

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PAOLA BEATRIZ FERNANDES DOS SANTOS

**ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO NÍVEL
ESTÁTICO E SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA DAS ÁGUAS DO
AQUÍFERO BAURU NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO-
SP (2013-2019)**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PAOLA BEATRIZ FERNANDES DOS SANTOS

**ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DO NÍVEL
ESTÁTICO E SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA DAS ÁGUAS DO
AQUÍFERO BAURU NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO-
SP (2013-2019)**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira – UNESP
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil.

Nome do orientador
Prof. Dr. César Gustavo da Rocha Lima

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S237e Santos, Paola Beatriz Fernandes dos.
Estudo da variabilidade espacial e temporal do nível estático e superfície
potenciométrica das águas do Aquífero Bauru no município de São José do Rio
Preto - SP (2013-2019) / Paola Beatriz Fernandes dos Santos. -- Ilha Solteira:
[s.n.], 2021
81 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e
Tecnologias Ambientais, 2021

Orientador: César Gustavo da Rocha Lima
Inclui bibliografia

1. Água subterrânea . 2. Krigagem ordinária . 3. Gestão dos recursos hídricos.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo da variabilidade espacial e temporal do nível estático e superfície potenciométrica das águas do aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto-SP (2013-2019)

AUTORA: PAOLA BEATRIZ FERNANDES DOS SANTOS

ORIENTADOR: CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA

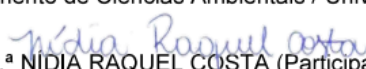
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA CIVIL,
área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. CESAR GUSTAVO DA ROCHA LIMA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Profa. Dra. JULIANA HELOISA PINE AMÉRICO PINHEIRO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências Ambientais / Universidade Brasil



Prof.^a Dr.^a NÍDIA RAQUEL COSTA (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Ilha Solteira, 22 de janeiro de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo convívio com a ciência.

Ao Professor Dr. César Gustavo da Rocha Lima pela orientação, paciência, incentivo, empenho e compreensão nos momentos de dificuldade, assim como seus conhecimentos transmitidos que tornaram possível a construção deste trabalho.

Ao Professor Dr. José Augusto de Lollo, pela empatia, apoio, e pelos conselhos que me serviram de instrumento profissional e para a vida.

In memoriam ao meu avô Paulo Lucania, permanecerá vivo em meu coração.

Aos meus pais, Joaquim Sergio e Valéria Cristina, que apesar de todas as dificuldades, me fortaleceram nessa jornada.

Aos meus irmãos, Leontil Lucania e Jonas Fernando, pela compreensão em meus momentos de ausência, por me alegrar em momentos de dificuldade. Meu amor por vocês é incondicional.

Ao meu Roberto Manechini, pelo apoio e incentivo, foram importantes para a realização deste trabalho.

Ao SEMAE e seus funcionários, sempre muito prestativos no fornecimento de dados, em especial ao Sr. Paulo Peroza e Sr. Carlos Fossa.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Amanda Ricardi, grande incentivadora nas horas difíceis.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Civil, por todo apoio e por proporcionarem um ambiente propício para o desenvolvimento do meu trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Estou entre aqueles que acham que a ciência tem uma grande beleza”. Marie Curie.

RESUMO

A pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos está relacionada ao crescimento populacional e urbano, pois é essencial para o desenvolvimento das atividades agrícolas, industriais e abastecimento público das cidades. Tendo em vista a supervalorização da água subterrânea como sendo fonte de recurso protegida de poluição e inesgotável, torna-se fundamental a condução de pesquisas visando o monitoramento da disponibilidade deste recurso. O município de São José do Rio Preto (SP) depende majoritariamente de água subterrânea e, principalmente, das águas do Sistema Aquífero Bauru (50%) por apresentar facilidade construtiva e operacional de poços tubulares, seguidos do Aquífero Guarani (28%) (Formação Botucatu/Pirambóia), além de afluentes e corpos d'água maiores como o Rio Preto (22%) para abastecimento público ou privado. Tendo em vista a demanda no município pelo Aquífero Bauru, a pesquisa focou em dados de poços que utilizam esse aquífero em razão do número de registro para os períodos 2013-2019, sendo estes fornecidos pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (SEMAE). O estudo avaliou a variabilidade espacial e temporal do Nível Estático (NE) e Nível Potenciométrico (NP) aplicando os conceitos da geoestatística. Para tal, foram realizadas análises descritivas e geoestatística através do cálculo de variogramas experimentais, por meio do qual foi avaliada a dependência espacial e gerada interpolação por krigagem ordinária. Os resultados obtidos da análise descritiva para o NE, em todos os períodos, mostrou elevados Coeficientes de Variação (CV), com o CV do NE anual, entre 28,48 % (2015) a 38,50% (2014), em análises sazonais, período de Excedente Hídrico (EH), de 35,06% (2019) a 39,71% (2018) e para o período de Deficiência Hídrica (DH), 25,36% (2017) a 35,46% (2016). Foi observada elevada variação dos dados, provavelmente em função da característica física do meio em que o poço se localiza (do solo ou a variação do relevo), mas principalmente devido aos períodos de avaliação, uma vez que as amostras foram coletadas em dias diferentes dentro do mesmo período, o que corrobora com valores mais distintos e um CV mais elevado; enquanto que para o NP o CV foi menor. Os valores médios do NE para os períodos anuais parecem indicar de modo geral uma tendência do aprofundamento do NE ao longo do período.

Palavras-chave: Água subterrânea. Krigagem ordinária. Gestão dos Recursos Hídricos.

ABSTRACT

The pressure on groundwater resources is related to populational and urban growth, as it is essential for the development of agricultural, industrial and public supply of cities. Regarding the overvaluation of groundwater as a source of resource protected from pollution and inexhaustible, it is essential to conduct research aimed at monitoring the availability of this resource. The municipality of Sao Jose do Rio Preto (SP) depends mostly on groundwater and, mainly, on the waters of the Bauru Aquifer System (50%) for presenting constructive and operational ease of tubular wells, followed by the Guarani Aquifer (28%) (Botucatu / Piramboia Formation), in addition to tributaries and larger water bodies such as the Rio Preto (22%) for public or private supply. In view of the demand in the municipality for the Bauru Aquifer, this research focused on data from wells that use this aquifer due to the registration number for the periods 2013-2019, which are provided by the Autonomous Municipal Water and Sewage Service (AMWSS). The study evaluated the spatial and temporal variability of the Static Level (SL) and Potentiometric Level (PL) by applying geostatistics concepts. Thus, descriptive and geostatistical analyzes were carried out through the calculation of experimental variograms, through which spatial dependence was evaluated and interpolation generated by ordinary kriging. The results obtained from the descriptive analysis for the SL, in all periods, showed high Coefficients of Variation (CV), with the annual SL CV, from 28,48% (2015) to 38,50% (2014), in analyzes seasonal, period of Water Surplus (WS), from 35,06% (2019) to 39,71% (2018) and for the period of Water Deficiency (WH), 25,36% (2017) to 35,46% (2016). High data variation was observed, probably due to the physical characteristic of the environment in which the well is located (soil or relief variation), but mainly due to the evaluation periods, since the samples were collected on different days within from the same period, which corroborates with different values and a higher CV; while for the PL the CV was lower. The average values of the SL for the annual periods seem to indicate in general a trend of deepening in the SL over the period.

Keywords: Groundwater. Ordinary Kriging. Water Resources Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfil dos usuários de águas subterrâneas no país	16
Figura 2 - Classificação dos diferentes tipos de aquíferos	19
Figura 3 - Classificação de Aquíferos.....	20
Figura 4 - Sistemas de fluxos subterrâneos e tempo de trânsito.....	22
Figura 5 - Localização de São José do Rio Preto - SP.....	25
Figura 6 - Sub Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos da UGRHi 15.	26
Figura 7 - Mapa Hidrográfico do município de São José do Rio Preto - SP	27
Figura 8 - Sistema Aquífero Bauru no Brasil e Estado de São Paulo.....	28
Figura 9 - Mapa de localização das seções geológicas traçadas no município de São José do Rio Preto - SP.....	29
Figura 10 - Seções geológicas traçadas do município de São José do Rio Preto - SP	30
Figura 11 - Mudanças do uso e ocupação do solo no município de São José do Rio Preto - SP	35
Figura 12 - Modelo Semivariográfico de comportamento ideal.....	40
Figura 13 - Localização da área de estudo e poços de monitoramento	45
Figura 14 - Padrões espaciais anuais por krigagem do parâmetro Nível Potenciométrico (NP) (período avaliado: 2013-2019)	58
Figura 15 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Potenciométrico (NP) - Excedente Hídrico - (período avaliado: 2016-2018).....	59
Figura 16 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Potenciométrico (NP) – Deficiência Hídrica - (período avaliado: 2016-2019)	60
Figura 17 - Padrões espaciais anuais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - (período avaliado: 2013-2019).....	61
Figura 18 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - Excedente Hídrico (EH) - (período avaliado: 2016-2018)	62
Figura 19 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - Deficiência Hídrica (DH) - (período avaliado: 2016-2019)	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Precipitação anual no município de São José do Rio Preto - SP	32
Gráfico 2 - Hietograma de chuvas e temperatura do município de São José do Rio Preto - SP	32
Gráfico 3 - Extrato do Balanço Hídrico do município de São José do Rio Preto - SP	33
Gráfico 4 - Crescimento da população de São José do Rio Preto - SP no período de 1980-2019	34
Gráfico 5 - Dados de uso e ocupação no município de São José do Rio Preto – SP no período de 1985-2019	35
Gráfico 6 - Evolução acumulada dos poços que utilizam água do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto - SP	36
Gráfico 7 - Classificação pelo uso dos poços que atingem o Aquífero Bauru no Município de São José do Rio Preto - SP	37
Gráfico 8 - Crescimento populacional relacionado com perfurações de poços no Aquífero Bauru em São José do Rio Preto - SP no período de 2011-2019	38
Gráfico 9 - Valores médios observados do Nível Estático (NE) e precipitação média anual (2013-2019) e em período sazonal (2016-2019) de Deficiência Hídrica (DH) e Excedente Hídrico (EH)	52
Gráfico 10 - Valores médios observados do Nível Potenciométrico (NP) e precipitação média anual (2013-2019) e em período sazonal (2016-2019) de Deficiência Hídrica (DH) e Excedente Hídrico (EH)	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Demonstrativo de perfurações anuais de poços que atingem o Bauru no município de São José do Rio Preto – SP	36
Tabela 2 - Análise estatística descritiva anual de parâmetros Quantitativos do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto – SP (continua).....	50
Tabela 3 - Parâmetros dos variogramas simples.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVO.....	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1	RECURSOS HÍDRICOS	15
3.1.1	Água subterrânea e sua importância frente ao desenvolvimento humano ...	15
3.1.2	Pressões pelo uso excessivo do recurso hídrico	17
3.1.3	Águas subterrâneas.....	18
3.1.4	Características hidráulicas da água subterrânea	21
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
3.2.1	Localização da área de estudo	24
3.2.2	Geologia	28
3.2.3	Aspectos climáticos	31
3.2.4	População e crescimento urbano.....	33
3.2.5	Poços de água subterrânea no município.....	36
3.3	GEOESTATÍSTICA.....	39
3.3.1	Conceitos básicos.....	39
3.3.2	Geoestatística aplicada aos estudos das águas subterrâneas	42
4	MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1	ÁREA DE ESTUDO E FONTE DE DADOS	45
4.2	ANÁLISE DOS DADOS	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1	ANÁLISE ESTATÍSTICA – PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS	49

5.2	Análise geoestatística	53
6	CONCLUSÕES	64
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	Apêndice A – Semivariogramas do Nível Estático (NE) em Período Anual ...	74
	Apêndice B – Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em Período Anual .	75
	Apêndice C – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em período sazonal de Excedente Hídrico (EH)	76
	Apêndice D – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em período sazonal de Deficiência Hídrica (DH)	77
	Apêndice E – Semivariogramas do Nível Potenciométrico (NP) em Período Anual	78
	Apêndice F – Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em Período Anual	79
	Apêndice G – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em período sazonal de Excedente Hídrico (EH)	80
	Apêndice H – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em período sazonal de Deficiência Hídrica (DH)	81

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional dos centros urbanos e da pressão sobre o consumo da água, o poder público tem o desafio cada vez maior de monitorar os recursos hídricos para atender a todos sem causar eventuais onerações ou desperdícios dos mananciais (superficiais ou subterrâneos), que cada vez mais se encontram comprometidos em sua qualidade e, conseqüentemente, em quantidade. As fontes de água subterrânea representam 97% das águas doces e líquidas, o que as torna a maior reserva de água potável do planeta (HIRATA, 2019). No Brasil, os recursos hídricos de origem subterrânea representam uma grande parcela do abastecimento público. Dados da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, 2010), demonstram que 36% dos municípios brasileiros utilizam como abastecimento exclusivo esse tipo de manancial. As fontes de abastecimento por manancial subterrâneo, até julho de 2018, totalizavam mais de 302 mil poços de captação de água subterrânea em todo o Brasil (ANA, 2018). Com uma nova projeção da quantidade de poços tubulares que se encontram em andamento no país, apontam-se valores da ordem de 1,2 milhão, representando um aumento anual de mais de 22% em relação à estimativa realizada em 2008.

Quanto ao consumo, dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2009) envolvendo 64 municípios da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande, apontaram que 57 municípios utilizam exclusivamente águas subterrâneas para abastecimento público, dentre os quais São José do Rio Preto, que apresenta o maior índice de consumo, com uma vazão média de 1,23 m³/s. Tal fato está diretamente relacionado às características populacionais e socioeconômicas do município.

A localização geográfica estratégica da cidade de São José do Rio Preto, no estado tem proporcionado um crescimento acelerado principalmente pela sua indústria emergente, se tornando um importante centro econômico e de serviços. A dinâmica proporcionada por essa vocação do município atrai novos empreendimentos, loteamentos habitacionais, indústrias, que por sua vez, demandam mais recursos hídricos. Barcha (1998) destaca a quantidade de 3.500 poços não elencados em números oficiais explotando do aquífero Bauru em São

José do Rio Preto, o que pode indicar uma influência exploratória irregular da água subterrânea com tendência evolutiva.

No que se refere ao uso e às pressões sobre os recursos hídricos, merecem destaque aquelas sobre às águas no Sistema Aquífero Bauru - SAB, uma vez que, por possuir comportamento de aquífero livre e contínuo (com baixa profundidade) e não possuir nenhuma outra unidade geológica que atue confinando suas águas (SILVA; KIANG; CAETANO-CHANG, 2005), sua exploração acaba sendo de maior facilidade e mais barata, o que de certa forma atrai seu uso, inclusive propiciando a perfuração de poços clandestinos (IRITANI; EZAKI, 2012).

Desta forma, o monitoramento das reservas assim como o reabastecimento desse manancial é de grande interesse para uma adequada gestão dos recursos hídricos. Até o ano de 2019, dados fornecidos pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto – SEMAE, indicam que o município de São José do Rio Preto apresenta 371 poços (registrados) que exploravam e/ou exploram água do Aquífero Bauru e que se encontram cadastrados no SEMAE, responsável pela gestão das águas no município. Desta forma, o monitoramento das reservas assim como o reabastecimento desse manancial é de grande interesse para uma adequada gestão dos recursos hídricos.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a variabilidade espacial e temporal do Nível Estático (NE) e Nível Potenciométrico (NP) das águas na área de influência do Aquífero Bauru com base no conjunto de dados relacionados a poços tubulares disponíveis na área urbana do município de São José de Rio Preto entre o período de 2013 a 2019.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar e organizar dados de poços tubulares de abastecimento urbano, como vazão, profundidade, nível dinâmico, nível estático e cota topográfica de cada poço;
- Avaliar a oscilação do nível estático e potenciométrico do aquífero na área do município;
- Analisar o crescimento da demanda por água (poços no aquífero Bauru) e o aumento populacional, da malha urbana e das atividades econômicas no município;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 RECURSOS HÍDRICOS

3.1.1 Água subterrânea e sua importância frente ao desenvolvimento humano

Desde os primórdios da humanidade, os recursos hídricos desempenham um papel essencial no desenvolvimento da vida humana no planeta. Estes recursos também possuem um papel essencial no desenvolvimento humano e no que diz respeito às relações e atividades socioeconômicas. A água é imprescindível para o abastecimento público, para agricultura e atividades industriais, para a disposição de efluentes, contribuindo com o desenvolvimento humano.

A água no Planeta Terra não se altera quantitativamente, o que de certa forma, apresenta a ideia de ser um recurso infinito por ser considerada constante há milhões de anos. Entretanto, essa ideia é errônea, visto que se observam alterações qualitativas que podem levar à escassez hídrica. Neste contexto, as atividades antrópicas podem ser mais ameaçadoras, principalmente no que concerne ao desenvolvimento dos centros urbanos e industriais e ao crescimento das atividades agrícolas, que além de elevarem os riscos de poluição dos recursos hídricos, também elevam as pressões exercidas nos mananciais subterrâneos pela sua exploração e, em certos casos, a natureza não é capaz de repor, comprometendo ambientalmente este recurso (PHILIPPI JR; ALVES, 2005).

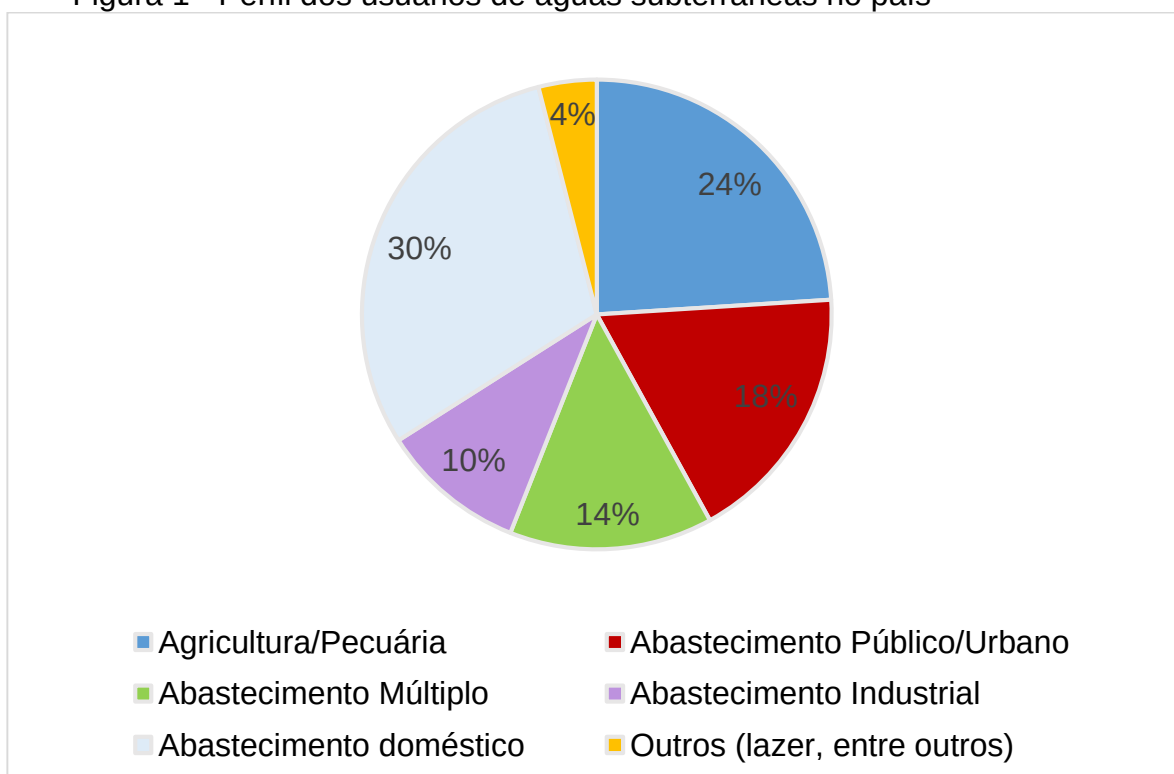
A quantidade de água no Planeta foi estimada, em valores aproximados por Heath (1983), com a maior parte dela, cerca de 97,5%, contida nos mares e oceanos. Desconsiderando a água congelada nos polos, 0,6% é o total da água doce. Destes 0,6%, apenas 2% compõem rios e lagos, o restante (98%) está contido nos aquíferos.

A disponibilidade hídrica subterrânea no Brasil dispõe de uma vazão estimada em torno de 14.650 m³/s (ANA, 2018). Ainda segundo estimativas da ANA (2018), os destinos com maiores retiradas de água doce são com finalidades agrícolas como irrigação (1.084 m³/s) e em seguida o abastecimento urbano (496 m³/s). A importância da água subterrânea se tornou cada vez maior nos últimos anos, não apenas por abastecer as cidades e o campo e servir de matéria-prima para atividades econômicas, mas também por sustentar vários sistemas aquáticos como rios, lagos, mangues e pântanos (HIRATA, 2019).

O recurso natural mais extraído do subsolo é a água subterrânea, superando os 17.580 Mm³/ano (557 m³ /s), resultado de um total de água bombeada para diversas finalidades pelos mais de 2,5 milhões de poços tubulares (HIRATA, 2019). As estimativas de uso da água subterrânea pelo país são demonstradas na Figura 1, sendo distribuídas entre Abastecimento Doméstico (30%), Agricultura/Pecuária (24%), Abastecimento Público/Urbano (18%), Abastecimento Múltiplo (14%), Abastecimento Industrial (10%) e Outros (4%) (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM, 2018).

Dados da ANA (2010) mostram que 52 % dos 5.570 municípios brasileiros são abastecidos total (36%) ou parcialmente (16%) por águas subterrâneas, sendo que seu uso é opção exclusiva para 48% dos municípios com populações menores que 10 mil habitantes e para 30% daqueles com 10 a 50 mil habitantes.

Figura 1 - Perfil dos usuários de águas subterrâneas no país



Fonte: Adaptado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM (2018).

Apesar de representarem importantes mananciais hídricos em regiões menos favorecidas pelos recursos hídricos superficiais, os recursos subterrâneos também vêm sendo intensamente explorados em quase toda a extensão do país,

e em um ritmo que provavelmente a natureza não conseguirá repor (TUCCI, 2008).

3.1.2 Pressões pelo uso excessivo do recurso hídrico

O desenvolvimento das áreas urbanas de forma acelerada e sem diretrizes que delineiam o aproveitamento dos recursos naturais pode gerar pressão nos recursos hídricos. Sem o devido planejamento do meio urbano, ocorre a deterioração dos mananciais existentes, os quais têm capacidade finita por conta da contaminação dos recursos (TUCCI, 1997).

Entre as principais causas da diminuição da água estão o crescente aumento do consumo, o desperdício e a poluição das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas por esgotos domésticos e resíduos tóxicos provenientes da indústria e da agricultura (VILLHOULTH, 2006). Com isso, a busca por água em quantidade gera o efeito de estresse hídrico, onde a demanda por água é maior do que a disponibilidade.

Os processos antrópicos da urbanização descritos por Tucci (1997) são reforçados pela *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* - UNESCO (2019), como ações que levam ao estresse hídrico mais de 2 bilhões de pessoas, e gera uma escassez severa de água para mais de 4 bilhões de pessoas ao menos uma vez ao ano. Ainda segundo dados da UNESCO (2019), a taxa de crescimento do uso da água é em torno de 1% ao ano desde a década de 1980.

Portanto, grandes centros urbanos são relacionados à taxa de crescimento do uso da água, que tendem a reduzir a infiltração de água direta das chuvas, por conta da área impermeável criada que impede a recarga para os aquíferos (MORRIS *et al.*, 1994; *BRITISH GEOLOGICAL SURVEY* - BGS, 2006). O desenvolvimento das áreas urbanas de forma acelerada e sem diretrizes que delineiam o aproveitamento dos recursos naturais pode gerar pressões nos recursos hídricos subterrâneos (HIRATA, 2010).

3.1.3 Águas subterrâneas

A água subterrânea é toda água que ocorre abaixo da superfície da Terra, submetida a duas forças - de adesão e de gravidade - preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS, 2019). Estas porções são recarregadas pelo excedente das águas de chuvas que percorrem camadas abaixo da superfície do solo e preenchem os espaços vazios entre as rochas (BERNARD; KUMAR, 1999).

A compreensão da função das águas subterrâneas é importante não só para o ciclo hidrológico e para processos geológicos, mas também para a gestão integrada das águas. Estas desempenham um papel fundamental na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos. Atribuições como manutenção da umidade dos solos (fluxo em meios não saturados) e dos fluxos de águas superficiais tornam seu estudo de extrema importância (FEITOSA *et al.*, 2008).

As classificações das camadas geológicas que armazenam água podem ser de acordo com a porosidade (estocagem/armazenamento) e permeabilidade (capacidade de transferência de água). Neste sentido, Feitosa *et al.* (2008) elenca as camadas como Aquíferos (camadas de sedimentos ou corpos de rochas da região considerada que apresentam porosidade específica e permeabilidade, como sedimentos arenosos, rochas compactas muito fraturadas ou intemperizadas, sistemas cársticos bem desenvolvidos), Aquitardes (camadas ou corpos de rocha que apresentam porosidade específica e permeabilidade relativamente baixa, tais como sedimentos argilosos, por exemplo), Aquicludes (camadas ou corpos de rochas que apresentam porosidade específica e permeabilidade praticamente nula, tais como camadas de sedimentos essencialmente argilosos, rochas compactas muito pouco fraturadas ou carstificadas) e Aquífuges (camadas ou corpos de rochas muito compactas que apresentam porosidade e permeabilidade praticamente nulas, tais como rochas cristalinas).

