

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Thais Sarinho Beham

**Análise do sistema de captação de água com enfoque no
rebaixamento do nível freático dos poços da cidade de
São Carlos-SP**

São Carlos

2018

Thais Sarinho Beham

**Análise do sistema de captação de água com enfoque no
rebaixamento do nível freático dos poços da cidade de
São Carlos-SP**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Maristela Oliveira dos Santos

**São Carlos
2018**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B419a Beham, Thais Sarinho
Análise do sistema de captação de água com enfoque no rebaixamento do nível freático dos poços da cidade de São Carlos-SP / Thais Sarinho Beham; orientadora Maristela Oliveira dos Santos. São Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Abastecimento público. 2. Sustentabilidade. 3. Rebaixamento do nível freático de poços. 4. Otimização linear. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Thais Sarinho Beham**

Data da Defesa: 31/10/2018

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Maristela Oliveira dos Santos (Orientador(a))

Aprovado
Aprovada
Aprovado

Prof. Dr. Edson Cezar Wendland

Profa. Dra. Edilaine Martins Soler


Prof. Dr. Marcelo Zaiat
Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo apoio. À minha orientadora pelos conhecimentos transmitidos, críticas construtivas e todo amparo. Às minhas queridas amigas que acabaram se tornando uma família para mim.

Agradeço também ao CNPq por financiar a minha Iniciação Científica que deu início a este trabalho, à EESC e a todos meus professores pelo meu aprendizado, contribuírem com minha visão de mundo e por me proporcionarem minha formação como engenheira ambiental.

“O Homem é parte da natureza e a sua guerra contra a natureza é, inevitavelmente, uma guerra contra si mesmo.”

Rachel Carson (Primavera Silenciosa)

RESUMO

BEHAM, T. S. **Análise do sistema de captação de água com enfoque no rebaixamento do nível freático dos poços da cidade de São Carlos-SP.** 2018. 59p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Um levantamento de informações sobre os recursos hídricos da região de São Carlos e sobre o seu sistema de captação de água foi realizado para sua compreensão e análise. Para estudar a situação do sistema foi desenvolvido um modelo matemático de otimização linear que considerou a captação e o rebaixamento do nível freático dos poços e a captação dos rios em um período de 30 anos. Para testar os modelos, foram gerados cenários considerando diversas proporções de uso de fontes subterrâneas e constatando o menor rebaixamento possível para uma resposta factível. As respostas indicam como deve ser a operação de captação de cada poço e rio em relação à sua ativação e vazão bombeada. Os resultados apresentam a melhor solução encontrada em termos de minimizar os impactos ambientais pois representam a configuração de operação que otimiza a resiliência do nível freático dos poços e cumpre as restrições impostas que visam garantir a sustentabilidade do sistema.

Palavras-chave: Abastecimento Público. Sustentabilidade. Rebaixamento do nível freático de poços. Otimização linear.

ABSTRACT

BEHAM, T. S. **Water supply system evaluation with approach in the lowering of the groundwater levels of the wells of the São Carlos city - Brazil.** 2018. 59p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A compile of information about the water resources and the water supply system in the city of São Carlos – Brazil was made for comprehension to further analysis. To study the system was developed a mathematical model of linear optimization which consider the lowering of the groundwater levels of the wells and the pumping of the rivers and the wells in a period of 30 years. To test the model, were made scenarios that consider diverse situations of pump water using different proportions of the superficial and ground water and for them were elected the lowest lowering possible for an achievable result. The solutions show how should be the configuration of each wells in terms of its activation and pumping. The results reveal the best solution found to minimize the environmental impacts by meaning the best configuration of the system operation to optimize the resilience of the groundwater levels and adapt to the constraints which claim to guarantee the sustainability of the system.

Keywords: Water Supply System. Sustainability. Groundwater level lowering. Linear Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das bacias Tietê-Jacaré e Mogi-Guaçu no estado de São Paulo assim como o contorno do município de São Carlos.	24
Figura 2 – Localização das sub-bacias no município de São Carlos com enfoque para a Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho (BHRM) e para Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão (BHRF).	25
Figura 3 – Exploração dos recursos hídricos na cidade de São Carlos.	27
Figura 4 – Efeito dos poços sobre os níveis estáticos (rebaixamento da carga hidráulica na bacia do Tietê-Jacaré, onde São Carlos está inserida).	29
Figura 5 – Localização dos poços atuais e poços propostos no PMSSanCa.	30
Figura 6 – Evolução das áreas de superfície impermeabilizada nas regiões dos rios Monjolinho e Feijão.	31
Figura 7 – Exemplo da variação do custo de captação de um rio conforme volume captado	39
Figura 8 – Evolução das demandas de água em São Carlos	45
Figura 9 – Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 1	49
Figura 10 – Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 1	49
Figura 11 – Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 2	50
Figura 12 – Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 2	51
Figura 13 – Comportamento da captação superficial nos cenários 1 e 2	51
Figura 14 – Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 3	52
Figura 15 – Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 3	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Demandas previstas para o sistema de abastecimento de água de São Carlos	44
Tabela 2 – Estimativa de Perdas no sistema de Abastecimento de Água	45
Tabela 3 – Valores das vazões dos poços em m^3/h e m^3/ano	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Variação da matriz de exploração de água ao longo do tempo no município de São Carlos	26
Quadro 2 – Dados dos poços na cidade de São Carlos	37
Quadro 3 – Valores dos parâmetros Rm, Vol e R	38
Quadro 4 – Porcentagem de captação subterrânea e Rebaixamento em cada cenário	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Área de Proteção Ambiental
APREM	Área de Proteção e Recuperação de Mananciais do Ribeirão do Feijão
BHRF	Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão
BHRM	Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IQA	Índice de Qualidade da Água
MEA	Método de Elementos Analíticos
PMSSanCa	Plano Municipal de Saneamento de São Carlos
S/O	Simulação/Otimização
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SP	São Paulo
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

\forall Para todo

Σ Somatório

\in Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Panorama da situação dos recursos hídricos da região de São Carlos	24
1.1.1	Caracterização da área	24
1.1.2	Sistema Aquífero Guarani (SAG)	25
1.1.3	Contexto histórico	26
1.1.4	Fontes de captação Subterrâneas	28
1.1.4.1	Localização dos poços	29
1.1.5	Fontes de captação Superficiais	29
2	DESENVOLVIMENTO	33
2.1	Caracterização do Ribeirão do Feijão	33
2.2	Caracterização do rio Monjolinho (Espraiado)	33
2.3	Plano Diretor de Saneamento de São Carlos	34
2.4	Revisão bibliográfica	34
2.5	Objetivos	36
2.6	Metodologia	36
2.6.1	Rebaixamento	36
2.7	Modelo matemático	38
2.8	Levantamento de dados	43
2.8.1	Vazão dos rios	43
2.8.2	Área	43
2.8.3	Volume de chuva	44
2.8.4	Demanda	44
2.8.5	Perdas no Sistema	44
2.8.6	Vazão dos poços	45
2.9	Custos utilizados	45
2.10	Experimentos Computacionais	46
2.10.1	Análise dos cenários	48
2.10.1.1	Cenário 1	48
2.10.1.2	Cenário 2	49
2.10.1.3	Captação superficial nos cenários 1 e 2	50
2.10.1.4	Cenário 3	50
3	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A insustentabilidade do uso da água é um problema crescente e grave observado em algumas regiões do Brasil, em especial no estado de São Paulo. Neste local, além do maior aglomerado populacional do país, o potencial hídrico é baixo para suprir a demanda, possuindo apenas 1,6% da água doce nacional (LOMBA, 2010). Exemplo disso é o estresse hídrico que a região metropolitana de São Paulo sofreu com início em 2014 no Sistema Cantareira.

O demasiado aumento e dependência que se tem gerado dos recursos subterrâneos é ilustrado pelo fato de 75% dos municípios do estado de São Paulo serem total ou parcialmente abastecidos por água subterrânea (DIAS, 2016). Costa (2010) alega que a outorga de uso dessas águas é realizada sem que haja critérios coerentes ou estudos do volume explotável adequado. A exploração é, em geral, realizada até o limite. Esse uso é justificado pelo autor pela diminuição dos custos de bombeamento da água e má qualidade das águas superficiais.

Muitos estudos relataram que a insustentabilidade do uso das águas subterrâneas pode trazer inúmeros malefícios e comprometer de maneira significativa o meio ambiente. Alguns países enfrentam situações drásticas atualmente, como o aquífero de Ogallala, no Arizona, nos Estados Unidos, que pode desaparecer pois já perdeu o equivalente a 18 vezes o volume do rio Colorado devido seu uso intenso na irrigação da agricultura. Na Indonésia, a exploração desenfreada dos aquíferos fez o mar avançar cerca de 15 quilômetros para o interior. Em Bancoc, capital da Tailândia, o solo em alguns lugares afunda cerca de 14 cm por ano devido a captação exagerada da água subterrânea que faz o solo ceder (APRILE, 2016). Como exemplo mais local tem-se que a cidade de Ribeirão Preto-SP, à aproximadamente 100km de São Carlos-SP, apresenta taxas de rebaixamento do aquífero de 1 metro por ano (OLIVEIRA, 2016).

Com isso, esse trabalho visa analisar o sistema de captação de água de São Carlos que vem progressivamente criando grande dependência da captação da água subterrânea. Em 2014, 54% da captação era realizado por poços (SAAE, 2016).

Como a escolha de como suprir o abastecimento (superficial ou subterrâneo) é embasada atualmente prioritariamente em questões econômicas, visa-se analisar como a captação irá interferir nos níveis freáticos do aquífero e estimar seu comportamento ao longo dos anos pela geração de cenários através da proposição de um modelo de otimização.

1.1 Panorama da situação dos recursos hídricos da região de São Carlos

O presente trabalho trata do problema de captação de água apresentado na cidade de São Carlos-SP que possui como fonte os rios Feijão e Monjolinho e a captação subterrânea pelo Aquífero Guarani em sua porção livre. Esta seção compreende a análise e caracterização dessas vertentes para possibilitar melhor entendimento do problema.

1.1.1 Caracterização da área

O trabalho estuda a cidade de São Carlos, a qual é um município do interior de São Paulo. De acordo com estimativas do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística ([IBGE, 2016](#)), datadas do censo de 2010, a cidade teria uma população de 243.765 habitantes em 2016 (estimativa). Também de acordo com o [IBGE \(2016\)](#), o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal - 2010 era de 0,805, acima da média brasileira de 0,699 ([G1, 2016](#)). Seu clima é Temperado de altitude, apresenta verão chuvoso e inverno seco e possui uma altitude média de 856m ([São Carlos Oficial, 2016](#)).

O estado de São Paulo é subdividido em 22 Unidades de Gestão de Recursos Hídricos ou também denominadas bacias hidrográficas. O município está localizado parte na bacia Tietê-Jacaré (ao sul) e parte na bacia Mogi-Guaçu (ao Norte). A totalidade da mancha urbana e os rios de abastecimento (Monjolinho e Feijão) são localizados na bacia do Tietê-Jacaré. A localização no estado pode ser observada na Figura 1.

