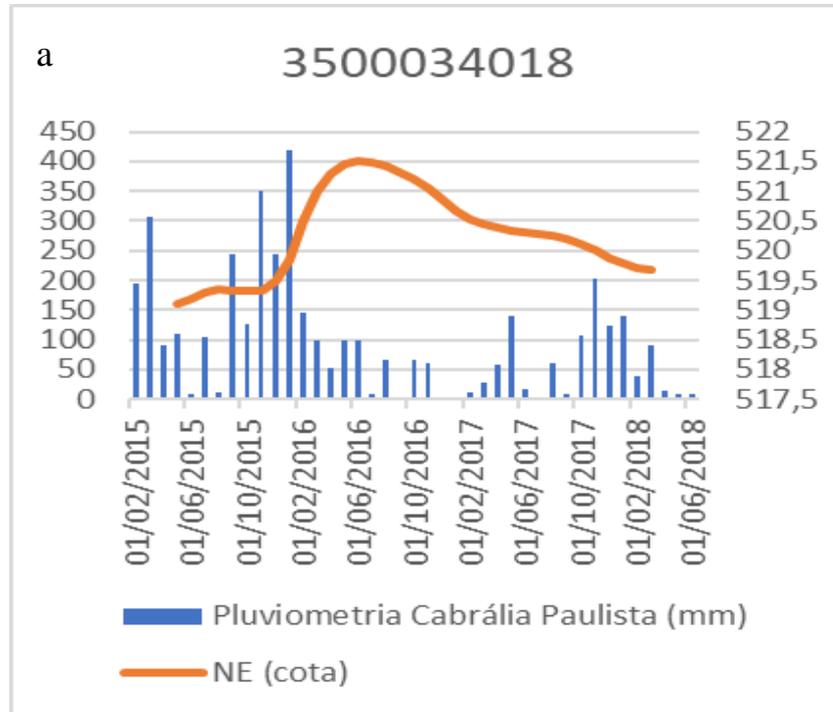
Apêndice 9- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500029467; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE - não apresentou correlação.

- Poço 3500029468: localizado no município de Teodoro Sampaio, não apresentou correlação com a série da estação pluviométrica DAEE. Observou-se neste poço um rebaixamento pouco expressivo entre 2014 e 2015.



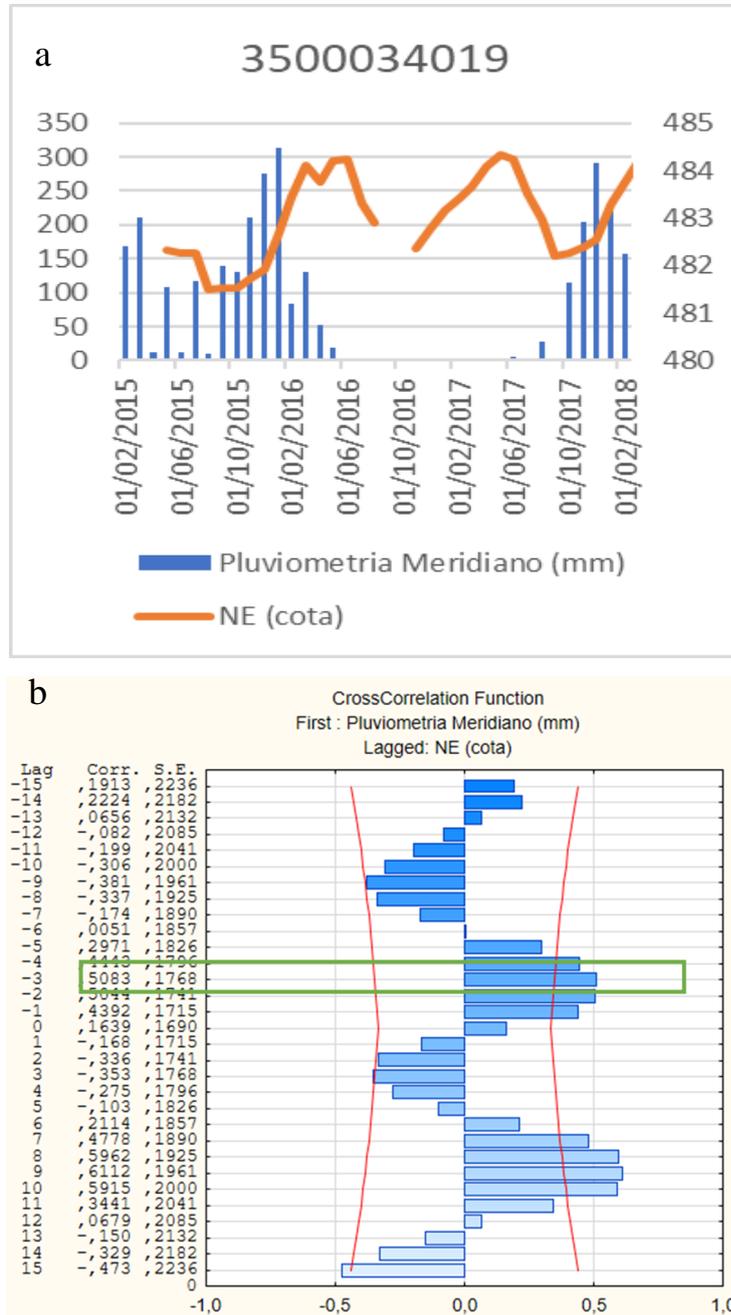
Apêndice 10 – a) Gráfico representando a série do nível d'água subterrânea do poço 3500029468; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE - não apresentou correlação.