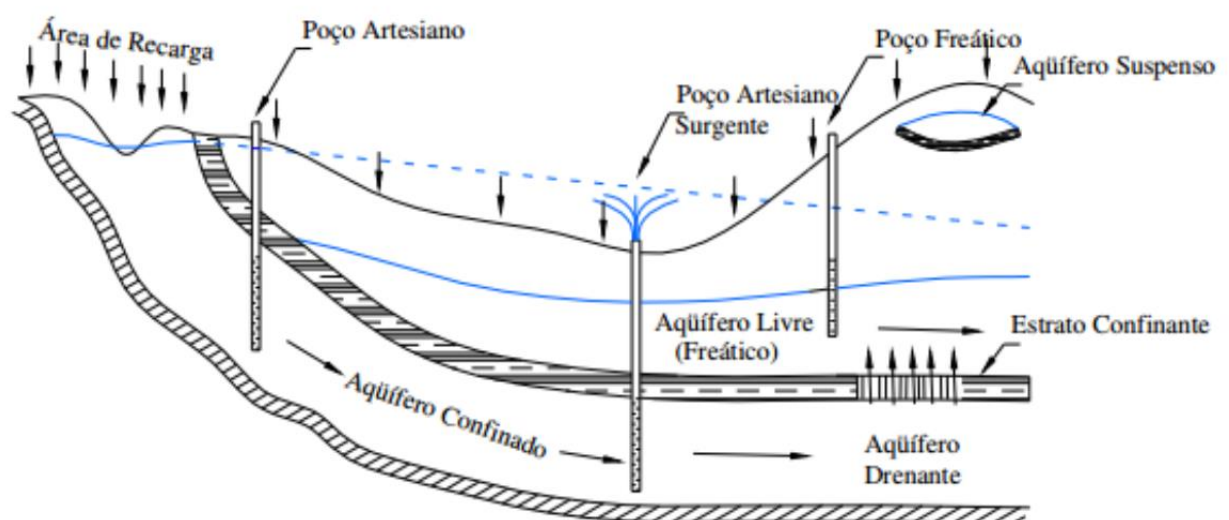
São nas bacias sedimentares que se encontram os maiores potenciais de água subterrânea do Brasil, dentre os quais estão inseridos os aquíferos, formações geológicas permeáveis que possuem função de mineração, alta

porosidade e condutividade, são capazes de armazenar e transmitir água em quantidades significativas em seu interior, diferenciando-se uns dos outros pelas características da formação geológica, bem como da porosidade, permeabilidade, transmissividade e capacidade de armazenamento de cada estrutura aquífera (CLEARY, 2007; MANOEL FILHO *et al.*, 2008; FEITOSA *et al.*, 2008).

Portanto, a porosidade e permeabilidade são fatores que determinam a classificação hidrogeológica dos aquíferos (CLEARY, 2007). As diferentes classificações aquíferas de acordo com sua formação são definidas conforme Bedient, Rifai e Newell (1997) e Gonçalves e Giampią (2006), onde apresentam o Aquífero Livre (zona saturada se encontra sob a mesma pressão atmosférica, recebe também o nome de freático); Aquífero Confinado (encontra-se inserido entre duas camadas relativamente impermeáveis. A água armazenada se encontra sob pressão, podendo sua água atingir níveis superiores ao do terreno quando este aquífero é perfurado. Nestes casos, temos um poço artesianiano); Aquífero Suspenso (ocorre quando há uma acumulação de água acima do nível freático regional) e o Aquífero Semi-Confinado (quando há uma camada confinante descontínua ou relativamente permeável).

A Figura 2 ilustra a disposição dos aquíferos conforme a classificação supracitada.

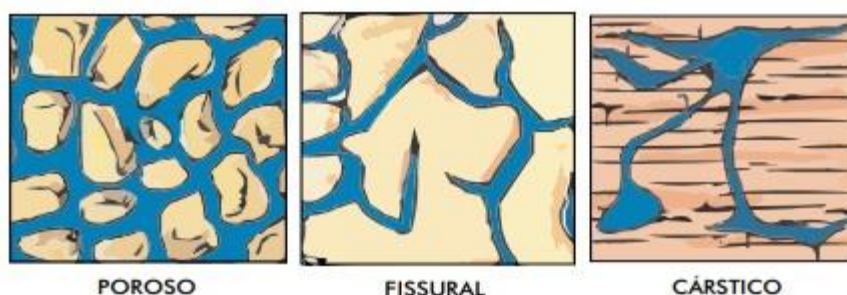
Figura 2 - Classificação dos diferentes tipos de aquíferos



Fonte: Todd (1967).

O arranjo geológico do aquífero define seus parâmetros de porosidade e permeabilidade, ou seja, como ocorre o transporte de água em seu interior e a facilidade com a qual ocorre. Este é decorrente da sua origem geológica, que pode ser fluvial, lacustre, eólica, glacial e aluvial (rochas sedimentares), vulcânica (rochas fraturadas) e metamórfica (rochas calcáreas), as quais estabelecem os diferentes tipos de aquíferos, dividindo-os em três tipos, levando em conta sua porosidade: poroso, fissural e cárstico (Figura 3) (BEAR, 1992).

Figura 3 – Classificação de Aquíferos



Fonte: Adaptado de Brasil (2007).

Na Figura 3 são apresentados diferentes tipos de aquíferos classificados quanto aos padrões de espaços vazios, definidos segundo o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2007) e Freeze e Cherry (2017) como, Poroso: a água se armazena no espaço entre os grãos criados durante a formação das rochas, no caso das sedimentares. Os aquíferos porosos são preenchidos em todo o seu conteúdo por água; Fissural: a água circula pelas fissuras resultantes do fraturamento das rochas relativamente impermeáveis (ígneas ou metamórficas); Cárstico: formados a partir de rochas carbonáticas (sedimentares, ígneas ou metamórficas). Constituem um aquífero fraturado, onde as fraturas podem atingir grandes aberturas devido à dissolução do carbonato pela água, criando verdadeiras cavernas subterrâneas.

O processo de circulação da água no interior do aquífero é lento, através de fluxo constante, por meio dos espaços vazios da formação geológica (IRITANI; EZAKI, 2012). É influenciado pela permeabilidade, que é um dos parâmetros determinantes do fluxo da água subterrânea, pois estabelece a relação entre homogeneidade de tamanho dos grãos e sua distribuição na interconexão entre poros e a capacidade de transmissão de água do aquífero (LOHMAN, 1975). Por

este motivo, o tempo de residência da água no aquífero, ou seja, o tempo de permanência em seu interior pode ser de milhares de anos.

As águas subterrâneas são fundamentais para o abastecimento público no Brasil (ANA, 2010). A crise de abastecimento dos últimos anos, marcada pelas imagens de reservatórios em níveis baixos e lançamento de esgotos contribuiu para trazer o tema do uso dos aquíferos (VILLAR, 2016). Neste contexto, os aquíferos assumem um papel fundamental na segurança hídrica mundial, pois representam a principal fonte disponível para a humanidade (SHIKLOMANOV; RODDA, 2003).

3.1.4 Características hidráulicas da água subterrânea

O conhecimento hidráulico subterrâneo é importante por apresentar variância regional e sua diversidade se dá de acordo com a geologia em que o aquífero se encontra. A abordagem hidráulica subterrânea permite o entendimento da dinâmica do fluxo da água e o entendimento de como ocorre o ciclo hidrológico em âmbito subterrâneo, como por exemplo, a compreensão da recarga de aquíferos e como ocorre o fluxo de água em seu interior. Para isto, é interessante compreender os parâmetros hidráulicos da água subterrânea, como condutividade, transmissividade, porosidade, permeabilidade, armazenamento e vazão específica (COHEN; CHERRY, 2020).

A geologia é um dos fatores que determinam o processo laminar da água subterrânea, que é lento quando comparado ao da água superficial, onde Cleary (2007) definiu que a água subterrânea nas camadas do aquífero não confinado (aquífero freático) pode deslocar-se cerca de 1 m/dia como demonstrado na Figura 4. Apesar disto, este processo de deslocamento lento pode-se apresentar equilibrado em condições naturais se a taxa de recarga for igual a de saída, entretanto, caso apresente uma exploração excessiva, o nível freático do aquífero poderá vir a rebaixar (CLEARY, 2007).

Em qualquer unidade aquífera, a exploração excessiva ocasiona danos e consequências aos recursos hídricos subterrâneos, de tal maneira, que está condicionada pelos reflexos causados por esta exploração no potencial de água subterrânea, o qual pode ser exaurido em caso de ultrapassar o limite (ALBUQUERQUE FILHO, 2011).

A superexploração de aquíferos, segundo Hirata (2012), diz respeito a um número excessivo de poços perfurados muito próximos uns dos outros e que funcionam de maneira contínua, podendo diminuir o nível de água no aquífero; com isso, o rendimento dos poços diminui de maneira que acarreta o aumento dos custos de bombeamento, possibilidade de recalque nos terrenos, e, em casos extremos, a exaustão dos aquíferos. Portanto, a potencimetry é um fator que auxilia no monitoramento do nível freático.

Neste cenário, a avaliação periódica temporal para sistemas aquíferos, utilizando-se o nível estático, é necessária, uma vez que com isso é possível visualizar tanto o abastecimento contínuo das grandes cidades quanto o entendimento do sistema aquífero, objeto de estudo (TCACENCO-MANZANO *et al.*, 2019).

Figura 4 - Sistemas de fluxos subterrâneos e tempo de trânsito



Fonte: Adaptado de *United States Geological Survey - USGS* (2000).

Dentro do contexto de aquíferos utilizados para abastecimento urbano, é importante conhecer algumas propriedades hidrogeológicas quantitativas, como inventário de poços d'água, redes de monitoramento, nivelamento de poços d'água e conhecer sua potencimetry (MANOEL FILHO *et al.*, 2008).

A potencimetry pode ser compreendida como "potencial", que segundo Hubbert (1940), é definido como uma quantidade física mensurável capaz de se locomover em um sistema de fluxo, cujas propriedades sejam tais que o fluxo as transporte de maior para menor potencial. Portanto, mapas potencimétricos podem ser compreendidos como isolinhas de contorno das cargas hidráulicas de

um aquífero, tornando possível a caracterização dos aspectos da circulação das águas subterrâneas (BEAR *et al.*, 1992).

A superfície potenciométrica é a representação do aquífero através de isolinhas de contorno com mesma carga hidráulica, onde é possível caracterizar aspectos da circulação da água subterrânea, como: identificação das zonas de recarga; identificação dos divisores de água do manancial subterrâneo; determinação da velocidade aparente de fluxo de água subterrânea; identificação dos contornos dos sistemas aquíferos, como a variação brusca de permeabilidade, de espessura; de influência das formas de relevo atual ou do seu substrato hidrogeológico e determinação das formas e da evolução das plumas de contaminação (CLEARY, 2007; MANOEL FILHO *et al.*, 2008).

Num aquífero livre, o topo é delimitado pelo nível freático que se encontra em contato direto com o ar atmosférico e, conseqüentemente, sob a mesma pressão atmosférica, enquanto que a representação da superfície potenciométrica é dada pela representação da superfície da zona saturada deste aquífero (FREEZE; CHERRY, 2017).

Para se determinar o nível freático do aquífero livre, utiliza-se o Nível Estático com a intenção de estabelecer um parâmetro de relação entre a superfície do terreno ao nível da água dentro do poço em um momento que não está bombeando água (CPRM, 1998). Para o conhecimento do nível freático de todo um aquífero, é necessária a implantação de redes de monitoramento, com poços e piezômetros que permitam a leitura destes níveis (FEITOSA *et al.*, 2008). Assim, a partir da obtenção destas informações, é possível elaborar um mapa da superfície potenciométrica (ou mapa potenciométrico) de determinado aquífero (BETTU; FERREIRA, 2005; TEIXEIRA *et al.*, 2008; TCACENCO-MANZANO *et al.*, 2019). Como em aquíferos livres a superfície potenciométrica coincide com a elevação do nível freático, a elaboração e análise do mapa potenciométrico, na prática, significa o estudo da evolução da superfície freática no tempo e no espaço (FORMAGGIO; CAMPOS; AMARAL, 2009).

O fluxo da água subterrânea ocorre das regiões de maior potencial para as regiões de menor potencial (CLEARY, 2007). Diante disto, o mapa potenciométrico assume fundamental importância em investigações de qualidade, uma vez que o sentido de escoamento freático é informação essencial para que se

possa monitorar/investigar a propagação de eventuais contaminações (FOSTER, 2010).

O monitoramento de aquíferos através de séries temporais é uma atividade recorrente nos estudos hidrogeológicos (BETTÚ; FERREIRA, 2005; SANTAROSA; MANZIONE, 2018; GAVRISHIN, 2018), nos níveis estáticos ou potenciométricos (TEIXEIRA *et al.*, 2008; FORMAGGIO; CAMPOS; AMARAL, 2009; FONTES JUNIOR; MONTENEGRO, 2017; TCACENCO-MANZANO, 2019) ou no potencial produtor aquífero (DALTO; NASCIMENTO; LOLLO, 2002).

Wendland (2013), em estudo do rebaixamento potenciométrico do aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto – SP, relata que a região central possui uma quantidade significativa de poços de bombeamento, e enfatiza que estes causam uma redução da superfície livre em uma área de grande extensão. A região central foi apontada nos estudos de Oliveira (2002), Lima (2004) e Lourecentti (2012) no mesmo município.

O conjunto de dados hidrogeológicos, quando consistentes, permitem a caracterização da análise temporal e auxiliam na criação e mitigação de ferramentas para uma gestão eficaz de aquíferos, de modo a suprir o abastecimento público de maneira eficiente. Com isso, denota-se a importância de uma avaliação temporal detalhada dos sistemas aquíferos, como forma de controle e aperfeiçoamento da exploração de águas para abastecimento.

Logo, a elaboração de mapas potenciométricos se torna essencial para a continuidade desses estudos, colaborando com o acervo de informações e pesquisas relacionados a este aquífero.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

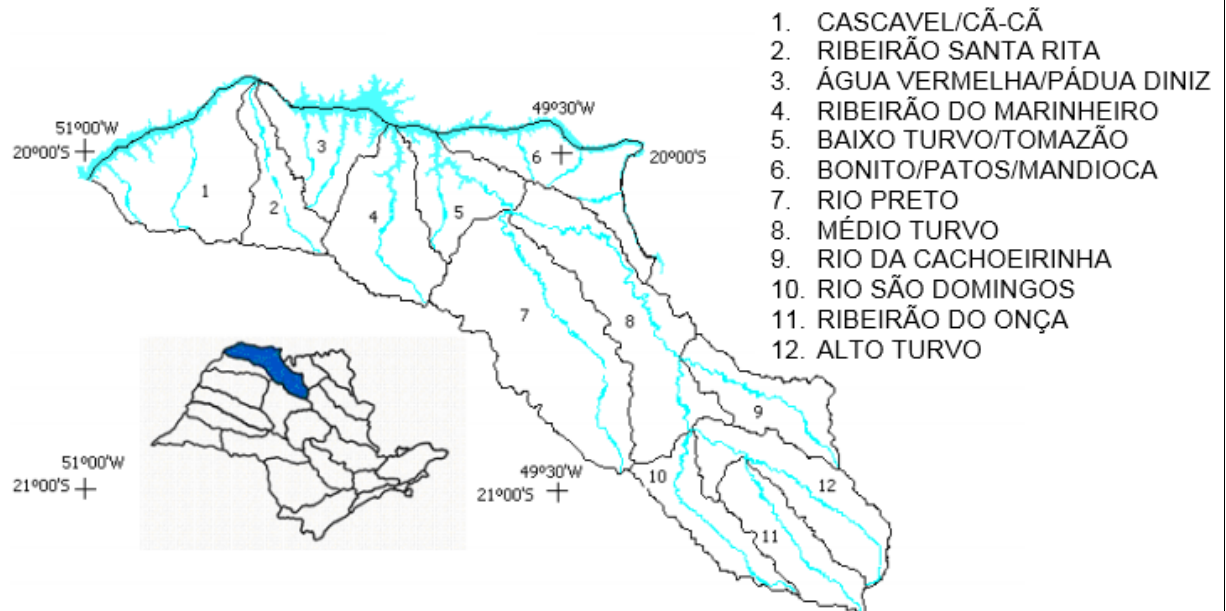
3.2.1 Localização da área de estudo

O município de São José do Rio Preto localiza-se na região Noroeste do estado de São Paulo (Figura 5), a cerca de 442 km da capital, nas coordenadas 20°49'11" de latitude Sul e 49°22'46" de longitude Oeste e possui uma população 460.671 pessoas, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2019).

A cidade foi emancipada de Jaboticabal na década de 1850, e o nome do município advém de uma combinação entre o nome do padroeiro, São José, e o

78% (Sendo 50% Bauru e 28% do Guarani), enquanto que a captação de mananciais superficiais é feita no rio Rio Preto com 22% (FREITAS, 2019).

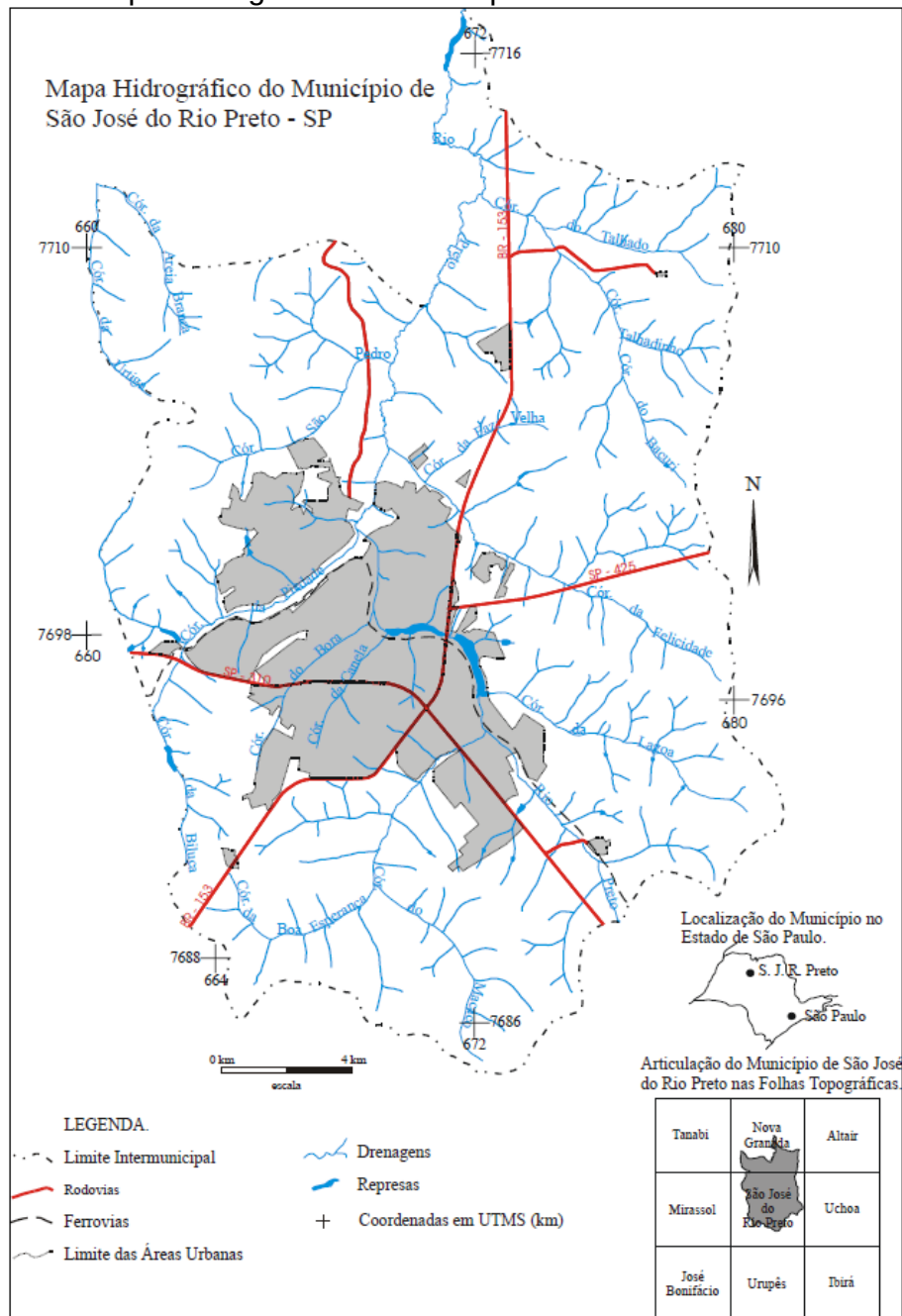
Figura 6 – Sub Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos da UGRHi 15



Fonte: Carvalho (2013).

O município de São José do Rio Preto localiza-se inserido na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 15 – Turvo/Grande (Figura 6), a 4ª maior UGRHI do estado de São Paulo, estando inserido na sub-bacia do Rio Preto. Os afluentes pertencentes a sub-bacia do Rio Preto (Figura 6) são: Córrego da Piedade, São Pedro, do Macaco, da Lagoa ou da Onça, do Canela, da Felicidade, do Borá, da Anta, do Talhado e dois lagos artificiais formados pelo Rio Preto (LEME, 2012), os quais são apresentados na Figura 7. No entanto, devem ser levados em maior consideração córregos como do Borá, do Canela e da Piedade, pois estes atravessam a área urbana e, no passado, foram os receptores de quase toda a carga de esgoto gerada pela cidade.

Figura 7– Mapa Hidrográfico do município de São José do Rio Preto - SP



Fonte: Lima (2004).

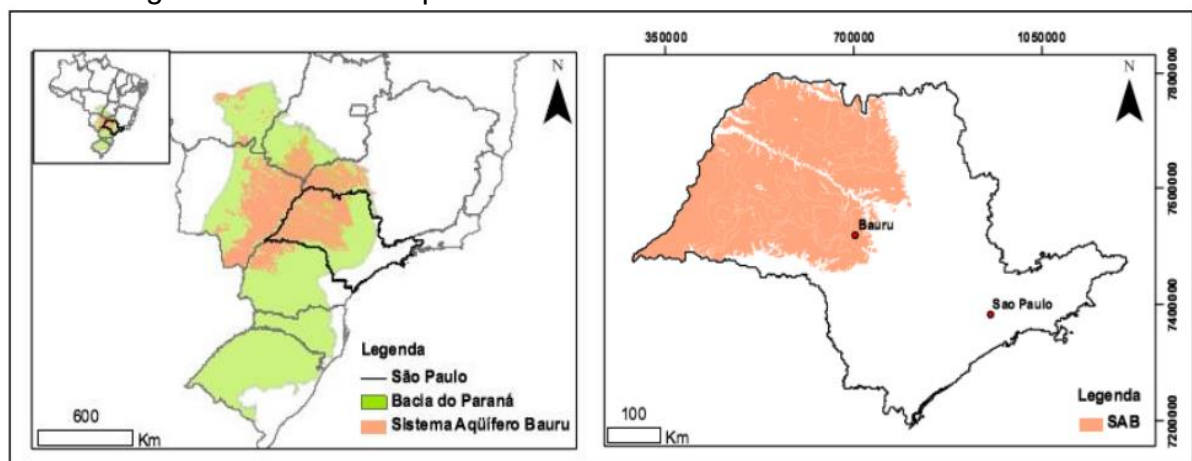
A área de interesse deste estudo possui três importantes sistemas aquíferos amplamente utilizados na captação de águas subterrâneas, sendo: Bauru, Guarani e Serra Geral. Contudo, o Aquífero Bauru possui uma elevada quantidade de poços tubulares no município quando comparado aos demais aquíferos (FREITAS, 2019).

3.2.2 Geologia

O SAB abrange os estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás e parte do Paraguai, como demonstrando na Figura 8, estendendo-se por uma área total de 370.000 km² (ARID, 1970; CPRM, 2012).

No estado de São Paulo, o SAB ocupa a metade Oeste, numa área de cerca de 96.900 km², segundo Iritani e Ezaki (2012) e apresenta espessuras médias em torno de 100-150 metros (CAMPOS *et al.*, 2000).

Figura 8 - Sistema Aquífero Bauru no Brasil e Estado de São Paulo

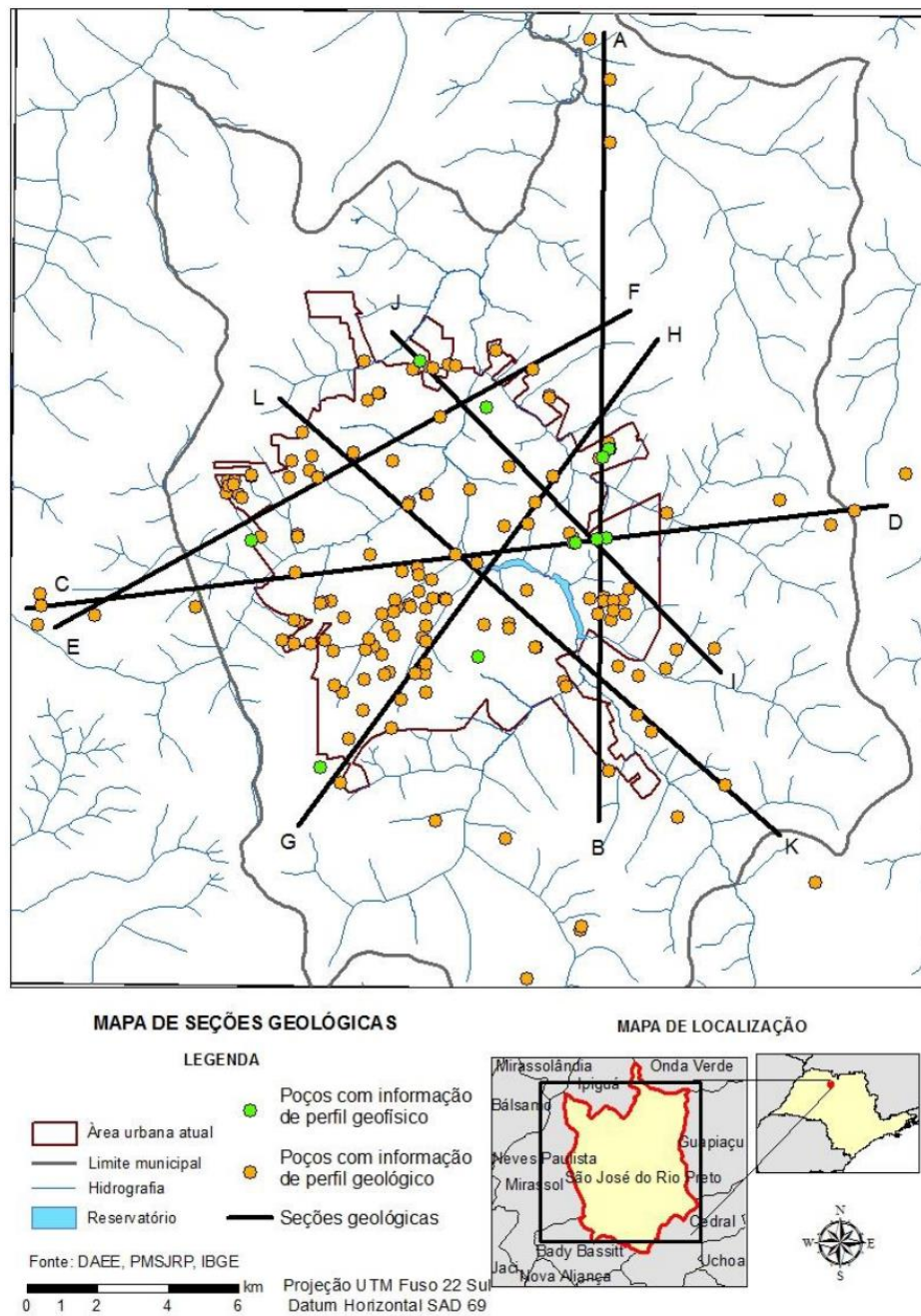


Fonte: Silva (2009).