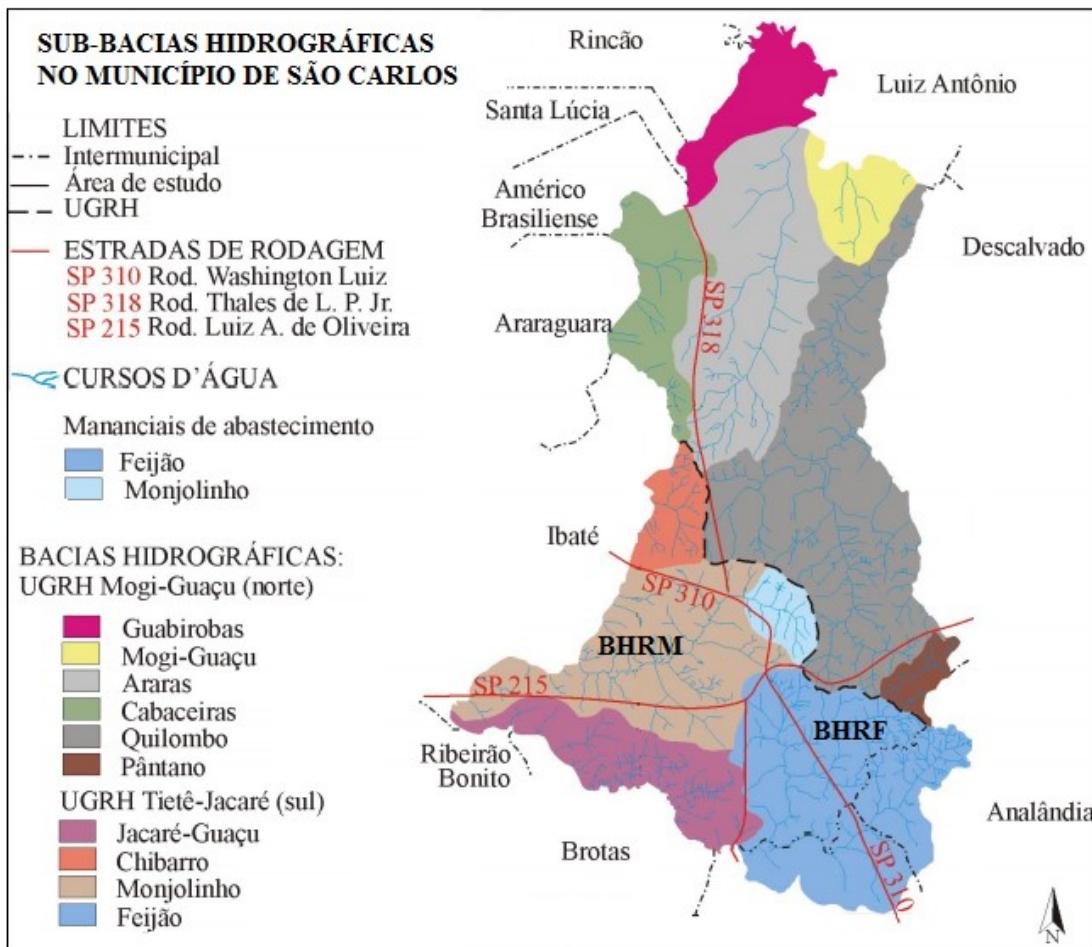
Figura 1: Localização das bacias Tietê-Jacaré e Mogi-Guaçu no estado de São Paulo assim como o contorno do município de São Carlos.



Fonte: Modificado de [Costa, Dupas e Pons \(2012\)](#)

Ao todo, a cidade de São Carlos corta o perímetro de 10 sub-bacias. A do Rio Monjolinho engloba, além de grande parte da mancha urbana da cidade de São Carlos, uma parte de Ibaté-SP e possui área de 275 km^2 . Já a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão (o outro rio que abastece a cidade) possui área aproximada de 240 km^2 (CERMINARO; OLIVEIRA, 2015). A localização destas podem ser observadas na Figura 2.

Figura 2: Localização das sub-bacias no município de São Carlos com enfoque para a Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho (BHRM) e para Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão (BHRF).



Fonte: modificado de Costa, Dupas e Pons (2012)

1.1.2 Sistema Aquífero Guarani (SAG)

O Aquífero Guarani está entre os maiores mananciais de água doce subterrânea do mundo. Está localizado na região centro-leste da América do Sul, e ocupa uma área de 1,2 milhões de km^2 , abrange o Brasil (840.000 km^2), Paraguai (71.700 km^2), Uruguai (58.500 km^2) e Argentina (255.000 km^2) (DAEE, 2016). Sua maior ocorrência é em território brasileiro, constituindo aproximadamente 60% de sua área total, englobando os estados

Quadro 1: Variação da matriz de exploração de água ao longo do tempo no município de São Carlos

Ano	Popu- lação	Consumo (L/hab.dia)	Captação Superficial				Captação Subterrânea	
			Galdino (L/s)	Feijão (L/s)	Espra- iado (L/s)	Total (L/s)	Vazão (L/s)	nº de poços
1989	150.027	374,3	50	364	180	594	56	10
1999	188.845	348,4	-	193,7	216,5	410,2	351,3	22
2009	220.463	347,2	-	246,3	225,9	472,3	439,2	21
2012	226.322	352,5	-	320,4	196,4	516,7	508	24

Fonte: Adaptado de [Costa \(2010\)](#) e [Prefeitura São Carlos \(2012\)](#)

de Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul ([DAEE, 2016](#)).

A sustentabilidade do uso do SAG está relacionada à sua forma de ocorrência, livre ou confinada. A forma livre ocorre quando o extrato superior do aquífero é permeável e a forma confinada quando este é impermeável. A cidade em estudo se encontra na zona de afloramento do aquífero, ou seja, em sua porção livre. Nestes casos, a análise da recarga (volume de água que adentra no aquífero) deve ser o fator limitante para definição de uma vazão sustentável. Essa vazão ambientalmente adequada pode ser fornecida pelo balanço hídrico entre a recarga e a saída de água. A saída de água é principalmente devida ao abastecimento dos rios superficiais, permitindo que possam ser perenes (não sequem na época de seca) ([SCALCO, 2014](#)).

O volume referente à vazão sustentável também é denominado de reserva ativa do aquífero. Este montante representa o volume que estaria disponível para captação e distribuição para abastecimento. Para alguns autores representa 4% da precipitação total anual e outros utilizaram o valor de 5% ([SINELLI et al., 2008](#) apud [SANTOS, 2009](#)).

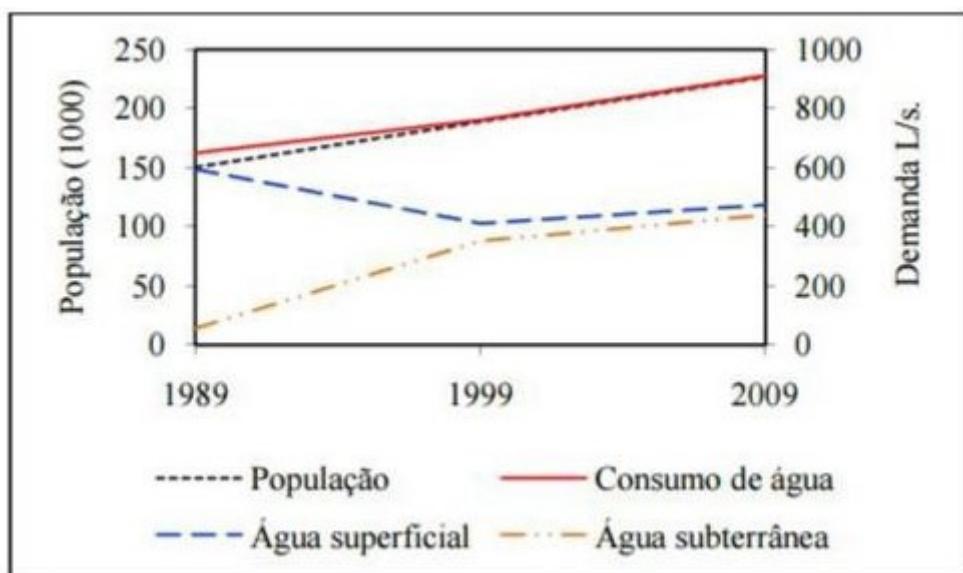
1.1.3 Contexto histórico

Atualmente percebe-se uma mudança no modelo de exploração dos recursos hídricos no estado de São Paulo. Este demonstrava prevalência do uso de fontes superficiais décadas atrás mas, atualmente, é baseado na captação por poços. Isso deve-se ao surto desordenado de exploração iniciado nos anos 70 devido ao barateamento dos custos das tecnologias de perfuração dos poços, tornando-a uma alternativa economicamente mais viável e também pela falta de políticas ambientais que freassem essas ações ([COSTA, 2010](#)). Todavia, esse panorama contraria o Plano Diretor do Sistema de Abastecimento de água de São Carlos que sugere a exploração inicialmente de fontes superficiais ([COSTA, 2010](#)). O Quadro 1 ilustra esse fenômeno.

Em 1989 a captação superficial era de 91,4% através dos Rios Galdino, Feijão e Monjolinho e havia apenas 10 poços para captação subterrânea que representava apenas 8,6% do volume total para abastecimento. Em 1999 suspende-se a captação do Rio Galdino devido à má qualidade das águas e o número de poços mais que dobram (22 poços) resultando no suprimento de quase metade da demanda (46,1%). Dados do [SAAE \(2016\)](#) informam que, em 2014, 46% do abastecimento era por fontes superficiais e 54% por fontes subterrâneas. Segundo [Prefeitura São Carlos \(2012\)](#), com o Plano Municipal de Saneamento de São Carlos - PMSSanCa, 62% das fontes superficiais são obtidas do Ribeirão do Feijão e os restantes 38% do Córrego do Espraiado.

A partir da Figura 3 é possível perceber como esse crescimento do uso de poços foi significativo.

Figura 3: Exploração dos recursos hídricos na cidade de São Carlos.



Fonte: [Costa \(2010\)](#)

A falta de políticas ambientais é ressaltada por [Costa \(2010\)](#) na medida em que é relatado uma exploração desenfreada, feita até o limite. A definição de critérios de outorgas é feita em geral de maneira sistemática, sem considerar fatores relevantes como características e necessidades ambientais de cada região. Também relata o autor que os cálculos de reservas explotáveis ainda são controversos. A persistência dessa situação pode acarretar em problemas de sobreexploração localizada ou de contaminação, a partir das bordas da bacia, em áreas urbanizadas ou industrializadas que poderão comprometer o aquífero ([COSTA, 2010](#)).

1.1.4 Fontes de captação Subterrâneas

A configuração predominante da exploração dos recursos hídricos por fontes subterrâneas no estado de São Paulo é demonstrada por 75% dos municípios do estado serem total ou parcialmente abastecidos por esse tipo de captação (DIAS, 2016). São Carlos possui uma localização privilegiada por se encontrar na zona de recarga do Aquífero Guarani, conforme supracitado. O fato de se encontrar nessa zona implica em serem necessários certos cuidados com políticas públicas adequadas para garantir a qualidade da água do reservatório. Adicionalmente, a cidade encontra-se em altitudes elevadas o que dificulta a captação.

Pode-se analisar o rebaixamento através de dois parâmetros: pelo nível freático estático do poço que se refere ao nível da água sem interferência do bombeamento (condição em repouso) e pelo nível freático dinâmico. Este último é apenas devido à atividade de bombeamento pela formação do cone de rebaixamento, ou seja, após se encerrar a atividade de captação o nível d'água retorna ao nível estático (MATTA, 2018). Este trabalho focou na análise dos níveis freáticos estáticos dos poços.

Rabelo (2006) constata que já houve um rebaixamento estático de 51 m do nível do aquífero na cidade, isso é demonstrado na Figura 4 que relata os estudos do autor sobre os rebaixamentos da carga hidráulica na bacia do Jacaré-Tietê.

Segundo Costa (1998), dentre os efeitos indesejáveis de uma exploração excessiva se destacam:

a) De ordem econômica:

- Exaustão do aquífero (dano ao reservatório para qualquer uso);
- Rebaixamento que inviabilize o uso econômico da água;

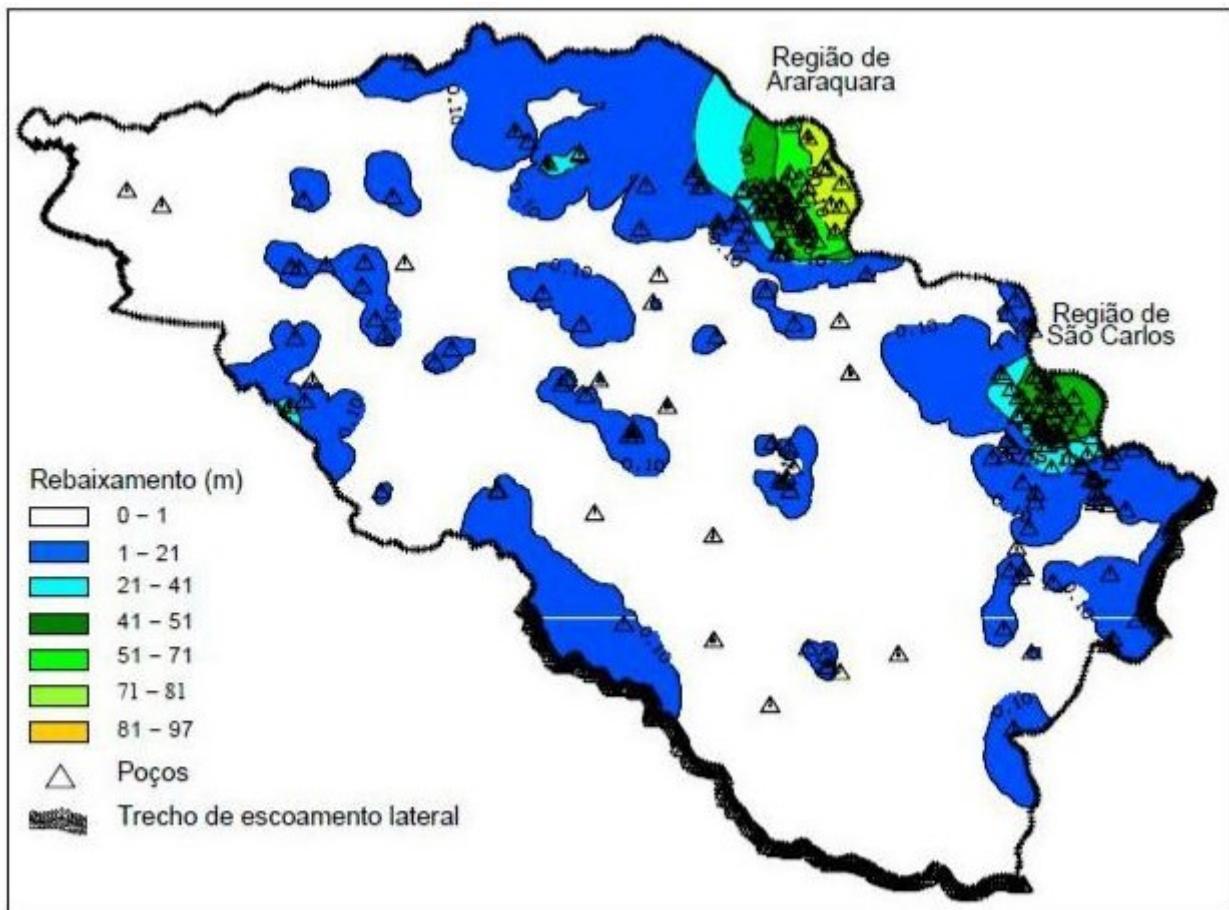
b) De ordem ambiental:

