UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO

VINICIUS FERREIRA BOICO

Modelo analítico para a avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP

São Carlos, SP
2016

VINICIUS FERREIRA BOICO

Modelo analítico para a avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Tit. Edson Wendland

Versão corrigida

São Carlos, SP

2016

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Boico, Vinicius Ferreira
B678m Modelo analítico para a avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP / Vinicius Ferreira Boico; orientador Edson Wendland. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Escoamento de água subterrânea. 2. Método de Elementos Analíticos. 3. Gerenciamento de Recursos Hídricos. 4. Sistema Aquífero Guarani. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **VINÍCIUS FERREIRA BOICO**.

Título da dissertação: "Modelo analítico para avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP".

Data da defesa: 02/06/2016

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Titular **Edson Cezar Wendland** **(Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Associado **Ricardo Cesar Aoki Hirata** (Instituto de Geociências/IG-USP)	Aprovado
Prof. Dr. **José Anderson do Nascimento Batista** (Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)	APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Edson Wendland, pela atenção, contribuição e participação ativa em todas as etapas desta pesquisa.

Aos meus colegas, que de alguma maneira contribuíram para esta pesquisa ou que me apoiaram durante o mestrado.

Aos funcionários do DAE Bauru, pelo fornecimento de dados e informações.

Aos funcionários do DAEE de Araraquara, pelo fornecimento de dados e informações.

Ao Zeca, do DAEE, São Paulo, pelo auxílio no fornecimento do Diagnóstico Hidrogeológico.

Aos funcionários do Departamento de Hidráulica e Saneamento.

À empresa Hidrosan, que possibilitou que eu trabalhasse no Plano Diretor de Água de Bauru, minha cidade natal, foco também desta pesquisa.

Aos meus companheiros do Laboratório de Hidráulica Computacional e da Hidrosan, que contribuíram para meu desenvolvimento técnico, pessoal e profissional.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa no segundo ano de mestrado.

Aos professores do Departamento de Hidráulica e Saneamento e da Geotecnia da EESC, que muito me ensinaram.

À todas aquelas pessoas que disseram “nossa, que interessante!” quando eu falei sobre a minha pesquisa.

E, sem dúvida, às pessoas amáveis que me fazem sentir acolhido, motivado e realizado.

"Emoção, fantasia, racionalidade e concretude são os ingredientes da criatividade. A racionalidade nos permite executar bem as nossas tarefas, mas sem emotividade não se cria nada de novo."

(Domenico de Masi)

RESUMO

BOICO, V. F. **Modelo analítico para a avaliação do escoamento de água no Aquífero Guarani em Bauru/SP**. 2016. 106p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Os eventos de escassez hídrica observados nos últimos anos e o aumento populacional no Estado de São Paulo têm conduzido à maior explotação de água subterrânea do Sistema Aquífero Guarani (SAG) para abastecimento público. Somente no município de Bauru/SP, está previsto um aumento da vazão de água extraída deste Aquífero de 3.699 m³/h (2014) para 4.465 m³/h (2034). Entretanto, a superexplotação em longo prazo do Aquífero pode comprometer a quantidade de água disponível. O Método de Elementos Analíticos foi utilizado para a modelagem do escoamento em regime permanente, considerando o escoamento regional, a extração de água por poços e os principais condicionantes geológicos locais. Observou-se que o gradiente hidráulico do SAG na cidade de Bauru é de aproximadamente 0,82 m/km. Os poços públicos que operam em regime de escoamento confinado estão localizados a nordeste da cidade. O rebaixamento esperado devido ao cenário previsto pelo DAE, em 2034, é de até 15 m com relação ao cenário atual (2014). Este rebaixamento pode ser controlado em até 5 m, reduzindo em 20% a vazão média anual de todos os poços, e em até 10 m, reduzindo em 10% a vazão média anual de todos os poços localizados na área central. A extração de água do SAG em Bauru/SP pode causar o rebaixamento de até 15 m nas cidades mais próximas (Piratininga e Agudos) e pouco interfere no escoamento de água do SAG das cidades mais distantes. Finalmente, os mapas potenciométricos e de rebaixamento gerados pelo modelo analítico são adequados para a análise do escoamento de água subterrânea e podem auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos.

Palavras-chave: Escoamento de água subterrânea. Método de Elementos Analíticos. Gerenciamento de Recursos Hídricos. Sistema Aquífero Guarani.

ABSTRACT

BOICO, V. F. **Analytical model for the groundwater flow assessment in the Guarani Aquifer in the city of Bauru/SP**. 2016. 106p. Master Degree Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

The recent drought events and the population growth in São Paulo State (Brazil) have caused many municipalities to increase the groundwater exploitation of the Guarani Aquifer System (GAS). In the city of Bauru/SP, the extraction of water from the Aquifer is expected to increase from 3,699 m^3/h, in 2014, to 4,465 m^3/h, by 2034. However, the long-term overexploitation of the Aquifer may compromise the amount of available water. The Analytical Element Method was used for the groundwater flow modeling in steady state. The regional flow, the water extraction by wells and the main local geological conditions were considered. The hydraulic gradient in the GAS in Bauru is approximately 0.82 m/km. The public wells in operation in confined flow regime are located in the eastern region of the city. The expected drawdown caused by the scenario predicted by the Department of Water and Wastewater of Bauru, in 2034, can reach 15 m, in comparison with the current situation (2014). Such lowering can be controlled up to 5 m, reducing 20% of the average annual groundwater flow rate of all wells, and up to 10 m, reducing 10% of the annual flow rate of all wells located in the critical area. The GAS groundwater extraction in Bauru/SP may cause the lowering of up to 15 m in nearby cities (Piratininga and Agudos) and has negligible interference in the groundwater flow in the GAS of distant cities. Finally, the potentiometric and drawdown maps generated by the analytical model are suitable for the analysis of groundwater flow and can be useful for the management of water resources.

Keywords: Groundwater flow. Analytic Element Method. Water Resources Management. Guarani Aquifer System.

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Ângulo (rad)
b	Base do aquífero (L)
K_1	Coeficiente do dia de maior consumo
L	Comprimento (L)
K	Condutividade hidráulica (L/T)
K^+	Condutividade hidráulica da inomogeneidade (L/T)
$\bar{z}$	Conjugado da variável complexa (L)
C	Constante
C_C	Constante para escoamento confinado
C_U	Constante para escoamento livre
q_{pc}	Consumo per capita (litro/hab.d)
ϕ	Cota piezométrica ou carga hidráulica (m)
q	Descarga específica (L/T)
q_j	Descarga específica na direção j (L/T)
Q_x	Descarga na direção x (L^2/T)
Q_y	Descarga na direção y (L^2/T)
α	Direção do escoamento uniforme (rad)
l	Distância entre dois pontos (L)
H^+	Espessura da inomogeneidade (L)
H	Espessura do aquífero confinado (L)
h	Espessura saturada do aquífero (L)
Ψ	Função de corrente (L^3/T)

Pop	População urbana (hab)
Ω	Potencial complexo (L^3/T)
Φ	Potencial de descarga (L^3/T)
R	Raio da inomogeneidade cilíndrica (L)
A	Seção transversal do escoamento (L)
T	Transmissividade (L^2/T)
z	Variável complexa (L)
Q_{DMC}	Vazão do dia de maior consumo de atendimento à população urbana (L^3/T)
Q	Vazão do poço (L^3/T)
$Q_{média\ anual}$	Vazão média anual (L^3/T)
$Q_{média\ diária}$	Vazão média diária (L^3/T)
W	Vetor de descarga complexo (L^3/T)
Q_j	Vetor de descarga na direção j (L^2/T)
Q_0	Vetor de descarga uniforme (L^2/T)

* L é comprimento, T é tempo e M é massa.

LISTA DE SIGLAS

CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DAE	Departamento de Água e Esgoto de Bauru
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
ETA	Estação de Tratamento de Água
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Índice de Perdas
ME	*Mean Error*
MAE	*Mean Absolute Error*
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEA	Método de Elementos Analíticos
MEF	Método de Elementos Finitos
NE	Nível Estático
PDA	Plano Diretor de Água
RMSE	*Root Mean Square Error*
RN	Rio Grande do Norte
SAB	Sistema Aquífero Bauru
SAG	Sistema Aquífero Guarani
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SP	São Paulo
UP	Unidade de Produção
UPP	Unidade de Produção Particular
UTM	Universal Transversa de Mercator

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de ocorrência do SAG no Brasil com indicação das formações aflorantes. Fonte: elaborado com base nas informações de Diniz et al. (2014a) 5
Figura 2 - Perfil estratigráfico do SAG com indicação das camadas confinantes. Fonte: modificado de Organização dos Estados Americanos (2009) 6
Figura 3 - Imagem de satélite georreferenciada da região de Bauru com indicação das cidades (centro urbano) com população maior ou igual a 5 mil habitantes 7
Figura 4 - Localização do município de Bauru e cidades vizinhas 8
Figura 5 - Projeção populacional de Bauru de acordo com as taxas de crescimento estudadas e a adotada (1,35%) no Plano Diretor de Água. Fonte: Hidrosan (2014) 9
Figura 6 - Regiões de ocorrência das Formações do Grupo São Bento na cidade de Bauru. Fonte: modificado de Paula e Silva e Cavaguti (1992) 12
Figura 7 - Seção estrutural esquemática na direção sudoeste - nordeste na cidade de Bauru. Fonte: modificado de Paula e Silva e Cavaguti (1994) apud Silva (2009) 13
Figura 8 - Mapa de espessuras do SAG no município de Bauru. Fonte: modificado de C3 Consultoria (2015) ... 15
Figura 9 - Fluxograma para modelagem de escoamento de água subterrânea. Fonte: modificado de Anderson, Woessner e Hunt (2015) 16
Figura 10 - Esquema do aquífero mostrando a área de estudo e o contorno do sistema de escoamento (A), uma malha de diferenças finitas (B) e uma malha de elementos finitos (C) usados em um modelo computacional de escoamento de água subterrânea. Fonte: modificado de Mercer e Faust (1980) apud Belcher e Welch (2006) 18
Figura 11 - Resumo da metodologia desenvolvida nesta pesquisa para geração do modelo analítico, com destaque em azul para a etapa de caracterização, verde para o equacionamento do modelo e roxo para a geração de resultados e utilização de programas 21
Figura 12 - Características hidrogeológicas do sistema de escoamento de água subterrânea no SAG consideradas no modelo conceitual 23
Figura 13 - Localização dos poços do SAG particulares e públicos, em operação e previstos de serem instalados pelo DAE a partir de 2015 25
Figura 14 - Transmissividade nos poços utilizados para estimativa da condutividade hidráulica média do SAG na cidade de Bauru 27
Figura 15 - Valores de condutividade hidráulica obtidos a partir dos testes de bombeamento dos poços do SAG e valores obtidos de estudos sobre a hidrogeologia na cidade de Bauru. Fonte: DAEE (2015) 28
Figura 16 - Valores de espessura do SAG obtidos pelo perfil estratigráfico dos poços do DAE em Bauru 29
Figura 17 - Cotas da base da Formação Piramboia (acima do nível do mar) obtidas nos relatórios de perfuração de poços 30
Figura 18 - Nível estático dos primeiros poços do SAG perfurados na cidade de Bauru de 1973 a 1985 32
Figura 19 - Localização do ponto de referência de carga hidráulica constante, próximo à cidade de Lençóis Paulista 35
Figura 20 - Exemplo de aplicação do MEA pela sobreposição dos elementos analíticos representados por Ω. Fonte: Marin (2011) 37

Figura 21 - Esquema das condições de escoamento confinado e livre 38
Figura 22 - Representação de um ponto em um plano complexo 42
Figura 23 - Escoamento uniforme orientado no plano bidimensional com ângulo α em relação à direção x 43
Figura 24 - Equipotenciais e linhas de corrente para um poço localizado na origem do sistema de coordenadas (modificado de Fitts (2002)) 44
Figura 25 - Representação de uma inomogeneidade cilíndrica de raio R e condutividade hidráulica K^+ em um plano complexo 45
Figura 26 - Representação das inomogeneidade do SAG no modelo conceitual e no modelo analítico 46
Figura 27 - Vazão média anual dos poços do SAG por cenário de explotação na cidade de Bauru 51
Figura 28 - Vazão média do ano de 2014 e vazões mensais máximas e mínimas para cada poço do DAE 56
Figura 29 - Sequência das principais atividades desenvolvidas para a modelagem de água subterrânea 57
Figura 30 - Simulação dos níveis piezométricos e das linhas de corrente na área de estudo geradas após a implementação do código de programação em Matlab para o ano de 1988 58
Figura 31 - Pontos de coordenadas conhecidas em que foram calculados os resultados do modelo em um SIG para a geração de mapas 59
Figura 32 - Variação de cota potenciométrica em função das coordenadas x e y 62
Figura 33 - Representação das descargas do escoamento uniforme nas direções x e y e na direção do escoamento 63
Figura 34 - Direção do escoamento de água no SAG no município de Bauru e principais aquíferos da região. Fonte: elaborado com base nas informações de Diniz et al. (2014a) 64
Figura 35 - Gráfico de dispersão dos níveis piezométricos observados e calculados dos poços do SAG utilizados para a calibração do modelo 67
Figura 36 - Potenciometria e direção do escoamento no SAG na cidade de Bauru antes da explotação por poços tubulares profundos, iniciada em 1973 69
Figura 37 – Potenciometria, escoamento no SAG e vazões explotadas em 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014 na cidade de Bauru, com NE dos poços usados para calibração do modelo 70
Figura 38 - Diferença entre os níveis dinâmicos simulados (verde) e observados (roxo) nos poços e a respectiva cota do topo do SAG para vazões médias do ano de 2014 71
Figura 39 - Poços públicos do SAG no município de Bauru com nível potenciométrico acima do topo do aquífero para as condições de bombeamento de 2014 destacados por uma elipse em cor vermelha 72
Figura 40 - Potenciometria e escoamento no SAG simulados sob condições de explotação de C1, C2, C3, C4 e C5 na cidade de Bauru 74
Figura 41 - Potenciometria e escoamento do SAG sob condições de explotação de C6 e C7 na cidade de Bauru 75
Figura 42 - Rebaixamento potenciométrico no SAG, em regime permanente, sob condições de explotação de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014 na cidade de Bauru 77
Figura 43 - Diferença de vazão média dos poços do SAG entre 2013 e 2014 78
Figura 44 - Rebaixamento do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C1 a C5 na cidade de Bauru 79
Figura 45 - Rebaixamento do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C6 e C7 na cidade de Bauru 80