Sua área é totalmente aflorante em superfície, isto é, não possui qualquer outra barreira geológica que mantenha suas águas confinadas, caracterizando um comportamento de aquífero livre, o que significa que a recarga de água neste caso se faz por toda sua extensão (IRITANI; EZAKI, 2012). Entretanto, na base do SAB são observados, com exceção das regiões de Bauru e Agudos, derrames basálticos, que compõem a Formação Serra Geral e que cobrem de forma parcial as rochas das Formações Botucatu e Pirambóia (SILVA, 2009).

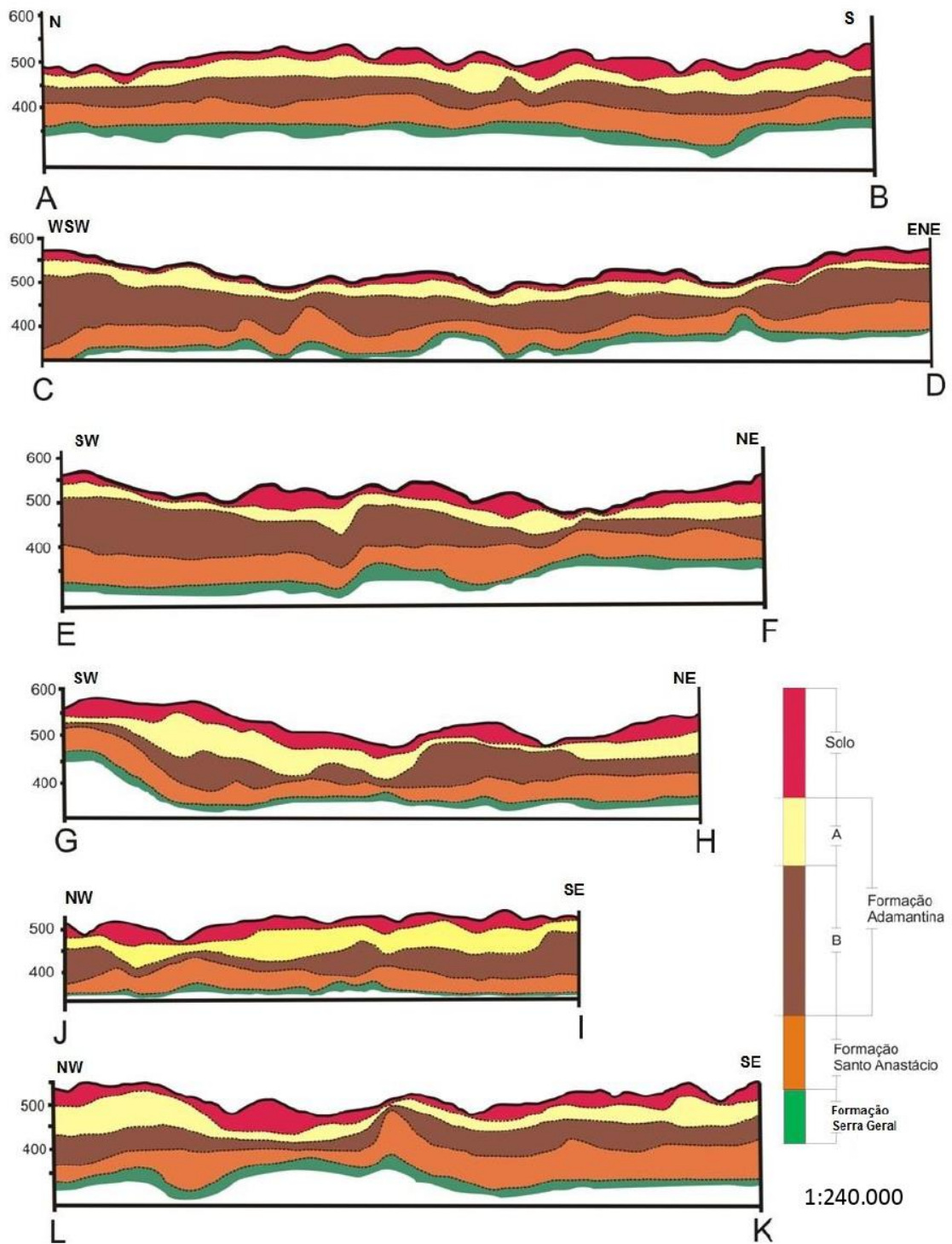
A divisão estratigráfica do Grupo Bauru proposta por Soares *et al.* (1980), ainda aceita e utilizada, são as formações Adamantina, Caiuá, Marília e Santo Anastácio, sendo as formações Adamantina e Santo Anastácio mais representativas na região de São José do Rio Preto. Tais seções geológicas são melhor detalhas nas Figuras 9 e 10 em seis seções apresentadas por Carvalho (2013).

Figura 9 – Mapa de localização das seções geológicas traçadas no município de São José do Rio Preto - SP



Fonte: Carvalho (2013).

Figura 10 - Seções geológicas traçadas do município de São José do Rio Preto - SP



Fonte: Carvalho (2013).

A Formação Adamantina, com espessura média de 100 metros, é constituída litologicamente por bancos de arenitos dos quais se intercalam com bancos de siltitos ou arenitos lamíticos, constituindo um aquífero que fornece baixos valores hidrodinâmicos, sendo sua produtividade atrelada à espessura das camadas arenosas atravessadas (SOARES, 1980; BARCHA, 1980).

Em profundidade, com espessura média de 50 metros, ocorre a Formação Santo Anastácio com constituição litológica arenosa que favorece um maior armazenamento e transmissão de águas subterrâneas e, apresenta um contato na base com a Formação Serra Geral (SOARES, 1980). Barcha (1980) observou um desempenho hidrogeológico melhor na Formação Santo Anastácio quando comparado à Formação Adamantina.

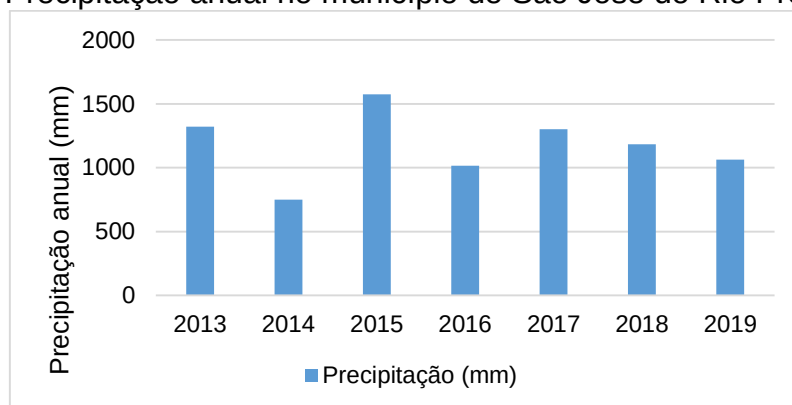
3.2.3 Aspectos climáticos

A recarga de aquífero livres como o Aquífero Bauru ocorre principalmente pela água da chuva, a caracterização climática do município torna-se de grande interesse nesse estudo.

Em relação aos aspectos climáticos no município é caracterizado como Aw (tropical úmido com inverno seco) na classificação de Köppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007).

Os índices de chuva anuais foram selecionados a partir da estação pluviométrica do DAEE (B6-043), localizada em São Jose do Rio Preto, obtidos entre 2013 e 2019 e são demonstrados no Gráfico 1. A pluviosidade em 2014 (Gráfico 1) apresentou valores abaixo da média quando comparado aos demais, provavelmente por ter sido um ano de pouca chuva.

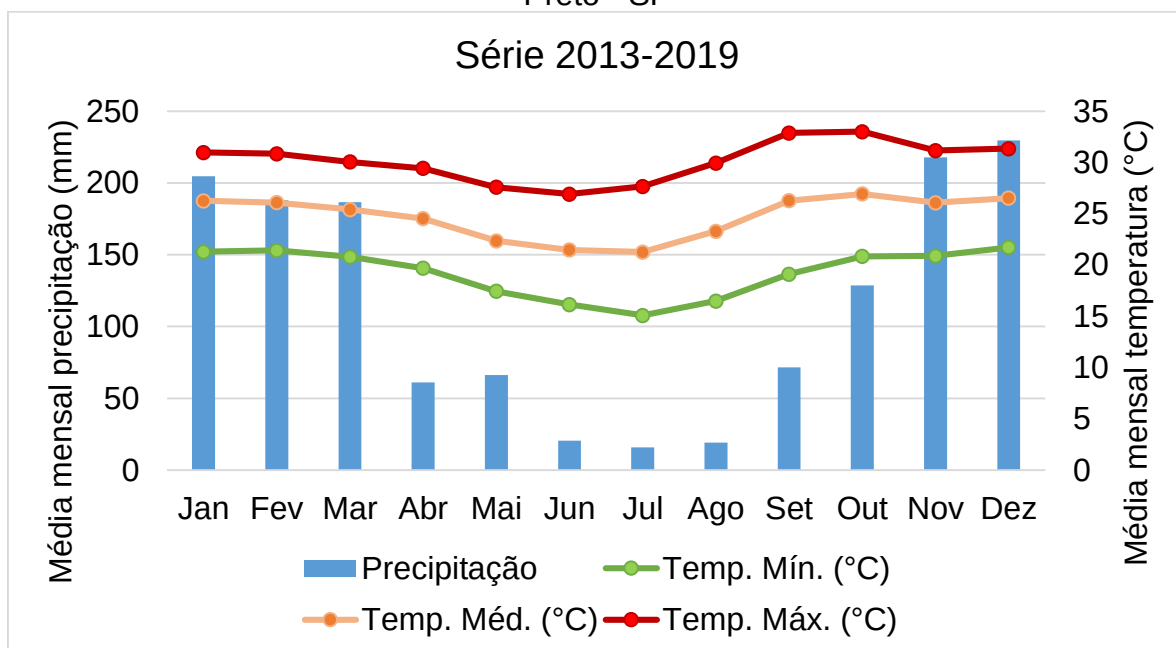
Gráfico 1 – Precipitação anual no município de São José do Rio Preto - SP



Fonte: Adaptado de DAEE (2020).

O clima possui uma temperatura média observada entre 2013 e 2019 de 24,59 °C, sendo os meses mais frios chegando a média mínima de 19,14 °C (maio a agosto), e os mais quentes a média máxima de 30,03 °C (setembro a abril) (AGRITEMPO, 2020). Os dados de chuva obtidos do DAEE (2020) são representados pelo Hietograma no Gráfico 2 e foram relacionados com dados da temperatura média mensal anual observada para o mesmo período utilizando dados do Agritempo (2020).

Gráfico 2 - Hietograma de chuvas e temperatura do município de São José do Rio Preto - SP

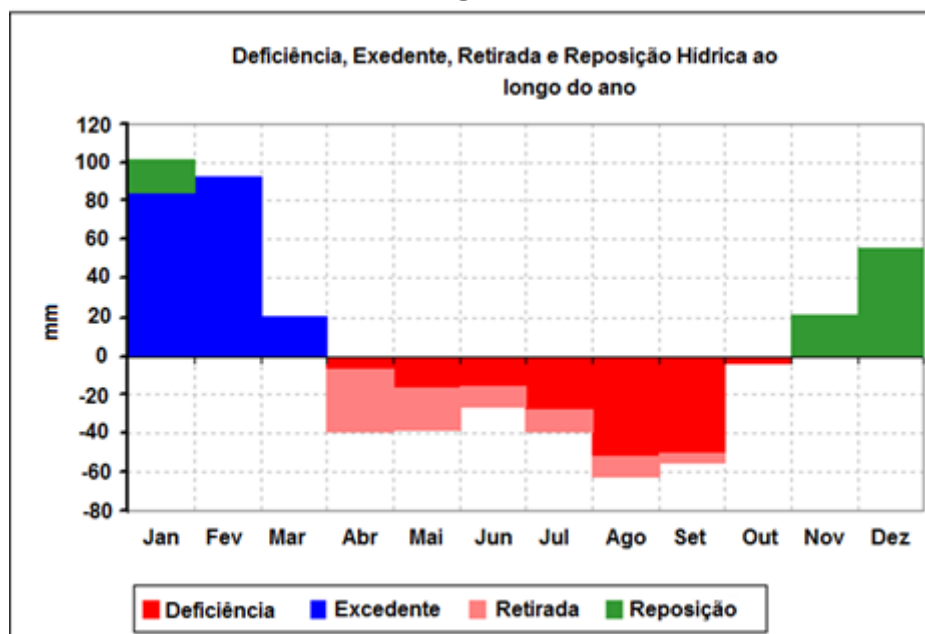


Fonte: Adaptado de Agritempo (2020) e DAEE (2020).

As chuvas no município são concentradas de outubro a março e o período mais seco se concentra entre os meses de abril a setembro, como apresentado no Gráfico 3.

No mesmo sentido, o extrato do balanço hídrico também traz importantes informações que podem auxiliar no entendimento das recargas de água. De acordo com dados da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2019) (Gráfico 3), nota-se que nos meses entre novembro a março, o extrato é positivo ao passo que entre abril a outubro, o extrato apresenta déficit.

Gráfico 3 – Extrato do Balanço Hídrico do município de São José do Rio Preto - SP



Fonte: Adaptado de Embrapa (2019).

As informações possibilitaram separar dois distintos períodos os quais auxiliaram na organização dos dados de medição durante o período estudado de 2013-2019.

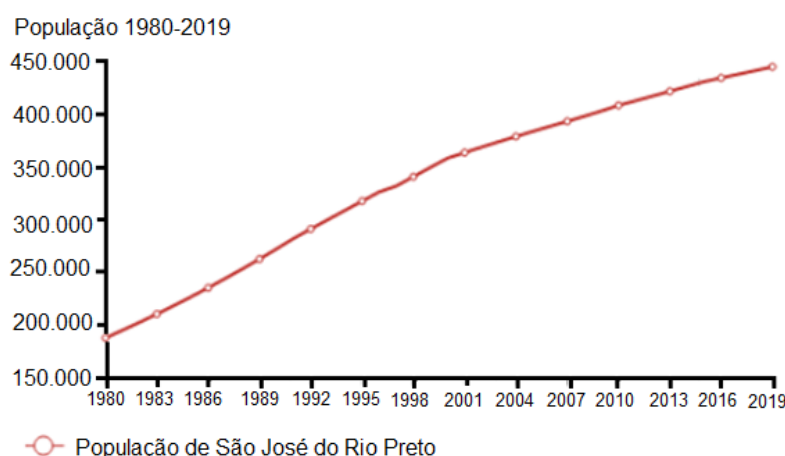
3.2.4 População e crescimento urbano

O Município de São José do Rio Preto apresentou importantes mudanças no uso e ocupação do solo ao longo dos anos em comparação realizada entre os anos de 1980 a 2019. Fatores como o crescimento populacional e o crescimento da infraestrutura urbana (promovendo o aumento da demanda por água por um

lado, e por outro a impermeabilização do solo), podem influenciar na quantidade de água subterrânea disponível.

Os dados referente ao crescimento populacional demonstraram crescimento, o que pode ter solicitado maior demanda de água subterrânea (Gráfico 4).

Gráfico 4- Crescimento da população de São José do Rio Preto - SP no período de 1980-2019



Fonte: Adaptado de Sistema Estadual de Análise de Dados - SEADE (2019).

As mudanças do uso e ocupação do solo em quinquênio são ilustradas na Figura 11, onde se demonstra o crescimento da área urbana próxima à Represa Municipal, nomeada na Figura 11 como Corpo D'água.

Atividades relacionadas à agricultura e pecuária tiveram crescimento elevado, conforme pode-se observar na Figura 11. Em 1980, havia apenas uma região concentrada com atividades de agricultura, enquanto que em anos posteriores se mostrou crescente e expansiva em toda a região rural. A zona rural demonstrou taxas de recarga reduzidas, em função da mudança da vegetação nativa e das atividades agropastoris, como apontado por Wendland (2013).

O impacto dessas mudanças geradas do crescimento urbano para o município, segundo Wendland (2013), pode resultar em dois fatores que influenciam a dinâmica do abastecimento do aquífero: impermeabilização da superfície pela urbanização e recarga artificial através das perdas nas redes de distribuição de água e coleta de esgotos do município.

O crescimento da infraestrutura urbana demonstrado na Figura 11 e Gráfico 5, pode exercer importante influencia na dinâmica de abastecimento do aquífero

Bauru nas áreas do município, além é claro, do aumento da necessidade de água por conta da demanda populacional (HIRATA *et al.*, 2019).

Figura 11 - Mudanças do uso e ocupação do solo no município de São José do Rio Preto - SP

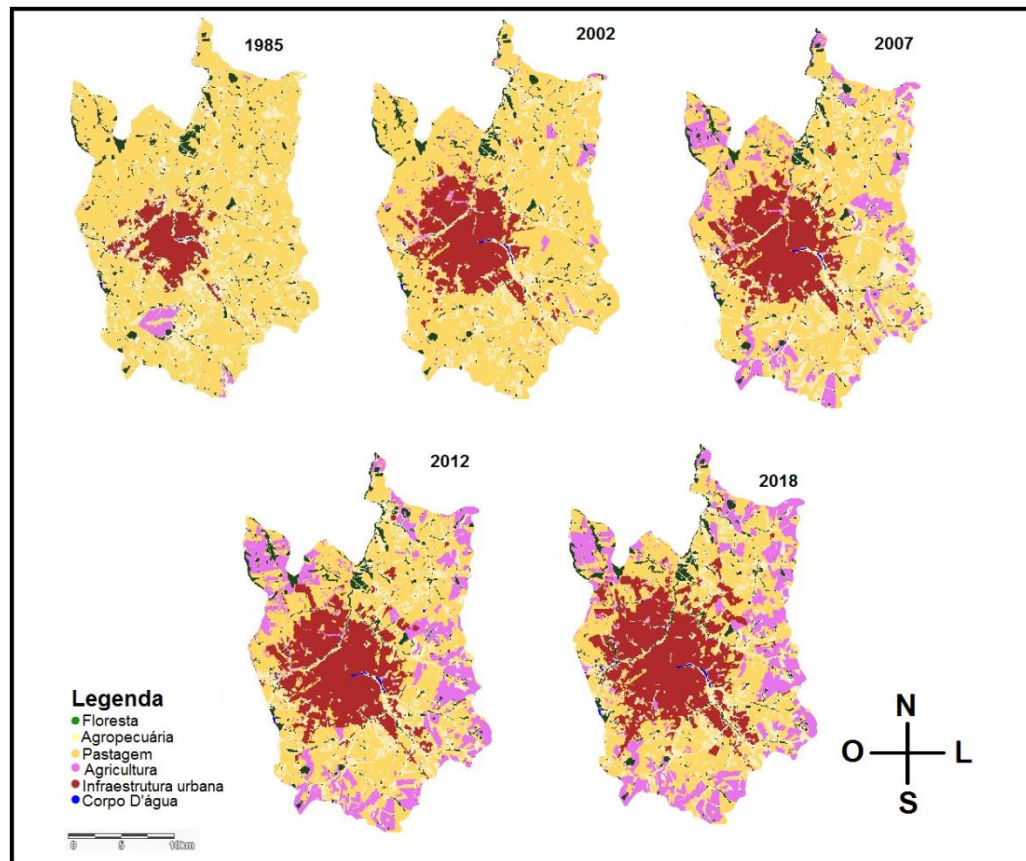
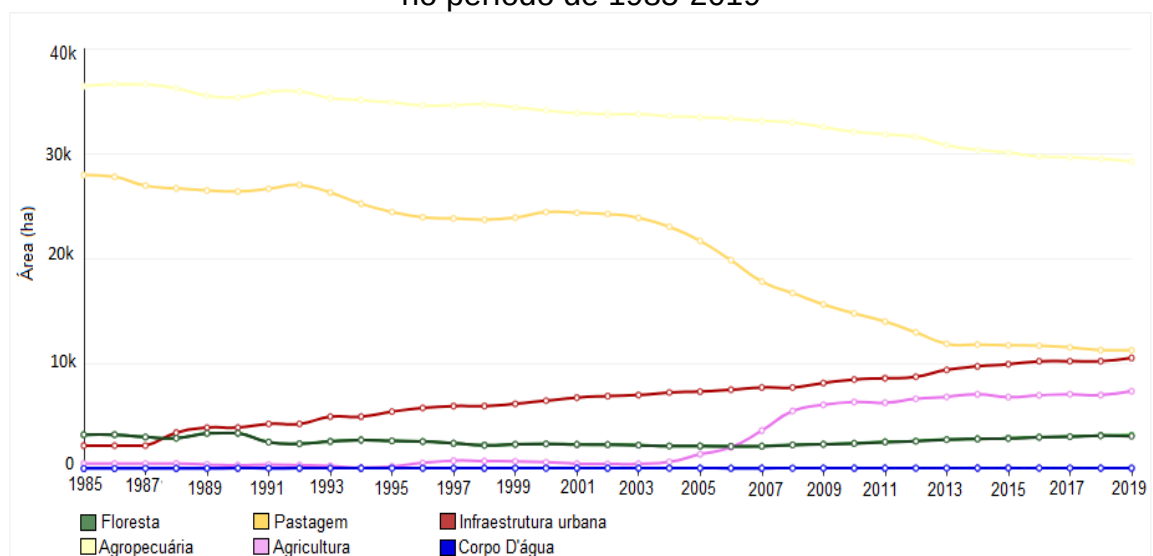


Gráfico 5 - Dados de uso e ocupação no município de São José do Rio Preto – SP no período de 1985-2019



3.2.5 Poços de água subterrânea no município

As informações dos poços de abastecimento urbano que atingem o Aquífero Bauru utilizado neste estudo são resultados de uma base de dados do órgão responsável pela rede de água e esgoto do município, o SEMAE.

A base de dados fornecida tornou possível relacionar informações como o número de poços perfurados ao longo dos anos, conforme pode ser acompanhando na Tabela 1 e Gráfico 6, com a primeira perfuração que explota do Aquífero Bauru datada de 1946, e o maior número de perfurações no período de um ano que ocorreu em 2015, com 26 poços.

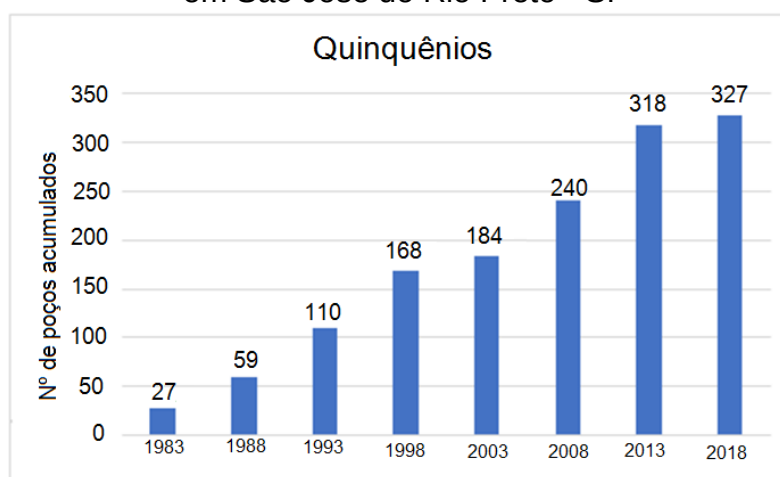
No Gráfico 6, os dados considerados para elaboração foram poços com data de perfuração, sendo portanto excluídos aqueles que tinham essa informação incompleta.

Tabela 1 - Demonstrativo de perfurações anuais de poços que atingem o Bauru no município de São José do Rio Preto – SP

Registro de Perfurações													
Ano	1946	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
Nº	1	11	6	3	1	6	7	6	6	8	4	5	12
Ano	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Nº	17	9	7	9	11	24	5	5		1	1	7	3
Ano	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018		
Nº	11	13	9	17	4		15	26	21	15	9		

Fonte: Adaptado de SEMAE (2019).