- Inviabilização do uso das captações existentes por limite das câmaras de bombeamento;
- Acarreta em introdução de água de qualidade inaceitável ao aquífero;
- Provoca recalque do terreno, podendo prejudicar construções civis (estradas, prédios, tubulações, etc.);
- Prejudica o equilíbrio do meio ambiente ao interferir nas descargas em corpos hídricos;

c) De ordem social:

- Prejudica usuários de poços;
- Pode interferir no uso econômico da natureza;

Figura 4: Efeito dos poços sobre os níveis estáticos (rebaixamento da carga hidráulica na bacia do Tietê-Jacaré, onde São Carlos está inserida).



Fonte: [Rabelo \(2006\)](#).

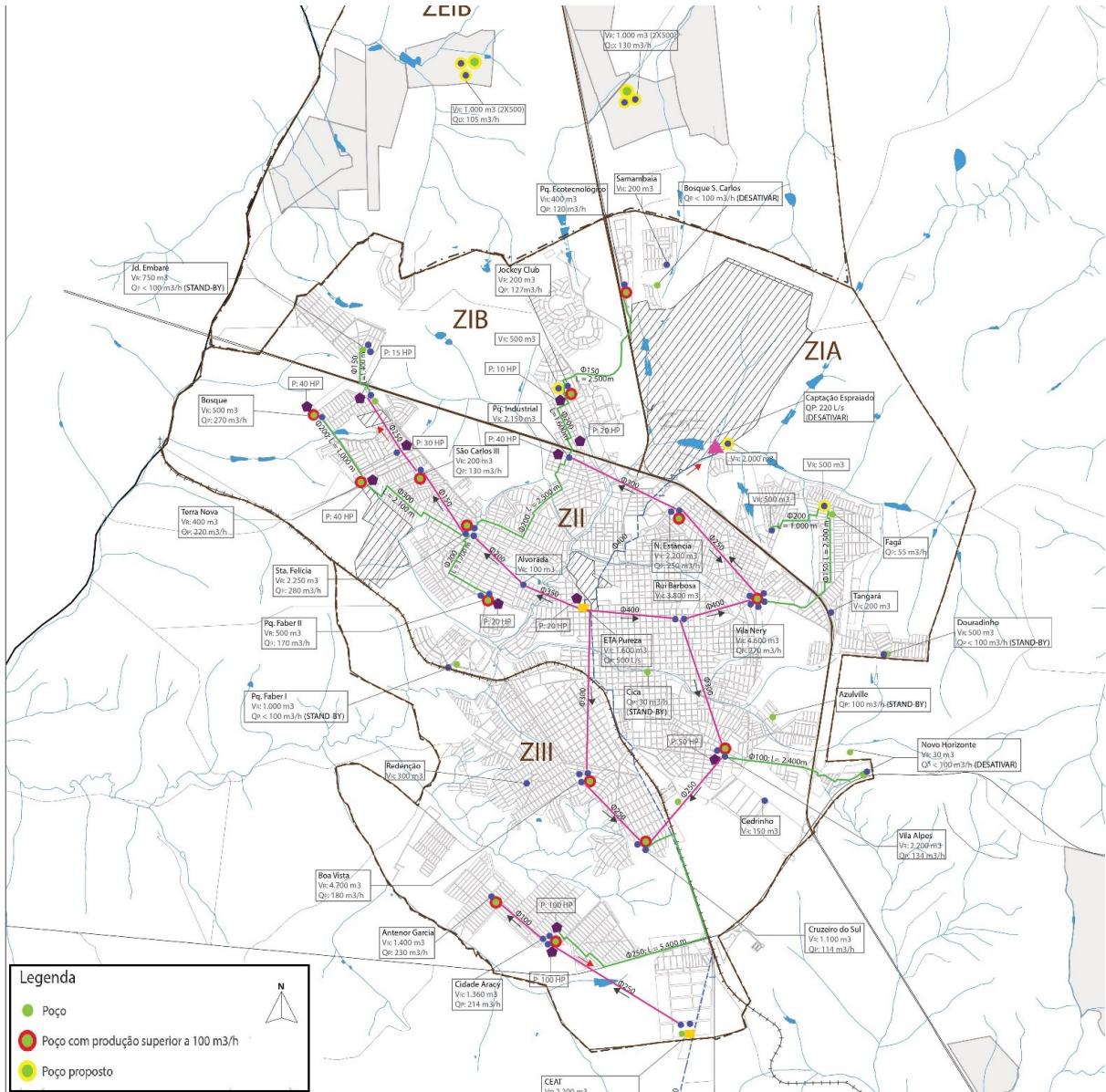
1.1.4.1 Localização dos poços

Segundo dados de 2012 do Plano Municipal de Saneamento (PMSSanCa), a cidade consta com 22 poços públicos e 4 privados ([ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2012](#)). A localização dos mesmos é concentrada na região urbana da cidade, conforme observado na Figura 5:

1.1.5 Fontes de captação Superficiais

O crescimento desenfreado e desorganizado das cidades brasileiras vem resultando em impactos negativos para o meio e, em especial, para os recursos hídricos de sua proximidade. Dentre as causas, ressalta-se a contaminação dos mananciais por esgoto doméstico, industrial e pluvial que pode inviabilizar o uso da água para abastecimento, gerar enchentes e poluição difusa. Isto é devido a um mau planejamento e desenvolvimento da drenagem urbana e também à poluição por resíduos sólidos causada por sua má gestão e disposição inadequada ([COSTA, 2010](#)).

Figura 5: Localização dos poços atuais e poços propostos no PMSSanCa.



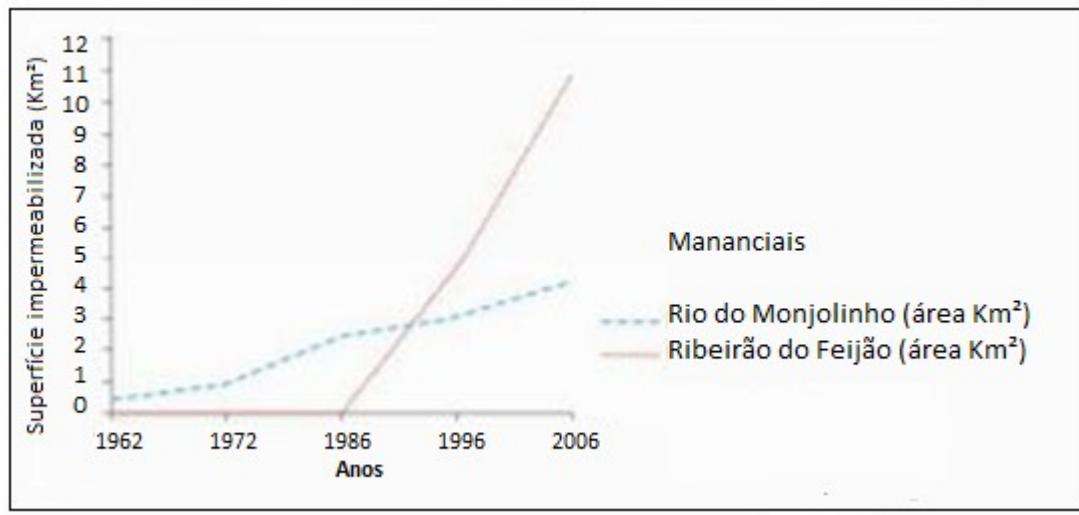
Fonte:Modificado de ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental (2012).

Dessa forma, a qualidade dos recursos superficiais implica muito em seu custo econômico de tratamento para viabilizar sua distribuição a população. Tundisi (2016) exemplifica que o custo para se tratar água na região de Cotia-SP é cerca de R\$300,00 para 1000m³. Em comparação, a mesma quantidade de água possui o custo de tratamento de R\$2,00 em uma cidade com os rios com proteção de matas ciliares.

Tundisi et al. (2007) avaliaram as características ambientais dos rios da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão através do IQA (Índice de Qualidade da Água), vegetação ripária, deposição sedimentar, análise dos peixes e se há presença de abrigos para eles e a estabilidade das margens. As conclusões do trabalho indicam que o manancial se encontra

degradado e nos piores trechos verificam-se elevada interferência antrópica atribuída ao uso intensivo do solo pela atividade agrícola. O avanço da mancha urbana sobre os rios é algo nítido na expansão da cidade de São Carlos, isto resulta em aumento dos despejos de águas residuárias de origem doméstica e esgotos não tratados na bacia, comprometendo a qualidade de suas águas. O rio Monjolinho e o Ribeirão do Feijão passam por esse processo conforme constatado por [Costa \(2010\)](#) e ilustrado na Figura 6.

Figura 6: Evolução das áreas de superfície impermeabilizada nas regiões dos rios Monjolinho e Feijão.



Fonte: [Costa \(2010\)](#)

Além dos problemas ocasionados pela urbanização, a região é caracterizada pelo uso intensivo do solo pelas atividades relacionadas ao agronegócio, destacam-se a pecuária, cultura de cana de açúcar, laranja e reflorestamento. São atividades que demandam grande volume de água e no caso das culturas, colaboram para a poluição da água devido à poluição difusa causada pelo uso de agrotóxicos. Estes últimos são bio-acumuladores e estão associados a efeitos adversos na saúde humana afetando o sistema nervoso, a ação imunodepressora ou por seu potencial cancerígeno. Os inseticidas, dentre os agrotóxicos, são os que representam o maior impacto ambiental, especialmente na cultura de cana-de-açúcar, pois são aplicados diretamente no solo ([TAVANTI et al., 2009](#)).

Com a intenção de proteger os mananciais de águas superficiais e subterrâneas, em 28 de novembro de 1997 é promulgada a Lei Estadual de Proteção dos Mananciais (Lei 9.866 /97) que dispõe sobre diretrizes e normas para a proteção e recuperação da qualidade ambiental das bacias hidrográficas que servem como mananciais para abastecimento do Estado de São Paulo ([SÃO PAULO, 1997](#)). Segundo esta lei, as águas dos mananciais são prioritárias para o abastecimento público em detrimento de qualquer outro interesse.

Com isso, as bacias hidrográficas do rio Monjolinho e do ribeirão do Feijão que são

classificadas como áreas de mananciais, deveriam apresentar restrições ao crescimento da mancha urbana em suas regiões e um plano de gestão ambiental com o intuito de proteção e recuperação.

2 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será abordado revisão bibliográfica, objetivos, metodologia e resultados.

2.1 Caracterização do Ribeirão do Feijão

O Ribeirão do Feijão representa 62% do volume de captação superficial (Prefeitura São Carlos, 2012). Sua bacia possui área aproximada de 240km^2 (CERMINARO; OLIVEIRA, 2015). A cobertura do solo é composta por 78,7% da área relacionada às atividades do agronegócio, sendo 38,7% à pecuária, 13,9% à cultura de laranja, 12,8% à solo exposto e por último 3,1% destinados a cana de açúcar. Em contrapartida, apenas 16,4% ($36,5\text{Km}^2$) é coberto por fragmentos florestais, demonstrando que a bacia está bastante alterada (COSTA, 2010). O rio possui 22 km de comprimento e na sua foz está localizada a Usina Hidrelétrica Ibitinga de 131,5 MW (CERMINARO; OLIVEIRA, 2015).