- Poço 3500034018: localizado no município de Cabrália Paulista, apresentou correlação de 6 meses com a série da estação pluviométrica DAEE. Este poço de monitoramento foi instalado em 2015 e por isso não apresenta dados para os períodos anteriores.



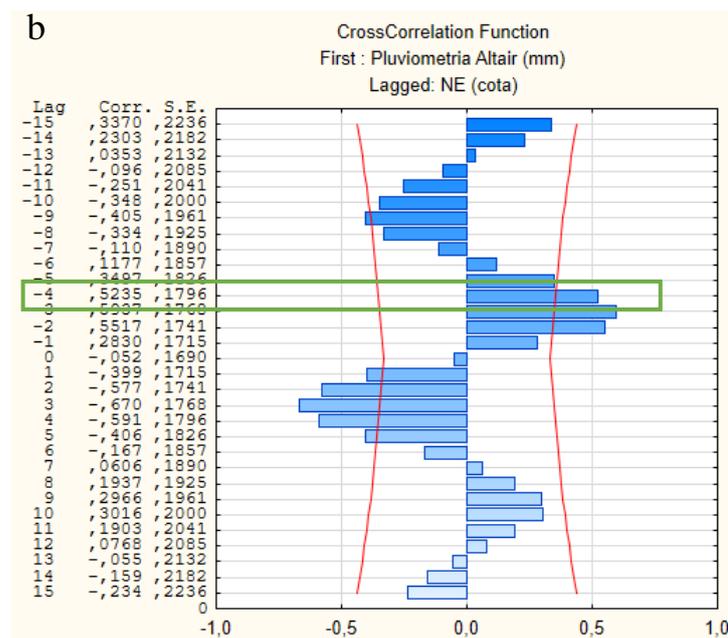
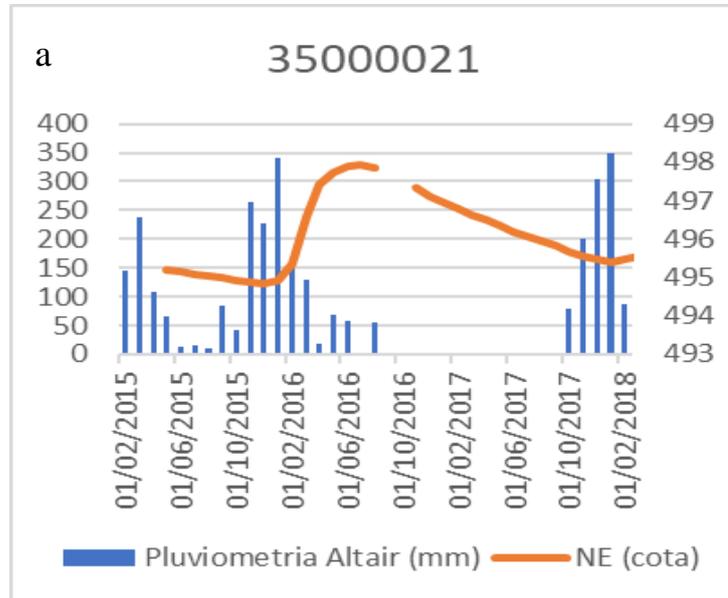
Apêndice 11- a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500034018; b) Gráfico de correlação cruzada estação DAEE – 6 meses.