Gráfico 6 - Evolução acumulada dos poços que utilizam água do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto - SP

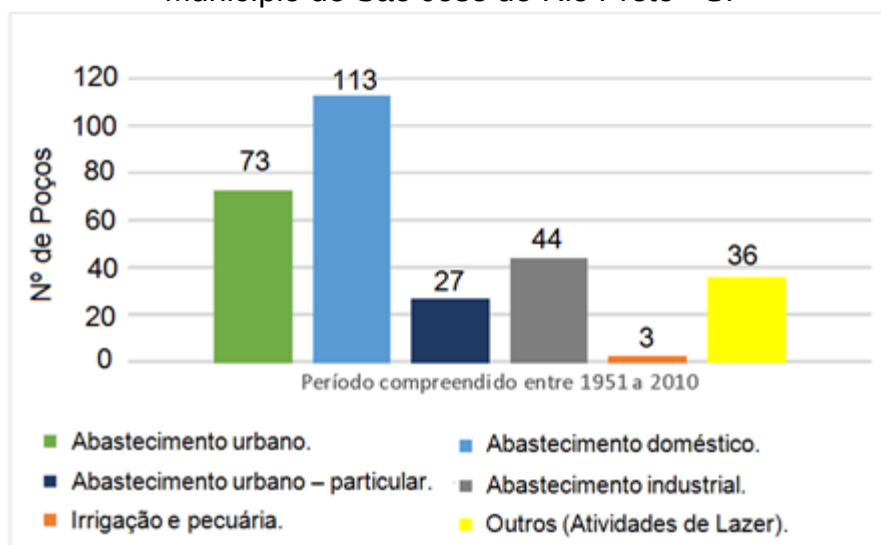


Fonte: Adaptado de SEMAE (2019).

A utilização da água subterrânea do Aquífero Bauru no município, apresentada no Gráfico 7, possui diversas finalidades, tais como: industrial, abastecimento público e particular, irrigação, uso doméstico e lazer. O Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS apresenta atualizações dos poços do Município de São José do Rio Preto semestralmente.

A elaboração do Gráfico 7 contou com informações do SIAGAS (2019), cujos dados foram selecionados de acordo com a categoria de uso e data. Mesmo que a totalidade seja maior quando captada a área da região, a quantidade de poços considerados para confecção deste deve ser levada em consideração de acordo com os itens mencionados, como a data de perfuração e a categoria de uso. Os dados do SIAGAS não foram utilizados e/ou considerados nos resultados desta pesquisa.

Gráfico 7 - Classificação pelo uso dos poços que atingem o Aquífero Bauru no Município de São José do Rio Preto - SP



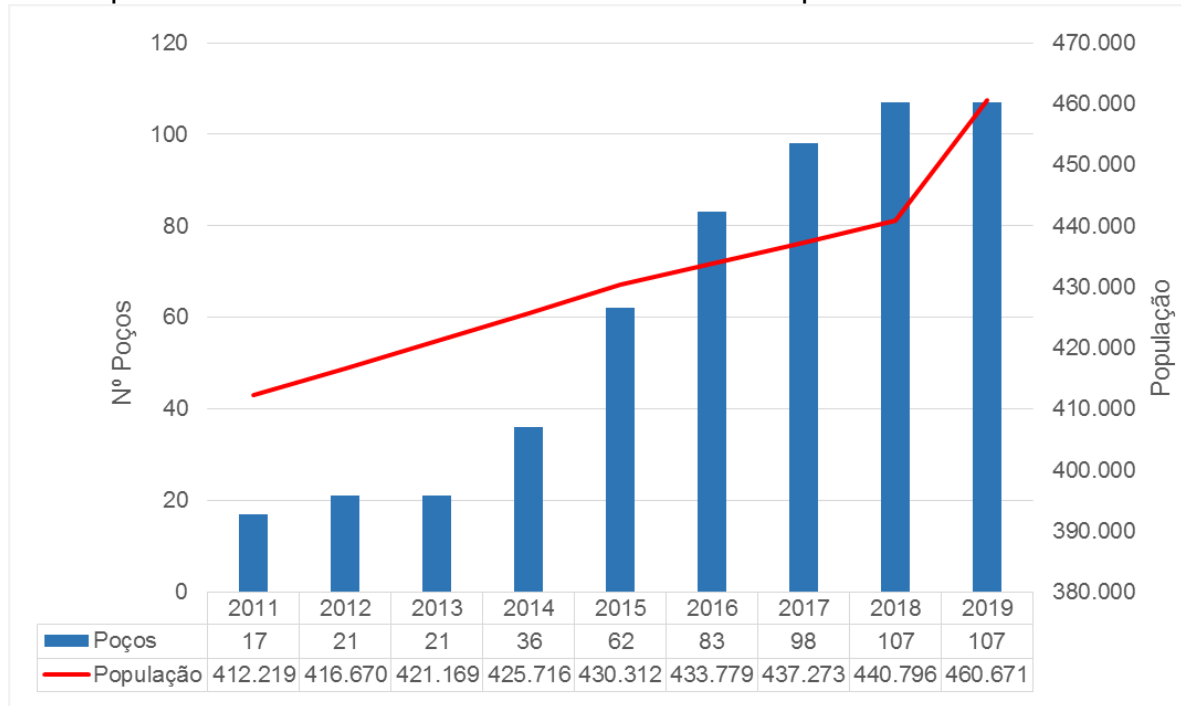
Fonte: Adaptado de SIAGAS (2019).

As informações relacionadas à utilização da água, auxiliam na gestão adequada do manancial. Medidas como controle de vazão necessária do poço, e o tempo de bombeamento tem como objetivo evitar a exploração em demasia do Aquífero Bauru.

A combinação dos dados de crescimento populacional e quantidade de perfurações de poços que exploram do Aquífero Bauru demonstrou uma tendência ascendente quando observado o Gráfico 8, denotando uma possível evolução no número de perfurações para acompanhar o crescimento populacional. O aquífero

Bauru pode estar sujeito a perfurações de poços irregulares (BARCHA, 1998), comprometendo sua capacidade para abastecer a população.

Gráfico 8 - Crescimento populacional relacionado com perfurações de poços no Aquífero Bauru em São José do Rio Preto - SP no período de 2011-2019



Fonte: Elaborado pela autora. Dados do SEMAE (2019) e SEADE (2019).

A exploração quando maior que a recarga pode proporcionar um estresse hídrico na região, sendo possível utilizar a avaliação do Nível Estático e do Nível Potenciométrico para auxiliar na identificação das áreas mais afetadas pela exploração da água subterrânea. Tais informações são de aplicação direta e prática para a gestão adequada dos serviços públicos de abastecimento de água.

Assim, torna-se de grande interesse não apenas o diagnóstico pontual dos poços monitorados, mas sim, a elaboração de mapas que permitam vislumbrar e compreender a variabilidade espacial-temporal tanto do Nível Estático quanto do Nível Potenciométrico, de forma a proporcionar dados efetivos para um melhor gerenciamento de ações de conservação dessas águas. Diante desse desafio técnico, a geoestatística se destaca como uma importante ferramenta de análise no estudo dos recursos hídricos subterrâneos, pois várias características da dinâmica das águas subterrâneas exigem o conhecimento e o entendimento de suas tendências espaço-temporais (KUMAR, 2006; VICENTE; LIMA; MARQUES, 2018).

3.3 GEOESTATÍSTICA

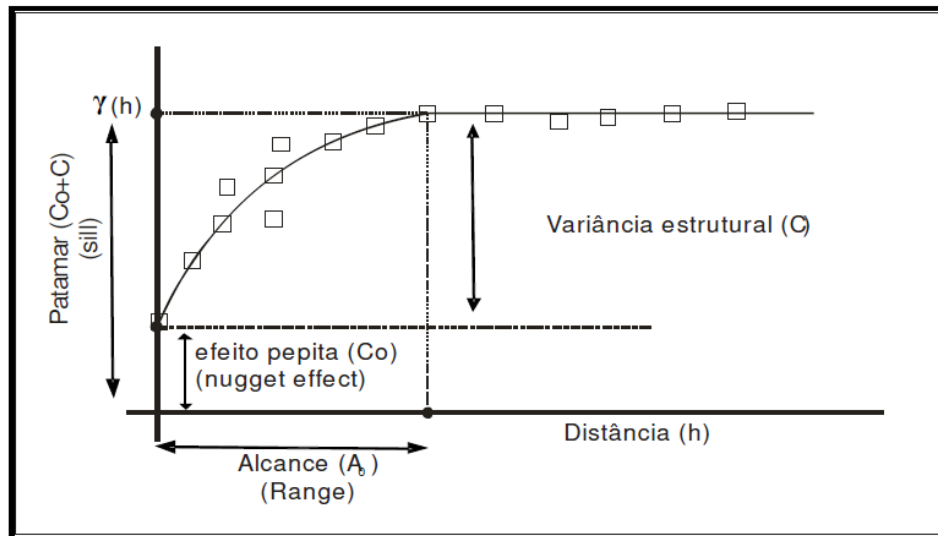
3.3.1 Conceitos básicos

A geoestatística teve início quando Daniel G. Krige (KRIGE, 1951) observou que a relação entre a variância de dados de mineração apresentava uma estruturação espacial em função da distância de amostragem. Matheron (1962) a partir desse pressuposto desenvolveu então a teoria das variáveis regionalizadas, a qual foi aperfeiçoando nos anos seguintes. Tal fato tornou possível a análise espacial de dados com base no comportamento natural da variável de interesse, sendo hoje, tal técnica, aplicada a inúmeras áreas de pesquisa, principalmente na área ambiental. As chamadas variáveis regionalizadas abordadas por Matheron (1962) são caracterizadas pela ocorrência de um fenômeno no espaço ou no tempo, que determinam a dependência e o comportamento espacial das observações (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Assim, a aplicação das técnicas de geoestatística visa duas tarefas distintas, segundo Nas (2009), sendo a quantificação da dependência espacial das amostras e o mapeamento por krigagem (elaboração de uma superfície de valores por interpolação).

O grau de dependência espacial entre as amostras de uma determinada variável é demonstrado pelo semivariograma, que é a ferramenta que descreve a variabilidade espacial da variável regionalizada (LANDIM, 2006; MOUSAVIFAZL; ALIZADH; GHAFRAN, 2013). Assim, para locais não amostrados, a interpolação de dados por krigagem será definida pelo ajuste do semivariograma (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Na Figura 12 é apresentado um modelo semivariográfico com comportamento próximo do ideal, tendo como destaque a variância e o erro observado, o alcance da dependência espacial e o patamar. No semivariograma apresentado na Figura 12 observam-se os seguintes componentes: Alcance (A_0), Patamar (C_0+C), Variância Estrutural (C) e o efeito pepita ou erro (C_0).

Figura 12 - Modelo Semivariográfico de comportamento ideal



Fonte: Amaral e Monteiro (2017).

A distância que $\gamma(h)$ atinge determina o patamar e a variância dos dados é nomeada alcance (A). Este elemento reflete a distância máxima em que duas amostras se encontram dependentes entre si (LANDIM, 2006). Ou seja, para distâncias maiores que o alcance pode-se dizer que é esperado uma interação aleatória entre dois valores amostrados. Este valor pode variar em função da escala (malha de coleta), mas também em função do comportamento espacial de algumas variáveis que sofrem por exemplo, influência sazonal.

O efeito pepita (C_0) refere-se à variabilidade não explicada (ou erro) que pode ser oriunda de uma pequena escala não abrangida pela malha de coleta de dados; ou oriunda da variabilidade induzida por erros de amostragem e erros computados no momento de algumas análises laboratoriais. Quando o efeito pepita apresenta valor constante e iguais ao patamar temos o chamado Efeito Pepita Puro (EPP) que representa a dependência espacial nula. Assim, neste caso, a dependência espacial, se existir, só será manifestada à distâncias menores do que o menor espaçamento entre as amostras (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Nos casos em que ocorre o efeito pepita puro, a análise semivariográfica não poderá ser realizada, uma vez que não existe confiabilidade entre os valores. Deste modo, a análise geoestatística não poderá ser realizada e deverão ser adotadas outras abordagens analíticas.

Por outro lado, a variância estrutural ou contribuição (C_1) representa a diferença entre o nível definido pela semivariância inicial (efeito pepita) e pelo patamar (C_0+C). E, diferentemente do efeito pepita, a variância estrutural

corresponde ao acerto (comprovação de que a variabilidade espacial apresenta-se estruturada), sendo possível o posterior mapeamento (estimativas) da variável de interesse por meio da técnica de interpolação por krigagem.

A forma de validar a modelagem originária do semivariograma é denominada validação cruzada. De acordo com Landim (2006), esse método de validação, depois de obtido o modelo semivariográfico final, cada valor real é removido e, usando-se os demais valores estimados (por krigagem), um novo valor é observado para esse ponto. Assim, um gráfico entre valores estimados e observados pode ser construído mostrando a relação entre eles. Nesse sentido, os ajustes semivariográficos devem buscar aqueles que melhor estimam os valores observados, o que em outras palavras, refere-se aquele ajuste que produza uma validação cruzada com uma regressão linear que apresente um intercepto igual, mais próximo de zero, e coeficiente angular mais próximo a 1 (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VICENTE; LIMA; MARQUES, 2018).

Valores ideais nem sempre são alcançados na validação cruzada, porém, conforme reforça Landim (2006), essa ferramenta não prova que o modelo escolhido é o mais correto, mas sim que o mesmo não é inteiramente incorreto. Assim, os parâmetros do semivariograma auxiliam na descrição da estruturação da variabilidade espacial dos dados que são utilizados para estimar valores em pontos não amostrados, pelo processo chamado de krigagem (MOUSAVIFAZL; ALIZADH; GHAFRAMAN, 2013).

A krigagem pode ser compreendida como uma estimação entre valores de variáveis distribuídas espacialmente. As inúmeras abordagens de krigagem, como: linear, simples, média, ordinária, podem ser aplicadas a diversos estudos, dependendo da natureza do uso e funcionalidade do modelo quanto à aplicação. A krigagem ordinária é a técnica mais utilizada pela facilidade e pelos resultados apresentados não tendenciosos.

Na krigagem ordinária, a média das variáveis é considerada desconhecida e consiste em estimar linearmente uma variável regionalizada que atenda à uma hipótese intrínseca. Caso os dados não se aproximem de zero, os estimadores serão considerados confiáveis (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Assim, a interpolação por krigagem quando comparada a outros métodos de análise apresenta melhor resultado com relação à confiabilidade (ZIMMERMAN *et al.*, 1999). Sendo deste modo, essa ferramenta estatística torna-se de grande

interesse para inúmeros cientistas que buscam conhecer e estimar o comportamento espacial de variáveis ambientais, como por exemplo, das águas subterrâneas.

3.3.2 Geoestatística aplicada aos estudos das águas subterrâneas

As técnicas geoestatísticas têm sido utilizadas como ferramenta de estimativa e mapeamento de variáveis naturais em diversos trabalhos científicos (RASHID *et al.*, 2020), amplamente empregados no campo da hidrologia, com especial interesse no monitoramento de variáveis/parâmetros de qualidade das águas subterrâneas.

Segundo Kumar (2006), o uso da geoestatística se mostra eficiente nos estudos e medições de variáveis em águas subterrâneas tendo em vista que a gestão desse tipo de recurso natural requer um monitoramento constante pelo fato de estarem relacionados às tendências espaço-temporais. Assim, podem ser retratados diversos estudos relacionados aos recursos hídricos cujos a geoestatística apresentou-se como importante técnica de análise, como por exemplo:

Bettú e Ferreira (2005) produziram modelos hidrológicos para relacionar a morfologia da superfície potenciométrica com a topográfica através de dados de Nível Estático e obtiveram resultados da potenciometria do aquífero livre e sua variação; Rivest e Marcotte (2012) aplicaram técnicas geoestatísticas para medir concentrações de contaminação da água subterrânea e obtiveram como resultado mapas que reproduziram os modelos regionais esperados, denotando áreas contaminadas e afetadas pelo rebaixamento do nível do aquífero.

Tais abordagens são encontradas tanto em trabalhos a nível internacional quanto nacional. Taghizadeh-mehrjardi, Jahromi e Heidari (2008), utilizaram da geoestatística para estimar espacialmente os teores de diversas variáveis de qualidade de água na região da planície de Yazd-Ardakan, no Irã. Os resultados utilizando a krigagem e a cokrigagem se mostraram promissores produzindo apreciáveis mapas.

Du Bui (2009) por sua vez, aplicou a geoestatística em séries temporais para medir quantitativamente e qualitativamente a água subterrânea. Seu objetivo foi verificar áreas de intrusão salina que ameaçavam o desenvolvimento

sustentável do aquífero por excessiva exploração em aquíferos no Delta do Rio Vermelho (Vietnã) e obteve resultados das tendências de queda dos níveis do aquífero de acordo com os locais dos mapas gerados, indicando maior declínio nas áreas urbanas.

Jang e Chen (2015) utilizaram tais técnicas espaciais em Taiwan para estabelecer zonas de proteção das águas subterrânea em áreas agrícolas que tem alta disposição em levar Nitrato em aquíferos.

Séraphin, Valleut-Coulomb e Gonçalves (2016) utilizaram da geoestatística para quantificar o volume de água que o aquífero Chau (Sul da França) recebia por recarga artificial e natural. Os autores concluíram que a recarga superficial era resultado do fluxo de retorno da irrigação através dos resultados gerados.

Marchant *et al.* (2018) aplicaram técnicas geoestatísticas para avaliar a variação do nível freático no aquífero Chalk no Reino Unido através de 948 pontos de amostragem e dados temporais de 1960 a 2013. Seus resultados foram de grande importância para o entendimento da dinâmica freática na região, pois pode ser usado para fornecer previsões de curto prazo do estado de seca das águas subterrâneas se previsões adequadas da meteorologia forem suficientes.

Crosbie *et al.* (2018) estabeleceram na Austrália (nas Bacias de carvão Sydney, Gunnedah, Gloucester e Surat) um estudo com a finalidade de calcular a recarga de água subterrânea e estimar os níveis de cloreto através de equação de regressão e krigagem. Seus resultados indicaram a viabilidade do uso das ferramentas geoestatísticas na análise da recarga aquífera, estimando a quantidade possível de entrada em cada unidade, de acordo com a idade geológica.

Assim, a nível internacional, vários outros trabalhos podem ser apresentados tais como de Theodoridou, Varouchakis e Karatzas (2017) e de Varouchakis, Theodoridou e Karatzas (2019).

Em nível nacional, inúmeros estudos também podem ser apresentados, como o trabalho de Fontes Junior e Montenegro (2017) que estudaram a potenciometria e salinidade de um aquífero aluvial e sua relação com a precipitação e evapotranspiração na região semiárida de Pernambuco. Utilizou-se dados de um período entre 2002-2013. Os mapas produzidos pelos autores identificaram um padrão temporal de variação da água subterrânea, sendo um suporte para quantificação dos recursos hídricos da região.

Já Lisboa, Carvalho e Mendes (2016) utilizaram-se de dados do SIAGAS e aplicaram geoestatística para avaliação de parâmetros hidrogeológicos e produzir mapas de vulnerabilidade em aquíferos em Belém do Pará. Seus resultados demonstraram que a geoestatística foi uma ferramenta útil ao planejamento e gestão para proteção das águas subterrâneas.

No âmbito do Sistema Aquífero Bauru (no estado de São Paulo), Vicente, Lima e Marque (2018), através da análise geoestatística, utilizaram-se 75 poços de monitoramento (com dados entre 2010 a 2012) para elaborar mapas de estimativas da variabilidade espacial do nitrato (N-NO_3) e do cloreto (Cl^-). Do mesmo modo, Marques (2018) avaliou múltiplos parâmetros de qualidade de água no Sistema Aquífero Bauru, apresentando a existência de dependência espacial para a grande maioria das variáveis estudadas.

Nesse mesmo sentido, podem-se destacar os trabalhos regionalizados como o de Manzione (2018) e de Santarosa e Manzione (2018) que também aplicaram técnicas de análise geoestatística para avaliar características hidráulicas em áreas do Sistema Aquífero Bauru no estado de São Paulo.

No âmbito do Sistema Aquífero Bauru, no município de São José do Rio Preto (SP), pode ser destacado importantes trabalhos precedentes ao proposto no presente estudo, como o de Lourencetti (2013) que reuniu dados de nível estático de poços na área do município e utilizou da técnica de krigagem para interpolar mapas e linhas de carga hidráulica dos fluxos subterrâneos, a fim de demonstrar as características e comportamento subterrâneo do aquífero. Como resultado, Lourencetti (2013) demonstrou que houve um rebaixamento quando comparado à Oliveira (2002) que utilizou as mesmas práticas interpoladoras, resultando em recomendações de medidas que limitassem novas perfurações em algumas regiões para evitar a exaustão do manancial.

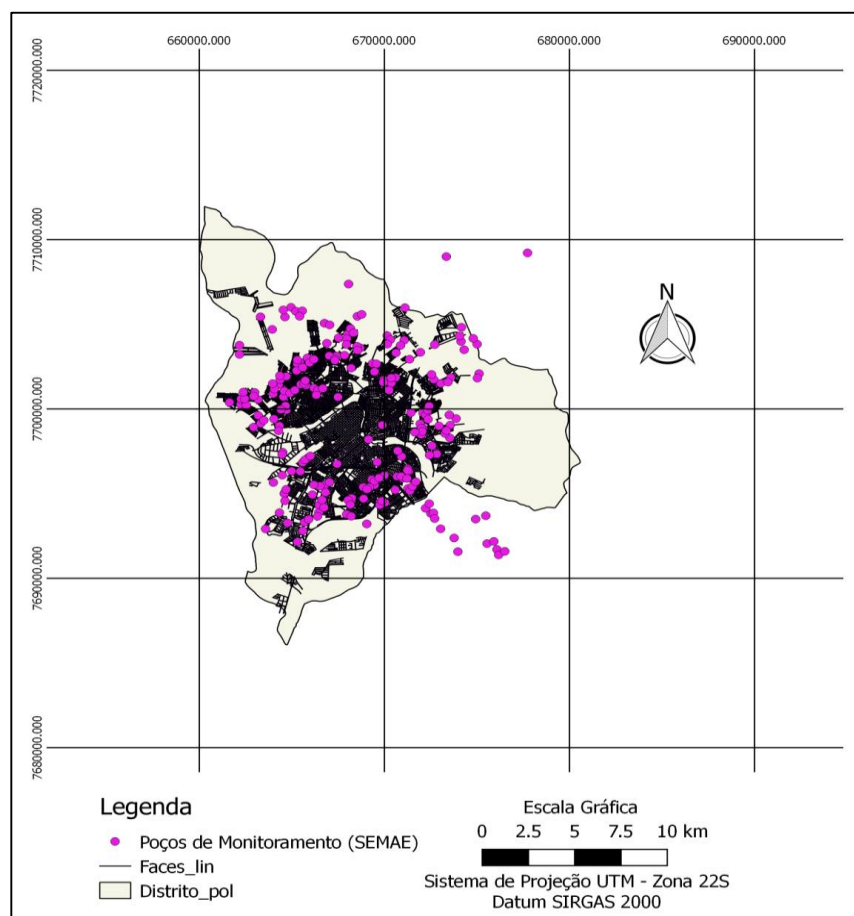
Diante do exposto, fica-se evidenciado que a aplicação da geoestatística e das técnicas de krigagem tem se mostrado de grande importância para o conhecimento da variabilidade espacial de variáveis hídricas, sendo por fim, de grande utilidade ao planejamento e gestão dos recursos hídricos. Assim, essa forma de análise de dados vem de encontro aos objetivos do presente estudo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO E FONTE DE DADOS

A presente pesquisa teve como interesse o município de São José do Rio Preto, estado de SP, Brasil, situado entre as seguintes coordenadas geográficas (20° 56' 45" S – 49° 28' 14" O e 20° 37' 26" S – 49° 14' 47" O). O estudo teve como base os dados/informações da Cota do Terreno e de medições do Nível Estático (NE) coletados a partir de 229 poços de captação subterrânea no Sistema Aquífero Bauru (na área do Município e entorno) (Figura 13). Dos 371 poços listados nos registros do SEMAE, apenas 229 encontram-se ativamente monitorados pelo SEMAE, sendo assim explicado o número reduzido de poços. Por outro lado, cabe ressaltar que nem todos os poços eram avaliados em um mesmo período de estudo neste trabalho.

Figura 13 - Localização da área de estudo e poços de monitoramento



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 ANÁLISE DOS DADOS

As variáveis estudadas foram o Nível Estático (NE) e a Superfície Potenciométrica (SP), sendo a primeira, medida diretamente pelos técnicos do SEMAE, obedecendo a normas adequadas de mensuração.

Por outro lado, a Superfície Potenciométrica foi determinada a partir dos dados do Nível Estático e da Cota do Terreno (C.T.), conforme a equação 1:

$$SP = CT - NE \quad (\text{Eq.1})$$

Os dados-base utilizados abrangem o período de 2013 - 2019. Estes dados foram tabulados e subdivididos em períodos (anuais; e também semestrais: conforme regime hídrico característico do município), de modo a permitir uma análise mais ampla da dinâmica das águas do Sistema Aquífero Bauru no município.

Ressalta-se que para os períodos de interesse (anual ou semestral), ora um ora outro poço não foi monitorado. Assim, para os diferentes períodos estudados o número de poços analisados não foi o mesmo.

Para cada período definido, cada uma das variáveis estudadas passou por análise estatística descritiva clássica utilizando-se da planilha do *Excel* e, posteriormente, foi analisada a dependência espacial por meio do software Gamma Design Software GS+ 7.0 (ROBERTSON, 2004).

Assim, isoladamente para cada variável/período foi realizado o cálculo do semivariograma experimental, tendo como base a pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca conforme a seguinte expressão (LANDIM, 2006).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: $N(h)$ é número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h .

Deste modo, os semivariogramas experimentais foram ajustados observando os seguintes modelos teóricos: exponencial (3), esférico (4) e gaussiano (5):

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{a} \right) \right] \right\}; h > 0 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 \leq h \leq A_0 \quad \text{então} \quad \hat{\gamma}(h) = C_0 + C; h \geq a \quad (\text{Eq. 4})$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h^2}{a} \right) \right] \right\}; 0 < h < d \quad (\text{Eq. 5})$$

sendo: “d” a máxima distância na qual o semivariograma foi definido, “C₀” corresponde ao efeito pepita; “C₀+C” o patamar e “a” o alcance do semivariograma (LANDIM, 2006).

Para os ajustes semivariográficos foram observados inicialmente: a) a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) o maior coeficiente de determinação espacial (R²); e, c) o maior avaliador da dependência espacial (ADE), onde se utilizou a classificação proposta por Zimback (2001), onde: ADE ≤ 25% = variável fracamente dependente; 25% < ADE ≤ 75% = variável moderadamente dependente, e, ADE > 75% = variável altamente dependente.