Sua área está localizada na ÁREA de Proteção Ambiental (APA) de Corumbataí criada pelo Decreto Estadual nº 20.960, de 8 de junho de 1983, e no município de São Carlos, onde compreende a ÁREA de Proteção e Recuperação de Mananciais do Ribeirão do Feijão (APREM), instituídas pela Lei nº 13.944/2006 (CERMINARO; OLIVEIRA, 2015).

Quanto à vegetação ripária (presente em espaços próximos a corpos da água), verifica-se que em 2006, dos $16,3\text{Km}^2$ previstos de serem mantidos ao longo das margens dos rios em todo manancial pelo Código Florestal, restam apenas $5,5\text{Km}^2$, ou 33,7%. Um estudo realizado nos Estados Unidos, sugere que a qualidade da água dos rios aumenta quando as matas ciliares cobrem pelo menos de 50 a 75% do comprimento dos canais (COSTA, 2010).

2.2 Caracterização do rio Monjolinho (Espraiado)

O rio Monjolinho representa 38% da captação superficial (Prefeitura São Carlos, 2012). Sua bacia possui área aproximada de 275km^2 e vazão máxima na época de seca de $2,28\text{m}^3/\text{s}$ e no período chuvoso de $2,85\text{m}^3/\text{s}$ (CAMPAGNA, 2005). As atividades relacionadas ao agronegócio representam 74,3% da área total ($17,83\text{Km}^2$), sendo 17,4% à pecuária, 9,1% à laranja, 7,5% por solo exposto, 6,2% por cana-de-açúcar e 0,9% por áreas de reflorestamento. O restante é composto por 17,4% de superfície impermeabilizada, valor bastante elevado que resulta em muitos impactos à bacia, e apenas 8,3% de fragmentos florestais (COSTA, 2010).

A mata ciliar também se encontra em estado crítico, dos $1,9\text{Km}^2$ previstos para serem preservados pelo Código Florestal, verifica-se que restam apenas 25,8% ($0,5\text{Km}^2$).

Apesar de não obrigatoriamente a quantidade de vegetação ripária traduzir-se em qualidade da água, constata-se que esse grande déficit pode contribuir para redução da qualidade e inclusive da quantidade de água desse curso d'água (COSTA, 2010).

2.3 Plano Diretor de Saneamento de São Carlos

O plano consiste de diretrizes para o tratamento de água e esgoto, abastecimento e resíduos. No último plano aprovado, realizado em 2012, foi proposto em relação ao que concerne este trabalho (ESA: Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012):

- a) Desativação da captação de água do Rio Monjolinho;
- b) Aumento da Captação do Ribeirão do Feijão;
- c) Desativar poços de baixa vazão, mas preservá-los para situações emergenciais;
- d) Limitar a captação aos 14 poços de maior produtividade e adicionar mais 2 poços em zonas afastadas com vazão de $130\text{m}^3/\text{h}$;
- e) Realizar o funcionamento dos poços na condição limite de 20h/dia;
- f) Recuperação da mata ciliar no entorno dos rios;

2.4 Revisão bibliográfica

Nesta seção são exemplificados alguns trabalhos que serviram de subsídio e motivação para a elaboração deste trabalho.

O trabalho do autor Souza (2003) propôs um modelo matemático para funcionar como ferramenta para outorga de uso das águas subterrâneas. Esse modelo é de simulação/otimização (S/O) e utiliza-se do método dos elementos finitos. Seu objetivo foi o de obter a máxima extração em volume de água que o aquífero suporta sem sofrer impacto ambientalmente relevante e ainda com mínimo custo de operação de extração. Isto foi realizado por meio do cálculo das cargas piezométricas em cada poço, visualização das linhas de mesmo potencial de carga em conjunto com o fluxo das águas no aquífero e da otimização de um sistema de extração de fontes pontuais definidas pelo usuário. Foi argumentado que o limite seria definido por diminuição de 80% da carga piezométrica do nível d'água subterrâneo. Obtiveram-se resultados satisfatórios para empregabilidade do modelo em diversas situações.

Heine (2005) analisou a cidade de Ivoi-RS (com aproximadamente 16000 habitantes) que conta com seu sistema de abastecimento sendo 100% captação subterrânea do Sistema Aquífero Guarani. A cidade se apresenta em um longo período sem nenhum controle e limite referente aos impactos no recurso. Foi constatado grande depleção dos níveis freáticos, colapso de poços e diminuição da produtividade. O estudo foi focado na análise histórica do comportamento da superfície potenciométrica em 30 anos (1973-2003). Observou-se

a relação das vazões totais com o número de poços e o período de tempo. Constatou-se também que grandes vazões concentradas em um poço só apresentavam maior depleção que grandes vazões distribuídas entre vários poços. O resultado do trabalho indicou vazões decrescentes de captação devido à maior exploração que recarga e constatou-se rebaixamentos de até 53 metros.

Um estudo mais recente, de [Neto \(2010\)](#), elaborou um problema característico da região do nordeste brasileiro: alta evapotranspiração das águas superficiais que supera a precipitação causando grandes períodos de estiagem e uma rápida diminuição da disponibilidade da água superficial acumulada nos períodos chuvosos. Dessa forma, as águas subterrâneas possuem um fator estratégico devido a não sofrerem evaporação. Com isso, o autor criou cenários de consumo e estimativas de recarga para proporcionar subsídios para tomada de decisão quanto ao uso do aquífero, visando um uso adequado, racional e ambientalmente correto desse recurso.

O objetivo final de [Neto \(2010\)](#) foi determinar o valor máximo do volume adequado de captação por poço. A análise foi feita considerando as componentes do gradiente hidráulico da água subterrânea. Caso a água esteja com o gradiente com direção de distanciamento do local de armazenamento, ela é dita como componente negativa. Caso contrário, componente positiva. O fluxo de água é representado pela diferença das componentes positivas e negativas. Com isso, limita-se a vazão de um poço pelo valor positivo do fluxo de água local.

Outro estudo que trata desse tema é o realizado por [Boico \(2016\)](#) que utiliza o Método de Elementos Analíticos (MEA) para simular o escoamento do SAG em Bauru-SP e com isso estimar cenários para o rebaixamento dos níveis piezométricos causados pelos poços. Estimou-se quanto seria o rebaixamento caso instalem os poços previstos aos próximos anos e como isso afetaria os antigos poços e até as cidades vizinhas. Para tal, utilizou-se as vazões dos poços, como funciona o escoamento do aquífero e os principais condicionantes geológicos. O Método de Elementos Analíticos foi desenvolvido por Otto Strack, é um método computacional baseado na sobreposição de expressões analíticas. O intuito do MEA é resolver problemas de escoamento de água subterrânea em escala local e regional ([BOICO, 2016](#)).

O trabalho de [Oda et al. \(2005\)](#) também atua na temática ao propor critérios para a exploração racional das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Tubarão, na região de Sorocaba-SP. Através de dados de recarga e de estudos geológicos criou-se um mapa de vazão recomendada para exploração na região com o intuito de preservar os recursos hídricos subterrâneos de impactos causados por uma captação intensiva. Determinou-se como diretrizes: a quantidade máxima a ser captada como 50% do valor da recarga, o número de poços máximo por área de 4 por km^2 e o rebaixamento máximo permitido por poço de 150 m.

2.5 Objetivos

Analisar a configuração do sistema de captação de água de São Carlos-SP através de um modelo matemático a ser otimizado e prever seu comportamento em um período de 30 anos. Para tal, estuda-se as proporções de água subterrânea e superficial e o rebaixamento do nível freático da água subterrânea dos poços considerando custos diferenciados em cada tipo de captação e no rebaixamento.

2.6 Metodologia

O problema a ser analisado consiste em formular uma função a ser minimizada buscando a melhor solução em termos da proporção de água subterrânea e superficial e diferenciando também qual a vazão em cada poço a fim de conciliar um menor rebaixamento. A metodologia aplicada não foi retirada da literatura.

2.6.1 Rebaixamento

Para estimar o valor do rebaixamento do nível freático poço em função da quantidade de água retirada, se analisou como os poços se comportaram nos anos anteriores. Para isso, foi utilizado o estudo de [Perroni e Wendland \(2008\)](#) que catalogou quanto cada poço diminuiu seu nível freático, a vazão e o tempo de funcionamento no período de 1970 a 2003. Dos 28 poços existentes em 2003 na cidade de São Carlos, apenas 18 puderam ser analisados por possuírem as informações necessárias disponíveis. Com esses dados, foi possível prever como cada um reage a determinada quantidade de água retirada e estimar como responderá a quantidades de bombeamento maiores. As informações podem ser observadas no [Quadro 2](#).

Analizando as informações no [Quadro 2](#), primeiramente calculou-se o rebaixamento médio de cada poço i por ano. Dividiu-se o valor em metros de rebaixamento do poço i pelo seu tempo de funcionamento como apresentado na [Equação 2.1](#).

$$Rm_i = \text{Rebaixamento total} / \text{Idade} \quad (2.1)$$

Em seguida, calculou-se o volume total de água captado por poço i e por ano. Esse dado foi obtido estimando um funcionamento médio de 20 horas por dia que, segundo o Plano Municipal de Saneamento de São Carlos ([Prefeitura São Carlos, 2012](#)), é o máximo permitido pelo SAAE. Assim, com o produto da vazão do poço i pelo tempo transcorrido, obteve-se o volume captado do poço i que é dado pela [Equação 2.2](#).

$$Vol_i[m^3] = \text{Vazão}[m^3/h] \cdot (20 \text{ horas} \cdot 365 \text{ dias}) \quad (2.2)$$

Utilizando esses dois parâmetros Rm_i e Vol_i , buscou-se uma maneira de obter uma relação que expresse como o rebaixamento ocorre. Deste modo, dividiu-se o valor Rm_i por

Quadro 2: Dados dos poços na cidade de São Carlos

Nº Poço	Nome local	Rebaixamento (m)	Idade (anos)	Vazão (m ³ /h)
2	Antônio Fischer dos Santos	31	34	48,5
5	Distrito Industrial MA	1	23	39,6
8	Samambaia	6	20	18
9	Maria Stela Fagá	2	17	93,1
11	Azuville II	16	16	95
12	São Carlos III	11	15	130,7
14	Parque Faber	11	12	17,6
16	Boa Vista	19	11	156,5
17	Cidade Aracy	35	9	171,6
19	Tramer	8	8	22,2
20	Vila Nery	24	77	286,7
21	Cruzeiro do Sul	7	5	125
22	Parque Fehr	3	5	66,3
23	Jockey Club II	3	4	143,8
24	Nova Estância	2	3	285
25	Douradinho	16	1	49,2
26	Núcleo Habitacional WLS	4	1	130,7
28	Vila Alpes	4	1	182,2

Fonte: Fonte: Perroni e Wendland (2008)

Vol_i calculado para cada poço, obtendo-se uma constante para cada poço. Esta constante, denominada R_i (Razão de Rebaixamento) representa o rebaixamento médio anual por volume retirado do poço i e é obtida pela Equação 2.3.

$$R_i = Rm_i/Vol_i \quad (2.3)$$

O processo é exemplificado utilizando os dados do poço de número 2 (Equações 2.4, 2.5, 2.6):

$$Rm = \text{rebaixamento total}/\text{idade} = 31/34 = 0,912 \text{ m/ano} \quad (2.4)$$

$$Vol = \text{Vazão}[m^3/h] \cdot (20 \text{ horas} \cdot 365 \text{ dias}) = 48,5 \cdot 20 \cdot 365 = 354050m^3/\text{ano} \quad (2.5)$$

$$R = Rm/Vol = 0,912/354050 = 2,576 \cdot 10^{-6}m/m^3.\text{ano} \quad (2.6)$$

Isso significa que, caso se retirem 1.000.000 m^3 desse poço distribuídos em um ano, ele possuirá um rebaixamento estimado em 2,58 metros.

Dessa forma, realizando o mesmo para os demais poços têm-se os valores observados no Quadro 3:

Quadro 3: Valores dos parâmetros Rm, Vol e R

N. Poço	Rm (m/ano)	Q (m ³ /ano)	R [(m/m ³)/ano] x 10 ⁻⁶
2	0,912	354050	2,576
5	0,043	289080	0,149
8	0,3	131400	2,283
9	0,118	679630	0,174
11	1	693500	1,442
12	0,733	954110	0,768
14	0,917	128480	7,137
16	1,727	1142450	1,512
17	3,889	1252680	3,105
19	1	162060	6,171
20	3,429	2092910	1,638
21	1,4	912500	1,534
22	0,6	483990	1,240
23	0,75	1049740	0,714
24	0,667	2080500	0,321
26	4	954110	4,192
28	4	1330060	3,007

Fonte: elaborado pela autora

O poço de número 25, em destaque na tabela, foi excluído das análises por possuir um valor muito destoante dos demais.