- Poço 3500034018: localizado no município de Meridiano, apresentou correlação de 2 meses com a série da estação pluviométrica CPRM. Este poço de monitoramento foi instalado em 2015 e por isso não apresenta dados para os períodos anteriores.



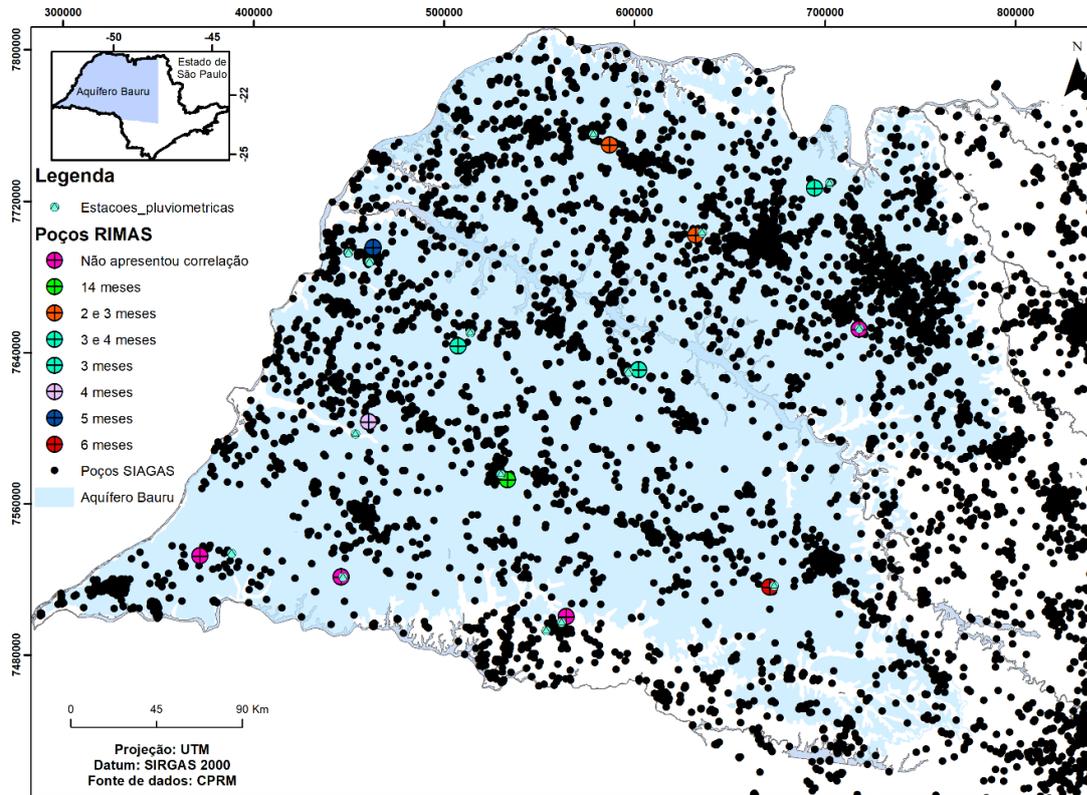
Apêndice 12 – a) Gráfico representando a série temporal de nível d'água subterrânea do poço 3500034019; b) Gráfico de correlação cruzada estação CPRM - 2 meses.

- Poço 3500034021: localizado no município de Altair, apresentou correlação de 3 meses com a série da estação pluviométrica DAEE. Este poço de monitoramento foi instalado em 2015 e por isso não apresenta dados para os períodos anteriores