Figura 46 - Rebaixamento adicional do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C1 a C5 na cidade de Bauru com relação ao ano de 2014 82
Figura 47 - Cortes AA, BB e CC na área de estudo para representação da potenciometria do SAG em perfil 83
Figura 48 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte AA 84
Figura 49 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte BB 84
Figura 50 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte CC 85
Figura 51 - Projeção da população urbana, do índice de perdas e das vazões médias e máximas diariamente distribuídas de 2014 a 2034 na cidade de Bauru 87
Figura 52 - Projeção das vazões médias diárias produzidas em cada cenário e das vazões média e máxima diárias distribuídas em 2034 88
Figura 53 - Rebaixamento regional do SAG sob as condições de explotação de 2014 da cidade de Bauru 89
Figura 54 - Escoamento regional do SAG e zona de captura dos poços da cidade de Bauru sob condições de explotação de 2014 90
Figura 55 - Rebaixamento regional do SAG sob as condições de explotação do cenário C1 da cidade de Bauru 91
Figura 56 - Escoamento regional do SAG e zona de captura dos poços da cidade de Bauru sob condições de explotação do cenário C1 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características hidrogeológicas das Formações Botucatu e Piramboia 6
Tabela 2 - População total de Bauru segundo os censos do IBGE de 1970 a 2010 9
Tabela 3 - Resumo dos principais objetivos dos estudos realizados no município de Bauru para subsidiar a perfuração de novos poços 10
Tabela 4 - Características hidrogeológicas do SAG no município de Bauru 12
Tabela 5 – Descrição das etapas da modelagem de escoamento de água subterrânea 17
Tabela 6 - Principais fontes de dados sobre os poços e a hidrogeologia na cidade de Bauru/SP e região 24
Tabela 7 - Condutividade hidráulica estimada com base nos valores de transmissividade e espessura dos relatórios dos poços do SAG na cidade de Bauru 26
Tabela 8 - Condutividade hidráulica do SAG no município de Bauru 27
Tabela 9 - Poços utilizados para estimativa do gradiente potenciométrico sob escoamento uniforme do SAG na cidade de Bauru e seu entorno 31
Tabela 10 - Vazão média anual dos poços do SAG por cenário de explotação na cidade de Bauru 50
Tabela 11 - Vazões médias anuais estimadas para os poços do DAE que explotam água do SAG na cidade de Bauru nos anos de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014 52
Tabela 12 - Vazões médias anuais estimadas dos poços do DAE que explotam água do SAG na cidade de Bauru nos cenários C1 a C6 54
Tabela 13 - Vazões médias anuais estimadas dos poços particulares que explotam água do SAG na cidade de Bauru 55
Tabela 14 - Vazão média anual dos poços do DAE que explotam água do Sistema Aquífero Bauru 55
Tabela 15 - Estimativas do gradiente hidráulico e do sentido de escoamento a partir de superfícies potenciométricas 63
Tabela 16 - Dados dos poços utilizados na calibração do modelo 66
Tabela 17 - Anos de medição dos níveis estáticos e os correspondentes anos simulados 66
Tabela 18 - Média e desvio padrão dos erros ao se variar os valores de K, H e Q_0 e o sentido do escoamento regional 68
Tabela 19 - Vazão média anual dos poços públicos e particulares do SAG por cenário futuro de explotação 73
Tabela 20 - Valores mínimos de cota piezométrica simulados para os cenários de explotação futuros do SAG na cidade de Bauru 75
Tabela 21 - Valores mínimos de cota piezométrica simulados para os cenários de explotação futuros do SAG na cidade de Bauru 76
Tabela 22 - Projeções da população urbana e das vazões distribuídas médias diárias e do dia de maior consumo no período de 2014 a 2034 para a cidade de Bauru 86
Tabela 23 - Vazão média anual dos poços públicos do SAG e do SAB por cenário futuro de explotação 87
Tabela 24 - Informações das zonas de captura dos poços para os cenários de 2014 e C1 92
Tabela 25 - Localização e ano de perfuração dos poços públicos do SAG 102
Tabela 26 - Localização e ano de perfuração dos poços particulares do SAG em operação em 2015 103

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 1
2 OBJETIVOS 3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
3.1 Sistema Aquífero Guarani 4
3.2 Cidade de Bauru e região 7
3.2.1 Desenvolvimento demográfico da cidade de Bauru 8
3.2.2 Abastecimento de água no município de Bauru 10
3.2.3 Hidrogeologia no município de Bauru 11
3.3 Modelagem de escoamento de água subterrânea 15
3.3.1 Lei de Darcy 19
3.3.2 Equação da continuidade 19
3.3.3 Equação de Laplace 20
4 MATERIAIS E MÉTODOS 21
4.1 Modelo conceitual 22
4.2 Levantamento de dados 23
4.3 Parâmetros do modelo 24
4.3.1 Poços 24
4.3.2 Condutividade hidráulica 26
4.3.3 Espessura do aquífero 28
4.3.4 Base do aquífero 30
4.3.5 Vetor de descarga do escoamento uniforme 31
4.3.6 Carga hidráulica do ponto de referência 33
4.4 Método de Elementos Analíticos 35
4.4.1 Definição e características do MEA 35
4.4.2 Escoamento potencial 37
4.4.3 Pesquisas anteriores sobre MEA no Brasil 41
4.5 Descrição dos elementos analíticos 42
4.6 Cenários propostos 48
4.6.1 Vazão dos poços 51
4.7 Simulação e visualização dos resultados 56
4.8 Calibração 59
4.9 Projeção da produção e do consumo de água 60
5 RESULTADOS 62

5.1 Escoamento regional no SAG 62
5.2 Parâmetros do modelo 63
5.3 Calibração 65
5.4 Potenciometria do SAG na cidade de Bauru 69
5.5 Cenários futuros 73
5.6 Rebaixamento do SAG na cidade de Bauru 76
5.7 Relação entre a produção e o consumo de água em Bauru 85
5.8 Avaliação do escoamento na região de Bauru 89
6 CONCLUSÕES 93
6.1 Sugestões para trabalhos futuros 95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 96
APÊNDICE A: LOCALIZAÇÃO E ANO DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS DO SAG 102
APÊNDICE B: CÓDIGO DO MODELO COMPUTACIONAL 104

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos (2013 e 2014), eventos extremos de seca atingiram a região Sudeste do Brasil, em que moram cerca de 85 milhões de habitantes (ESCOBAR, 2015), comprometendo a disponibilidade hídrica para consumo humano, geração de energia e agricultura. Consequentemente, a segurança hídrica no Sudeste está ameaçada e, em médio e longo prazo, a situação tende a se agravar, devido ao aumento da demanda de água (BICUDO et al., 2014).

A falta de um manejo adequado para atendimento das demandas crescentes de água e a redução das precipitações evidencia a vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de água em garantir o fornecimento de água tratada à população. Dentre os municípios afetados pela crise hídrica no Estado de São Paulo, está o município de Bauru, com uma população aproximada de 367 mil habitantes. A solução adotada pelos órgãos gestores do município de Bauru, em 2014, para garantir o suprimento de água a toda a população, foi implementar um rodízio de água nas regiões abastecidas por água superficial, em que vivem cerca de 150 mil habitantes.

Para solucionar o problema de falta de água em longo prazo e atender o consumo da população bauruense no horizonte de 2014 a 2034, foi elaborado o Plano Diretor de Água de Bauru (PDA). Algumas das diretrizes estabelecidas no PDA são o maior investimento em medidas de redução de perdas no sistema de distribuição de água e o aumento da oferta de água, pela perfuração de novos poços. Consequentemente, estima-se que as vazões de água extraídas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) passarão de 3.699 m^3/h, em 2014, a 4.465 m^3/h, até 2034.

Entretanto, onde há alta concentração de poços, a captação de água subterrânea deve ser controlada, para não ocasionar o rebaixamento acentuado dos níveis piezométricos. Nestas condições, a extração de água de um poço pode interferir nos demais, reduzindo o seu rendimento e aumentando o gasto com energia elétrica para bombeamento de água em profundidades cada vez maiores. Logo, o conhecimento do regime de escoamento do Sistema Aquífero Guarani, submetido às condições de explotação passada, presente e futura, é indispensável para a tomada de decisões quanto às vazões de bombeamento, ao regime de funcionamento e à localização dos novos poços.

A previsão do comportamento do escoamento de água subterrânea em diferentes cenários de explotação pode ser obtida por meio de modelagem computacional, com aplicação de métodos numéricos ou analíticos para a solução das equações diferenciais representativas do escoamento. Para o município de Bauru, já foram desenvolvidos dois modelos numéricos de escoamento de água subterrânea com cenários futuros de explotação. O primeiro prevê a perfuração de novos poços pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE) na década de 2000, para fins de gerenciamento de recursos hídricos (WATERLOO BRASIL, 2001). O segundo analisa o rebaixamento do SAG considerando cenários hipotéticos de bombeamento (C3 CONSULTORIA, 2015).

Nesta pesquisa, utilizou-se o Método de Elementos Analíticos (MEA), que foi desenvolvido por Otto Strack e é baseado na sobreposição de expressões analíticas (STRACK, 1989). A aplicação deste método não requer a discretização do domínio e é particularmente útil para a aplicação em aquíferos de escala regional (BAKKER et al., 1999; HAITJEMA, 1995). Além disso, a área modelada pode aumentar em extensão e complexidade simplesmente adicionando mais elementos hidrogeológicos (FITTS, 2002).

Portanto, o propósito desta pesquisa consiste em analisar o escoamento do SAG, no município de Bauru e região, usando o MEA, para subsidiar a tomada de decisões dos órgãos públicos quanto à explotação de água subterrânea. Para tanto, é considerada a previsão de perfuração de novos poços pelo DAE no período de 2014 a 2034, de acordo com as diretrizes do Plano Diretor de Água. Para a análise do escoamento no aquífero foram gerados mapas equipotenciais e de rebaixamento, com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) gratuito. Esta análise permitiu verificar algumas alternativas de explotação do aquífero, pela variação da vazão média anual de bombeamento, de forma a controlar o rebaixamento dos níveis piezométricos.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é analisar cenários passados, presente e futuro de explotação do SAG na cidade de Bauru/SP e avaliar cenários futuros alternativos ao cenário previsto pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru, com o objetivo de reduzir o rebaixamento dos níveis piezométricos ocasionado pelos poços.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

I Analisar o rebaixamento potenciométrico e a direção do escoamento do Sistema Aquífero Guarani por meio de um modelo computacional baseado no Método de Elementos Analíticos;

II Analisar a adequabilidade do Método de Elementos Analíticos (MEA) em simular o escoamento do SAG na cidade de Bauru;

III Fornecer ao setor público uma ferramenta adicional para o gerenciamento dos recursos hídricos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são apresentados alguns estudos já desenvolvidos quanto ao desenvolvimento demográfico, o abastecimento de água e a hidrogeologia na cidade de Bauru e o Sistema Aquífero Guarani (SAG).

3.1 Sistema Aquífero Guarani

O Sistema Aquífero Guarani é um corpo hídrico subterrâneo que corresponde às unidades estratigráficas e aquíferas Botucatu, porção superior, e Piramboia, porção basal. A Formação Piramboia é composta por arenitos fluvio-lacustres de granulação média a fina, localmente grossos e conglomeráticos, enquanto que a Formação Botucatu é composta por arenitos eólicos de granulação média a fina, avermelhados, bem selecionados (WU; CAETANO-CHANG, 1992).

O SAG está localizado nas Bacias sedimentares do Paraná e do Chaco-Paraná, no sudoeste da América Latina (ARAÚJO; FRANÇA; POTTER, 1999). Ocupa a área de, aproximadamente, 1.088.000 km² (ORGANIZATION OF AMERICAN STATES, 2009) e ocorre em quatro países: Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai, sendo que 67,65% de sua área pertencem ao território brasileiro (ORGANIZATION OF AMERICAN STATES, 2009). A Figura 1 representa a área de ocorrência do SAG no Brasil, com indicação das formações geológicas aflorantes, de acordo com o Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo, disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (DINIZ et al., 2014a).