Com isso, o rebaixamento estimado é obtido pelo produto do volume de água retirado anual de cada poço multiplicado pela sua respectiva razão de rebaixamento e adicionado ao rebaixamento encontrado no período anterior, conforme equação 2.7:

$$Reb_{t,i} = xp_{t,i} \cdot R_i + Reb_{t-1,i} \quad (2.7)$$

2.7 Modelo matemático

As decisões principais consistem em decidir o volume de captação subterrânea de cada poço i em cada período de tempo t e o volume de captação superficial de cada rio j no período t com objetivo de atender as demandas a cada ano. Cada período t representa um ano dentro de um horizonte de tempo de T anos. A demanda de cada ano t é determinística e será baseada no consumo *per capita*, crescimento da população e perdas no sistema do município em questão.

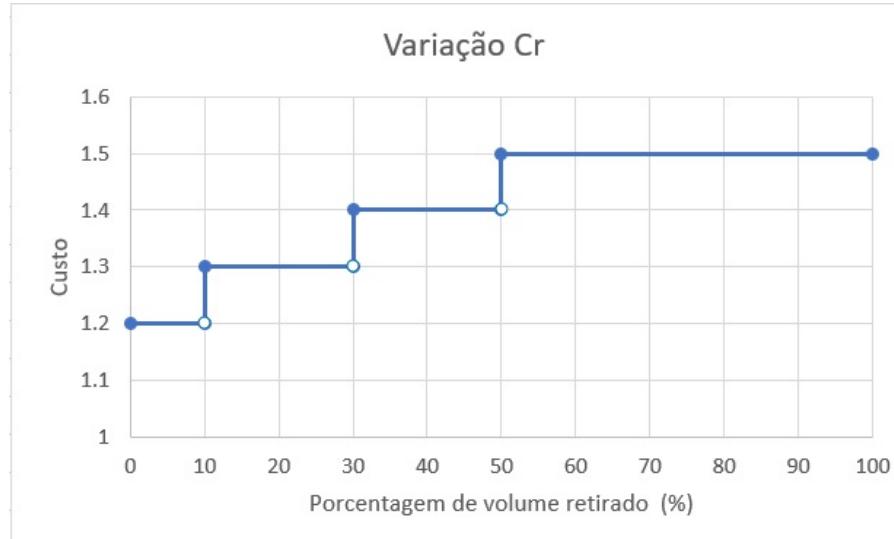
Para cada rio j e período t , sabe-se qual é seu volume de água anual, representado por $Vr_{j,t}$. Assim, permite-se que seja captado uma fração desse volume, indicada por F_j .

Para estudar os impactos da captação de água em cada rio j , estabelece-se faixas para captação, as quais correspondem a uma fração do total disponível. Cada faixa k apresenta um custo diferenciado para o volume captado no rio j . Isso significa que o custo de captação varia conforme a quantidade retirada. Caso seja bombeado um volume muito grande, este valor estará contido em uma faixa que representa um custo mais elevado em comparação à um volume menor.

Dessa forma, em cada faixa k , pode-se captar uma quantidade maior ou igual a $PC_{j,k-1} \cdot Vr_{j,t} \cdot F_j$ e inferior a $PC_{j,k} \cdot Vr_{j,t} \cdot F_j$, onde $PC_{j,k}$ é uma fração do volume total de água no rio j para limitar a faixa k . Considerando o estabelecimento de K faixas, tem-se que $\sum_{k=1}^K PC_{j,k} = 1, \forall j$.

A Figura 7 mostra um exemplo para um determinado rio com as faixas de captação e seus respectivos os custos (fator multiplicador). O mesmo é feito para cada poço i , ou seja, considera-se captação por faixas e os custos diferenciados nas faixas. Para todos os rios utiliza-se um mesmo número de faixas de captação k bem como para todos os poços, utiliza-se um mesmo valor m de faixas de captação.

Figura 7: Exemplo da variação do custo de captação de um rio conforme volume captado



Fonte: elaborado pela autora

Esta consideração na análise deve-se à avaliação do problema em estudo no trabalho de [Beham \(2017\)](#). Assim, visa-se que modelo não opte por realizar uma captação excessiva nos locais que apresentam menor rebaixamento proporcionalmente e, portanto, realize um arranjo melhor distribuído.

O objetivo do problema é a minimização dos custos sendo este formado por três parcelas. A primeira parcela é referente a captação subterrânea: é composta pelo produto do volume de água retirado no período t no poço i pelo seu respectivo custo, considerando as faixas de captação. A segunda é referente a captação superficial: é o produto do volume

de água bombeado no período t no rio j pelo seu respectivo custo, considerando sua faixa de captação da água. Finalmente, a última parcela é referente ao rebaixamento do nível freático do poço: é obtida pelo produto da quantidade de metros que o poço i foi rebaixado no período t pelo seu respectivo custo.

Os seguintes índices são utilizados:

Índices	
N	número total de poços
J	número total de rios
T	número total de períodos
K	número total de faixas para os rios
M	número total de faixas para os poços
$i \in \{1, \dots, N\}$	índice dos poços
$j \in \{1, \dots, J\}$	índice dos rios
$t \in \{1, \dots, T\}$	índice dos períodos
$k \in \{1, \dots, K\}$	índice das faixas dos rios
$m \in \{1, \dots, M\}$	índice das faixas dos poços.

As seguintes variáveis foram utilizadas:

Variáveis	
Xp_{it}	Volume de água retirado do poço i no período t
$XFp_{i,t,m}$	Volume de água retirado do poço i no período t na faixa m
Xr_{jt}	Volume de água retirado do rio j no período t
$XFr_{j,t,k}$	Volume de água retirado do rio j no período t na faixa k
$YFp_{i,t,m}$	1 se ocorre captação de água no poço i na faixa m durante o período t e 0, caso contrário
$YFr_{j,t,k}$	1 se ocorre captação de água no rio j na faixa k durante o período t e 0, caso contrário
Reb_{it}	Rebaixamento no poço i no período t .

A seguir, os seguintes parâmetros:

Parâmetros	
PP_{it}	perda de água captada no poço i no período t (em %)
PR_{jt}	perda de água captada no rio j no período t (em %)
D_t	demanda por água agregada no período t
F_j	Fração da vazão do rio j
Vr_{jt}	volume de água do rio j no período t
$PC_{j,k}$	% do volume total de água no rio j para limitar a faixa k
$PP_{i,m}$	% do volume total de água no poço i para limitar a faixa m
MF_m	Múltiplo da faixa m (multiplica Q_i)
$chuva_t$	Volume de chuva ocorrido no período t (histórico)
Q_i	vazão observada em 2003 no poço i
Er_i	Extrapolação do Rebaixamento do poço i
R_i	Constante de Rebaixamento do poço i
$cr_{j,k,t}$	Custo de captação de água no rio j na faixa k no período t
$cp_{i,m,t}$	Custo de captação de água no poço i na faixa m no período t
$Creb_i$	Custo de rebaixamento do poço i

Deste modo, a formulação matemática do modelo pode ser descrita como um problema de minimização dos custos descrito pelas expressões (2.8) - (2.20).

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T cr_{j,k,t} \cdot XFr_{j,k,t} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T cp_{i,m,t} \cdot XFp_{i,m,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Creb_i \cdot Reb_{it} \quad (2.8)$$

sujeito a :

$$\sum_{i=1}^N (1 - PP_{it}) \cdot Xp_{it} + \sum_{j=1}^J (1 - PR_{jt}) \cdot Xr_{jt} \geq D_t \quad \forall t; \quad (2.9)$$

$$Xr_{jt} = \sum_{k=1}^K XFr_{j,t,k} \quad \forall j, t; \quad (2.10)$$

$$PC_{j,k-1} \cdot Vr_{jt} \cdot F_j \cdot YFr_{j,t,k} \leq XFr_{j,t,k} \leq PC_{j,k} \cdot Vr_{jt} \cdot F_j \cdot YFr_{j,t,k} \quad \forall t; \quad (2.11)$$

$$\sum_{k=1}^K YFr_{j,t,k} \leq 1 \quad \forall j, t; \quad (2.12)$$

$$\sum_{i=1}^I Xp_{it} \leq 0,05 \cdot chuva_t \quad \forall i, t; \quad (2.13)$$

$$Xp_{it} = \sum_{m=1}^M XFr_{i,t,m} \quad \forall j, t; \quad (2.14)$$

$$PPC_{i,m-1} \cdot Q_i \cdot YFr_{i,t,m} \leq XFr_{i,t,m} \leq PP_{i,m} \cdot Q_i \cdot YFr_{i,t,m} \quad \forall t; \quad (2.15)$$

$$\sum_{m=1}^M YFr_{i,t,m} \leq 1 \quad \forall i, t; \quad (2.16)$$

$$Reb_{i,t} = Reb_{i,t-1} + R_i \cdot Xp_{i,t} \quad \forall j, t; \quad (2.17)$$

$$XFr_{j,t,k}, XFr_{i,t,m} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m, t; \quad (2.18)$$

$$YFr_{i,t,m} \in \{0, 1\}, YFr_{j,t,k} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, k, m, t; \quad (2.19)$$

$$Xr_{jt}, Reb_{i,t}, Xp_{it} \geq 0 \quad \forall i, j, t; \quad (2.20)$$

Sendo então, a função objetivo (2.8) representa a minimização dos custos que são formados por três parcelas. A primeira parcela é referente a captação superficial, a segunda relacionada à captação dos poços e a última, aos custos de rebaixamento dos poços.

As restrições (2.9) definem que o volume total captado das duas fontes deve ser suficiente para suprir a demanda da população no período t . Considera-se que existe uma

perda para cada poço i no período t e também existe uma perda na água captada do rio j no período t . Essa perda é relativa a rede de distribuição de água.

As restrições (2.10) determinam a quantidade de água captada no período t no rio j e esta depende da faixa utilizada e juntamente com as restrições (2.11) e (2.12) estabelecem o volume de água captado no rio j bem como a faixa que poderá ser utilizada para a captação de água.

As restrições (2.13) limitam a captação do poço em 5% do volume de água de chuvas no período t (conceito de reserva ativa – explicado na Subsecção 1.1.2 deste trabalho). Para se calcular o volume de chuva das restrições 2.13 utiliza-se dos dados de pluviometria e da área de atuação da bacia.

As restrições (2.14) determinam a quantidade de água captada no período t no poço i e esta quantidade depende da faixa utilizada. As restrições (2.15) e (2.16) estabelecem o volume de água captado no poço i bem como a faixa que poderá ser utilizada para a captação de água.

As restrições (2.17) referem-se ao cálculo do rebaixamento de cada poço devido à captação de água total no período t . Ademais, esse é um valor acumulativo, sendo que o valor do ano anterior é somado para se obter o resultado do rebaixamento no tempo presente. Por fim, as restrições (2.18), (2.19), (2.20) definem o domínio das variáveis.

2.8 Levantamento de dados

Para que os testes possam ser realizados foi realizado um levantamento das informações apresentadas nas seguintes subseções.

2.8.1 Vazão dos rios

A vazão dos rios de captação é um dado necessário para as restrições (2.11), já que esta necessita do volume de água no rio j em um determinado período t ($Vr_{j,t}$). Os rios utilizados para o abastecimento são:

- a) Rio Monjolinho com vazão $2,5m^3/s$ (CAMPAGNA, 2005);
- b) Ribeirão do Feijão com vazão $4m^3/s$ (JUNIOR; MAUAD, 2015);

2.8.2 Área

Os poços se encontram na bacia do Rio Monjolinho que possui área de $275km^2$ (ESPÍNDOLA, 2000). Assim sendo, o volume de chuva que cai sobre a região é o produto do valor da pluviometria (mm) pela área da bacia.

Tabela 1: Demandas previstas para o sistema de abastecimento de água de São Carlos

Ano	População	Vazão total (média com perdas) (L/s)
2012	220312	953,24
2017	231735	794,7
2022	242354	795,75
2027	253423	828,81
2032	262136	860,7
2037	271642	861,37
2042	281056	867,46

Fonte: [ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental \(2012\)](#)

2.8.3 Volume de chuva

Segundo o PMSSanCa ([Prefeitura São Carlos, 2012](#)), a média de precipitação anual é de 1356,82 mm/ano, a máxima anual é de 1387,28mm/ano e a mínima anual de 1301,88mm/ano. Esses valores foram obtidos analisando-se os dados dos poços pluviométricos e utilizando a metodologia de interpolação por Krigagem ordinária e SIG como ferramenta.