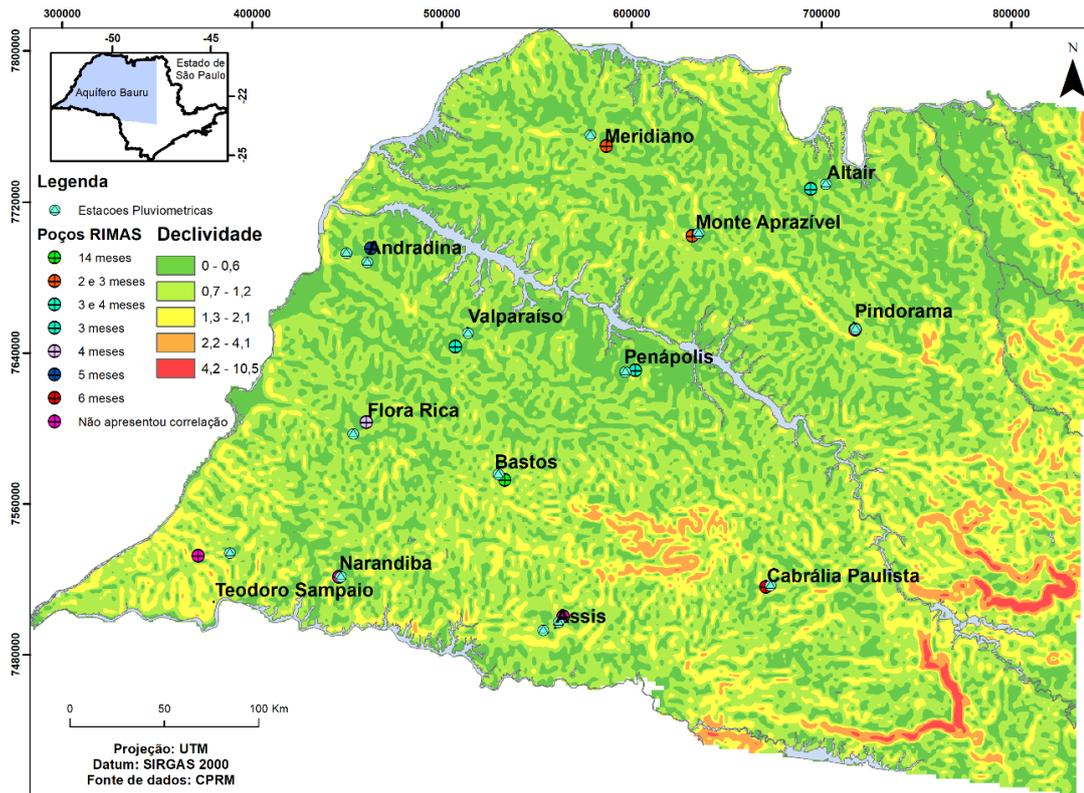


Apêndice 13- a) Gráfico representando a série temporal do nível d'água subterrânea do poço 3500034021; b) Gráfico correlação cruzada estação DAEE - 3 meses.