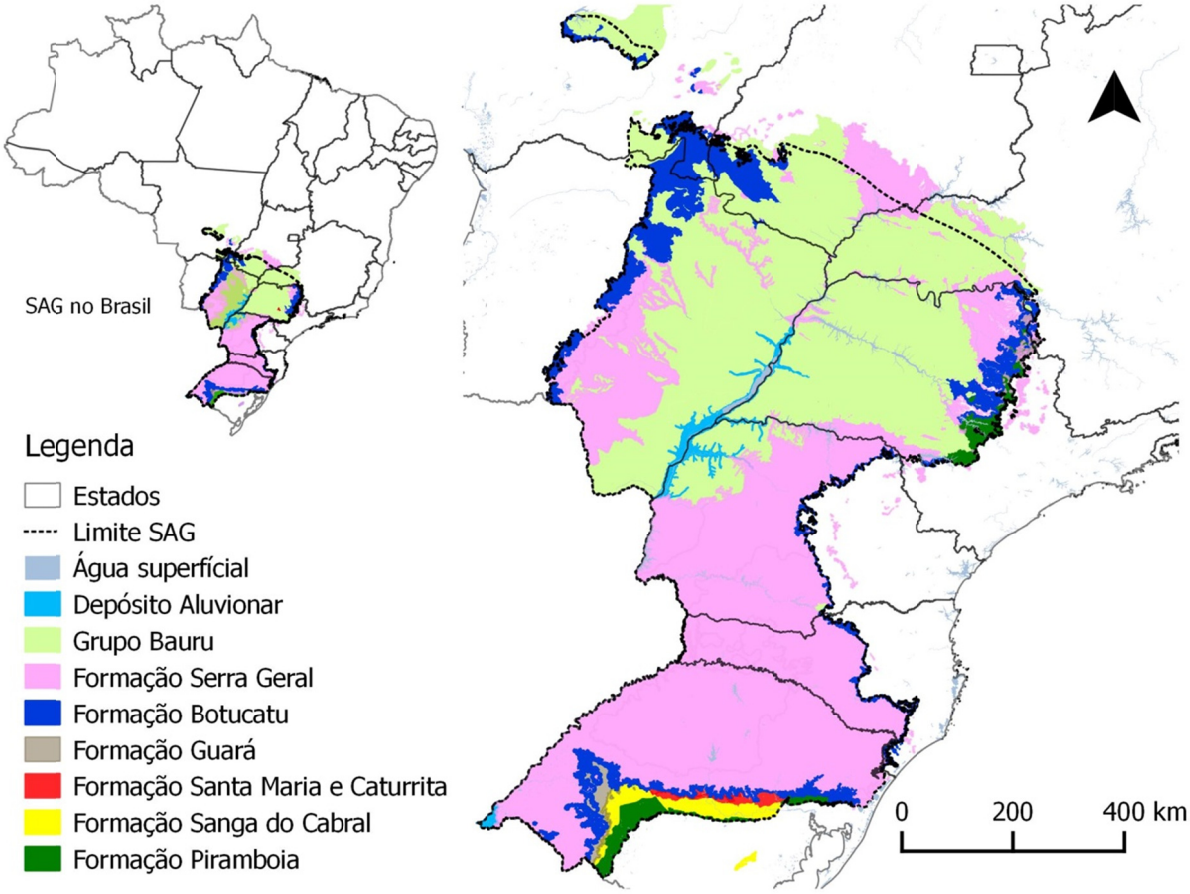


Figura 1 - Área de ocorrência do SAG no Brasil com indicação das formações aflorantes. Fonte: elaborado com base nas informações de Diniz et al. (2014a)

O número de pessoas que vivem sobre a área de ocorrência do SAG ultrapassa 20 milhões e os principais usos deste aquífero são para a agricultura, a indústria e o abastecimento público (GÓMEZ; RODRÍGUEZ; VIVES, 2010). Além disso, o SAG representa um recurso essencial e para o funcionamento e manutenção dos ecossistemas a ele associados (DINIZ et al., 2014b). O estado de São Paulo concentra o maior número de poços que captam água do SAG e é o responsável pelo maior volume de água extraído do Aquífero. A maior parte dos poços no estado é utilizada para o abastecimento público (ORGANIZATION OF AMERICAN STATES, 2009).

De acordo com Rebouças (1976) a espessura do SAG no Estado de São Paulo é de, em média, 300 m. Em 1999, o Serviço Técnico de Pesquisas, Estudos e Treinamentos de Araraquara (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 1999) verificou que a espessura do SAG varia de 150 m a 450 m em sua porção confinada. No mesmo ano, Araújo, França e Potter (1999) estudaram a hidrogeologia do SAG baseado em dados de 322

poços. Os valores de espessura, condutividade hidráulica e transmissividade obtidos por eles são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características hidrogeológicas das Formações Botucatu e Piramboia

Característica	Formação Botucatu	Formação Piramboia
Espessura (m)	4 a 484	25 a 770
Espessura média (m)	138	139
Condutividade hidráulica média (m/s)	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$
Transmissividade (m²/d)	2,4 a 552	Sem dados confiáveis

Fonte: modificado de Araújo, França e Potter (1999)

De acordo com o perfil estratigráfico elaborado por Sracek e Hirata (2002) no Estado de São Paulo, a espessura do SAG atinge valores máximos de até 550 m, e valor médio de 268 m. No Programa Estratégico de Ação do SAG (ORGANIZATION OF AMERICAN STATES, 2009) é apresentado um perfil estratigráfico do SAG, indicando as espessuras (Figura 2). Observa-se que, no geral, as espessuras do SAG são maiores na região em que o aquífero está confinado.

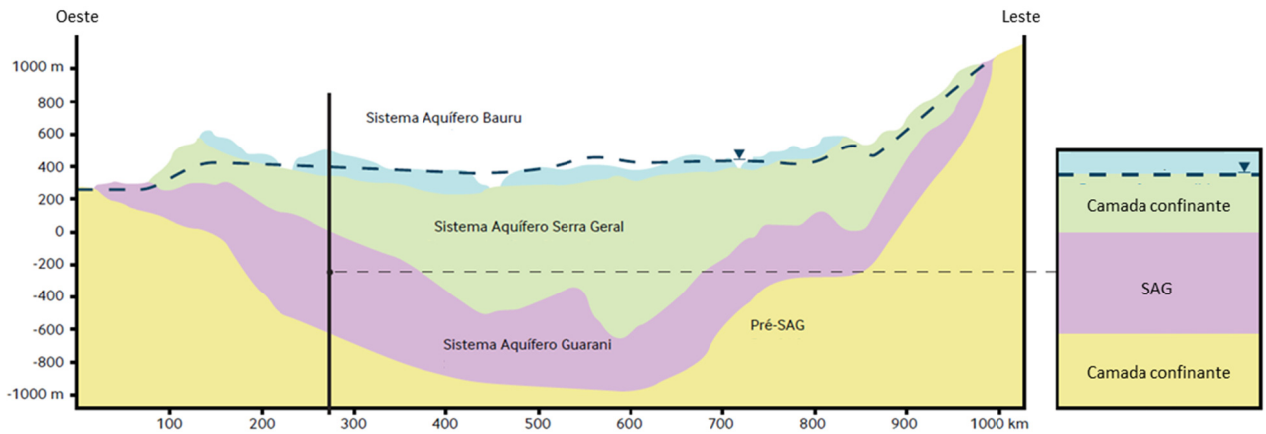


Figura 2 - Perfil estratigráfico do SAG com indicação das camadas confinantes. Fonte: modificado de Organização dos Estados Americanos (2009)

Na cidade de Araraquara, situada a cerca de 100 km da área de estudo desta pesquisa, os valores de transmissividade e de condutividade hidráulica obtidos por Hirata et al. (2012) variam entre 120 e 333 m²/d e entre $4{,}1 \cdot 10^{-6}$ e $0{,}9 \cdot 10^{-5}$ m/s, respectivamente.

Estudos mais recentes, elaborados pelo CPRM, indicam que a espessura média do SAG é de 250 m (DINIZ et al., 2014b).

3.2 Cidade de Bauru e região

Nesta pesquisa, a principal área de estudo do escoamento de água subterrânea do SAG corresponde à cidade de Bauru e região (Figura 3). A área da região é de 102x102 km², o que equivale a 10.404 km². De acordo com o último censo do IBGE, a população total dos municípios com área urbana dentro da região delimitada na Figura 3 é maior do que 870 mil habitantes (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010). Esta região foi escolhida, pois permite a visualização da zona de captura dos poços de Bauru, sendo todas as cidades localizadas em área de ocorrência de escoamento confinado do SAG.

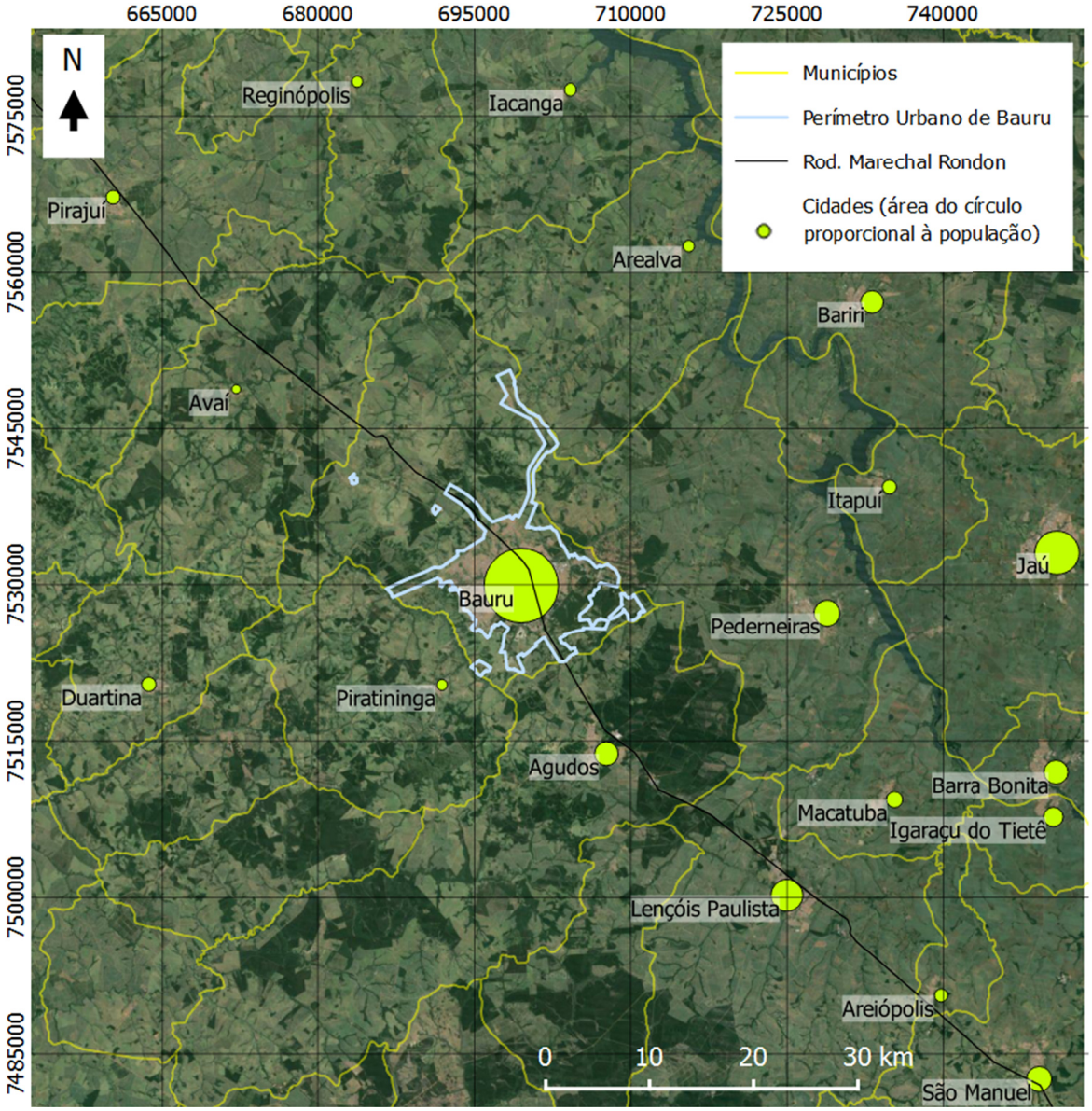


Figura 3 - Imagem de satélite georreferenciada da região de Bauru com indicação das cidades (centro urbano) com população maior ou igual a 5 mil habitantes

O estudo do rebaixamento dos níveis potenciométricos foi focado no município de Bauru, que está localizado no centro do Estado de São Paulo (700.000 m E, 7.540.000 m N), como indicado na Figura 4.

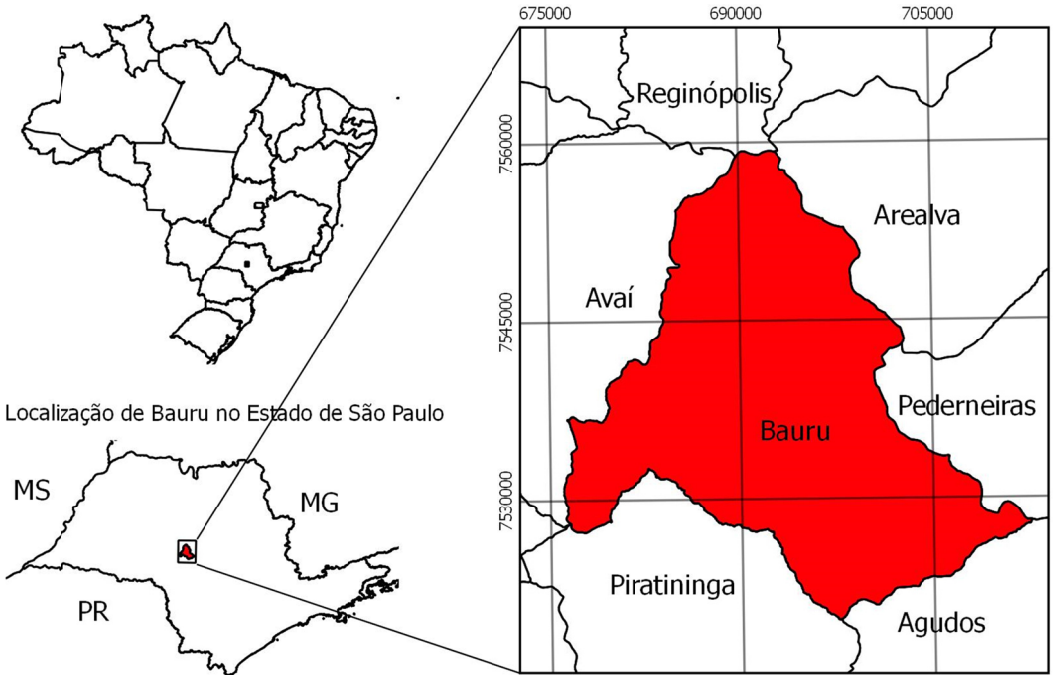


Figura 4 - Localização do município de Bauru e cidades vizinhas

Os principais motivos para o foco do estudo na cidade de Bauru foram:

- Há interesse do Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE) para o desenvolvimento do projeto, uma vez que é prevista a instalação de novos poços públicos para explotação de água do SAG na cidade;
- Há um estudo recente sobre as características hidrogeológicas do município (C3 CONSULTORIA, 2015), o que facilita a obtenção de informações e de dados de monitoramento;
- Há informações disponíveis e atualizadas quanto ao abastecimento de água de Bauru, no Plano Diretor de Água de Bauru (PDA) (HIDROSAN, 2014), que fornece diretrizes para o abastecimento no horizonte de projeto de 2014 a 2034.