O valor médio é utilizado na multiplicação com a área da bacia (subseção [2.8.2](#)) para obtenção do volume de água fornecido pelas chuvas, conforme equação [2.21](#). Este dado é utilizado no parâmetro $chuva_t$ nas restrições [2.13](#), para cada período t .

$$Volume = \text{Área da Bacia} \cdot \text{precipitação} \quad (2.21)$$

2.8.4 Demanda

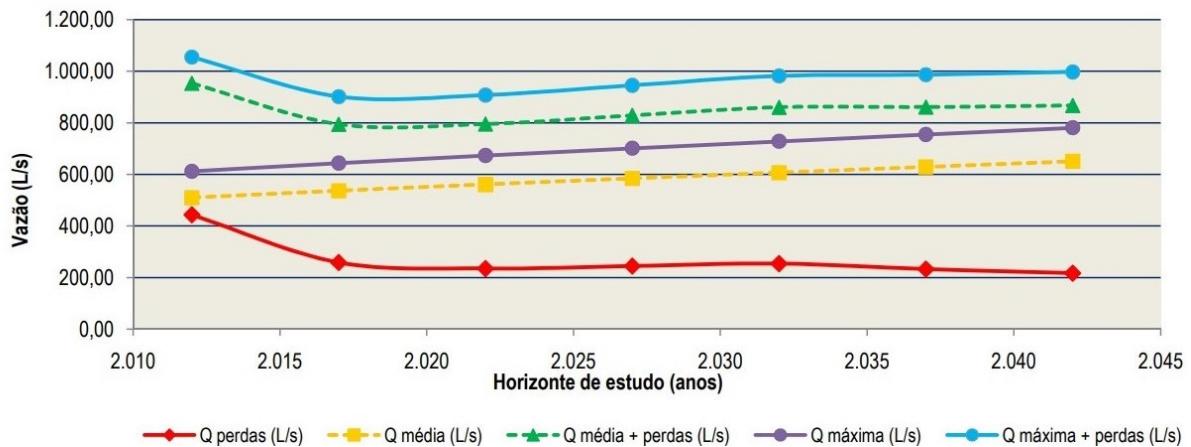
Segundo o PMSSanCa ([ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2012](#)), a demanda com a contabilização das perdas e a população de 2012 a 2042 são demonstradas na Tabela 1.

O Gráfico apresentado na Figura 8 demonstra como a vazão de consumo se comporta ao longo do tempo. Além dela, também é exposto a vazão sem perdas, a vazão máxima, a vazão máxima com perdas e a de somente perdas. É válido notar a proposta do plano de diminuir substancialmente a quantidade de perdas no sistema ao longo dos anos por melhorias na distribuição da água.

2.8.5 Perdas no Sistema

As perdas no sistema, como por exemplo devidas a vazamentos na rede, são consideradas segundo as estimativas fornecidas no relatório do PMSSanca ([ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental, 2012](#)). São observadas na Tabela 2.

Figura 8: Evolução das demandas de água em São Carlos



Fonte: Adapatado de [ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental \(2012\)](#)

Tabela 2: Estimativa de Perdas no sistema de Abastecimento de Água

Ano	Índice de perdas (%)
2012	46,5
2017	32,5
2022	29,5
2027	29,5
2032	29,5
2037	27
2042	25

Fonte: Adaptado de [ESA: Engenharia Sanitaria e Ambiental \(2012\)](#)

2.8.6 Vazão dos poços

As vazões dos poços a serem utilizados nas restrições [2.15](#) estão na Tabela 3.

2.9 Custos utilizados

Os custos foram definidos para prover maior preferência ao uso das águas subterrâneas a fim de compactar com a tendência atual. Ademais, estes foram estabelecidos em faixas de consumo, conforme explicado na seção [2.7](#). Dessa forma, penaliza-se quanto maior a captação em um só poço ou rio devido ao custo aumentar após atingir-se determinada faixa de volume retirado.

Muitos testes foram realizados a fim de se alcançar uma boa calibração dos dados. Quanto as faixas, determinou-se que a primeira possuiria um custo relativamente menor em comparação as demais, que possuem um aumento percentual constante. O motivo foi incentivar que todas as fontes obtivessem alguma captação. Além disso, adotou-se que os poços vistos como mais desfavoráveis (elevado rebaixamento inicial) possuem um custo

Tabela 3: Valores das vazões dos poços em m^3/h e m^3/ano

Poço	Vazão		Poço	Vazão	
	m^3/h	m^3/ano		m^3/h	m^3/ano
1	48,5	424860	10	22,2	194472
2	39,6	346896	11	286,7	2511492
3	18	157680	12	125	1095000
4	93,1	815556	13	66,3	580788
5	95	832200	14	143,8	1259688
6	130,7	1144932	15	285	2496600
7	17,6	154176	16	130,7	1144932
8	156,5	1370940	17	182,2	1596072
9	171,6	1503216			

Fonte: Adaptado de [Perroni e Wendland \(2008\)](#)

maior para distingui-los dos demais.

Para a diferenciação dos custos da captação dos dois rios, concluiu-se, após algumas tentativas, que eles não poderiam ser muito destoantes pois repercutiria em um uso excessivo de apenas uma fonte, mesmo com o uso das restrições das faixas de consumo. Dessa forma, adotou-se para o rio de menor vazão um valor apenas 4% maior, a fim de favorecer sutilmente o de maior vazão.

Quanto aos poços, foram definidos possuindo como base a constante de razão de rebaixamento de cada um (Quadro 3). Consequentemente, quanto maior esse valor, mais elevado será o custo para retirar a água. Para contabilizar os custos do rebaixamento também foi utilizado o mesmo parâmetro mas possuindo maior grandeza devido a sua contabilização na função objetivo ser multiplicada por valores relativamente menores (rebaixamento em metros) que os demais custos (volume de água em metros cúbicos).

2.10 Experimentos Computacionais

O modelo matemático foi codificado no *software* ILOG CPLEXTM 12.1, usando a biblioteca ILOG Concert. Os cenários foram executados durante um tempo máximo limitado em 15 minutos e o tempo necessário para o solver encontrar a solução ótima para todos os cenários foi inferior a 8 segundos. A configuração do CPLEX foi alterada para parar com um GAP relativo de 10^{-1} .

Para realizar as simulações utilizou-se o período de dados do PMSSanCa que contempla os anos de 2012 a 2042. Após algumas tentativas constatou-se que para moderar mais o problema e gerar melhores resultados restringiria-se o rebaixamento máximo dos poços para observar como o sistema de abastecimento operaria nesta situação.

Após limitá-lo, identifica-se que os resultados incidiam para uma captação superficial

muito alta mesmo com custos elevados e as restrições elencadas. Desta forma, cria-se uma restrição para que uma porcentagem definida da demanda fosse atendida pela captação subterrânea, representada por 2.22 e dessa forma fosse gerado cenários.

$$\sum_{i=1}^N (1 - PP_{it}) \cdot Xp_{it} \geq (Percentual) \cdot D_t \quad \forall t; \quad (2.22)$$

Esta análise possui por objetivo constatar como as soluções são encontradas em termos das variações dos usos dos poços e suas vazões. Assim sendo, ao se analisar os dados de resposta, constata-se como seria uma possível conformação no sistema a fim de minimizar o rebaixamento total. Assim sendo, foram gerados três cenários:

- a) Cenário 1: captação subterrânea de 70%
- b) Cenário 2: captação subterrânea de 85%
- c) Cenário 3: captação subterrânea de 100%

Essas proporções foram adotadas por representar a tendência de crescimento da captação subterrânea e assim poder avaliar, nessas três situações, o comportamento estimado do sistema. Portanto, não foi estudado como se portaria com captações superficiais maiores que as subterrâneas devido à análise histórica apenas indicar crescimento proporcional da captação subterrânea a nível regional e também à fatores econômicos, conforme explicado nas seções anteriores deste trabalho.

Além disso, para não gerar rebaixamentos extremos em determinados poços, restringi-se o valor máximo de rebaixamento. Com isso, testa-se valores, para cada cenário, de qual o menor rebaixamento possível com o qual obtém-se uma solução factível. Com isso, obteve-se as seguintes configurações para cada cenário destacadas no Quadro 4:

Quadro 4: Porcentagem de captação subterrânea e Rebaixamento em cada cenário

Cenários	1	2	3
Porcentagem de captação subterrânea	70%	85%	100%
Rebaixamento	40 m	50 m	60 m

Fonte: elaborado pela autora

Desta maneira, os cenários escolhidos apresentam o menor rebaixamento com o qual foi possível encontrar uma resposta factível. As soluções não factíveis indicam, em outros fatores, que poderia haver a abertura de um novo poço para suprir a demanda ou também aumentar a proporção da captação superficial. Além disso, averigua-se qual o mínimo valor de rebaixamento que o sistema enfrentará no período de 30 anos ao se adotar alguma das proporções analisadas.

2.10.1 Análise dos cenários

A seguir são descritos e analisados os cenários e exibidos as soluções obtidas.

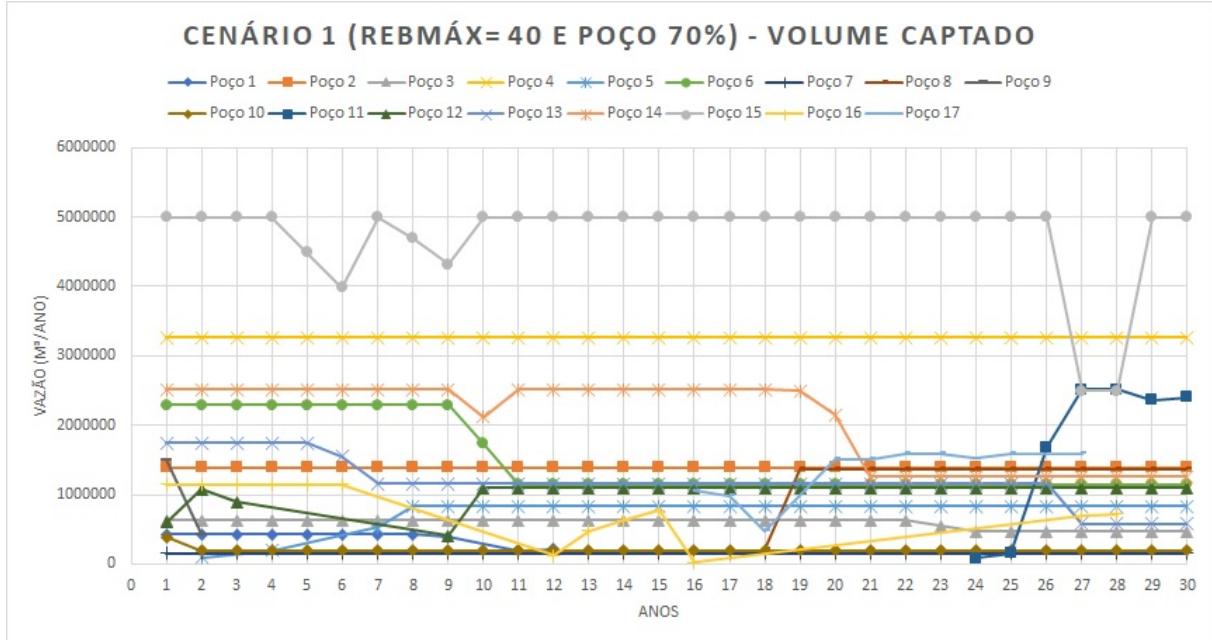
2.10.1.1 Cenário 1

O Cenário 1 é definido por um rebaixamento máximo de 40 m e com a captação do poço representando 70% da demanda. Analisando como se comportou os poços no gráfico da Figura 9, observa-se que há uma grande discrepância entre os valores captados em cada poço e que muitos deles permanecem constantes. Além disso, alguns poços são ativados apenas em períodos posteriores e outros são desativados antes do ano 30. Cabe ressaltar que a demanda não é crescente com o tempo, devido as projeções do PMSSanCa de diminuição das perdas ao longo dos anos, apesar do crescimento populacional ([ESA: Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012](#)).

A grande diferença dos volumes pode ser justificada pelo fato que alguns poço são bem mais antigos que outros e possuem um índice de rebaixamento maior por volume retirado e desta forma são preferidos em relação aos demais. A ocorrência de ativações e desativações dos poços são compreendidas como uma resposta positiva pois compatibiliza-se com a proposta do PMSSanCa de desativar alguns poços ([ESA: Engenharia Sanitária e Ambiental, 2012](#)).