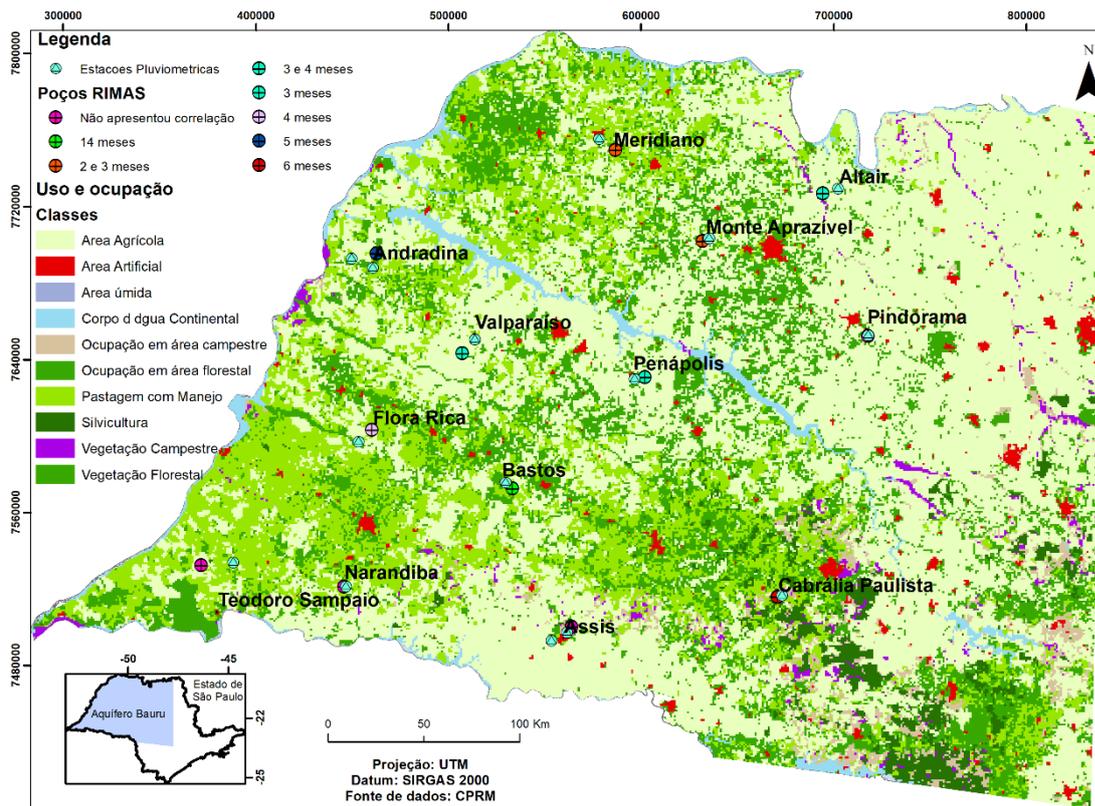
Mapas Temáticos



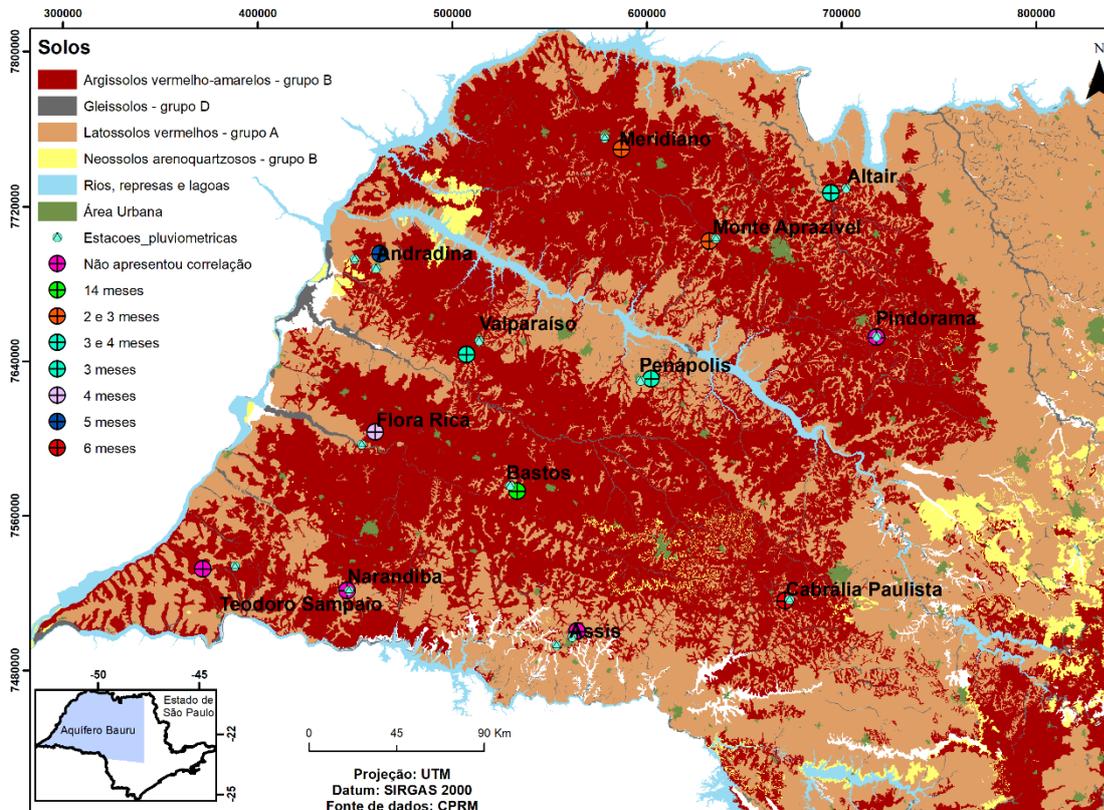
Apêndice 14 - Mapa mostrando a densidade de poços da rede SIAGAS



Apêndice 15 - Mapa de declividade



Apêndice 16 - Mapa de Uso e Ocupação adaptado de IBGE



Apêndice 17- Mapa de solos adaptado de Rossi, 2016.