A definição final do modelo de ajuste, bem como do número de vizinhos interpoladores para a krigagem, foi elaborada tendo como parâmetro o maior coeficiente de correlação (r) entre os valores observados *versus* estimados da validação cruzada (VC). Desta forma, o processo de validação cruzada consistiu na remoção de cada observação pertencente ao conjunto de dados com subsequente estimativa do seu valor. Assim, na presente pesquisa utilizou-se o método de interpolação por krigagem ordinária (YAMAMOTO; LANDIM, 2013), para a verificação/validação da confiabilidade de cada modelo matemático ajustado. Portanto, o modelo final adotado foi aquele que apresentou as melhores estimativas dos valores observados, ou seja, aquele que produziu uma equação de regressão linear entre os valores observados, em função dos valores estimados o mais próximo da bissetriz (intercepto igual a zero e coeficiente angular = 1) (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989).

Após essa etapa, foi realizada a interpolação por krigagem Ordinária uma vez que esta técnica se trata de um estimador linear não enviesado (LANDIM, 2006). Nesse processo de krigagem, as estimativas foram feitas a partir da equação 6 (FARIA, 2013):

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(X_i) \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo: “z*” o valor a ser estimado no ponto não amostrado x_0 ; “N” o número de valores medidos $z(x_i)$ envolvidos na estimativa e “ λ_i ” os pesos associados a cada valor medido $z(x_i)$.

Em seguida, foi realizada a confecção e edição final dos mapas de cada variável/período, utilizando-se a plataforma ArcGis (ESRI, 2011). Os mapas produzidos foram apresentados para discussão e conclusão do trabalho.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA – PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

Os parâmetros da estatística descritiva do Nível Estático (NE) e Nível Potenciométrico (NP) são apresentados na Tabela 2. O coeficiente de variação (CV) foi o primeiro item observado. Como elucidado por Pimentel-Gomes e Garcia (2002), o coeficiente de variação (CV) pode ser considerado baixo quando $CV \leq 10\%$, médio se $10\% < CV \leq 20\%$, alto se $20\% < CV \leq 30\%$, e muito alto se $CV > 30\%$. O CV alto denota dados mais heterogêneos, enquanto que o CV baixo aponta homogeneidade das amostras (Lima, 2012).

O CV da cota apresentaram uma faixa de 3,06 % no ano de 2013 até 4,40 % no ano de 2016 (Tabela 2). A pouca variação do CV deve-se provavelmente ao relevo suave do município.

O CV do NE anual, oscilou entre 28,48 % (NE_15_A) a 38,50% (NE_14_A), para o período de EH 35,06% (NE_19_EH) a 39,71% (NE_18_EH) e para o período de DH, 25,36% (NE_17_DH) a 35,46% (NE_16_DH) (Tabela 2). Foi observada elevada variação dos dados, provavelmente em função da característica física do meio em que o poço se localiza (do solo ou a variação do relevo), mas principalmente devido aos períodos de avaliação, uma vez que as amostras foram coletadas em dias diferentes dentro do mesmo período, o que corrobora com valores mais distintos e um CV mais elevado.

Os valores de menor e maior variação do CV encontrados para os NP em período anual foram de 2,82% (NP_13_A) a 4,43% (NP_16_A), período de EH de 2,89% (NP_18_EH) a 3,84% (NP_16_EH) e no período de DH com 2,02% (NP_17_DH) e 4,77% (NP_16_DH) (Tabela 2). A pouca variação do CV do NP pode ser em função da resultante entre o NE e o relevo, reduzindo a amplitude dos valores e os aproximando.

Tabela 2 - Análise estatística descritiva anual de parâmetros Quantitativos do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto – SP (continua)

Variável ^(a)	Medidas da Estatística Descritiva							
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente		
			Min.	Max.		Variação (%)	Curtose	Assimetria
2013								
Cota_13_A ⁽²⁴⁾	518,88	517,27	490,00	560,62	15,91	3,06	0,73	0,41
NE_13_A ⁽²⁴⁾	45,84	46,57	10,45	81,40	15,63	34,09	0,58	0,15
NP_13_A ⁽²⁴⁾	473,04	471,60	442,25	508,55	13,37	2,82	2,08	0,49
2014								
Cota_14_A ⁽²²⁾	529,72	532,00	489,00	560,62	21,18	3,99	-0,25	-0,47
NE_14_A ⁽²²⁾	51,34	48,15	16,80	84,60	19,77	38,50	-0,92	0,16
NP_14_A ⁽²²⁾	478,37	475,00	451,40	517,20	19,53	4,08	-0,33	0,65
2015								
Cota_15_A ⁽²⁴⁾	538,03	540,00	501,00	563,00	17,74	3,29	-0,66	-0,37
NE_15_A ⁽²⁴⁾	57,44	54,10	23,50	83,60	16,36	28,48	-0,77	-0,10
NP_15_A ⁽²⁴⁾	480,58	479,75	446,90	518,15	17,27	3,59	0,56	0,33
2016								
Cota_16_A ⁽⁴⁰⁾	536,50	536,00	494,00	584,00	23,65	4,40	-0,98	-0,04
NE_16_A ⁽⁴⁰⁾	53,74	54,00	9,82	86,10	17,54	32,63	-0,20	-0,24
NP_16_A ⁽⁴⁰⁾	482,72	483,00	421,24	520,00	21,42	4,43	0,70	-0,30
Cota_16_EH ⁽¹⁵⁾	542,32	536,50	499,50	584,00	25,15	4,63	-1,13	0,09
NE_16_EH ⁽¹⁵⁾	54,64	53,50	10,00	85,50	19,58	35,83	1,06	-0,46
NP_16_EH ⁽¹⁵⁾	487,67	485,35	458,50	519,75	18,77	3,84	-0,77	0,38
Cota_16_DH ⁽²⁷⁾	534,46	535,00	494,00	571,00	23,51	4,39	-1,27	-0,20
NE_16_DH ⁽²⁷⁾	53,35	55,45	9,73	86,10	18,92	35,46	-0,36	-0,42
NP_16_DH ⁽²⁷⁾	481,06	480,35	421,24	520,00	22,95	4,77	0,66	-0,43
2017								
Cota_17_A ⁽⁶⁹⁾	532,23	534,57	489	573,18	21,02	3,94	-0,66	-0,28
NE_17_A ⁽⁶⁹⁾	59,97	61,73	16,80	97,83	19,18	31,98	-0,94	-0,20
NP_17_A ⁽⁶⁹⁾	472,26	472,18	434,26	513,09	13,72	2,90	1,97	0,58
Cota_17_EH ⁽²⁸⁾	526,36	521,00	489,00	573,18	22,52	4,27	-0,85	0,20
NE_17_EH ⁽²⁸⁾	51,24	48,12	16,80	86,78	19,34	37,74	-1,04	0,29
NP_17_EH ⁽²⁸⁾	475,12	473,59	434,26	513,09	16,52	3,47	1,30	0,20
Cota_17_DH ⁽⁴¹⁾	535,65	539,00	490,00	573,00	19,31	3,60	-0,11	-0,46
NE_17_DH ⁽⁴¹⁾	66,26	69,91	24,63	97,83	16,81	25,36	-0,23	-0,49
NP_17_DH ⁽⁴¹⁾	469,39	469,38	443,98	491,80	9,52	2,02	0,48	-0,20
2018								
Cota_18_A ⁽⁸⁰⁾	529,51	529,00	477,00	586,00	22,23	4,19	-0,24	0,15
NE_18_A ⁽⁸⁰⁾	50,26	47,00	1,77	93,40	18,64	37,08	-0,23	0,20
NP_18_A ⁽⁸⁰⁾	479,25	477,63	435,22	526,30	16,19	3,37	0,81	0,38
Cota_18_EH ⁽³⁰⁾	526,64	522,00	477,00	586,00	23,71	4,30	0,65	0,54
NE_18_EH ⁽³⁰⁾	47,04	48,18	1,77	93,40	18,68	39,71	0,93	0,12
NP_18_EH ⁽³⁰⁾	479,61	479,14	448,27	503,65	13,89	2,89	-0,33	-0,25
Cota_18_DH ⁽⁵²⁾	533,02	531,00	489,00	575,00	21,21	3,97	-0,64	-0,14
NE_18_DH ⁽⁵²⁾	52,91	51,40	21,15	91,35	17,88	33,79	-0,75	0,25
NP_18_DH ⁽⁵²⁾	480,10	477,63	435,22	526,30	17,91	3,73	0,57	0,43

(a) Parâmetros analisados onde: Cota = Cota Altimétrica (m), NE = Nível Estático (m), NP = Nível Potenciométrico (m), EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, seguidos do respectivo ano e período de avaliação. Sendo EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, assim o valor entre parênteses refere-se ao número de observações no período.
Fonte:

Tabela 2 - Análise estatística descritiva anual de parâmetros Quantitativos do Aquífero Bauru em São José do Rio Preto – SP (conclusão)

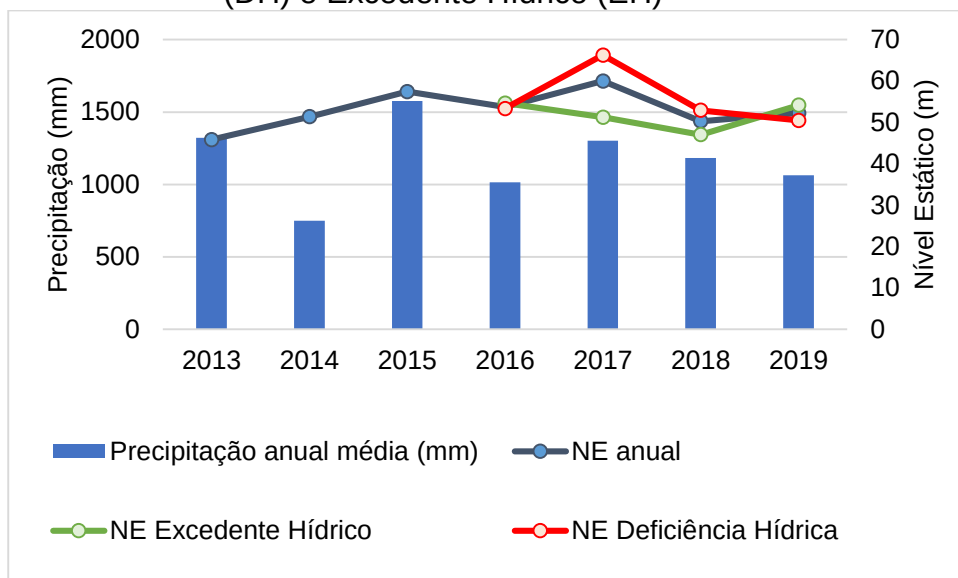
Variável ^(a)	Medidas da Estatística Descritiva							
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente		
			Min.	Max.		Variação (%)	Curtose	Assimetria
2019								
Cota_19_A ₍₇₁₎	529,31	524,00	487,00	586,00	23,11	4,36	-0,45	0,48
NE_19_A ₍₇₁₎	52,24	50,40	18,69	92,35	17,93	34,32	-0,91	0,20
NP_19_A ₍₇₁₎	477,08	476,60	438,44	515,90	14,95	3,13	0,33	-0,14
Cota_19_EH ₍₃₉₎	531,63	527,00	494,00	586,00	23,64	4,44	-0,38	0,59
NE_19_EH ₍₃₉₎	54,16	55,65	25,23	92,35	18,99	35,06	-1,27	-0,01
NP_19_EH ₍₃₉₎	477,50	479,68	444,40	506,77	15,82	3,31	-0,49	-0,39
Cota_19_DH ₍₃₄₎	527,59	522,00	487,00	570,00	21,94	4,15	-0,66	0,28
NE_19_DH ₍₃₄₎	50,47	46,00	18,69	90,14	16,41	32,51	-0,24	0,47
NP_19_DH ₍₃₄₎	477,12	476,03	438,43	515,90	13,73	2,87	2,48	0,19

^(a) Parâmetros analisados onde: Cota = Cota Altimétrica (m), NE = Nível Estático (m), NP = Nível Potenciométrico (m), EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, seguidos do respectivo ano e período de avaliação. Sendo EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, assim o valor entre parênteses refere-se ao número de observações no período. Fonte:

O menor valor médio para o NE em período anual foi 45,84 m (2013), com o ano de maior variação de 59,97 m (2017) e, o no fim do período avaliado apresentou variação de 52,24 m (2019). A necessidade de conhecer as oscilações dos NE ensejam oportunidades de controle e limitação ou impedimento da exploração. Cabe ressaltar que apesar de nem todos os poços estudados terem seus dados considerados no mesmo período (devido à inconstância dos dados), os valores médios para o período anual aparentam indicar, de modo geral, uma tendência do aprofundamento do NE ao longo de todo o período estudado.

Os valores do NE em períodos sazonais observados no Gráfico 9, sugere que as flutuações dos níveis podem estar ocorrendo de forma equilibrada, mostrando os períodos de EH e DH quando comparados de 54,64 m (NE_16_EH) e 53,35 m (NE_16_DH), 47,04 m (NE_18_EH) e 52,91 m (NE_18_DH) e 54,16 m (NE_19_EH) e 50,47 m (NE_19_DH), com exceção para o ano de 2017 que apresentou um valor no período de DH (66,26 m) superior ao EH (51,24 m), o que neste caso, pode ser em função de maior demanda por água no período avaliado (Gráfico 9).

Gráfico 9 – Valores médios observados do Nível Estático (NE) e precipitação média anual (2013-2019) e em período sazonal (2016-2019) de Deficiência Hídrica (DH) e Excedente Hídrico (EH)



Fonte: Adaptado de DAEE (2020).

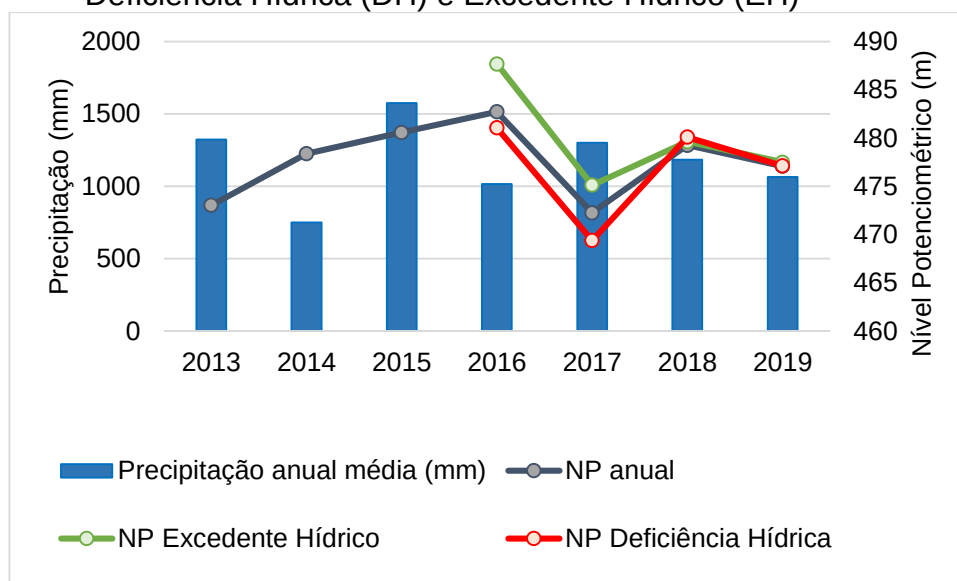
O menor valor médio para o NE em período anual foi 45,84 m (2013), com o ano de maior elevação com 59,97 m (2017) e, o no fim do período avaliado apresentou o NE de 52,24 m (2019) (Tabela 2). A necessidade de conhecer as oscilações dos NE ensejam oportunidades de controle e limitação ou impedimento da exploração (HIRATA, 2012). Cabe ressaltar que apesar de nem todos os poços estudados terem seus dados considerados no mesmo período (devido à inconstância dos dados), os valores médios para o período anual aparentam indicar, de modo geral, uma tendência do aprofundamento do NE ao longo de todo o período estudado. Tcacenco-Manzano *et al.* (2019) no estudo em Campo Grande-MS, concluiu que onde há maiores concentrações de poços há também os maiores valores de rebaixamentos do NE, atribuindo à superexploração das águas do aquífero Bauru na cidade.

O NP anual apresentou o menor valor médio em 2017 com 472,26 m (Tabela 2), e, em períodos sazonais, 475,12 m (NP_17_EH) e 469,39 m (NP_17_DH). Os valores médios do NP quando comparados em período de EH e DH foram EH 487,67 m – DH 481,06 m (2016), EH 475,12 m - DH 469,39 m (2017), EH 479,61 m – DH 480,10 m (2018), EH 477,50 m – DH 477,12 m (2019), permitindo observar que os valores medidos no período de EH para NP mostram-

se majoritariamente superiores quando comparados ao período de DH (Gráfico 10).

Os períodos sazonais de EH e DH demonstraram para o ano de 2017 uma equivalência de rebaixamento nas linhas do NE (Gráfico 9) e NP (Gráfico 10). O NE (Gráfico 9) em período de DH mostrou linhas superiores quando em EH e, em consonância o NP (Gráfico 10) apresentou declínio na linha no mesmo período de DH, em 2017. De acordo com esses dados, supõe-se que a potenciometria permanece provavelmente elevada a maior parte dos períodos avaliados sem alterações significativas em período de EH; tal fato, aliado a uma gestão que favoreça o aumento e/ou permanência de áreas permeáveis como jardins ou pavimentos filtrantes, com controle do uso do solo, talvez não implique em alterações nas condições de exploração em período de DH.

Gráfico 10 - Valores médios observados do Nível Potenciométrico (NP) e precipitação média anual (2013-2019) e em período sazonal (2016-2019) de Deficiência Hídrica (DH) e Excedente Hídrico (EH)



Fonte: Dados do DAEE (2020).

5.2 Análise geoestatística

Os parâmetros dos modelos ajustados aos variogramas experimentais (Apêndices A a H) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros dos variogramas simples

Parâmetro ^(a)	Medidas de Ajuste dos Variogramas									
	Modelo ^(b)	C ₀	C ₀ +C	A(m)	R ²	SQR	ADE ^(c)	Validação Cruzada		
							%	a	B	“r”
Nível Estático Anual										
NE_2013 ⁽²³⁾	ESF	3,78x10 ¹	1,69x10 ²	2862,0	0,755	2,319 x10 ³	77,6	-3,79	1,10	0,309
NE_2014 ⁽²³⁾	ESF	2,90x10 ¹	4,09x10 ²	2490,0	0,491	3,2126x10 ⁴	92,9	32,52	0,36	0,027
NE_2015 ⁽²⁴⁾	EXP	4,02x10 ¹	3,02x10 ²	6510,0	0,459	2,9517x10 ⁴	86,7	-4,05	1,06	0,429
NE_2016 ⁽⁴⁰⁾	ESF	4,60x10 ¹	3,95x10 ²	9740,0	0,878	1,4569x10 ⁴	87,8	5,67	0,89	0,420
NE_2017 ⁽⁶⁹⁾	GAU	3,60x10 ¹	5,26x10 ²	4970,9	0,960	1,0046x10 ⁴	93,2	5,67	0,90	0,630
NE_2018 ⁽⁷⁸⁾	ESF	1,04x10 ²	4,23x10 ²	12570,0	0,777	7,5161x10 ⁴	75,4	-2,80	1,04	0,596
NE_2019 ⁽⁷¹⁾	GAU	6,44x10 ¹	3,62x10 ²	5767,7	0,920	1,2239x10 ⁴	92,0	2,64	0,93	0,529
Nível Estático – Déficit Hídrico										
NE_DH_2016 ⁽²⁵⁾	ESF	1,00	4,16x10 ²	9030,0	0,664	9,7893x10 ⁴	99,8	-6,11	1,11	0,790
NE_DH_2017 ⁽⁴¹⁾	GAU	4,00x10 ¹	3,84x10 ²	5733,0	0,865	2,5255x10 ⁴	89,6	5,31	0,91	0,593
NE_DH_2018 ⁽⁴⁶⁾	ESF	3,20x10 ¹	4,58x10 ²	10960,0	0,799	7,1871x10 ⁴	93,0	-2,39	1,04	0,863
NE_DH_2019 ⁽³⁴⁾	GAU	6,00	3,19x10 ²	4832,4	0,867	1,7670x10 ⁴	98,1	7,92	0,83	0,665
Nível Estático – Excedente Hídrico										
NE_EH_2016 ⁽¹⁵⁾	GAU	1,00x10 ⁻¹	2,91x10 ²	2771,2	0,718	1,3917x10 ⁴	100,0	43,2	0,18	0,005
NE_EH_2017 ⁽²⁶⁾	GAU	9,00	3,91x10 ²	4052,9	0,667	5,3428x10 ⁴	97,7	2,20	0,93	0,677
NE_EH_2018 ⁽²⁶⁾	ESF	2,90x10 ¹	3,85x10 ²	10670,0	0,602	6,3677x10 ⁴	92,5	6,06	0,85	0,369
Nível Potenciométrico Anual										
NP_2013 ⁽²²⁾	GAU	3,41x10 ¹	2,40x10 ²	3914,4	0,635	2,3218x10 ⁴	85,5	46,9	0,90	0,372
NP_2014 ⁽²²⁾	ESF	4,10x10 ¹	3,78x10 ²	6210,0	0,830	1,3817x10 ⁴	89,2	68,3	0,86	0,191
NP_2015 ⁽²⁴⁾	ESF	1,00	3,23x10 ²	8000,0	0,806	1,8787x10 ⁴	99,7	9,83	0,98	0,466
NP_2016 ⁽⁴⁰⁾	GAU	1,70x10 ¹	5,02x10 ²	4763,1	0,905	2,2120x10 ⁴	96,6	125,3	0,74	0,373
NP_2017 ⁽⁶⁹⁾	GAU	3,13x10 ¹	1,98x10 ²	4434,0	0,824	7,288x10 ³	84,2	-42,5	1,09	0,603
NP_2018 ⁽⁷⁸⁾	ESF	5,60x10 ¹	2,87x10 ²	4670,0	0,516	5,6265x10 ⁴	80,5	-58,8	1,12	0,581
NP_2019 ⁽⁷¹⁾	GAU	2,33x10 ¹	2,33x10 ²	5178,8	0,948	3,714x10 ³	90,0	37,8	0,92	0,641
Nível Potenciométrico – Déficit Hídrico										
NP_DH_2016 ⁽²⁷⁾	GAU	2,50x10 ¹	5,55x10 ²	4745,8	0,544	2,48954x10 ⁵	95,5	-27,7	1,05	0,625
NP_DH_2017 ⁽³⁹⁾	ESF	2,13x10 ¹	1,12x10 ²	4310,0	0,480	8,318x10 ³	81,1	-27,7	1,05	0,470
NP_DH_2018 ⁽⁴⁴⁾	GAU	2,60	2,39x10 ²	4104,9	0,603	4,6124x10 ⁴	98,9	-8,59	1,02	0,827
NP_DH_2019 ⁽²⁸⁾	GAU	2,93x10 ¹	7,97x10 ¹	3810,5	0,739	9,11x10 ²	63,3	-30,0	1,06	0,408
Nível Estático – Excedente Hídrico										
NP_EH_2016 ⁽¹⁵⁾	GAU	1,00	3,77x10 ²	3152,3	0,865	1,0871x10 ⁴	99,7	588,0	-	0,008
NP_EH_2017 ⁽²⁶⁾	ESF	1,34x10 ¹	2,46x10 ²	5510,0	0,822	7,679x10 ³	94,6	-53,4	1,17	0,428
NP_EH_2018 ⁽³⁰⁾	ESF	1,00x10 ⁻¹	2,35x10 ²	4510,0	0,725	8,752x10 ³	100,0	73,41	0,84	0,471

^(a) Parâmetros analisados onde: NE = Nível Estático (m), NP = Nível Potenciométrico (m), EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, seguidos do respectivo ano e período de avaliação. Sendo EH = Excedente Hídrico e DH = Deficiência Hídrica, assim o valor entre parênteses refere-se ao número de observações no período. ^(b) Ajuste semivariográfico, onde: gau: gaussiano, esf: esférico, exp: exponencial; ^(c) ADE: Avaliador da Dependência Espacial.

Fonte:

Baseado na avaliação dos modelos (Tabela 3), os parâmetros variográficos de ajuste foram do tipo esférico (NE_2013, NE_2014, NE_2016, NE_2018, NE_DH_2016, NE_DH_2018, NE_EH_2018, NP_2014, NP_2015, NP_2018, NP_DH_2017, NP_EH_2017, NP_EH_2018); exponencial (NE_2015); e Gaussiano (NE_2017, NE_2019, NE_DH_2017, NE_DH_2019, NE_EH_2016,

NE_EH_2017, NP_2013, NP_2016, NP_2017, NP_DH_2016, NP_DH_2018, NP_DH_2019, NP_EH_2016). Trabalhos como os de Du Bui (2009), Fontes Jr. e Montenegro (2017), e Marchant et al. (2018) também constataram dependência espacial para NE e NP, indicando plena viabilidade da aplicação de técnicas geoestatística para mapear tais parâmetros hidrogeológicos.

Os valores de “r”, coeficientes de determinação espacial do variograma, indicam melhores ajustes variográficos quanto mais próximos os valores forem de um. Assim, para todos os parâmetros analisados na presente pesquisa foram observados elevados “r” (“r”>0,500) (Tabela 3). Os valores mais significativos foram: NE_2016 (0,878); NE_2017 (0,960); NE_2019 (0,920); NE_Def_2017 (0,865); NE_Def_2019 (0,867); NP_2014 (0,830); NP_2015 (0,806); NP_2016 (0,905); NP_2017 (0,824); NP_2019 (0,948); NP_Exc_2016 (0,865); NP_Exc_2017 (0,822) indicando apreciáveis ajustes ao modelos testados (Tabela 3).