3.2.1 Desenvolvimento demográfico da cidade de Bauru

A projeção demográfica mais recente do município de Bauru foi apresentada no PDA (HIDROSAN, 2014), em que o crescimento populacional foi comparado com o de outras cidades de comportamento semelhante. Em seguida, o aumento populacional foi analisado por

meio de vários métodos, variando a taxa de crescimento. Finalmente, foi selecionado o método geométrico e adotada a taxa de crescimento de 1,35 % ao ano (HIDROSAN, 2014).

Na Tabela 2 são apresentados dados da população do município de Bauru de acordo com os censos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Tabela 2 - População total de Bauru segundo os censos do IBGE de 1970 a 2010

Ano do censo do IBGE	População (hab)	Taxa geométrica de crescimento anual (%)
1970	131.936	-
1980	186.659	3,53
1991	261.112	3,10
2000	316.064	2,14
2010	343.937	0,85

Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010)

Da população de 343.937 hab registrada no Censo do IBGE realizado em 2010, 338.184 correspondem à população urbana e 5.753, à rural (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

A Figura 5 apresenta a evolução populacional do município de Bauru de 1970 a 2010, de acordo com os censos do IBGE e a projeção demográfica elaborada no PDA, com outras taxas de crescimento possíveis e a adotada (1,35%).

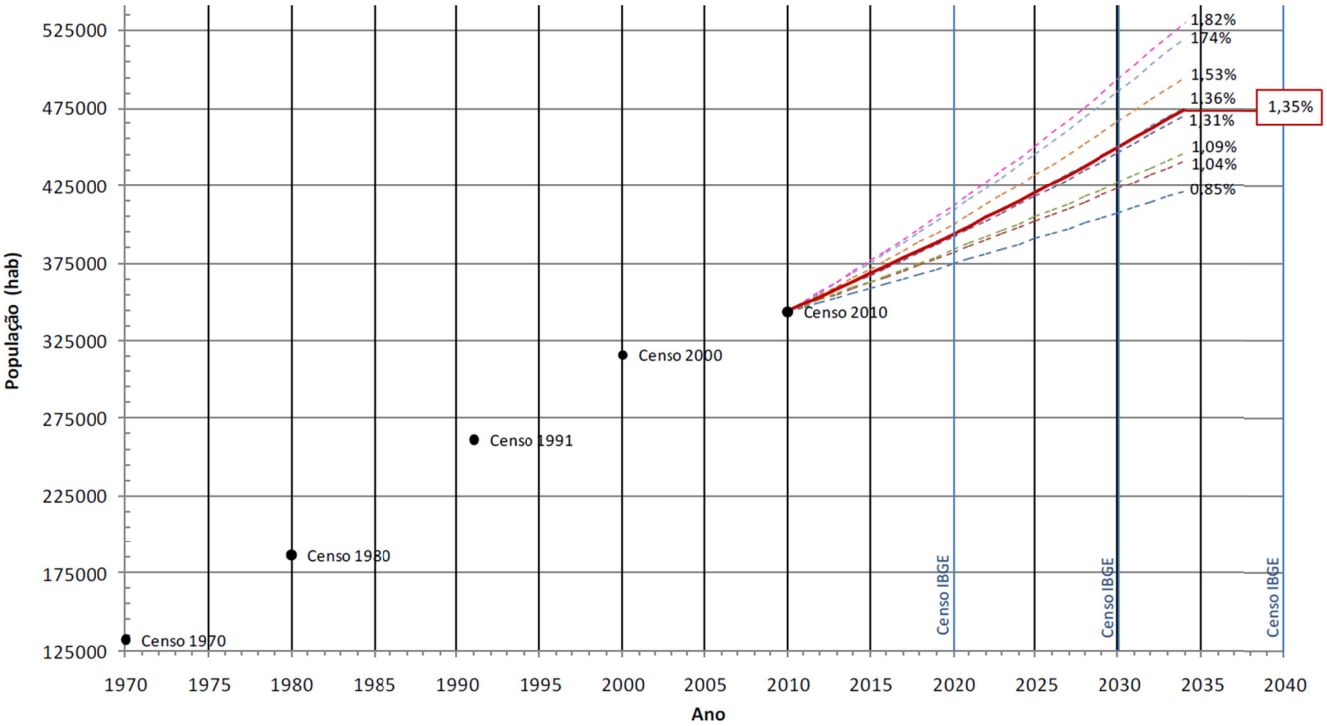


Figura 5 - Projeção populacional de Bauru de acordo com as taxas de crescimento estudadas e a adotada (1,35%) no Plano Diretor de Água. Fonte: Hidrosan (2014)

3.2.2 Abastecimento de água no município de Bauru

O serviço de abastecimento público de água no município de Bauru é realizado pelo DAE, cuja atribuição é a administração, gerenciamento, produção, distribuição e fiscalização do sistema de abastecimento de água no município de Bauru (BAURU, 2008).

Os estudos mais recentes realizados no município de Bauru visando subsidiar, entre outros, a explotação de água subterrânea foram o "Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru / SP" (C3 CONSULTORIA, 2015) e o "Plano Diretor de Água de Bauru" (HIDROSAN, 2014). Além destes, em 2001 foi entregue ao DAE o relatório "Modelagem matemática de fluxo das águas subterrâneas" (WATERLOO BRASIL, 2001). Os principais objetivos destes estudos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resumo dos principais objetivos dos estudos realizados no município de Bauru para subsidiar a perfuração de novos poços

Fonte	Principais objetivos
Waterloo Brasil (2001)	Fornecer ao DAE uma ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos no município de Bauru
Hidrosan (2014)	Realizar um diagnóstico qualitativo, quantitativo, técnico e operacional do sistema de abastecimento existente. Estabelecer diretrizes para o abastecimento público de água.
C3 Consultoria (2015)	Elaboração de um diagnóstico hidrogeológico para avaliar a necessidade de delimitação e classificação de áreas de restrição e controle do uso das águas subterrâneas.

A maior parte da água consumida no município de Bauru provém da produção de água superficial e subterrânea pelo DAE (HIDROSAN, 2014). O termo "água produzida" refere-se à água bombeada de mananciais subterrâneos ou superficiais e destinada ao abastecimento.

No município de Bauru há apenas uma captação de água superficial, do Rio Batalha, como fonte de abastecimento público de água. A água captada deste rio é tratada na Estação de Tratamento de Água (ETA), que produz cerca de 37% do total de água produzida pelo DAE. No horizonte de projeto do PDA (2014 a 2034), não é prevista a implantação de uma nova ETA (HIDROSAN, 2014).

Além dos 35 poços públicos administrados pelo DAE em 2014, há cerca de 460 poços particulares ativos e cadastrados, sendo sua maioria de uso comercial, industrial e residencial

(HIDROSAN, 2014). Em 2014, a vazão média anual produzida pelo poços públicos foi de 3.283 m³/h e pelos poços particulares foi de 451 m³/h.

No PDA são descritas as etapas para o controle e a redução do índice de perdas (IP) na cidade de Bauru no horizonte de 2014 a 2034. De 2014 a 2019, a redução de perdas está relacionada, principalmente, ao controle das perdas aparentes, como o combate às fraudes e às falhas de medição dos hidrômetros. As principais medidas a serem adotadas pelo DAE para redução das perdas aparentes são (HIDROSAN, 2014):

- Alteração na lei de propriedade do hidrômetro;
- Substituição dos hidrômetros existentes pelo novo padrão a ser estabelecido pelo DAE com base na faixa de consumo de cada economia;
- Criação da bancada de aferição de hidrômetros.

A partir de 2019 a redução de perdas deverá ocorrer, principalmente, pela setorização da rede de distribuição de água, ou seja, pelo controle das perdas reais nas tubulações. Consequentemente, o índice de perdas, estimado em 49% em 2014 (HIDROSAN, 2014), deve diminuir gradativamente ao longo dos anos: estima-se que o índice de perdas reduza em 10% até o 5º ano do período de projeto (2019) e que diminua gradativamente até atingir o valor de 25% no final da vigência do Plano Diretor de Água (2034) (HIDROSAN, 2014).

No PDA, foi estabelecido que o DAE será responsável em atender o consumo de água de toda a população urbana, até 2034. As regiões de indústria, comércio e serviço e as áreas de expansão industrial não serão contabilizadas no abastecimento de água pelo DAE até 2034, sendo atendidos prioritariamente por poços particulares (HIDROSAN, 2014).

3.2.3 Hidrogeologia no município de Bauru

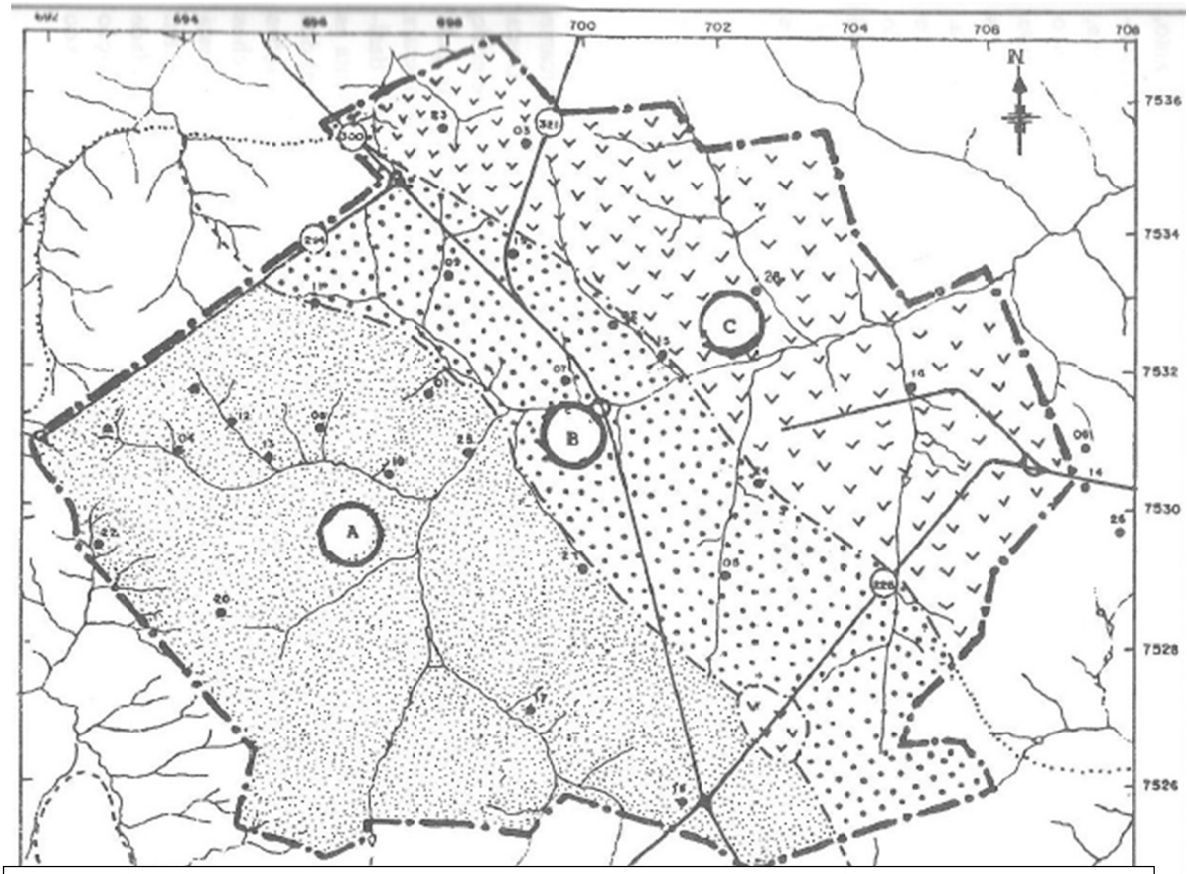
No município de Bauru ocorrem as Formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral, que pertencem ao Grupo São Bento, e as Formações Adamantina, Marília e Araçatuba, que pertencem ao Grupo Bauru (PAULA E SILVA; CHANG; CAETANO-CHANG, 2003). Os dois principais aquíferos que são utilizados para o abastecimento de água no município são o Sistema Aquífero Bauru (SAB) e o SAG. Na cidade de Bauru, o SAB corresponde às formações Marília e Adamantina (C3 CONSULTORIA, 2015), enquanto que o SAG corresponde às formações Botucatu e Piramboia.

Cavaguti (1981) realizou um dos primeiros estudos detalhados para subsidiar a escolha dos locais adequados para instalação de novos poços na cidade de Bauru. Em sua tese, a geologia, estrutura e características hidrogeológicas da cidade foram analisadas. Posteriormente, Paula e Silva e Cavaguti (1992) analisaram a hidrogeologia de Bauru para auxiliar no gerenciamento de recursos hídricos. As características hidrogeológicas do SAG obtidas nesses estudos são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características hidrogeológicas do SAG no município de Bauru

Fonte	Transmissividade (m^2/d)	Espessura (m)	Condutividade hidráulica média (m/s)
Cavaguti (1981)	100 a 655	196 a 257	-
Paula e Silva e Cavaguti (1992)	32 a 539	60 a 344	$2{,}9 \cdot 10^{-5}$

De acordo com Paula e Silva e Cavaguti (1992), a cidade de Bauru está localizada em uma área com características geológicas anômalas, apresentadas na Figura 6.