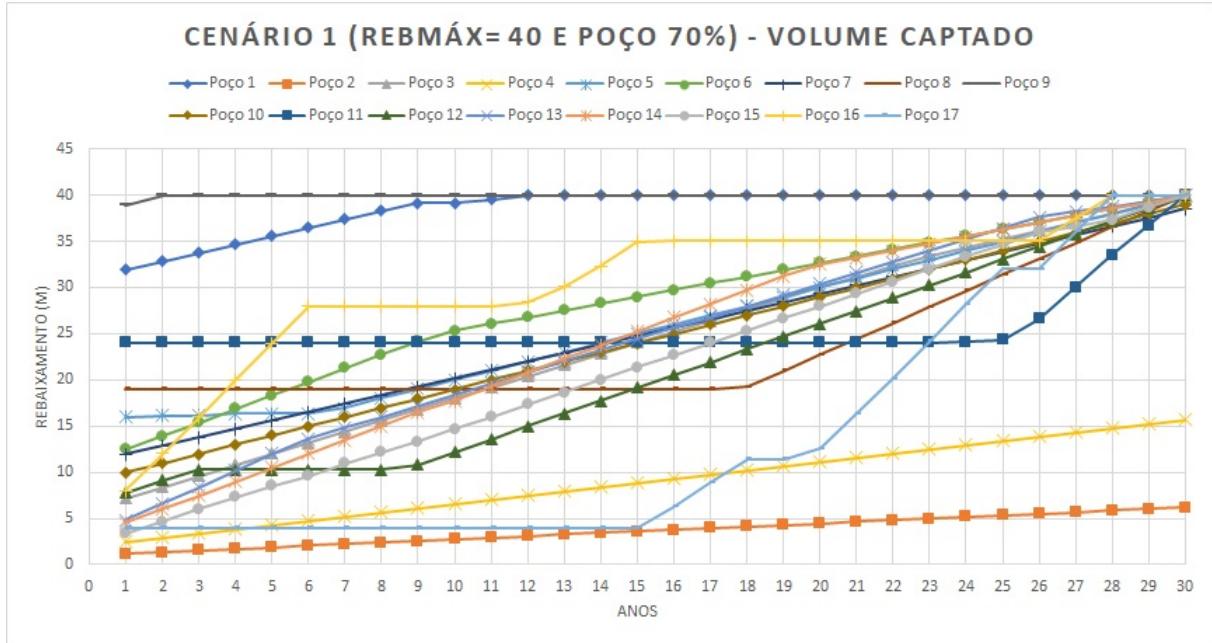
O gráfico representado pela Figura 10 indica como se comportou o rebaixamento em cada poço. Como este é calculado pela soma do próprio com o obtido no período anterior, significa que não foi contabilizado a sua diminuição devido a entrada de água no sistema por meio das chuvas por se tratar de uma estimativa.

Figura 9: Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 1



Fonte: elaborado pela autora

Figura 10: Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 1



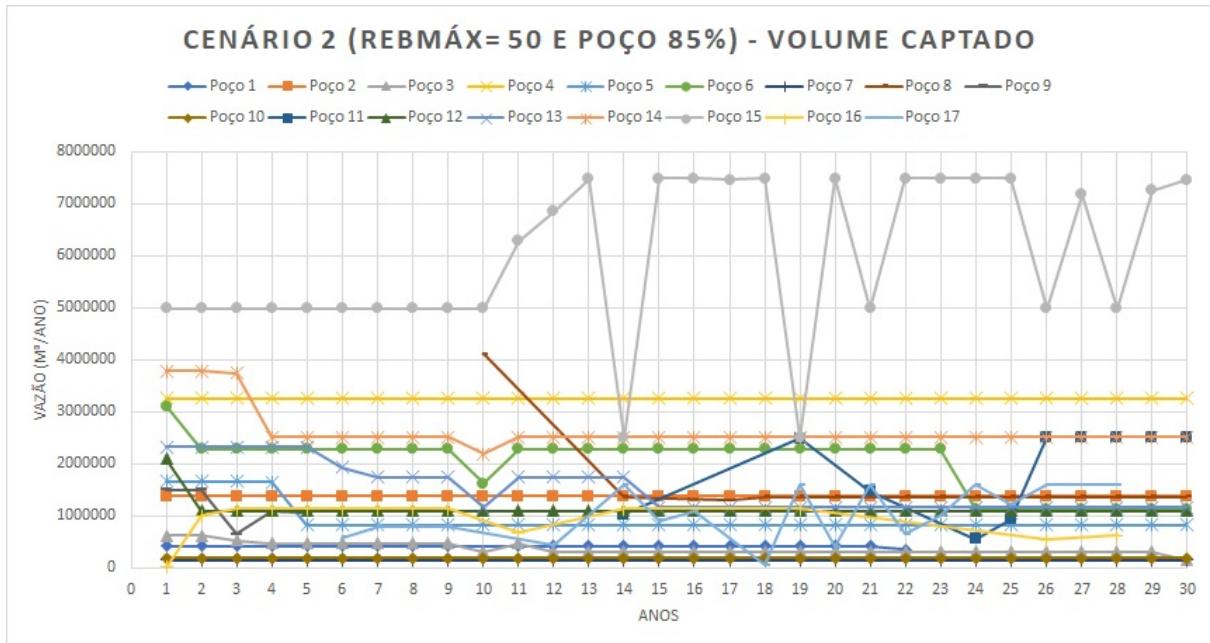
Fonte: elaborado pela autora

2.10.1.2 Cenário 2

Este cenário é caracterizado pela captação por poço representar 80% e o máximo rebaixamento permitido ser de 50 m. Esta configuração foi eleita por representar um cenário

intermediário entre o primeiro e o terceiro, mais extremo. Muitos pontos descritos no cenário anterior também são válidos para este, como a constância do valor da vazão de alguns e a discrepância entre seus valores, conforme notado na Figura 11. Entretanto, observa-se maiores oscilações neste cenário, como representado no poço 15. Desta forma, constata-se que poderia ser válido penalizar grandes oscilações devido a ser operacionalmente mais complicados lidar com essa configuração.

Figura 11: Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 2



Fonte: elaborado pela autora

A análise do rebaixamento no gráfico da Figura 12 demonstra valores mais acentuados em relação ao cenário anterior, mas não são todos os poços que atingem o valor máximo. Apenas alguns alcançam a limitação antes do último período, o que indica um sistema bem distribuído.

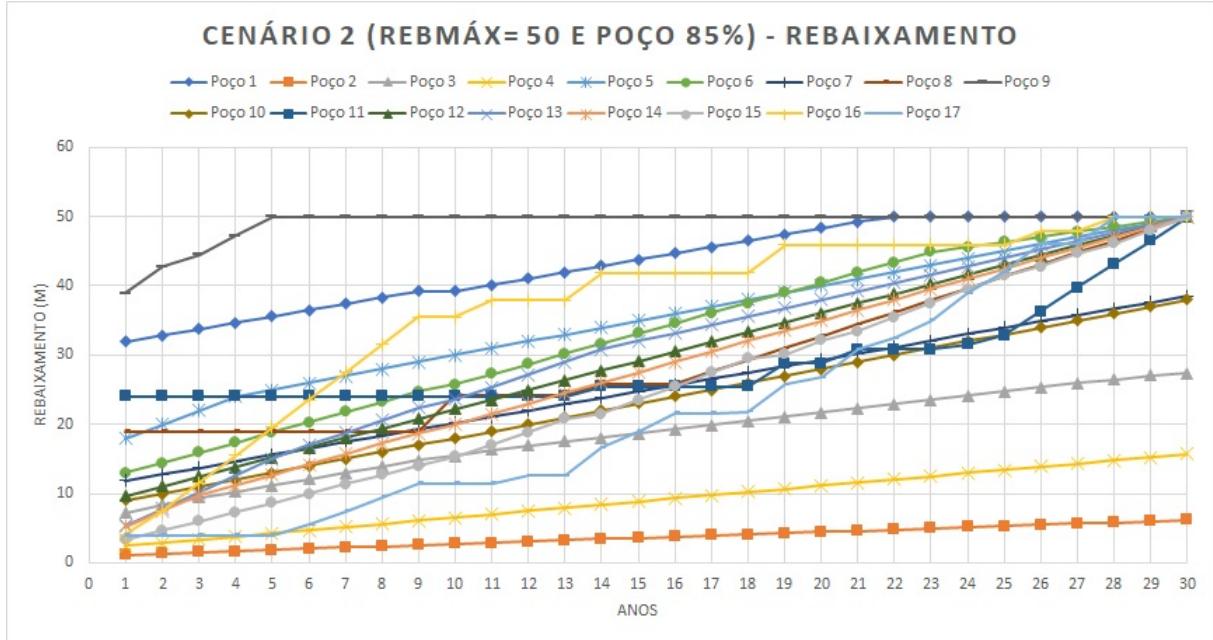
2.10.1.3 Captação superficial nos cenários 1 e 2

A configuração de como se comporta a captação nos rios nos dois cenários anteriormente descritos pode ser observada no gráfico da Figura 13. Verifica-se que a proporção em ambos foi a mesma, apenas alterando que o cenário 1 apresenta uma captação maior.

2.10.1.4 Cenário 3

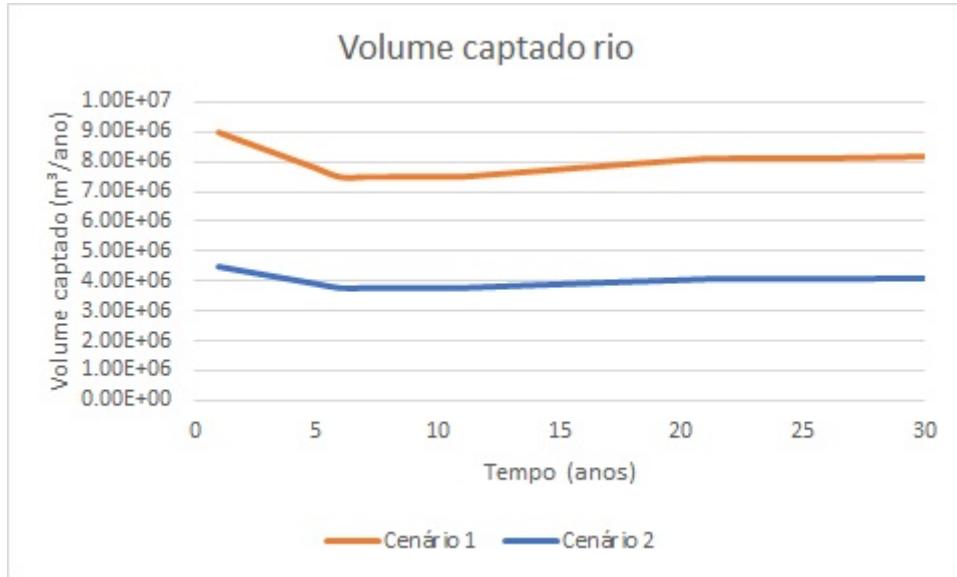
Este cenário se configura como o mais extremo que, todavia, ocorre em algumas cidades da região. Suprimir totalmente a captação nos rios pode gerar um desequilíbrio no ecossistema pela perspectiva que a água após utilizada é devolvida ao sistema superficial,

Figura 12: Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 2



Fonte: elaborado pela autora

Figura 13: Comportamento da captação superficial nos cenários 1 e 2

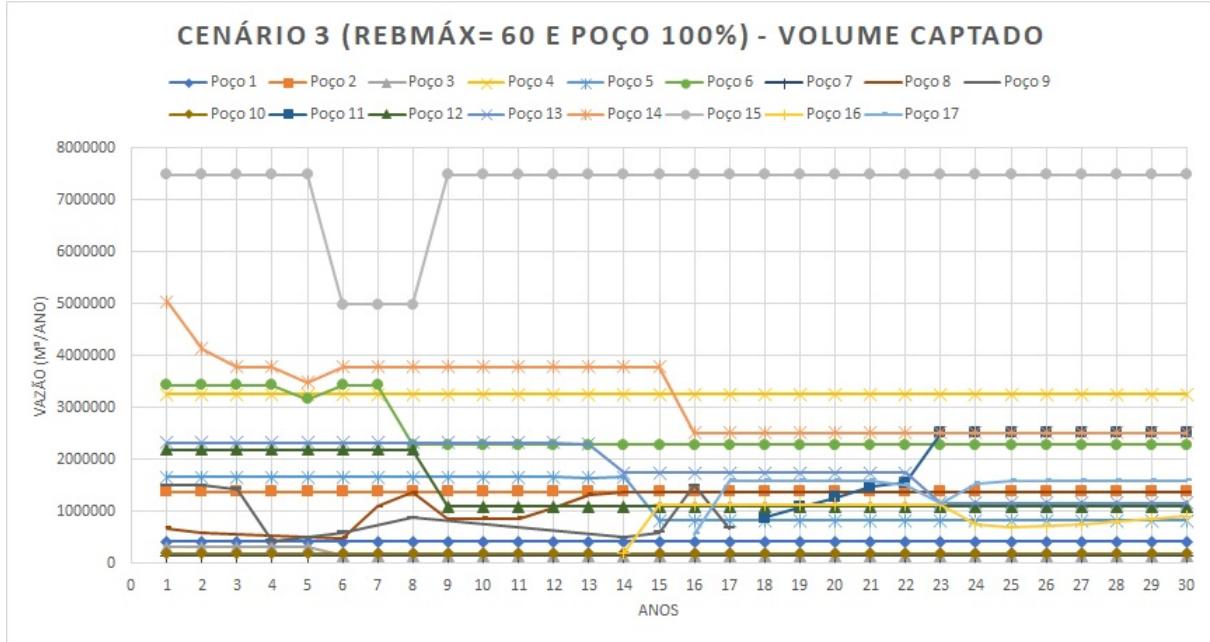


Fonte: elaborado pela autora

ocorrendo um desbalanceamento. Dentre os três cenários, este é o que possui valores mais constantes. Isso indica que foi utilizado a vazão máxima permitida frequentemente para se conseguir suprir a grande demanda. Também nota-se que majoritariamente todos os poços estão constantemente ativos durante os 30 anos.