A localização dos poços dentro da região de estudo determina a variância do alcance (A), que se mostra baixa e elevada, de acordo com o período analisado (Tabela 3). As variações do alcance foram: NE anual de 2490,0 m (2014) a 12570,0 m (2018); NE em período de DH de 4832,4 m (2019) a 10960,0 m (2018); NE em período de EH de 2771,2 m (2016) a 10670,0 m (2018); NP anual de 3914,4 m (2013) a 8000,0 m (2015); NP em período de DH de 3810,5 m (2016) a 4745,8 m (2019); NP em período de EH de 3152,3 m (2016) a 5510,0 m (2017) (Tabela 3). Os maiores valores de alcance foram observados no período anual de 12570,0 m (NE_2018), nos sazonais de EH 10670,0 m (NE_EH_2018) e DH 10960,0 m (NE_DH_2018). Cabe ressaltar que o alcance pode ter sofrido influência do número e localização de poços para os diferentes períodos estudados, conforme poderá ser notado mais à frente no resultado dos seus mapeamentos.

Os valores de ADE demonstraram moderada (NP_DH_2019) a alta dependência espacial (NE_2013; NE_2014; NE_2015; NE_2016; NE_2017; NE_2018; NE_2019; NE_DH_2016; NE_DH_2017; NE_DH_2018; NE_DH_2019; NE_EH_2016; NE_EH_2017; NE_EH_2018; NP_2013; NP_2014; NP_2015; NP_2016; NP_2017; NP_2018; NP_2019; NP_DH_2016; NP_DH_2017; NP_DH_2018; NP_DH_2019; NP_EH_2016; NP_EH_2017; NP_EH_2019) na Tabela 3, como proposto em pesquisa por Zimback (2001), estes intervalos

correspondem a: variável fracamente dependente ($ADE \leq 25\%$), variável moderadamente dependente ($25\% \leq ADE < 75\%$), e, variável altamente dependente ($ADE > 75\%$). Os modelos de semivariogramas ajustados, juntamente com as validações cruzadas são apresentados nos Apêndices A ao H.

A análise da validação cruzada, no geral, demonstrou valores de r no intervalo de 0,005 (NE_EH_2017) a 0,863 (NE_DH_2018) (Tabela 3). Os resultados com valores de 0,005 (NE_EH_2016) e 0,008 (NP_EH_2016), refletiram os piores desempenhos neste estudo. Tal fato se deve muito em função de se tratar dos anos iniciais onde o número de poços considerados no período eram pequenos (Tabela 3), em torno da metade do ideal que é de aproximadamente 30 valores, conforme indicado por Yamamoto e Landim (2013). Vale ressaltar que tal ocorrência não anula os resultados obtidos, pois segundo Landim (2006), a validação não possui como objetivo indicar qual ajuste obtido é o mais concordante, mas o de apontar que ele não está inteiramente impreciso. Entretanto, os dados obtidos na presente pesquisa refletem os resultados de estimativa de menor desempenho. Os mapas de variabilidade espacial e temporal foram elaborados em períodos anuais e sazonais, pelo método de krigagem ordinária visando a reproduzir e avaliar os impactos ocorridos devido a exploração de águas subterrâneas para abastecimento público. Os mapas dos níveis potenciométricos (NP) gerados para esta região de estudo foram divididos em períodos anuais (2013-2019), e para analisar o comportamento potenciométrico diante das respectivas taxas de recarga ao longo do ano, de excedente hídrico (2016-2018) e deficiência hídrica (2016-2019).

Por se tratar de um aquífero livre, a movimentação natural da água é de cotas topograficamente mais elevadas, onde estão localizadas as maiores cargas hidráulicas, para as cotas menos elevadas topograficamente onde estão as menores cargas hidráulicas, no sentido das drenagens (BOEZIO *et al.*, 2006).

O período que antecede a exploração da água subterrânea na cidade foi descrito por Wendland (2013) como ocorrência de maiores cargas hidráulicas em regiões topograficamente mais altas (correspondendo as áreas de maior recarga) e, menores valores de carga hidráulica na região central, sendo influenciadas pelas drenagens.

As sucessivas variações dos NP (m) que ocorreram entre 2013-2019 em período anual (Figura 14), podem ter sido causadas pelos novos poços que se

apresentam, próximos à região central nos anos de 2017 para 2018 e 2019, demonstram isolinhas de contorno bem definidas, o que pode ser comportamento de cones de rebaixamento e, é provável que em função disto, a potenciometria tenha se mostrado menor em toda a extensão no ano de 2019.

Os poços mostraram crescimento expansivo até o ano de 2019, acompanhados de indicativos nas mudanças no comportamento dos níveis potenciométricos e, conseqüentemente, podem alterar a movimentação natural da água subterrânea. As estimativas do NP obtido para o ano de 2019 variaram entre 420 m a 520 m, devido, provavelmente, a alta concentração de poços na cidade.

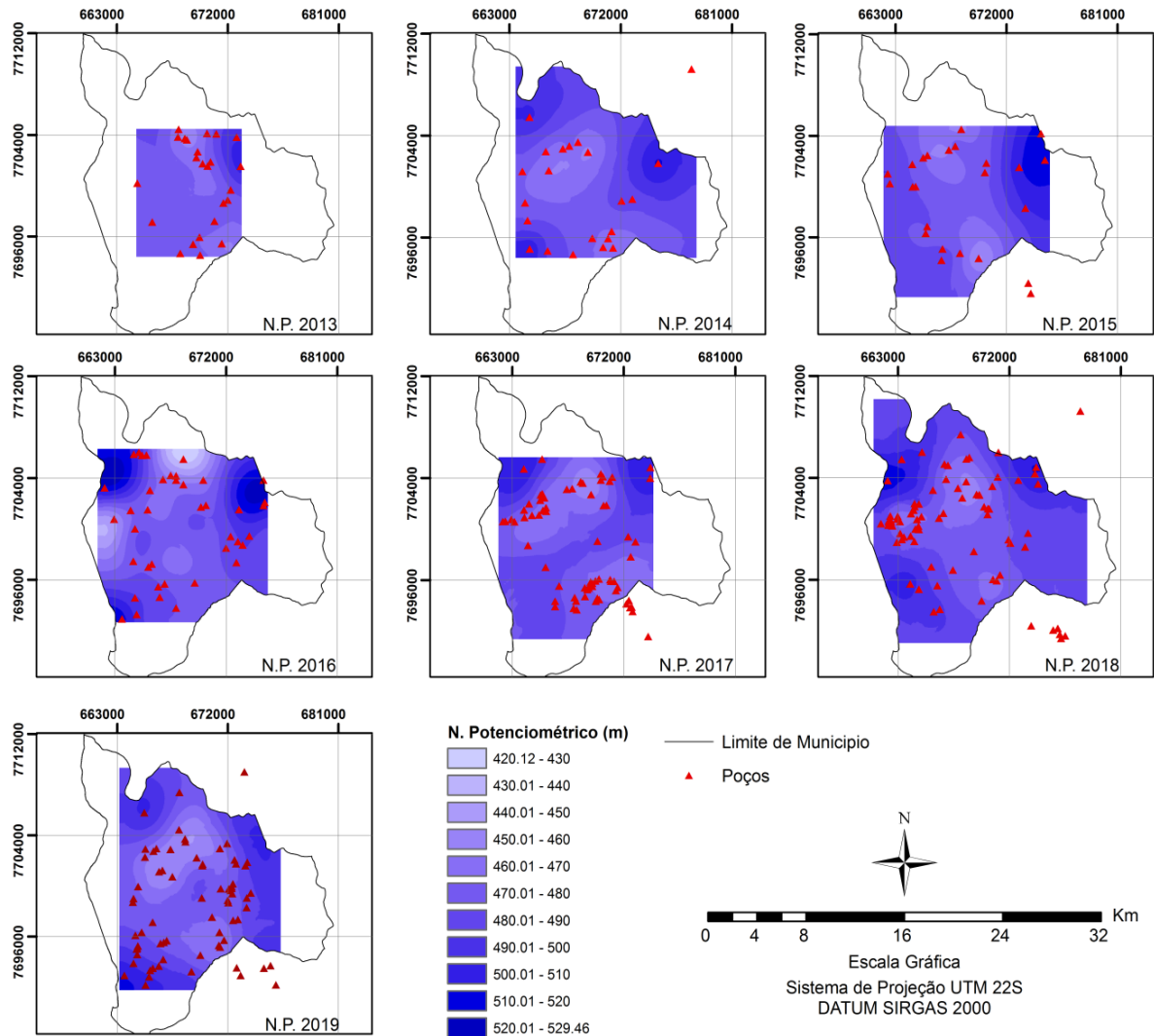
As regiões próximas à área central, de menor cota topográfica e próximas à represa, possuem condição de drenança (BARCHA, 1997), na qual os níveis da superfície livre encontram-se abaixo da situação atual, portanto, alimentando o aquífero. Nas regiões topograficamente mais baixas, onde a concentração de poços de bombeamento é maior, os cursos d'água alimentam o aquífero, de modo a contribuir para o abastecimento dos poços (WENDLAND, 2013).

Nas porções Norte e Oeste (região industrial) em NP 2016 (Figura 14), observam-se duas formações de cones de rebaixamento, que podem ter sido pela exploração das águas subterrâneas nessas áreas, podendo existir outros poços que estão induzindo a alteração dos fluxos subterrâneos. Tais condições reduzidas do NP no sentido Oeste foram notadas por Lourecentti (2013).

Na Figura 14, o NP em 2019 indica sinais de rebaixamento em todo o município, sendo que em locais de cota topográfica menos elevada, o efeito de variação do nível pode ter sido menor por resposta dos rios e córregos do município que apresentam comportamento de drenança, ou seja, passaram a ceder água para o aquífero, sendo tal comportamento observado também por Carvalho (2013). O NP demonstrou decaimento em toda a extensão, sendo que as possíveis causas para a variação do NP não podem ser atribuídas somente o acúmulo e/ou aumento de poços, mas à intensa impermeabilização observada na região central da cidade e, por conseguinte às áreas ao entorno e às obras de canalização dos rios e córregos, realizadas no período de 2010-2012 (ÁRTICO, 2013). A canalização de rios como o Preto podem de forma sutil, ter alterações na comunicação entre recursos subterrâneos e superficiais, segundo Sophocleous (2004). Os córregos Borá e Canela dentro da região de estudo também foram

canalizados e impermeabilizados, afetando a recarga do aquífero segundo Oliveira (2002).

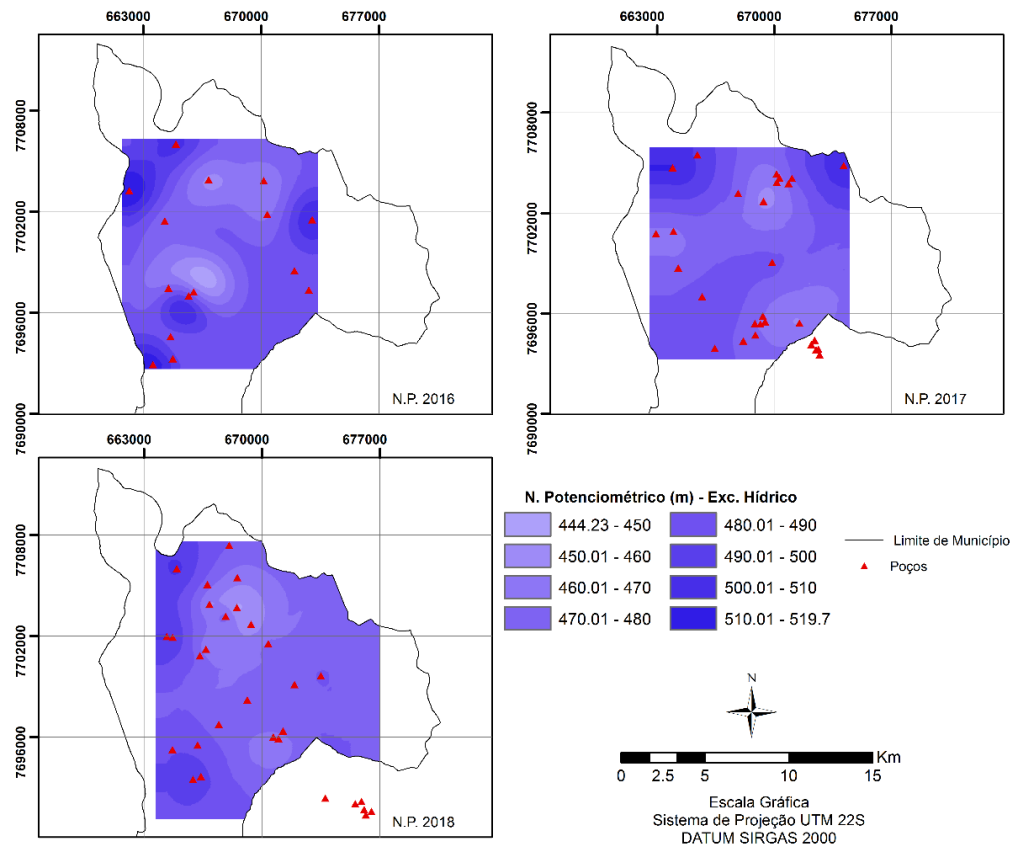
Figura 14 - Padrões espaciais anuais por krigagem do parâmetro Nível Potenciométrico (NP) (período avaliado: 2013-2019)



Fonte: Elaborado pela autora.

De forma geral, as águas subterrâneas têm um fluxo seguindo em direção às principais drenagens; com isso, como demonstrando nas Figuras 15 e 16, as variações dos NP (m) que ocorreram entre 2016-2018 (EH) e 2016-2019 (DH) em período sazonal, sugerem uma mudança neste padrão, alterada talvez, pelos novos poços que surgiram.

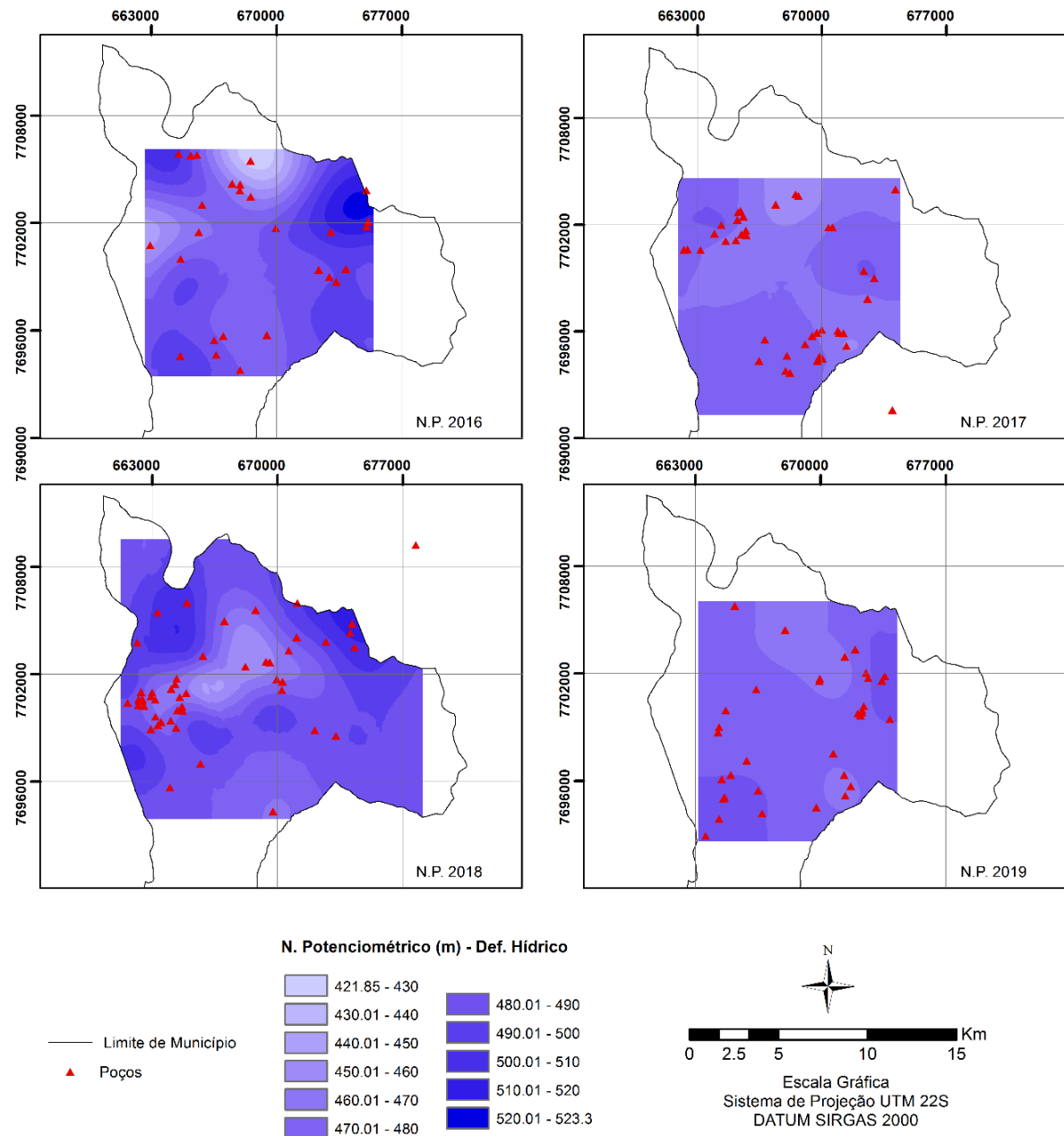
Figura 15 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro **Nível Potenciométrico (NP) - Excedente Hídrico** - (período avaliado: 2016-2018)



Fonte: Elaborado pela autora.

Na região avaliada, geralmente a precipitação entre os meses de Abril a Outubro é baixa. Com isso, é possível notar, pela Figura 16, uma redução das linhas do potenciométrico nas imagens NP 2016 a NP 2019 de modo evolutivo. Em locais onde foi notada a queda potenciométrica no período com pouca chuva, a cautela deve ser adotada com relação à exploração dos poços tubulares para abastecimento. Na Figura 16 observa-se um rebaixamento iniciado em NP 2016, onde tomou a região central da cidade em NP 2019, demonstrando zonas com nível de água mais baixo que o inicial (Figura 15). Na área urbana do município de São José do Rio Preto-SP, foi notado o rebaixamento do NP do aquífero Bauru por Oliveira (2002), Carvalho (2013) e Lourecentti (2013).

Figura 16 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Potenciométrico (NP) – Deficiência Hídrica - (período avaliado: 2016-2019)



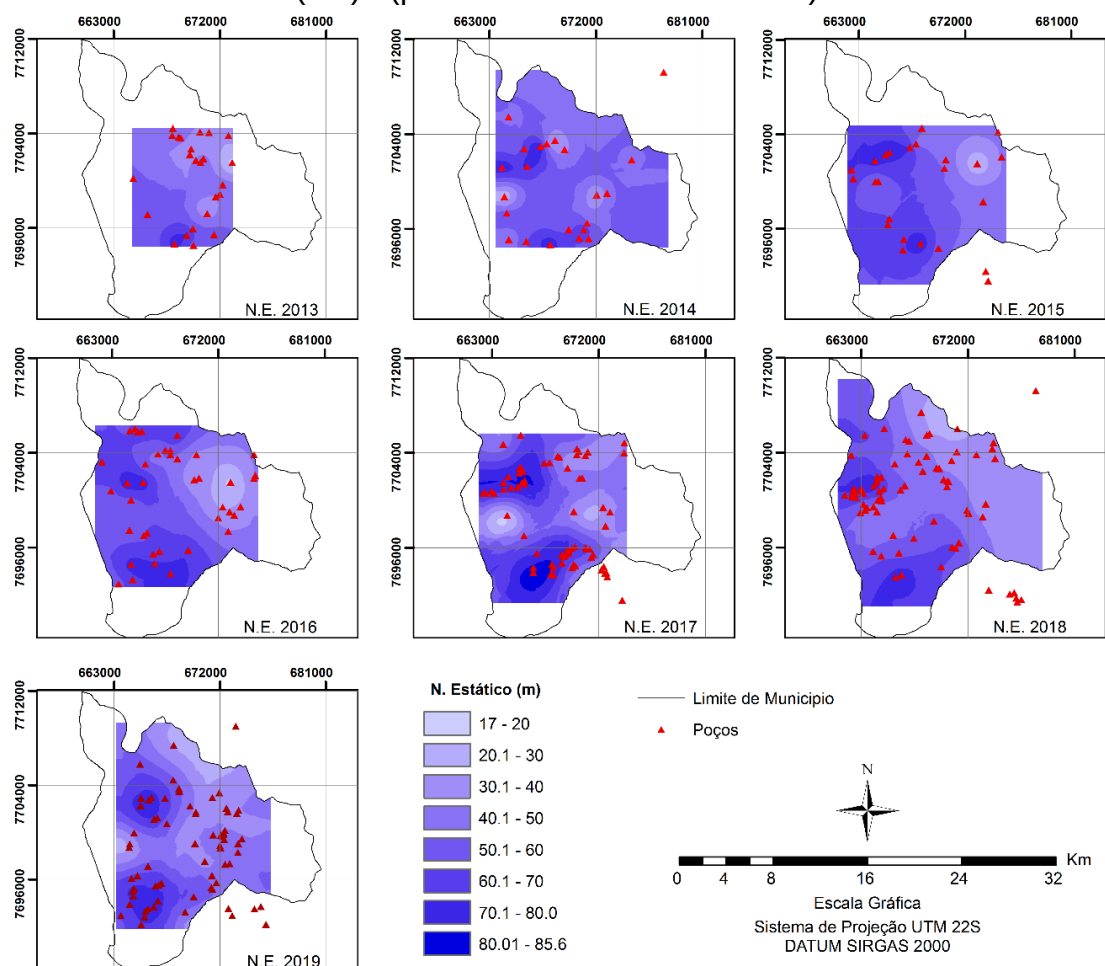
Fonte: Elaborado pela autora.

Os mapas dos NE gerados para esta região de estudo foram divididos em períodos anuais (2013-2019), e para analisar o comportamento diante das alterações sazonais ao longo do ano, de EH (2016-2018) e DH (2016-2019). Os mapas avaliados em período anual nas Figuras 14 e 17, demonstraram uma possível recarga dos poços diante do regime exploratório das águas subterrâneas nos anos amostrados (2013-2019). Portanto, os NE de menor valor representam os níveis da água mais próximos da superfície, dado que, a região de estudo está

localizada sobre um aquífero livre, enquanto que os de maior valor demonstram o rebaixamento naquele local (BOEZIO, 2006). Arid (1970) em sua pesquisa trouxe valores do NE em torno de 2-20 m, sendo portanto os valores expressivos se comparados com atuais observados na Figura 17, de no mínimo 17 a 20 m e máximo 80,1 a 85,6 m.

As regiões do NE em 2016 (Figura 17), denotam equivalência com áreas de rebaixamento do NP em 2016 (Figura 14), sugerindo que a quantidade explotada pelos poços não tem sido repostas. O NE em 2017 (Figura 17) apresenta duas zonas de rebaixamento apontadas para Norte e Sul, onde sugere reduções compatíveis com aquelas do NP para o ano de 2017 (Figura 14).

Figura 17 - Padrões espaciais anuais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - (período avaliado: 2013-2019)

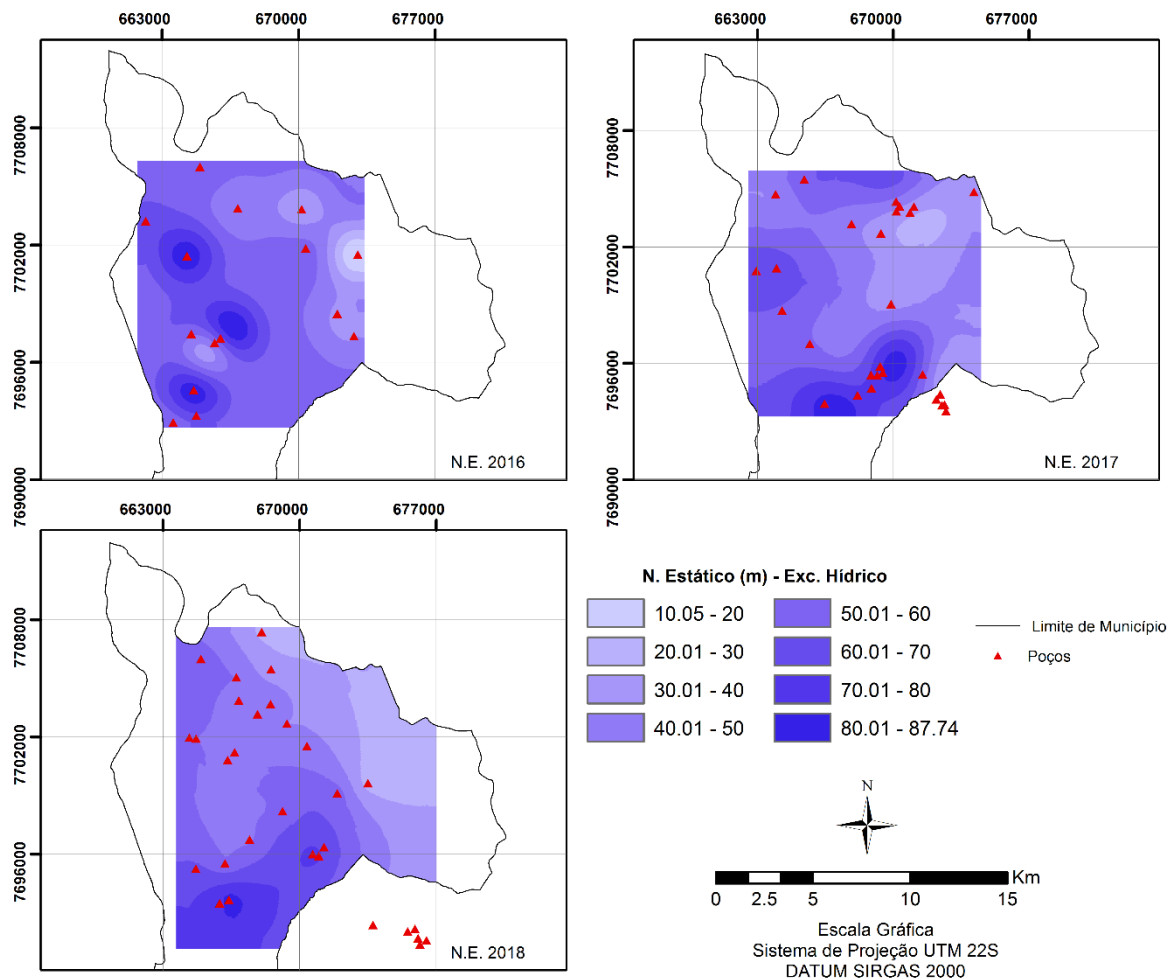


Fonte: Elaborado pela autora

Para o período de excedente hídrico, os números observados na Figura 18 não demonstraram variações positivas ou estáveis que pudessem ser

relacionadas com tal época da avaliação. A zona rural da cidade demonstrou um elevado crescimento de atividades agropastoris, enquanto que a área urbana aumentou a área impermeável (WENDLAND, 2013).