Região A: Formação Piramboia Região B: Formação Botucatu Região C: Formação Serra Geral

Figura 6 - Regiões de ocorrência das Formações do Grupo São Bento na cidade de Bauru. Fonte: modificado de Paula e Silva e Cavaguti (1992)

As regiões delimitadas na Figura 6 são (PAULA E SILVA; CAVAGUTI, 1992):

- Região A: O SAG é composto apenas pela Formação Piramboia, não sobreposta pela Formação Serra Geral;
- Região B: O SAG é composto pelas Formações Piramboia e Botucatu, não sobrepostos pela Formação Serra Geral;
- Região C: O SAG é composto pelas Formações Piramboia e Botucatu, sobrepostos pela Formação Serra Geral.

Uma seção estrutural esquemática do SAG na cidade de Bauru é apresentada na Figura 7. A base do Grupo Bauru (indicada na Figura 7 por tracejado) é predominantemente formada por sedimentos pelíticos (SILVA, 2009), os quais são característicos da Formação Araçatuba (PAULA E SILVA; CHANG; CAETANO-CHANG, 2003). Nota-se, ainda, que a espessura do SAG diminui no sentido sudoeste.

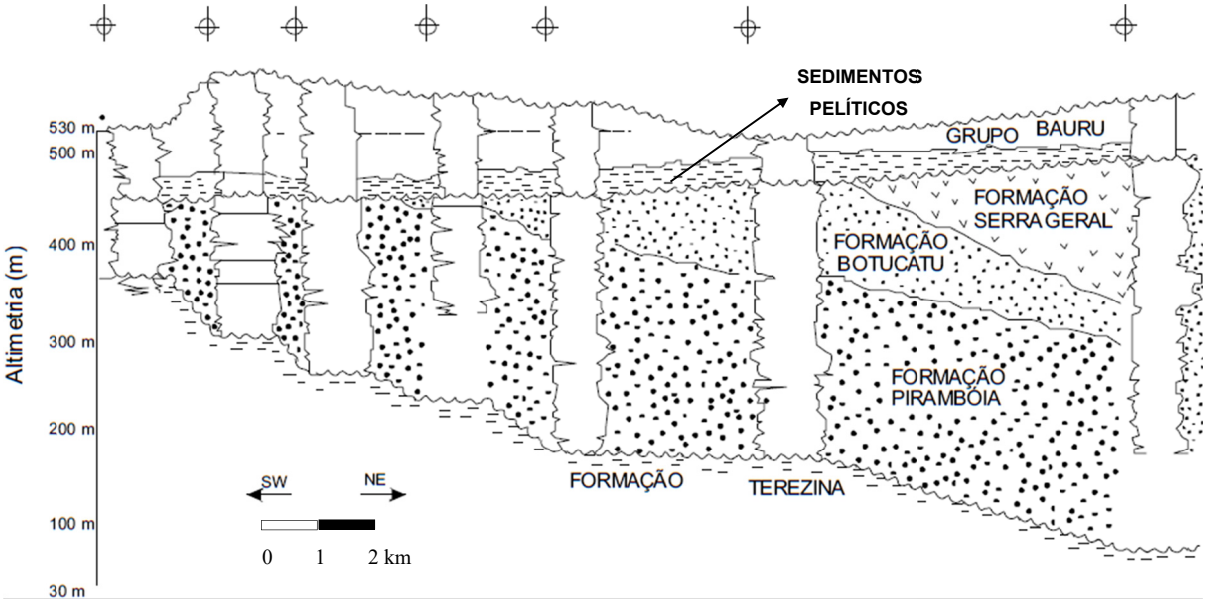


Figura 7 - Seção estrutural esquemática na direção sudoeste - nordeste na cidade de Bauru. Fonte: modificado de Paula e Silva e Cavaguti (1994)[1] apud Silva (2009)

Segundo Silva e Chang (2010), os sistemas aquíferos Bauru e Guarani estão em contato direto, com o primeiro assentado sobre o segundo, na maior parte da área urbana de Bauru, onde não ocorre a Formação Serra Geral. Contudo, devido às porções argilosas existentes na base da Formação Adamantina, os autores afirmam que não há mistura de água significativa entre os dois sistemas.

[1] PAULA E SILVA, F. DE; CAVAGUTI, N. **Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru - SP**. Revista Geociências, v. 13, p. 81–99, 1994.

O Diagnóstico Hidrogeológico de Bauru (C3 CONSULTORIA, 2015) apresenta características similares às observadas nos estudos anteriores, com relação à janela estrutural. Além disso, foi avaliada a conexão hidráulica entre o SAB e o SAG. Concluiu-se que não há conexão hidráulica entre os aquíferos em condições naturais, com base nos seguintes critérios (C3 CONSULTORIA, 2015):

- As características hidrogeoquímicas e isotópicas das águas subterrâneas do SAB e do SAG são distintas;
- As águas do SAG não possuem diferenciação hidrogeoquímica ou isotópica entre as regiões de ocorrência da janela estrutural e aquelas subjacentes à Formação Serra Geral;
- As superfícies piezométricas do SAB e do SAG possuem comportamentos distintos e independentes: os níveis piezométricos do SAB são da ordem de 40 a 160 m mais elevados que os níveis do SAG em todo perímetro urbano de Bauru;
- A partir de estudos anteriores, de dados recentemente obtidos e com auxílio dos perfis geofísicos de poços e as sondagens elétricas verticais, uma camada de lamitos foi identificada na base da sequência sedimentar do Grupo Bauru, correlacionada à Formação Araçatuba, com espessura variando de 10 a 20 m e continuidade lateral em toda a área de ocorrência da janela estrutural, constituindo um aquitarde responsável pelo isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG.

Embora a conexão hidráulica ainda não tenha sido verificada em estudo anteriores, ela pode ocorrer devido ao bombeamento nos poços do SAG, cuja extração de água altera os gradiente hidráulicos, tornando o poço cada vez mais vulnerável à contaminação.

O diagnóstico hidrogeológico coordenado por C3 Consultoria (2015) apresenta o mapa de espessura mais recentemente desenvolvido (Figura 8).

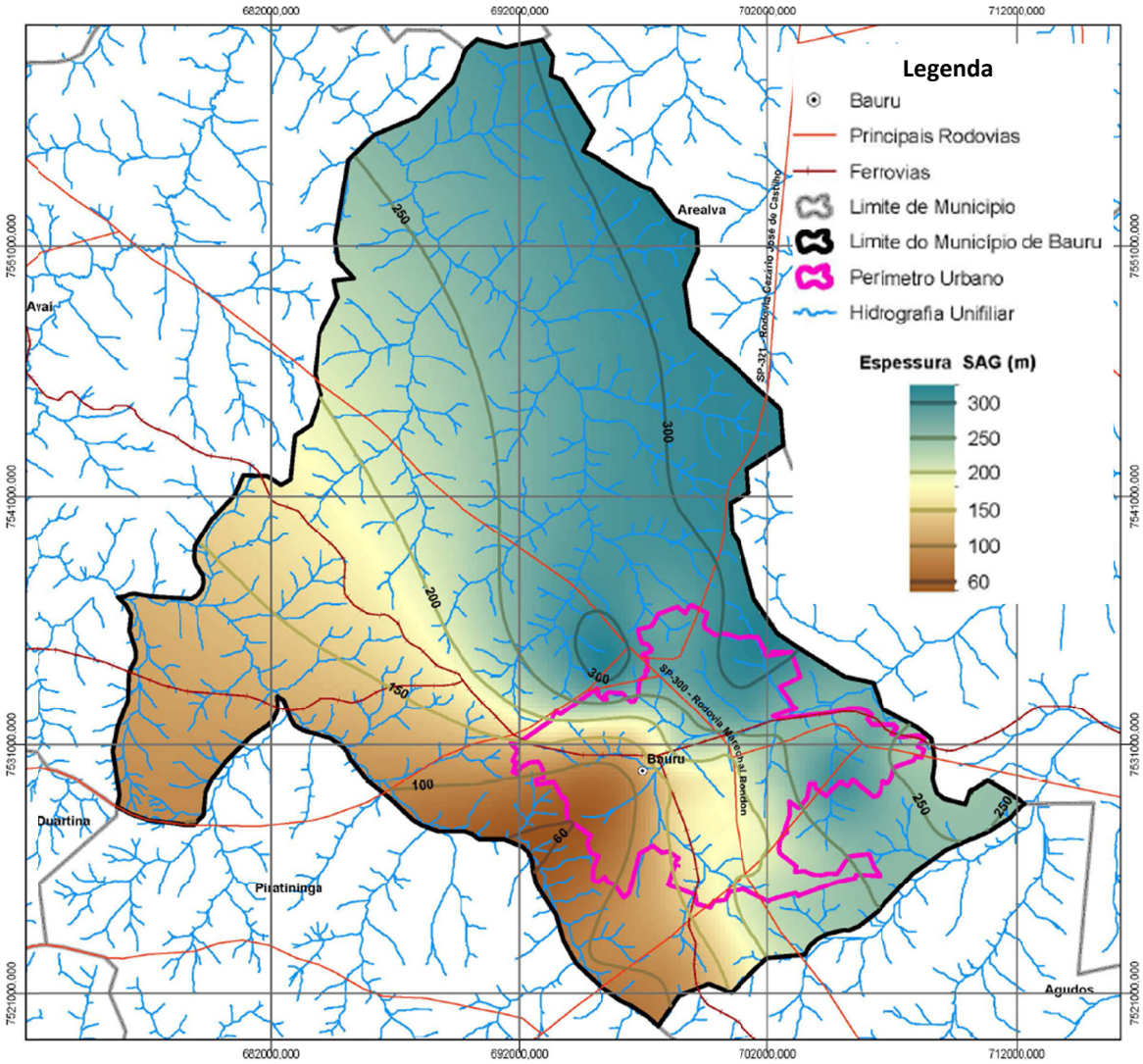


Figura 8 - Mapa de espessuras do SAG no município de Bauru. Fonte: modificado de C3 Consultoria (2015)

A variação de espessura apresentada na Figura 8 está praticamente na mesma faixa de espessura obtida por Paula e Silva e Cavaguti (1992), de 60 a 344 m.

3.3 Modelagem de escoamento de água subterrânea

A modelagem do escoamento de água subterrânea constitui uma etapa importante na maioria dos projetos relacionados com desenvolvimento, proteção e remediação de água subterrânea (KRESIC, 2006). Modelos são descrições simplificadas de um fenômeno e podem ser na forma de texto, representações gráficas, modelos físicos ou equações matemáticas (BELCHER; WELCH, 2006).

Para a descrição do comportamento da água em um aquífero ao longo do tempo, podem ser elaborados modelos dos cenários passados, presente e futuros. A representação de

cenários futuros é também descrita como "previsão". Anderson, Woessner e Hunt (2015) considera esse termo mais apropriado do que "predição", uma vez que enfatiza que há sempre uma incerteza a ser considerada na análise dos resultados.

O fluxograma a seguir (Figura 9) ilustra as etapas do processo de modelagem utilizadas por Anderson, Woessner e Hunt (2015) e adotadas nesta pesquisa. As etapas da modelagem de água subterrânea são descritas na Tabela 5.

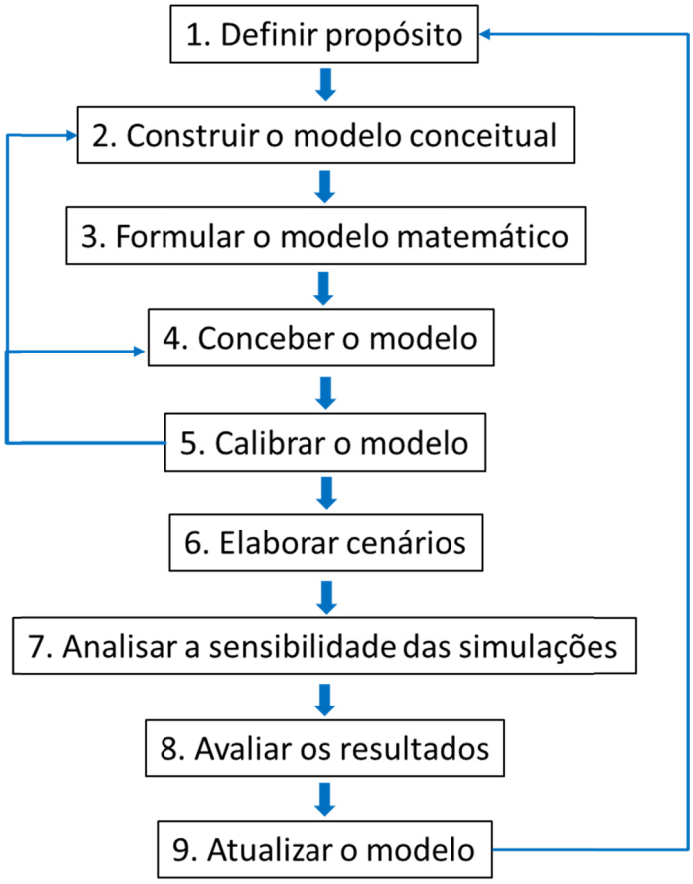


Figura 9 - Fluxograma para modelagem de escoamento de água subterrânea. Fonte: modificado de Anderson, Woessner e Hunt (2015)

Tabela 5 – Descrição das etapas da modelagem de escoamento de água subterrânea

	Etapas da modelagem de escoamento de água subterrânea
1	Definição dos objetivos finais da modelagem, por exemplo: simulação de cenários futuros; simulação de cenários passados e avaliação do comportamento do aquífero. Seyf-Laye et al. (2012) afirmam que se o propósito está claro, pode-se determinar se o modelo será uma solução relevante para o problema, ou não.
2	Definição de características hidrogeológicas para a identificação das unidades hidroestratigráficas do aquífero e suas características hidráulicas (IRITANI, 1999). O modelo conceitual é idealizado com o objetivo de definir o domínio do modelo, o tipo do aquífero a ser modelado, as condições iniciais e de contorno e as fontes e sumidouros de água do sistema (IRITANI, 1999).
3	Formulação matemática das equações governantes para resolução do problema.
4	Elaboração do modelo numérico ou analítico considerando o modelo conceitual (definir as condições de contorno, parâmetros, etc).
5	Anderson, Woessner e Hunt (2015) dividem a etapa de calibração em: a) seleção dos dados usados na calibração (ex. carga hidráulica); b) ajuste dos parâmetros e comparação dos valores simulados com os valores observados; c) aceitacão ou rejeição da calibração (uma vez rejeitada, retorna-se à etapa 2 ou 4 e d) após aceita a calibração, avalia-se a coerência dos parâmetros ajustados (uma vez incoerentes, retorna-se à etapa 2 ou 4). De acordo comSeyf-Laye et al. (2012), os dados de campo devem ser reproduzidos pelo modelo com certo grau de precisão, definido de acordo com a escala do modelo e com os resultados esperados para o modelo.
6	Elaboração da simulação (cenários passados, presentes e/ou futuros)
7	Análise de sensibilidade do modelo
8	Avaliação dos resultados obtidos
9	Reavaliação e atualização do modelo no caso de novas questões a serem respondidas, da coleta de novos dados e disponibilidade de novas informações (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Pode haver a necessidade em recomeçar desde a primeira etapa do processo de modelagem.