Este formato evidentemente apresenta os poços com maiores rebaixamentos, ao

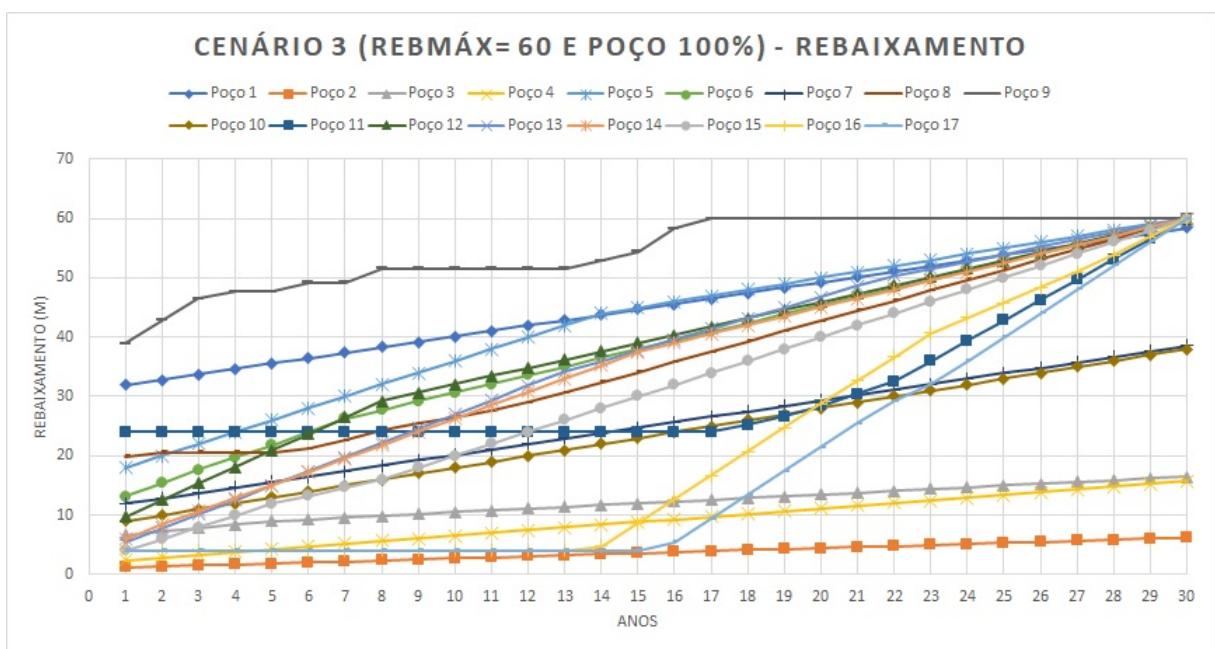
Figura 14: Variação do Volume captado ao longo do tempo nos poços no Cenário 3



Fonte: elaborado pela autora

notar pela Figura 15. Esses baixos níveis podem acarretar diversos problemas de ordem ambiental e econômica. Com a captação excedendo a taxa de recarga local e os níveis se apresentando sempre mais baixos, alcançará-se um ponto que se inviabilizará a obtenção de mais água.

Figura 15: Variação do Rebaixamento dos poços ao longo do tempo no Cenário 3



Fonte: elaborado pela autora

3 CONCLUSÃO

O presente trabalho estudou o comportamento do sistema de captação de água do município de São Carlos. O caso considerado e suas particularidades não está presente na literatura, porém durante o trabalho foi possível adaptar modelos já propostos e estratégias de solução de modo a abordar o problema de maneira condizente com a situação real. As análises dos resultados permitiram que fossem estimados os efeitos da atual tendência de aumento do uso de fontes subterrâneas. Além disso, foi proposto que variar e adequar a vazão dos poços pode resultar em um menor rebaixamento total. Ou seja, indicou-se em cada cenário a melhor maneira de operar os poços (vazão e tempo de operação) a fim de minimizar os impactos negativos no meio.

Desta forma, o estudo buscou abordar duas vertentes: qual o mínimo valor possível de rebaixamento que se pode atingir adotando determinada proporção de captação de água subterrânea ao fim de 30 anos e como poderá ser a configuração da operação dos poços para que seja concebível suprir toda demanda e adquirir o menor rebaixamento total possível.

Adicionalmente, é preciso analisar que captar grandes quantidades de água subterrânea e depois devolvê-las ao sistema superficial constitui um desequilíbrio ao ecossistema que pode ser de maior ou menor intensidade. As quantidades de rebaixamento analisadas (40, 50 e 60 m) são valores bem abaixo do que realmente ocorreria se as proporções fossem adotadas pois apresentou-se a melhor configuração possível do sistema e foram utilizados dados mais antigos para o rebaixamento inicial. Assim sendo, deve-se analisar esses valores visando que em realidade representariam situações bem mais drásticas.

Em suma, criar meios que estimem como se portará sistemas complexos como a dinâmica das águas subterrâneas pode ajudar a nortear as tomadas decisões a fim que estas não sejam apenas embasadas em fatores econômicos.

Propostas para trabalhos futuros:

- a) Analisar em escala de tempo menor, como semestral ou mensal, em oposição à anual, para adequar às temporalidades das chuvas;
- b) Gerar cenários com aumento da demanda ao longo do tempo;
- c) Criar faixas de custos para os poços que variam conforme o nível do rebaixamento;
- d) Realizar cenários que abranjam maior proporção de captação superficial que subterrânea para comparações;

REFERÊNCIAS

- APRILE, J. **Aquífero Guarani: Águas subterrâneas também estão em risco.** 2016. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/geografia/aquifero-guarani-aguas-subterraneas-tambem-estao-em-risco.htm>>.
- BEHAM, T. S. Estudo de questões de sustentabilidade em redes de captação e distribuição de água: O caso de São Carlos-sp. **Programa de Iniciação Científica – PIBIC**, 2017.
- BOICO, V. F. **Modelo analítico para a avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP.** 2016. Tese (Doutorado), 2016.
- CAMPAGNA, A. F. **Toxicidade dos sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho (São Carlos - SP): ênfase nas substâncias cobre, aldrin e heptacloro.** 2005. Tese (Doutorado), 2005.
- CERMINARO, A. C.; OLIVEIRA, D. **Relações Solo-Relevo Através da Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Feijão, nos Municípios de São Carlos, Analândia e Itirapina no Estado de São Paulo-BR: Ordenações de Unidades para Uso e Ocupação Adequados.** 2015.
- COSTA, C. W. **Expansão da mancha urbana e suas consequências sobre os mananciais dor rio do Monjolinho e do ribeirão do Feijão da cidade de São Carlos, SP.** 2010. Dissertação (Mestrado), 2010.
- COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; PONS, N. A. D. Regulamentos de uso do solo e impactos ambientais: avaliação crítica do plano diretor participativo do município de São Carlos-SP. **Geociências**, 2012.
- COSTA, W. D. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. **X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 1998.
- DAEE. **Aquífero Guarani.** 2016. Disponível em: <<http://www.daaeararaquara.com.br/guarani.htm>>.
- DIAS, H. **Centro de pesquisa do IGc alerta para contaminação de aquíferos paulistas.** 2016. Disponível em: <<http://www5.usp.br/38710/centro-de-pesquisa-do-igc-alerta-para-contaminacao-de-aquiferos-nitrato/>>.
- ESA: Engenharia Sanitária e Ambiental. **Revisão e complementação do Plano Diretor de Saneamento de São Carlos.** [S.l.], 2012.
- ESPÍNDOLA, E. L. G. A bacia hidrográfica do rio do monjolinho. In: **O rio Monjolinho: um estudo de caso.** [S.l.: s.n.], 2000.
- G1. **Brasil ocupa 73ª posição entre 169 países no IDH 2010.** 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/11/brasil-ocupa-73-posicao-entre-169-paises-no-idh-2010.html>>.

HEINE, C. A. e. a. **Monitoramento da depleção e detecção dos limites de exploração do Sistema Aquífero Guarani em Ivoi (RS):: uma aplicação de geoprocessamento no gerenciamento municipal do uso sustentável de recursos hídricos subterrâneos.** [S.l.], 2005.

IBGE. **São Carlos.** 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=354890>>.>

JUNIOR, P. P. A.; MAUAD, F. F. Simulação dos impactos das mudanças climáticas na vazão da bacia do ribeirão do feijão – sp. In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** [S.l.: s.n.], 2015.

LOMBA, C. C. P. A disponibilidade hidrica da região metropolitana de São Paulo. In: **XVI Encontro nacional dos Geógrafos.** [S.l.: s.n.], 2010.

MATTA, M. **Parâmetros Hidrogeológicos Fundamentais.** 2018. Apresentação.

NETO, M. F. A. Modelo de simulação de vazão e rebaixamento para aquíferos sedimentares adaptado para imagens – implementação em planilha eletrônica. In: **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.** [S.l.: s.n.], 2010.

ODA, G. H. et al. Proposta metodológica para exploração racional do sistema aquífero tubarão no estado de São Paulo. In: **ABAS, Encontro Nac. Perfuradores de Poços.** [S.l.: s.n.], 2005.

OLIVEIRA, A. . **Nível do Aquífero Guarani baixa um metro por ano em Ribeirão Preto, SP.** 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2012/03/nivel-do-aquifero-guarani-baixa-um-metro-por-ano-em-ribeirao-preto-sp.html>>.

PERRONI, J. C. A.; WENDLAND, E. C. Avaliação das condições de ocorrência e exploração do Sistema Aqüífero Guarani em São Carlos - SP. **Águas Subterrâneas,** 2008.

Prefeitura São Carlos. Report, **Plano Municipal de Saneamento de São Carlos.** 2012.

RABELO, J. L. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema JacaréTietê.** 2006. Tese (Doutorado), 2006.

SAAE. **Produção de Água e Esgoto Tratado.** 2016. Disponível em: <<http://www.saaesaocarlos.com.br/joomla4/index.php/dadossaneamentomenutop/producaoaguaesgotomenu>>.

SANTOS, M. M. **Gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos: uso atual e potencial do sistema aquífero guarani no estado de São Paulo-SP.** 2009. Tese (Doutorado), 2009.

SCALCO, A. V. **Estudo do balanço hídrico da área de influência da zona de recarga do sistema aquífero guarani (SAG) no estado de São Paulo.** 2014. mathesis, 2014.

SINELLI, O. et al. Plano de ação estratégico para a gestão do sistema aquífero guarani na Área piloto de Ribeirão Preto. In: **Plano de Ação Estratégico para a Gestão do Sistema Aquífero Guarani na Área Piloto de Ribeirão Preto**. In: **II Congresso Aquífero Guarani/Workshops**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 31–43.

São Carlos Oficial. **A cidade: dados geográficos**. 2016. Disponível em: <<http://www.saocarlosoficial.com.br/acidade>>.

SÃO PAULO. **Lei 9.866 /97**. 1997.

SOUZA, C. F. Desenvolvimento de modelos simulação/otimização para gestão de águas subterrâneas. In: **Anais do Xv Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. [S.l.: s.n.], 2003.

TAVANTI, D. R. et al. Estudo da vulnerabilidade de contaminação de aquíferos por agrotóxicos, na região de Analândia e Descalvado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2009.

TUNDISI, J. D. **Impactos do novo Código Florestal**. 2016. Disponível em: <<http://www.agencia.fapesp.br/materia/12572/impactos-do-codigo-florestal-saoanalisados.htm>>.

TUNDISI, J. G. et al. Relatório final de projeto de pesquisa FAPESP de Políticas Públicas proc. 98/109243, **Uso atual e uso potencial do solo no município de São Carlos, SP – base do planejamento urbano e rural**. 2007.