Figura 18 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - Excedente Hídrico (EH) - (período avaliado: 2016-2018)

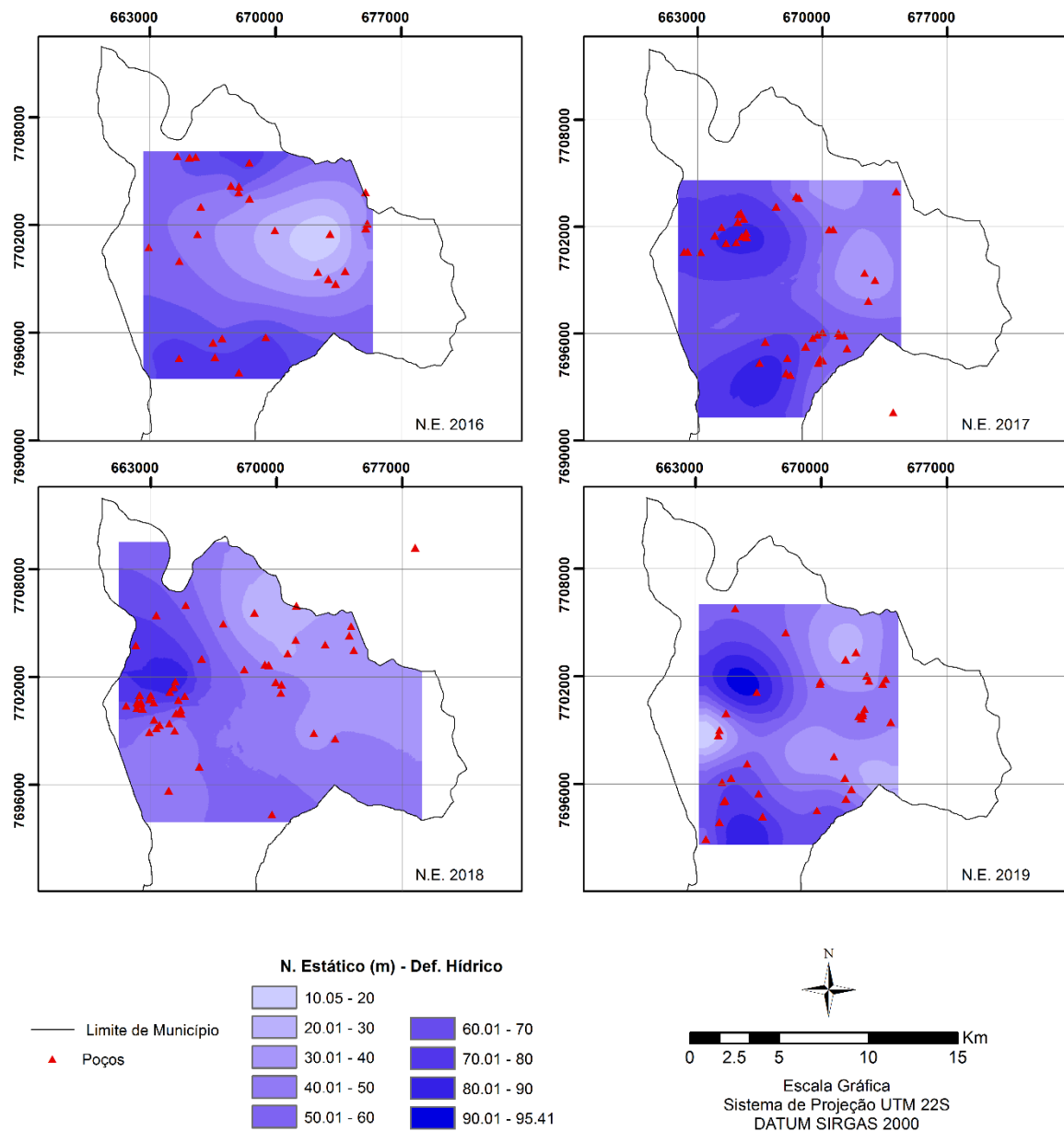


Fonte: Elaborado pela autora.

Os mapas que representam os NE nos períodos de Deficiência Hídrica entre 2016-2019 são apresentados na Figura 19. Os maiores valores de NE indicam coincidir com regiões densamente urbanizadas, provavelmente locais com maior número populacional.

As regiões de maior concentração de poços representaram, no período de DH (Figura 19), locais com maior concentração urbana (Figura 11). Consequentemente, é possível notar o efeito da recarga, podendo atribuir a diversos fatores, como meses de seca, e mudanças significativas no uso e ocupação do solo.

Figura 19 - Padrões espaciais sazonais por krigagem do parâmetro Nível Estático (NE) - Deficiência Hídrica (DH) - (período avaliado: 2016-2019)



Fonte: Elaborado pela autora.

As oscilações do NP e NE podem estar relacionadas com o aumento populacional e da área urbanizada, que demonstraram crescimento no período avaliado (2013-2019). O monitoramento do nível das águas subterrâneas auxilia no conhecimento das oscilações e reduções que o aquífero pode vir a demonstrar, de modo que, a continuidade dos estudos que utilizam o NE como parâmetro básico, depende de medições periódicas e padronizadas, assim como demonstrado com a presente pesquisa.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos da análise descritiva demonstrou oscilações para o NP e NE determinados no aquífero Bauru, na região de São José do Rio Preto, SP. As oscilações do NP e NE podem ser em função do aumento da área urbana e o crescimento populacional, seja pela redução da recarga, pelo aumento de áreas impermeáveis ou aumento do número de poços de captação para cumprir a demanda por água no município, fatores esses que provavelmente estão contribuindo com as mudanças evolutivas que mostram menores níveis em maior território. A sazonalidade em períodos de EH e DH foi um fator que corroborou e demonstrou certas variações dos NE e NP.

A geoestatística demonstrou dependência espacial nos parâmetros de NP e NE, de modo que se tornou realizáveis os ajustes semivariográficos e a confecção de mapas de estimativas da variabilidade espacial dos NE e NP da água subterrânea no Sistema Aquífero Bauru, no município de São José do Rio Preto, SP. Nos primeiros anos de análise dos mapas anuais do NP, foi notada uma possível formação de cones de rebaixamento que provavelmente esteja ocorrendo uma superexploração desses poços tubulares. Entretanto, as linhas mostraram-se expansivas provocando uma redução da superfície livre em uma área de grande extensão observado em 2019.

Os poços mostraram crescimento expansivo até o ano de 2019, acompanhados pelo crescimento populacional e de indicativos nas mudanças do comportamento anual dos níveis potenciométricos, e conseqüentemente, podendo alterar a movimentação natural da água subterrânea. Deve-se atentar para novas perfurações em áreas no sentido oeste, onde os níveis potenciométricos podem estar indicando reduções pelos novos poços construídos para abastecimento público.

Cabe à administração pública municipal a elaboração de planos que busquem alternativas para suavizar os efeitos das mudanças observadas. É recomendável manter a coleta padronizada referente ao nível da água subterrânea, como o nível estático. Os dados, quando reciclados, permitem a continuidade de estudos desta natureza para caracterizar o comportamento do aquífero no futuro.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado**. Brasília, DF, 2010. 92p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. **Conjuntura Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 2018. 72p.
- ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; BARBOSA, M. C.; AZEVEDO, S. G.; CARVALHO, A. M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos hídricos**. Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos – APRH, v. 32, p. 53-61, 2011.
- AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V. **Abordagens espaciais em estudos de população: métodos analíticos e técnicas de representação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2017. 153p.
- ARID, F. M.; CASTRO, P. R. M.; BARCHA, S. F. Estudos Hidrogeológicos no Município de São José do Rio Preto, SP. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 19, n. 1, p. 43-69, 1970.
- ÁRTICO, B. C. **O estudo de áreas vulneráveis a enchentes: uma ferramenta na mitigação de impactos. O caso de São José do Rio Preto-SP**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2013.
- BARCHA, S. F. **Água e abastecimento urbano em São José do Rio Preto, SP**. In: X CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo, 1998. 11p.
- BARCHA, S. F. **Aspectos geológicos e províncias hidrogeológicas da formação bauru na região norte-ocidental do estado de São Paulo**. 1980. 209 f. Tese (Livre Docência em Geociências) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 1980.
- BARCHA, S. F. Urbanização e impacto sobre aquíferos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1997, Vitória. **Anais [...]** Vitória: [s. n.], 1997. p. 683-687.
- BEAR, J.; BEIJIN, M. S.; ROSS, R. R. **Fundamentals of Groundwater Modeling**. Groundwater Issue. United States Environmental Protection Agency – USEPA, 1992. p.113-130.
- BEDIENT, P.B.; RIFAI, H.S; NEWELL, C.J. **Groundwater contamination: transport and remediation**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 604 p.

BERNARD, A. E.; KUMAR, C. S. N. **The role of geographical information systems in groundwater engineering.** In: DELLEUR, J. W. The handbook of groundwater engineering. Boca Raton: CRC, 1999. p.1-17.

BETTÚ, D. F.; FERREIRA, F. J. F. Modelo da superfície potenciométrica do sistema aquífero Caiuá no noroeste do estado do paraná: comparação entre krigagem ordinária e krigagem com tendência externa do modelo numérico do terreno. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 2, p.55-66, 2005.

BOEZIO, M. N. M.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J. C. Cokrigagem colocada aplicada ao mapeamento do nível da água subterrânea. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 2, p. 169-164, 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido e protegido.** Brasília, DF, 2007. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY - BGS. **The chalk aquifer of Yorkshire.** Nottingham, UK: British Geological Survey Technical Report, 2006. 68p.

CAMPOS, J. E. ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; ODA, G. H.; IRITANI, M. A.; PERROTTA, M. M.; SILVEIRA, R. E. I.; TAKAHASHI, A. T. **Carta hidrogeológica do Estado de São Paulo (Brasil) na escala de 1:1.000.000. Resultados Parciais.** In: 1 st Joint World Congress on Groundwater,1, 2000, Fortaleza (CE). São Paulo: ABAS, p. 3-5. 2000.

CARVALHO, A. M. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto (SP).** 2013. 171 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologias) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas.** Princeton Groundwater: Clean environment Brasil, 2007. 112 p.

COHEN, A. J. B.; CHERRY, J. A.. **Conceptual and Visual Understanding of Hydraulic Head and Groundwater Flow.** Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020. 54p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Noções básicas sobre poços tubulares.** Cartilha informativa. 1998. 22p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS– CPRM. **Sistema aquífero Bauru-Caiuá nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná.** Relatório Diagnóstico. 2012. 44p.

CROSBIE, R. S.; PEETERS, L. J. M.; HERRON, N.; McVICAR, T. R.; HERR, A. Estimating groundwater recharge and its associated uncertainty: use of regression kriging and the chloride mass balance method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 561, p. 1063-1080, 2018.

DALTO, L. A.; OLIVEIRA, J. F.; LOLLO, J. A. Avaliação do potencial do aquífero Bauru em Votuporanga – SP. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 12., 2002, Florianópolis. **Anais [...]** Florianópolis: ABAS, 2002. p. 2-4.

DUBUI, D.; KAWAMURA, A.; TONG, T. N.; AMAGUCHI, H.; NAKAGAWA, N. Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], v. 20, n. 8, p. 1635-1650, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Dados do balanço hídrico do município de São José do Rio Preto**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/bdclima/>. Acesso em: 10 nov. 2020.

ESRI 2011. **ArcGIS Desktop**: Release 10. Redlands, CA: Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais, 2011.

FARIA, G. A. **Uso de um sistema de informação geográfica para análise geoestatística em solos**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Experimental). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

FEITOSA, F. A. C.; DEMETRIO, J. G. A. Hidráulica de aquíferos e eficiência de poços. *In: GONÇALVES, V. G.; GIAMPÁ, C. E. Q. Águas subterrâneas e poços tubulares profundos*. São Paulo: Signus, 2008. p. 305-352.

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

FONTES JUNIOR, R. V. P.; MONTENEGRO, A. A. A. Temporal dependence of potentiometric levels and groundwater salinity in alluvial aquifer upon rainfall and evapotranspiration. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 54, 2017.

FORMAGGIO, L. F.; CAMPOS, J. E. G.; AMARAL, B. D. Estudo da variabilidade da potenciometria em aquíferos freáticos com auxílio de regressão múltipla espacial. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 1, n. 39, p. 101-111, 2009.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; MISRA, S.; GARDUÑO, H. **Urban Groundwater Use Policy**: Balancing the Benefits and Risks in Developing Nations. Sustainable Groundwater Management: Contributions to Policy Promotion. Washington/EUA: GWMate World Bank, 2010. 36 p.

FOSTER, S.; LAWRENCE, A.; MORRIS, B. **Groundwater in urban development: assessing management needs and formulating policy strategies**. Washington: The World Bank, 1998. 74p.

FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. **Água subterrânea**. Instituto Água Sustentável. 2017. 698 p.

FREITAS, G. M. (org.) **Conjuntura Econômica de São José do Rio Preto**. 34 ed. São José do Rio Preto/SP: Secretaria Municipal de Planejamento Estratégico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2019.

GAVRISHIN, A. I. 2018. Mine Waters of the Eastern Donbass and Their Effect on the Chemistry of Groundwater and Surface Water in the Region. **Water Resources**, New York, v. 45, p. 785-794, 2018.

HEATH, R. C. **Basic Ground-water Hydrology**. Reston: U.S. Geological Survey, 1983. 86 p.

HIRATA, R.; BERTOLO, R.; CONICELLI, B. P.; MALDANER, C. **Hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê**. In: TWIN CITIES: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba. [S. l.: s. n.], 2012. 318p.

HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **As Águas Subterrâneas e sua Importância Ambiental e Socioeconômica para o Brasil**. Universidade de São Paulo: Instituto de Geociências, 2019. 66 p.

HIRATA, R.; UCCI, M. S.; WAHNFRIEND, I.; VIVIVANI-LIMA, J. B. Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara. **Geol. USP, Sér. cient.**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 11-127, 2012.

HIRATA, R.; ZOBY, J. E. G.; OLIVEIRA, F. R. **Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial**. In: BICUDO, C. E.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. (Orgs.). **Águas do Brasil: análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, v. 1, p. 149-164, 2010.

HUBBERT, M. K. The Theory of Ground-Water Motion. **The Journal of Geology**, [s. l.], n. 8, v. 48, p. 785-944, 1940.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo Demográfico 2010**. São Paulo: Edusp, 2010. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default_uf.shtm. Acesso em: Novembro 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. Governo do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Plano de bacia da unidade de gerenciamento de recursos hídricos da bacia do Turvo/Grande – 2009**. São Paulo: Edusp, 2009. 318p. (Relatório Técnico, 397).

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente-SMA, 2012. 104p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANG, C.; CHEN, S. Integrating indicator-based geostatistical estimation and aquifer vulnerability of nitrate-N for establishing groundwater protection zones. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 523, p. 441-451, 2015.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic e valuation problems on the Witwatersrand. **Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, [s. l.], v. 52, n. 6, p. 119-139, 1951.

KUMAR, V. R. Kriging of groundwater levels: a case study. **Journal of Spatial Hydrology**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 81-94, 2006.

LEME, E. M. M. T.; FREITAS, G. M. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 27 ed. São José do Rio Preto/SP: Secretaria Municipal de Planejamento Estratégico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2012. 101p.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LIMA, A. A. **Hidrogeologia do sistema aquífero Bauru no Município de São José do Rio Preto (SP)**. 2004. 102 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

LIMA, C. G. R. **Análise linear e espacial entre alguns atributos produtivos e tecnológicos da cana-de-açúcar com o pH de um argissolo vermelho de Suzanópolis (SP)**. 2012. 101 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

LISBÔA, E.; CARVALHO, J.; MENDES, R. O Uso da Geoestatística na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos para compor o mapa de vulnerabilidade Intrínseca de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 188-199, 2016.

LOHMAN, S. W. **Groundwater hydraulics**. United States Government Printing Office. Washington: Geological Survey Professional Paper, 1975. 70p.

LOURENCETTI, J. **Avaliação espaço-temporal da disponibilidade hídrica subterrânea do Município de São José do Rio Preto**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 53-75. 812p.

MANZIONE, R. L. Mapeamento das características dinâmicas do nível freático do Sistema Aquífero Bauru como instrumento de gestão de recursos hídricos. **Revista do Instituto de Geociências**, [s. l.], v.18, p. 227-240, 2018.

MAPBIOMAS. **Mapas e dados de uso e cobertura do solo do Município de São José do Rio Preto**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <http://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acesso em: 11 nov. 2019.

MARCHANT, B. p.; BLOOMFIELD, J. P. Spatio-temporal modelling of the status of groundwater droughts. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 397-413, 2018.

MATHERON, G.; BLODEL, F. **Traité de geostatistique appliquée**. Paris: Technip, 1962. 333 p.

MORRIS, B. L.; LAWRENCE, A. R.; STUART, M. E. **The Impact of Urbanisation on Groundwater Quality**. Nottingham, UK, British Geological Survey - BGS. 1994. 55p.

MOUSAVIFAZL, H.; ALIZADH, A.; GHAHRAMAN, B. Application of geostatistical methods for determining nitrate concentrations in groundwater: case study of Mashhad plain, Iran. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 318-328, 2013.

NAS, B. Geostatistical approach to assessment of spatial distribution of groundwater quality. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 18, n. 6, p. 1073-1082, 2009.

OLIVEIRA, J. N. **Ferramental de gestão de águas subterrâneas para a cidade de São José do Rio Preto, SP**. 2002. 127 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

PHILIPPI JR, A.; ALVES, A. **Curso Interdisciplinar de direito ambiental**. Manole: Coleção ambiental, 2005. 953 p.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Update World map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 11, p. 1633-1644, 2007.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações pra uso de aplicativos. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PREFEITURA DE SÃO JOSÉ DO RIO PRETO. **História sobre São José do Rio Preto**. São José do Rio Preto, 2019. Disponível em: <https://www.riopreto.sp.gov.br/sobre/>. Acesso em: 11 nov. 2019.

RASHID, A.; AYUB M., JAVED, A; KHAN, S.; GAO, X.; LI, C.; ULLAH, Z.; SARDAR, T.; MUHAMMAD, J. NAZNEEN, S. Potentially harmful metals, and health risk evaluation in groundwater of Mardan, Pakistan: application of geostatistical approach and geographic information system. **Geoscience Frontiers**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 1-12, 2020.

RIVEST, M.; MARCOTTE, D. Kriging groundwater solute concentrations using flow coordinates and nonstationary covariance functions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 472-473, p. 238-253, 2012.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for environmental sciences. 7.ed. Michigan: Gamma Desing Software, 2004. 159 p.

SANTAROSA, L. V.; MANZIONE, R. L. Soil variables as auxiliary information in spatial prediction of shallow water table levels for estimating recovered water volume. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, n. 24, p. 1-13, 2018.

SAVAZZI, E. A. **Determinação da presença de bário, chumbo e cromo em amostras de água subterrânea coletadas no Aquífero Bauru**. 74 f. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2008.

SERVIÇO MUNICIPAL AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE RIO PRETO - SEMAE. **Comunicação pessoal**. Dados de campo. São José do Rio Preto, 2019.

SÉRAPHIN, P.; VALLET-COULOMB, C.; GONÇALVÊS, J. Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 542, p. 241-253, 2016.

SHIKLOMANOV, I. **Word water resources**: a new appraisal and assessment for the 21st century. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization - UNESCO, 1998. 32 p.

SHIKLOMANOV, I. A.; RODDA, J. C. **World water resources at the be-ginning of the 21st century**. Cambridge, UK: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO, International Hydrology Series, 2003. 75p.

SILVA, F. P.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 19-36, 2005.

SILVA, R. B. G. **Águas subterrâneas**: um valioso recurso que requer proteção. 3. ed. São Paulo: DAEE, 2004.

SILVA, S. R. **Caracterização hidrogeoquímica dos sistemas Aquíferos Bauru e Guarani no Município de Bauru**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - SIAGAS. **Dados de poços mineradores de água subterrânea do Aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto**. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 3 dez. 2019.

SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS – SEADE. **Portal de Estatísticas do Estado de São Paulo. População e estatísticas vitais**. São Paulo: Edusp, 2011. Portal de Estatísticas do Estado de São Paulo. 2019. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/>>. Acesso em: 11 nov. 2019.

SISTEMA DE MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO – AGRITEMPO. Disponível em: <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/Estatisticas/index.jsp?siglaUF=SP>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no estado de São Paulo: grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, n. 10, p. 177-185, 1980.

SOPHOCLEOUS, M. **Groundwater Recharge**, in Groundwater, in Encyclopedia of Life Support Systems. Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, 2004. Disponível em: www.eolss.net/ebooks/Sample%20Chapters/C07/E2-09-01-05.pdf . Acesso em: 1 jul. 2020.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; JAHROMI, M. Z.; HEIDARI, A. Spatial distribution of groundwater quality with geostatistics (case study: yazd-ardakan plain). **World Applied Sciences Journal**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 9-17, 2008.

TCACENCO-MANZANO, L. M.; ATHAYDE, C. V. M.; ZUQUI, A. R.; ROSA FILHO, E. F. Análise temporal do nível estático dos poços de abastecimento público da área urbana de Campo Grande. **Águas Subterrâneas**, Caracas, v. 33, n. 1, p. 1-11, 2019.

TEIXEIRA, Z. A.; QUESADO JÚNIOR, N.; OLIVEIRA, G. N.D.; SUCUPIRA, P. A. P.; OLIVEIRA FILHO, R. L. Monitoramento dos níveis estáticos de poços do perímetro irrigado de morada nova – Ceará, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais [...]** Natal: [s. n.], p. 4-6.

THEODORIDOU, P. G.; VAROUCHAKIS, E. A.; KARATZAS, G. P. Spatial analysis of groundwater levels using Fuzzy Logic and geostatistical tools. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 242-252, 2017.

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: Edgard Blucher, 1967. 319p.

TUCCI, C. E. **Água no Meio Urbano**. Capítulo 14 do Livro Água Doce. 1997. 40p.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Conceptual groundwater-flow diagram**. [S. l.: s. n.], 2000. Disponível em: <https://www.usgs.gov/media/images/conceptual-groundwater-flow-diagram>. Acesso em: 02 Fev. 2020.

UNITED NATIONS: EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION - UNESCO. **Leaving no one behind**. The United Nations. World Water Development Report, 2019.12p.

VAROUCHAKIS, E. A.; THEODORIDOU, P. G.; KARATZAS, G. P. Spatiotemporal geostatistical modeling of groundwater levels under a Bayesian framework using means of physical background. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 575, p. 487-498, 2019.

VELÁSQUEZ, L. M. N.; BRANCO, O. E. A.; CARVALHO FILHO, C. A.; MINARDI, P. S. P.; COTA, S. D. S.; BOMTEMPO, V. L.; CAMARGOS, C. C.; RODRIGUES, P. C. H.; FIUMARI, S. L. Caracterização hidrogeológica dos aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., 2008, Natal. **Anais [...]** Natal: ABAS, 2008. p. 4-5.

VICENTE, G. Z.; LIMA, C. G. R.; MARQUES, S. M. Variabilidade espacial e temporal do Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, Caracas, v. 32, n. 3, p. 295-306, 2018.

VILLAR, P. C. Groundwater and the Right to Water in a Context of Crisis. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 85-102, 2016.

VILLHOLTH, K. G. Groundwater assessment and management: implications and opportunities of globalization. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 330-339, 2005.

WENDLAND, E.; SIMONATO, M. D.; LAPICCIRELLA, E. S.; HIRATA, R. Modelo numérico de escoamento subterrâneo na região de São José do Rio Preto – SP. **Águas Subterrâneas**, Caracas, v. 27, N. 1, P. 92-109, 2013.