A simulação do escoamento de água subterrânea é geralmente realizada por modelos computacionais que representam o escoamento da água em meio poroso por meio de equações matemáticas. Os métodos numéricos tradicionais para a implementação das equações de escoamento de água subterrânea são o Método das Diferenças Finitas (MDF) e o Método de Elementos Finitos (MEF) (BELCHER; WELCH, 2006). Ambos dependem de um domínio dividido em unidades discretas (ou células), que formam uma malha (Figura 10). No caso do MDF, as malhas são retangulares (Figura 10 B), enquanto que no MEF, as malhas são formadas por polígonos irregulares (Figura 10 C) (BELCHER; WELCH, 2006).

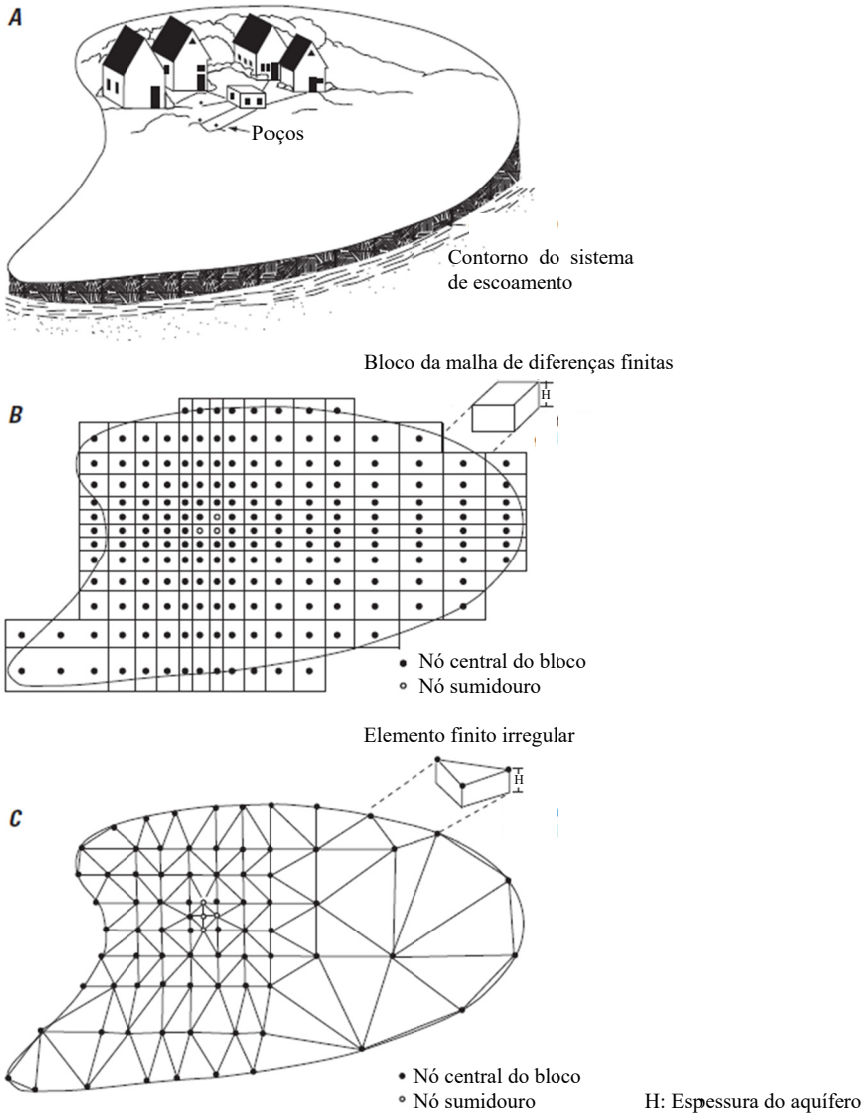


Figura 10 - Esquema do aquífero mostrando a área de estudo e o contorno do sistema de escoamento (A), uma malha de diferenças finitas (B) e uma malha de elementos finitos (C) usados em um modelo computacional de escoamento de água subterrânea. Fonte: modificado de Mercer e Faust (1980)[2] apud Belcher e Welch (2006)

De acordo com (FITTS, 2002), além dos métodos numéricos de diferenças finitas e de elementos finitos, o Método de Elementos Analíticos é muito utilizado em modelos computacionais de escoamento de água subterrânea. O modelo de escoamento desenvolvido nesta pesquisa foi desenvolvido pelo MEA, devido a sua simplicidade em representar aquíferos regionais confinados (ver item 4.4).

O modelo matemático consiste nas leis de Darcy e na equação da continuidade. Considerando que o aquífero é confinado e que não há recarga nem descarga no local de estudo, as equações deverão respeitar a equação de Laplace. Nos próximos itens são apresentados os fundamentos teóricos utilizados na simulação.

[2] MERCER, J. W.; FAUST, C. R. **Ground-Water Modeling: An overview**. Groundwater, v. 18, n. 2, 1980.

3.3.1 Lei de Darcy

A partir de análises quantitativas do escoamento de água através de uma coluna de areia, Darcy (1856) estabeleceu a lei básica para os estudos modernos de escoamento em meio poroso (KRESIC, 2006). A lei de Darcy estabelece que o volume de água por unidade de tempo Q (L^3/T) que atravessa uma amostra de areia é diretamente proporcional à área da seção transversal do escoamento A (L^2) e à diferença de carga hidráulica entre dois pontos medidos $\Delta\ \phi$ (L), e é inversamente proporcional à distância entre os dois pontos l (L). K é a constante de proporcionalidade, chamada de condutividade hidráulica (L/T). A lei de Darcy pode ser descrita como:

$$Q = KA\frac{\Delta\ \phi}{l} \tag{1}$$

A equação de Darcy pode ser reescrita com relação à descarga específica q_j (L/T), que é o volume de água (L^3) que escoa por unidade de área (L^2) por unidade de tempo (T):

$$q_j = -K\frac{d\phi}{dj} \tag{2}$$

A derivada $\frac{d\phi}{dj}$ indica o gradiente hidráulico na direção j do escoamento. O sinal negativo é necessário porque a carga hidráulica diminui na direção do escoamento.

3.3.2 Equação da continuidade

A equação da continuidade descreve o movimento de água subterrânea a partir do princípio de conservação de massa. Considerando ainda que a água é incompressível, a conservação de massa resulta na conservação de volume, ou, para água em movimento, continuidade do escoamento. Isso significa que, a quantidade (massa ou volume) de água que entra em um volume de controle em meio poroso preenchido com água deve ser a mesma que sai. A equação da continuidade descrita em termos da descarga específica, para aquíferos sem área de descarga ou recarga, é:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

3.3.3 Equação de Laplace

A equação de Laplace é a equação diferencial para escoamento de água subterrânea em estado estacionário. Ela é obtida pela combinação entre a equação da continuidade e a lei de Darcy:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[-K\frac{d\phi}{dx}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[-K\frac{d\phi}{dy}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[-K\frac{d\phi}{dy}\right]=0 \tag{4}$$

ou

$$\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial z^2}=0 \tag{5}$$

De acordo com Strack (1989), embora existam poucas soluções para a equação de Laplace em três dimensões, a maioria dos problemas práticos de escoamento é bidimensional ou aproximadamente bidimensional.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa da elaboração do modelo de escoamento de água subterrânea consistiu na coleta de dados de órgãos públicos e publicações especializadas. Posteriormente, o modelo foi desenvolvido de acordo com as etapas apresentadas na Figura 11.

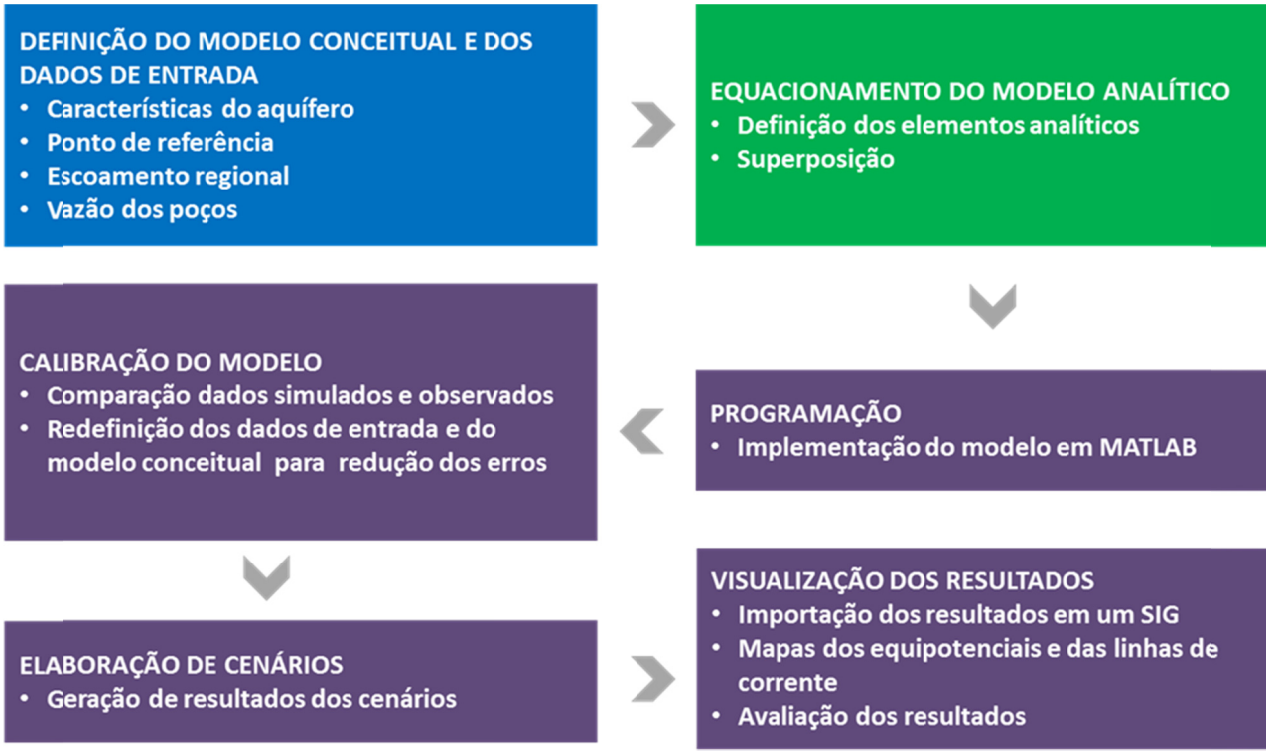


Figura 11 - Resumo da metodologia desenvolvida nesta pesquisa para geração do modelo analítico, com destaque em azul para a etapa de caracterização, verde para o equacionamento do modelo e roxo para a geração de resultados e utilização de programas

Em azul estão destacadas as atividades iniciais desta pesquisa, como a avaliação dos dados coletados e o estudo e caracterização do sistema de escoamento de água subterrânea. Em verde são destacadas as atividades relativas ao equacionamento do modelo matemático, baseado no Método de Elementos Analíticos. Nos quadros roxos, observam-se as etapas de geração, calibração e visualização dos resultados.

Nos próximos itens são descritas com mais detalhes as metodologias adotadas para geração dos resultados.

Todas as coordenadas são representadas pelo sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), datum de referência WGS84, zona 22K.

4.1 Modelo conceitual

O modelo conceitual é um conjunto de hipóteses que descreve o sistema de escoamento de água subterrânea de forma simplificada. Nesta pesquisa, as hipóteses do modelo conceitual são:

- o aquífero é confinado não drenante, homogêneo e isotrópico;
- o regime é permanente;
- a água possui viscosidade e densidade constantes;
- a espessura do aquífero é constante e seu topo e base são horizontais;
- existe escoamento natural no aquífero: escoamento regional uniforme;
- no bombeamento, o escoamento é radial e horizontal;
- o escoamento é laminar;
- o aquífero tem extensão infinita;
- não há outras captações além daquelas consideradas na área de estudo;
- a vazão de bombeamento dos poços é constante e
- os poços perfuram o aquífero até a base (penetração total dos poços e dos filtros).

O SAG foi considerado como uma única unidade hidroestratigráfica, formada pelas Formações Botucatu e Piramboia, limitada inferiormente pelas formações do grupo Passa Dois e, superiormente, pela Formação Serra Geral ou pela Formação Araçatuba do Grupo Bauru. O SAG também foi considerado como uma única unidade hidroestratigráfica nos modelos numéricos elaborados por Cavicchia (2007), Guanabara (2011) e Rabelo e Wendland (2010), uma vez que, em geral, as informações geológicas disponíveis não fornecem detalhamento espacial suficiente que justifique maior complexidade no sistema de escoamento.

O escoamento regional foi considerado a única entrada de água no sistema. Os elementos da área de estudo considerados para elaboração do modelo analítico foram:

- escoamento regional uniforme;
- bombeamento dos poços;
- inomogeneidade cilíndrica e
- valor de carga hidráulica constante no ponto de referência.

Os principais parâmetros e características que descrevem o modelo conceitual são:

- condutividade hidráulica uniforme para toda a área de estudo (K);
- espessura do aquífero (H);
- espessura da inomogeneidade (H^+);
- raio da inomogeneidade (R);
- cota base do aquífero com relação ao nível do mar (b);
- escoamento regional uniforme (Q_0) e
- carga hidráulica no ponto de referência (ϕ_0).

A Figura 12 mostra os parâmetros do sistema de escoamento de água subterrânea no SAG, consideradas no modelo analítico.

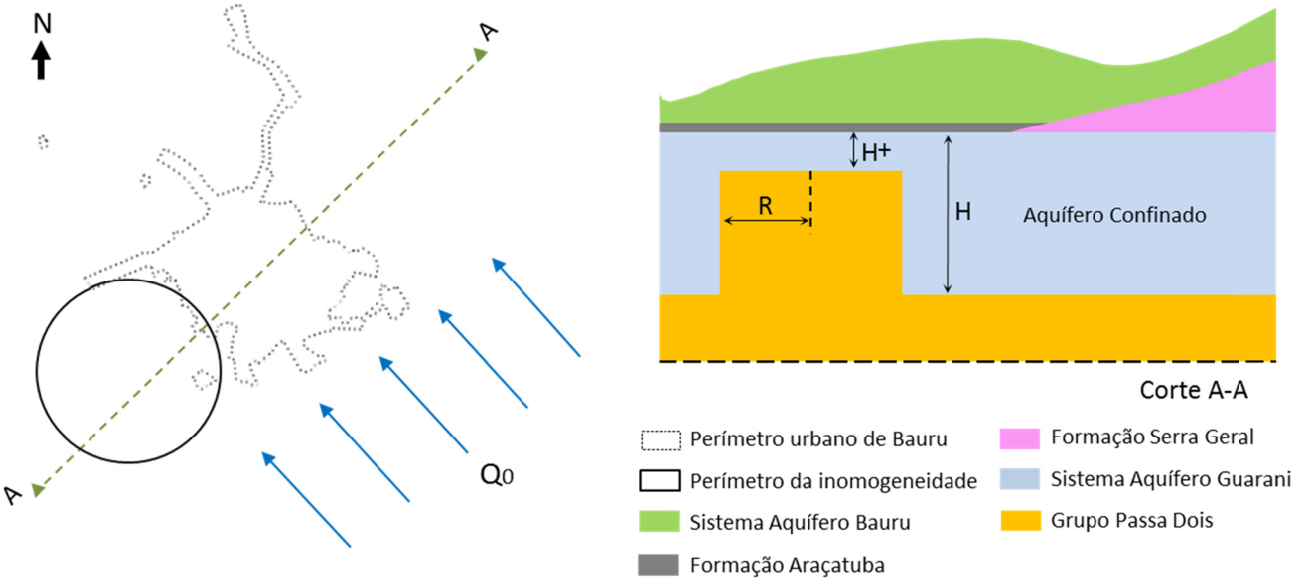


Figura 12 - Características hidrogeológicas do sistema de escoamento de água subterrânea no SAG consideradas no modelo conceitual

4.2 Levantamento de dados

A maioria dos dados utilizados para a elaboração do modelo analítico são referentes à hidrogeologia do SAG e aos poços que explotam água do aquífero na cidade de Bauru. A data de perfuração, localização e o as características hidrogeológicas do aquífero explotado pelos poços do DAE e particulares foram obtidos dos relatórios de perfuração dos poços, disponibilizados pelo setor de águas subterrâneas do DAEE de Araraquara, SP.

As principais referências e os dados obtidos são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Principais fontes de dados sobre os poços e a hidrogeologia na cidade de Bauru/SP e região

Fonte	Dados
Cavaguti (1981), Paula e Silva e Cavaguti (1992), Waterloo Brasil (2001), Silva e Chang (2010) e Diniz et al. (2014b)	Área de ocorrência do SAG, espessura, condutividade hidráulica, condições de confinamento, etc.
Araújo; França e Potter (1999), Rocha et al. (2006) e LEBAC (2008)	Gradiente hidráulico estimado e sentido do escoamento de água no SAG.
DAE (2015a)	Vazão média dos poços do DAE nos anos de 2006 a 2014 e localização dos poços do DAE.
DAE (2015b)[3]	Informações relativas à instalação e vazão de novos poços.
Hidrosan (2014)	Localização de poços a serem instalados até 2034, informações sobre o crescimento demográfico e o consumo de água, perfis geológicos de poços do DAE, etc.
DAEE (2015)	Relatórios de perfuração, instalação e renovação de outorga dos poços do SAG e testes de bombeamento.
C3 Consultoria (2015)	Resultados de testes de bombeamento, mapa de espessura do SAG, área de ocorrência da Formação Serra Geral, etc.

4.3 Parâmetros do modelo

Neste item são apresentados os parâmetros utilizados na modelagem do escoamento do SAG na cidade de Bauru e região. Foi adotado o raio médio dos poços igual a 15 cm. Esse valor equivale à média dos raios no fundo dos poços do DAE utilizados nesta pesquisa. Todos os valores de cota (piezométrica, topográfica, topo e base dos aquíferos) são relativos ao nível do mar.

4.3.1 Poços

Os poços públicos, atualmente em operação (2015) e previstos de serem instalados até 2017, são apresentados no APÊNDICE A. A nomenclatura dos poços públicos adotada nesta pesquisa é a mesma utilizada pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE), em que os poços são representados pela sigla UP (Unidade de Produção). No total há 26 poços públicos do SAG em operação em janeiro de 2015. A partir desse mês, é prevista a instalação de mais 6 poços.

Os poços particulares atualmente em operação (estimativa para 2015) são apresentados no APÊNDICE A. A nomenclatura dos poços particulares nesta pesquisa foi representada por Unidade de Produção Particular (UPP). A partir das informações obtidas nos relatórios de

[3] Informação fornecida pelo Departamento de Água e Esgoto, em 2015.

perfuração e desativação de poços do DAEE Araraquara, foi estimado que existam 47 poços particulares em operação no início de 2015. A estimativa da perfuração de novos poços particulares não foi verificada nesta pesquisa devido, principalmente, às baixas vazões destes poços. As vazões outorgadas dos poços particulares são inferiores a 25 m³/h, com exceção dos dois poços do Frigorífero Mondelli, que extraem a vazão diária de aproximadamente 72 m³/h, conforme os seus relatórios de outorga (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Todos os poços do SAG com registro disponível e acessado para elaboração desta pesquisa são apresentados na Figura 13. Nela são indicados os poços em operação e aqueles previstos de serem instalados e operados pelo DAE. Além disso, são apresentados os poços particulares ativos até 2015, de acordo com os relatórios de perfuração e desativação de poços do DAEE Araraquara.

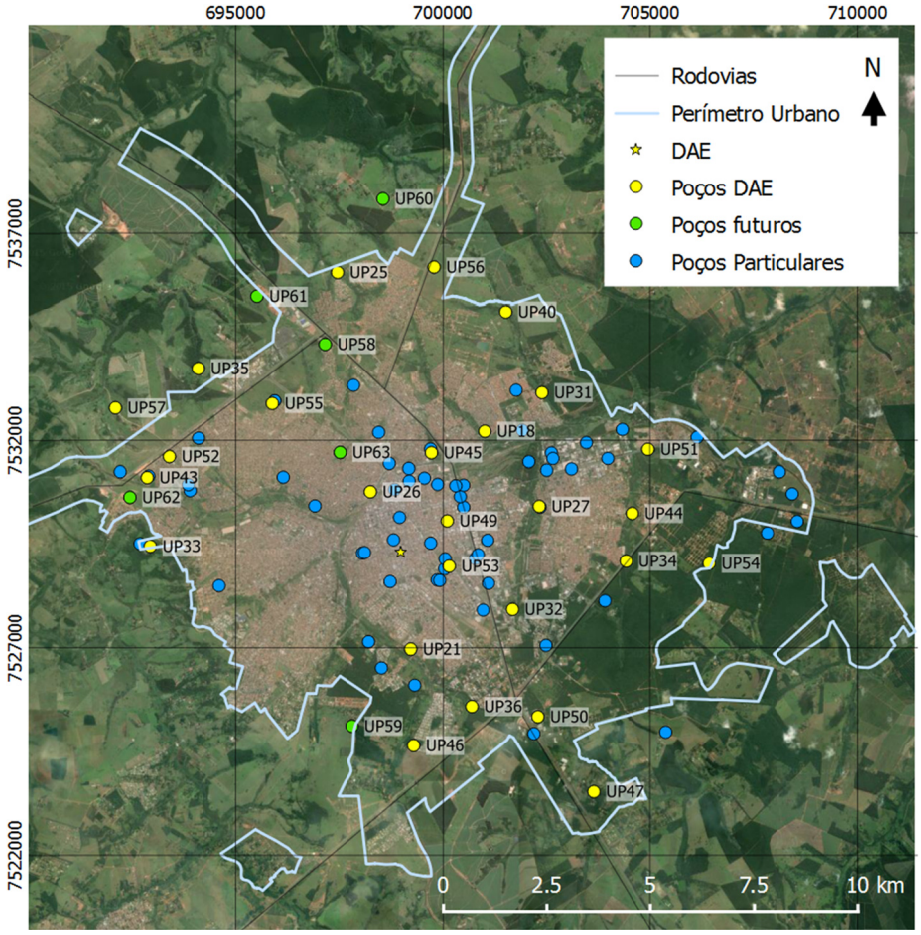


Figura 13 - Localização dos poços do SAG particulares e públicos, em operação e previstos de serem instalados pelo DAE a partir de 2015

4.3.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica foi estimada com base nos valores disponíveis de transmissividade e espessura dos relatórios dos poços do SAG na cidade de Bauru. A transmissividade foi obtida por testes de bombeamento realizados pelas empresas responsáveis pela perfuração de cada poço do DAE e do Frigorífico Mondelli.

A média aritmética das condutividades hidráulicas é igual a $1{,}3 \cdot 10^{-5}$ m/s. Sabe-se que a média aritmética não considera a representatividade espacial de K, contudo, este valor foi inicialmente utilizado para implementação do modelo sendo, posteriormente, alterado na etapa de calibração. A Tabela 7 apresenta os valores utilizados para estimativa inicial do valor de K e a Figura 14, os valores de transmissividade obtidos pelos testes de bombeamento.

Tabela 7 - Condutividade hidráulica estimada com base nos valores de transmissividade e espessura dos relatórios dos poços do SAG na cidade de Bauru

Poço	Espessura SAG (m)	Transmissividade (m²/d)	Condutividade hidráulica (m/s)
UP 42 Nova Esperança III	127	79	$7{,}2 \cdot 10^{-6}$
UP 43 Bauru XVI II	144	105	$8{,}5 \cdot 10^{-6}$
UP 45 Primavera II	234	394	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$
UP 50 Marabá II	250*	182	$8{,}4 \cdot 10^{-6}$
UP 53 Nações Unidas II	250*	403	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$
UP 55 Roosevelt III	250*	197	$9{,}1 \cdot 10^{-6}$
UP 56 Zona Norte (Nova Bauru)	338	530	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$
UP 57 Val de Palmas	202	15	$8{,}6 \cdot 10^{-7}$
UP 58 Jardim TV	250*	217	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
UPP 19 Frigorífico Mondelli I	250*	383	$1{,}8 \cdot 10^{-5}$
UPP 20 Frigorífico Mondelli II	250*	469	$2{,}2 \cdot 10^{-5}$
Média aritmética			$1{,}3 \cdot 10^{-5}$

*Espessura considerada para os poços que não perfuram o SAG até a base

Fonte: Relatórios de perfuração dos poços (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2015)

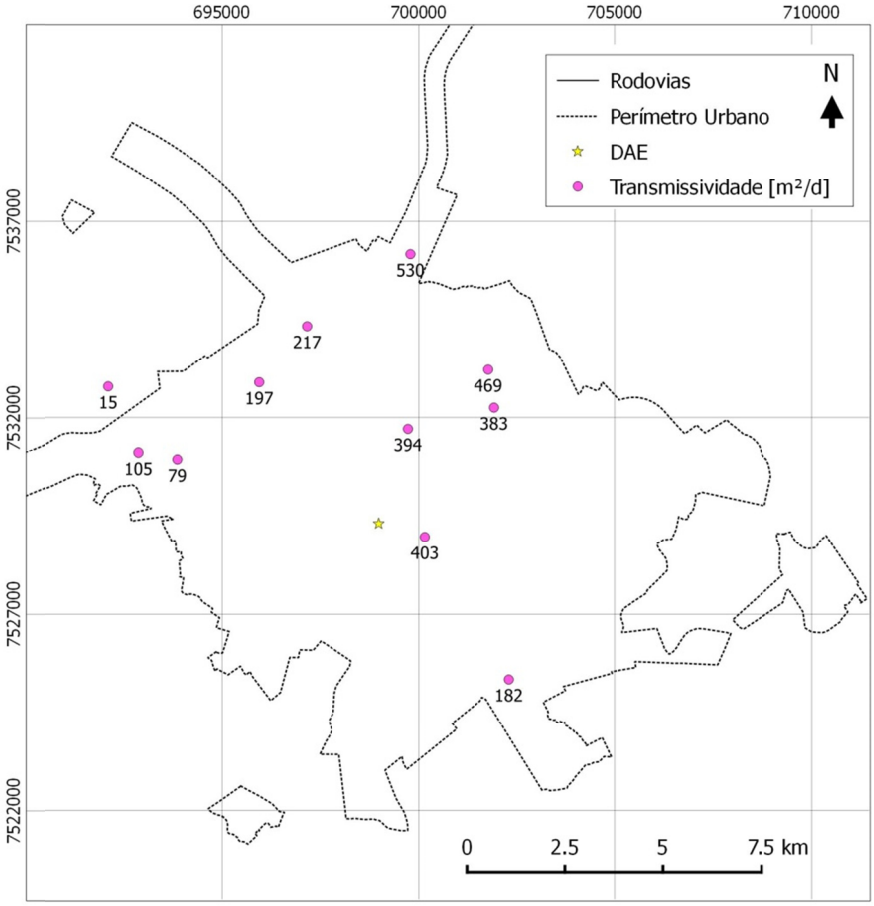


Figura 14 - Transmissividade nos poços utilizados para estimativa da condutividade hidráulica média do SAG na cidade de Bauru

Os valores de referência para K na Literatura são mostrados na Tabela 8. Valores similares foram também observados no Estado de São Paulo por Rebouças (1976) e Silva (1983).