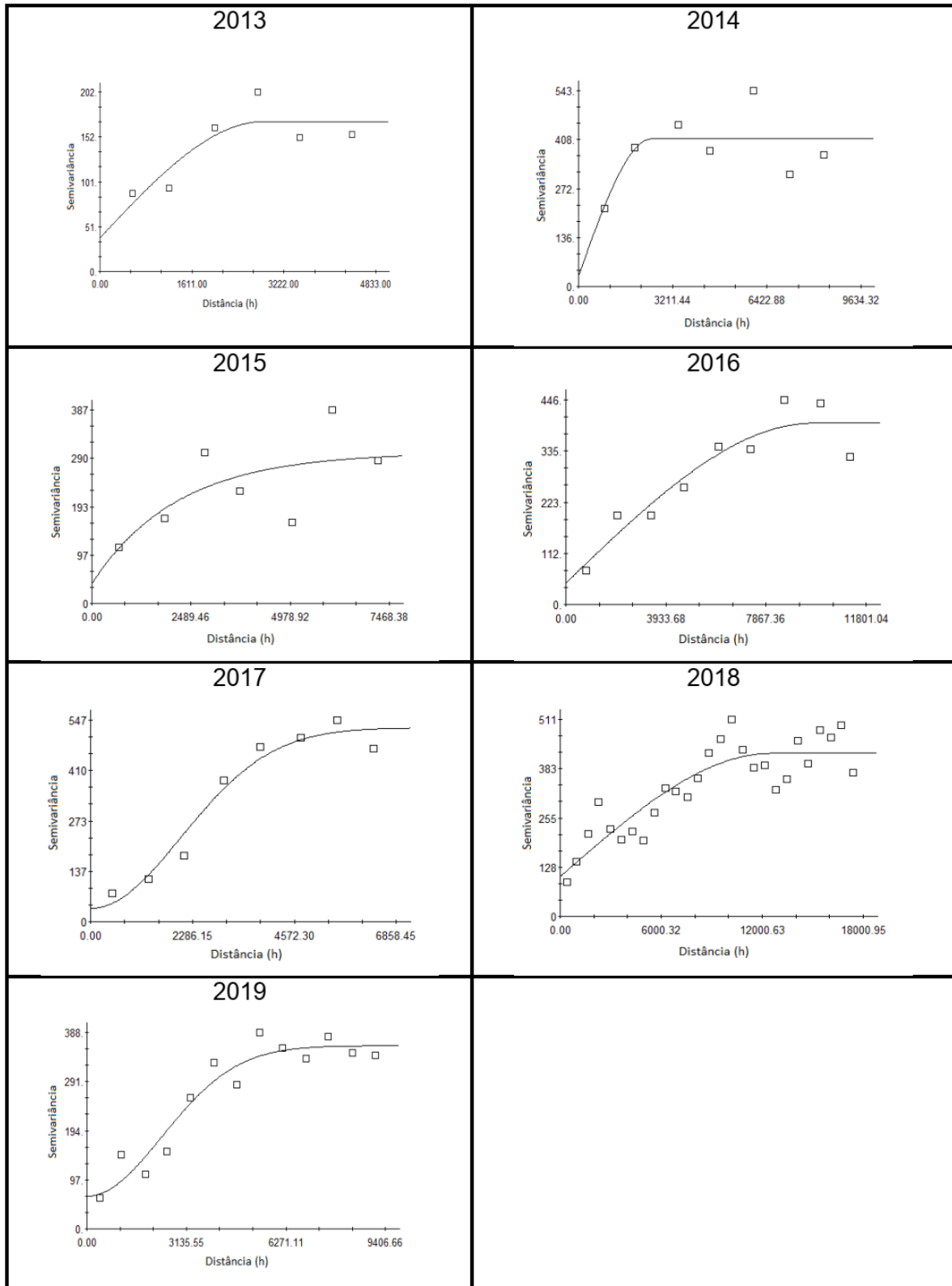
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZIMMERMAN, D.; PAVLIK, C.; RUGGLES, A.; ARMSTRONG, M. P. An experimental comparison of ordinary and universal kriging and inverse distance weighting. **Mathematical Geology**, New York, v. 31, n. 4, p. 375-390, 1999.

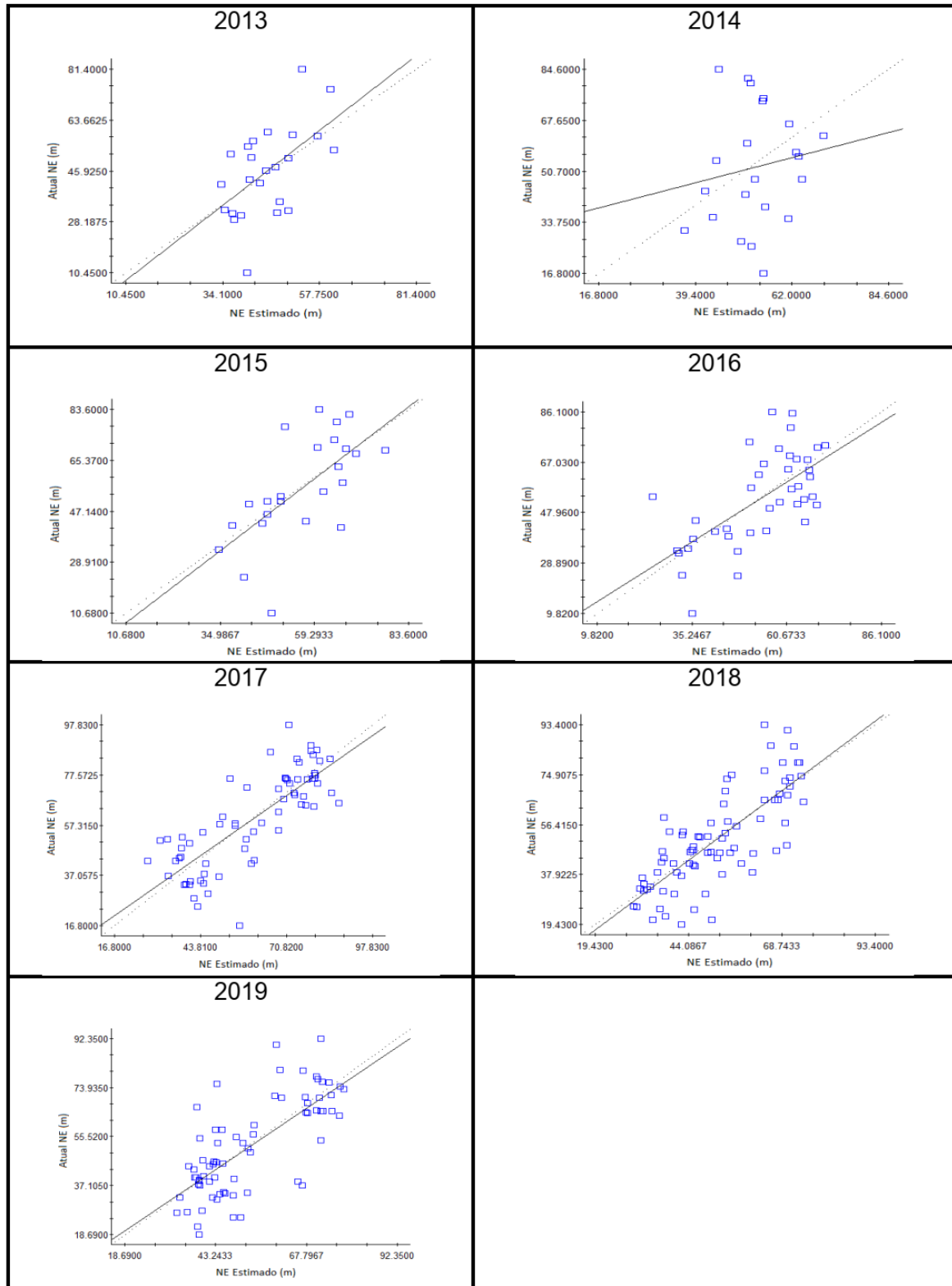
APÊNDICE A

Apêndice A – Semivariogramas do Nível Estático (NE) em Período Anual



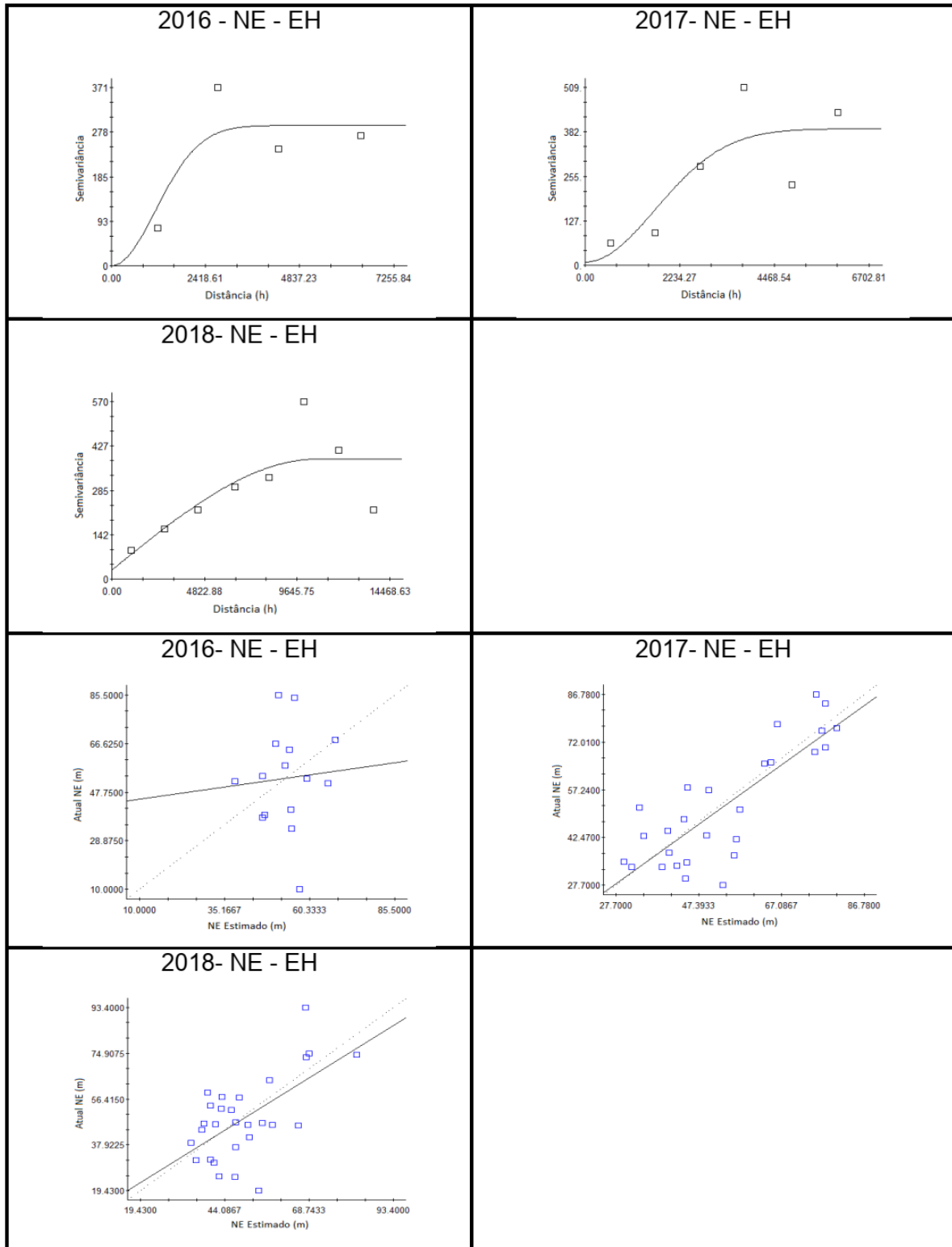
APÊNDICE B

Apêndice B – Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em Período Anual



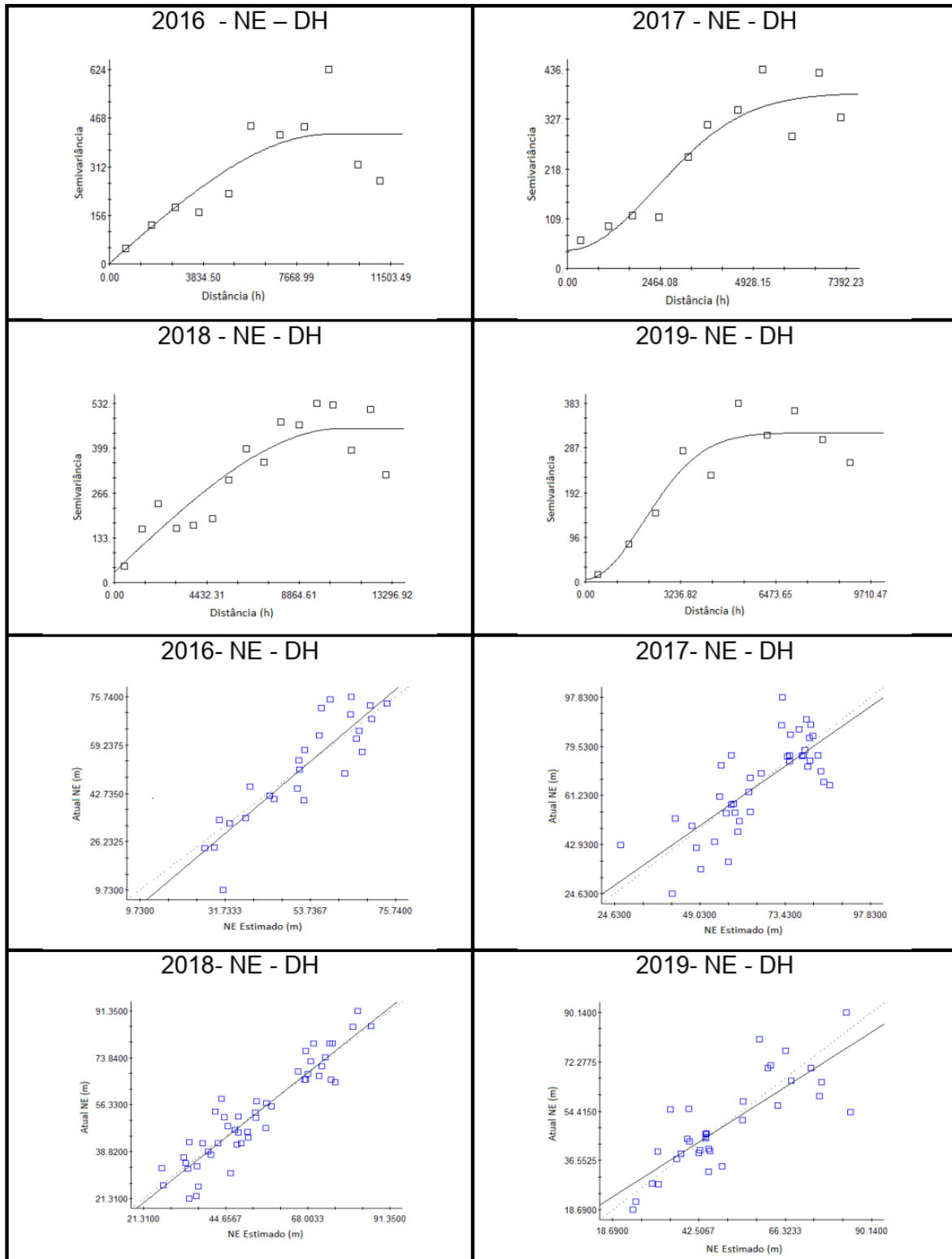
APÊNDICE C

Apêndice C – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em período sazonal de Excedente Hídrico (EH)



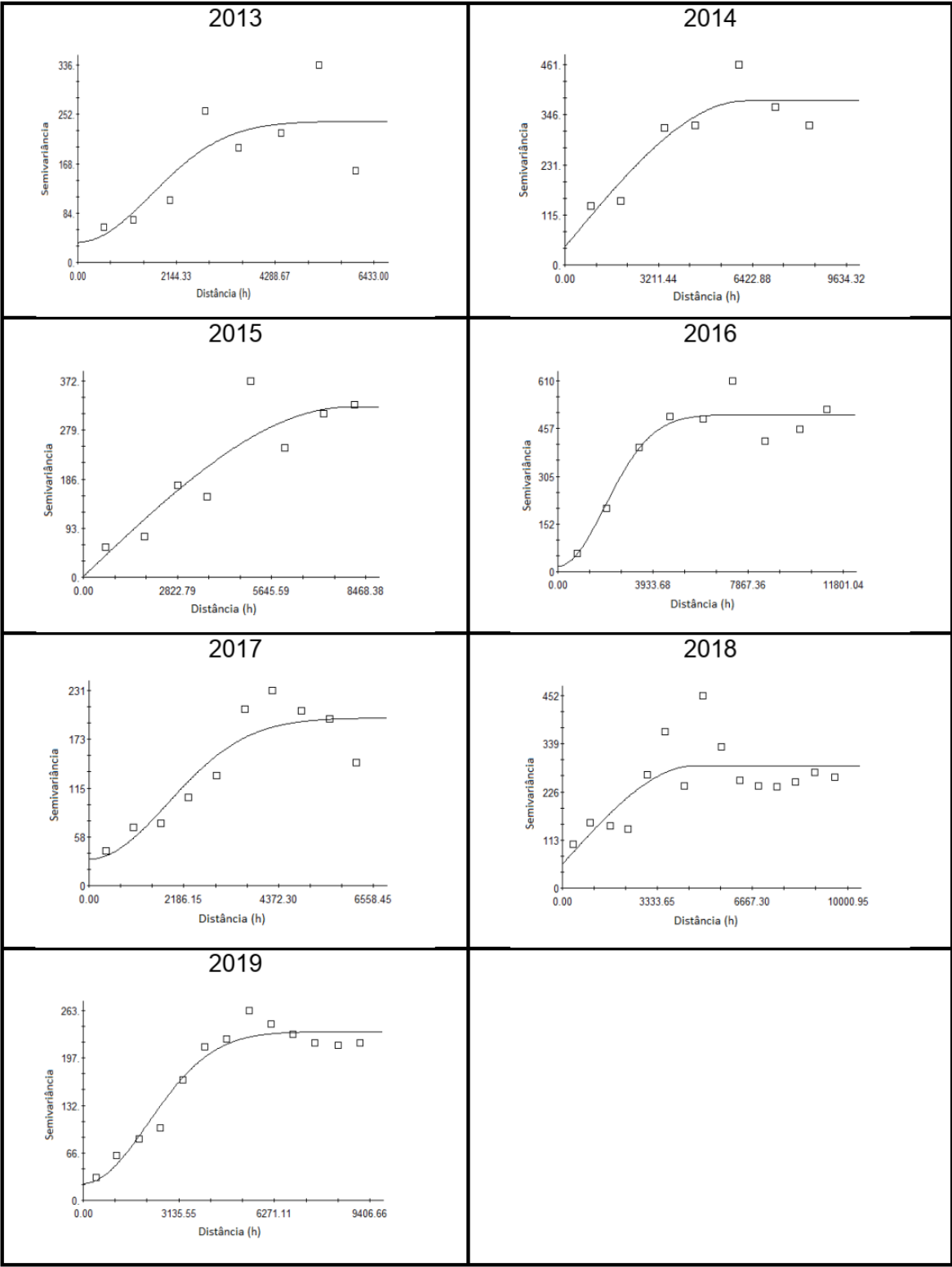
APÊNDICE D

Apêndice D – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Estático (NE) em período sazonal de Deficiência Hídrica (DH)



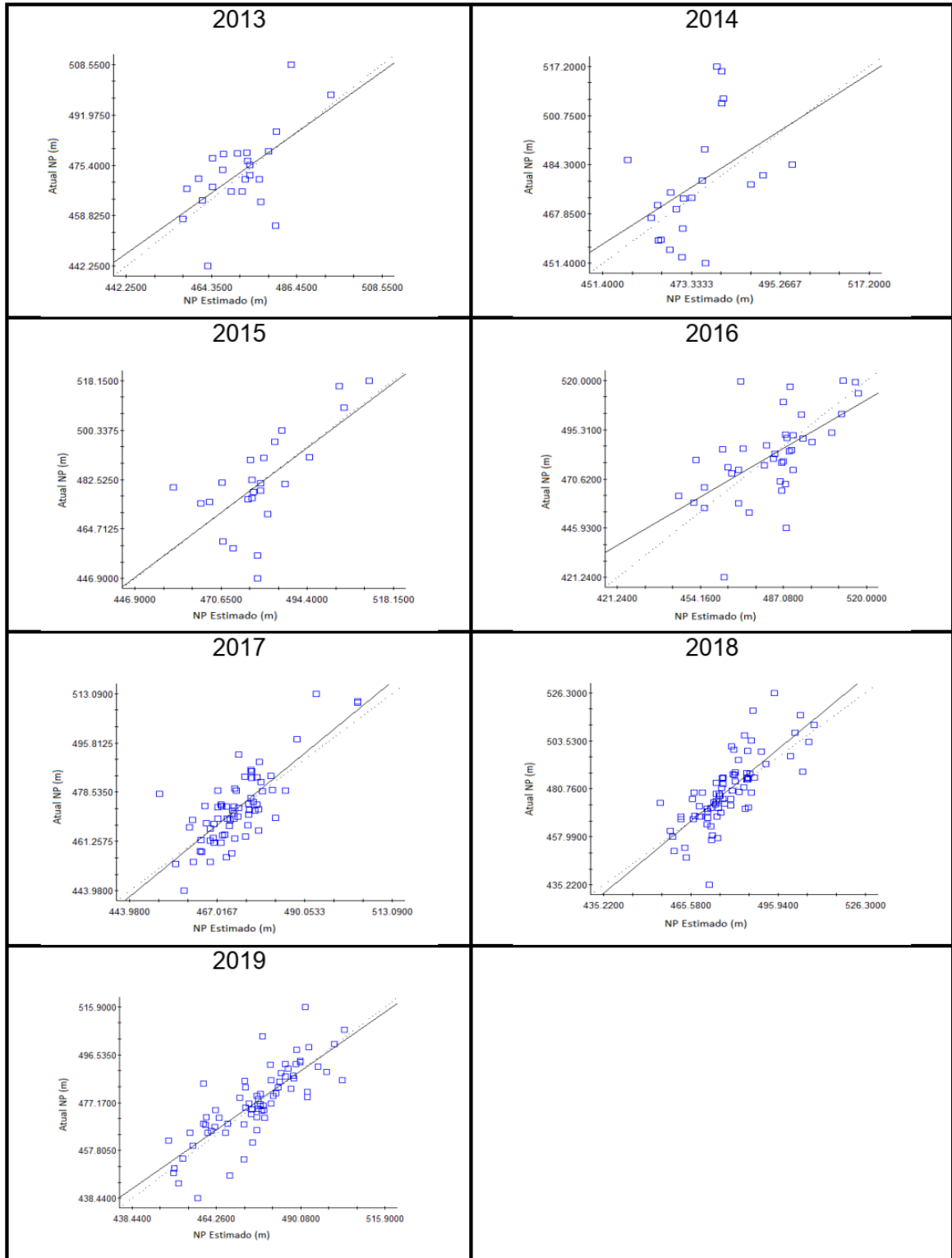
APÊNDICE E

Apêndice E – Semivariogramas do Nível Potenciométrico (NP) em Período Anual



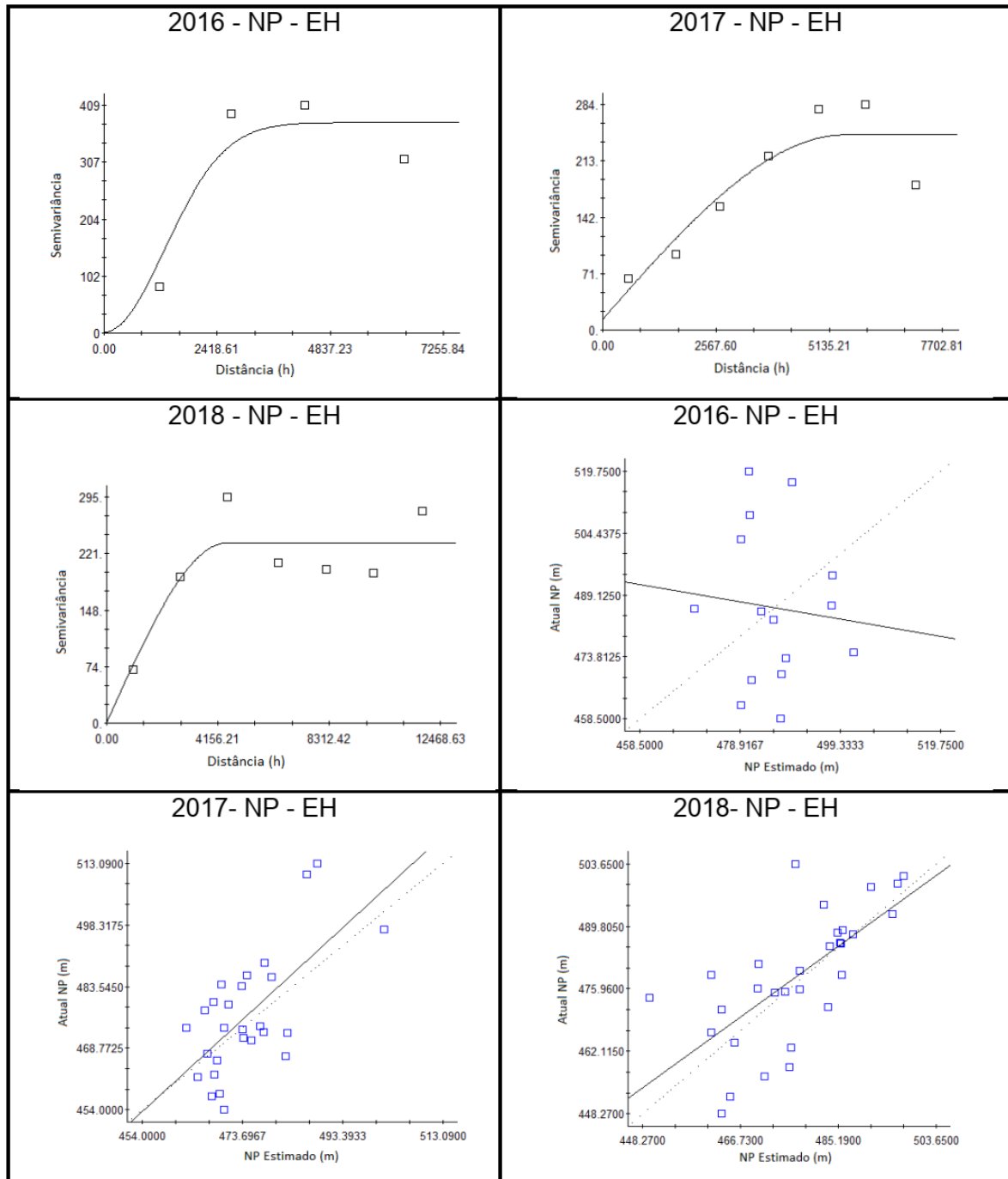
APÊNDICE F

Apêndice F – Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em Período Anual



APÊNDICE G

Apêndice G – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em período sazonal de Excedente Hídrico (EH)



APÊNDICE H

Apêndice H – Semivariogramas e Validação Cruzada do Nível Potenciométrico (NP) em período sazonal de Deficiência Hídrica (DH)