Tabela 8 - Condutividade hidráulica do SAG no município de Bauru

Fontes	Condutividade hidráulica (m/s)
Paula e Silva e Cavaguti (1992)	$2{,}9.10^{-5}$ (média)
Waterloo Brasil (2001)	$1{,}5.10^{-6}$ a $4{,}0.10^{-5}$*

*Valores usados para o SAG após calibração do modelo de escoamento de água subterrânea de Bauru.

O Diagnóstico Hidrogeológico de Bauru (C3 CONSULTORIA, 2015) apresenta testes de bombeamento realizados em 2015 no poço UP 53 Nações Unidas e em outro poço a 5 m de distância do anterior. Os valores de condutividade hidráulica obtidos pelo método de Cooper e Jacob (1953) foram, respectivamente, $3{,}8 \cdot 10^{-5}$ e $2{,}9 \cdot 10^{-5}$ m/s.

A variação dos valores de condutividade hidráulica estimados com base nos relatórios dos poços do SAG em Bauru, comparados com os estudos já realizadas na cidade, são apresentados na Figura 15.

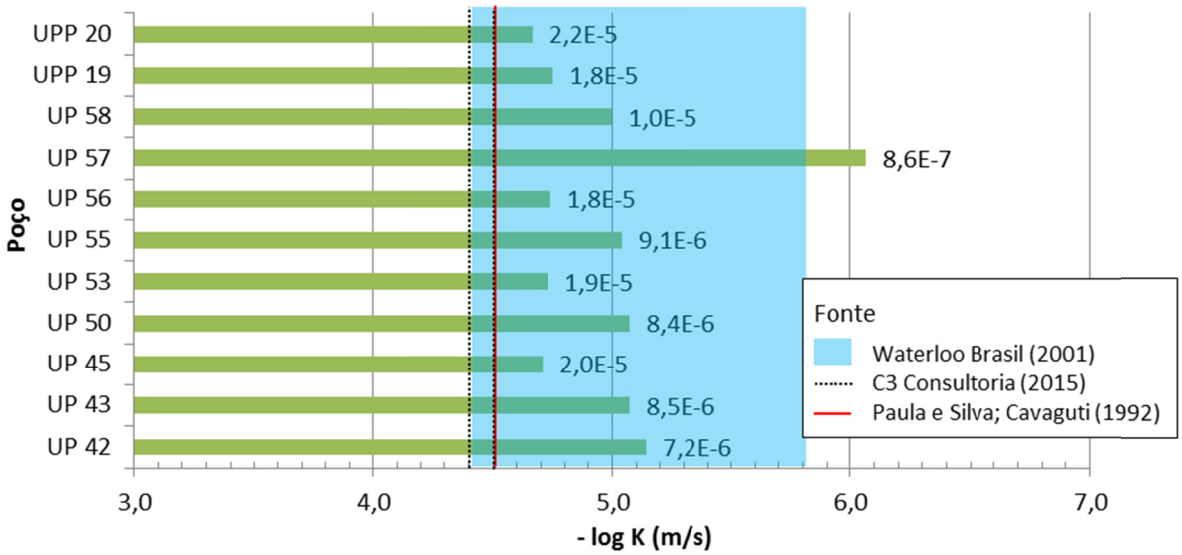


Figura 15 - Valores de condutividade hidráulica obtidos a partir dos testes de bombeamento dos poços do SAG e valores obtidos de estudos sobre a hidrogeologia na cidade de Bauru. Fonte: DAEE (2015)

4.3.3 Espessura do aquífero

Pelo perfil geológico dos poços, observa-se que a espessura do aquífero varia de 58 a 358 m (Figura 16). Os valores foram obtidos pela diferença entre a cota do topo da Formação Botucatu (ou Piramboia, onde não há Botucatu) e a cota da base da Formação Piramboia. Os poços que não perfuram a base da Formação Piramboia não são apresentados no mapa.

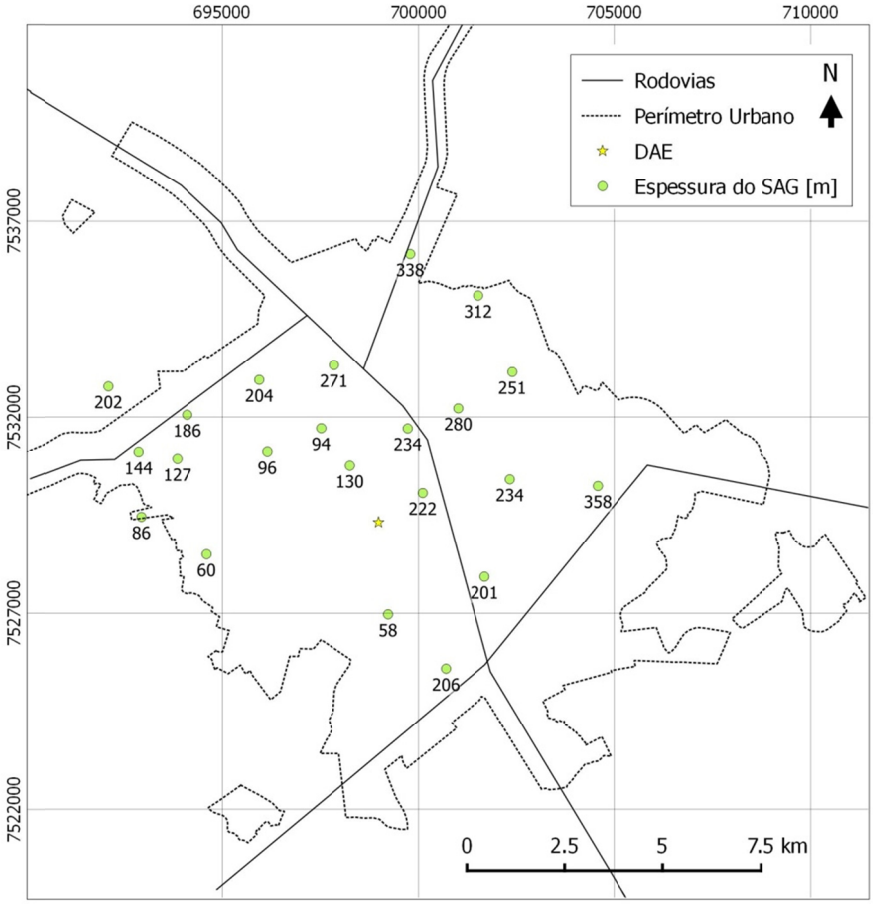


Figura 16 - Valores de espessura do SAG obtidos pelo perfil estratigráfico dos poços do DAE em Bauru

Observa-se que a espessura do aquífero atinge valores menores a sudoeste e maiores a nordeste. O mapa de espessura do SAG elaborado no Diagnóstico Hidrogeológico de Bauru (C3 CONSULTORIA, 2015) (Figura 8) apresenta a mesma distribuição espacial da espessura do Aquífero.

Para a modelagem do escoamento de água subterrânea na cidade de Bauru, o SAG foi idealizado como um aquífero horizontal e de espessura constante. O valor de espessura adotado foi de 250 m. Este valor também foi utilizado para a modelagem do Sistema Aquífero Guarani na cidade de Bauru em 2001 (WATERLOO BRASIL, 2001).

A espessura variável do SAG na área estudada foi considerada por meio de uma inomogeneidade a sudoeste. Logo, com base nos dados geológicos disponíveis, considerou-se que há uma inomogeneidade cilíndrica de raio igual a 7 km com centro no município de Piratininga e de espessura igual a 60 m. Essa região foi definida durante a etapa de calibração do modelo, sendo verificado que a inclusão da inomogeneidade reduz a diferença entre os valores simulados e os observados.

4.3.4 Base do aquífero

Para definição da cota da base do SAG na área estudada, foram analisados os perfis estratigráficos dos poços do SAG. Duas abordagens foram avaliadas:

I Estudo das cotas da base do SAG (base da Formação Piramboia);

II Estudo das cotas do topo do SAG (topo da Formação Botucatu ou Piramboia) subtraídas da espessura média do aquífero.

Poucos poços do SAG em Bauru possuem informações disponíveis sobre a base da Formação Piramboia: apenas 20, apresentados na Figura 17. Logo, foi adotada a abordagem II, uma vez que há 70 poços com informações disponíveis da cota do topo do SAG (Formação Botucatu ou Piramboia).

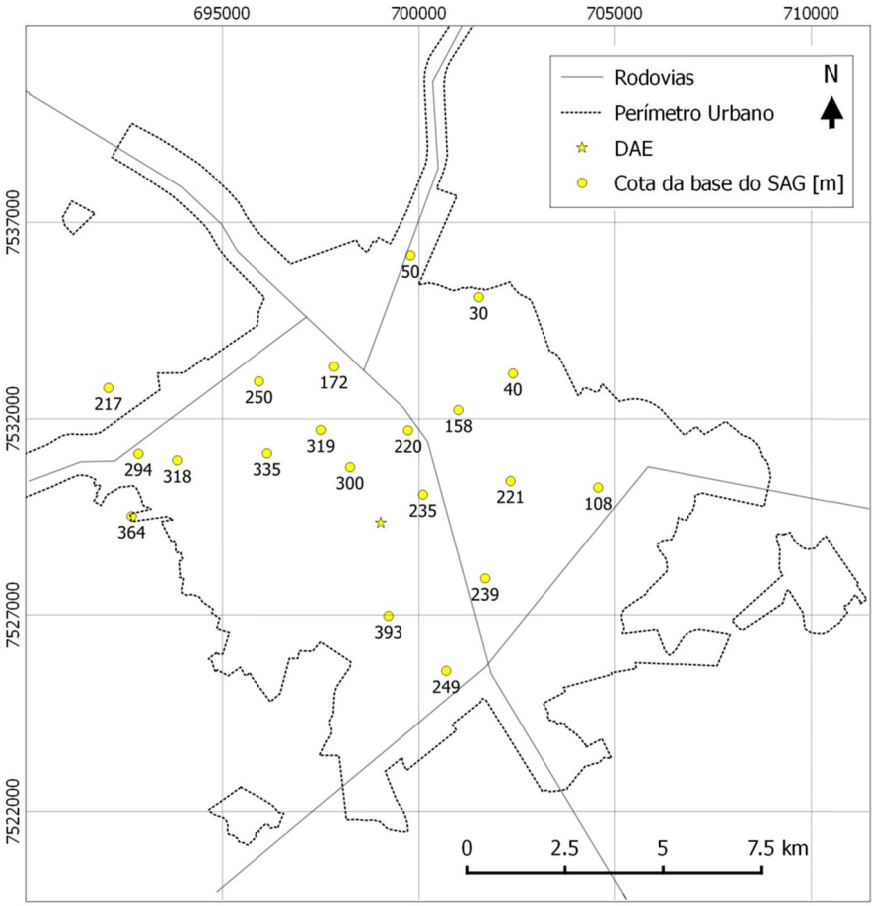


Figura 17 - Cotas da base da Formação Piramboia (acima do nível do mar) obtidas nos relatórios de perfuração de poços

A média das cotas obtidas do topo do SAG é igual a 428 m. Sendo a espessura definida em 250 m, a cota da base do aquífero utilizada no modelo foi de 180 m. Observa-se

na Figura 17 que a cota da base do aquífero não é constante, contudo, essa consideração é necessária para a aplicação do Método de Elementos Analíticos.

4.3.5 Vetor de descarga do escoamento uniforme

Uma vez que o regime de escoamento do SAG foi considerado confinado na área de estudo, conforme demonstrado no trabalho de C3 Consultoria (2015) e verificado no item 3.2.3, a única entrada de água no sistema é proveniente do escoamento regional. O escoamento de água subterrânea do Sistema Aquífero Guarani foi considerado uniforme.

O gradiente hidráulico do escoamento regional na área de estudo foi determinado a partir dos valores de nível estático (NE) dos primeiros poços perfurados na cidade (período de 1973 a 1985), como indicado na Tabela 9 e na Figura 18. Os níveis estáticos medidos no ano de perfuração dos poços fornecem a cota potenciométrica naquele ponto. Considerou-se que o NE na perfuração dos primeiros poços ainda não sofria interferência do bombeamento dos demais, sendo definido, apenas, pelo escoamento regional uniforme.

Tabela 9 - Poços utilizados para estimativa do gradiente potenciométrico sob escoamento uniforme do SAG na cidade de Bauru e seu entorno

Poço	**Coordenadas UTM**		**Ano de perfuração**	**Cota NE na perfuração (m)**
	m E	m N		
UPP 54 CPI 4	699.550	7.531.100	1973	481
UP 45 Primavera I	699.700	7.531.800	1975	461
UP 06 Consolação	696.904	7.530.431	1978	477
UP 09 Padilha	697.510	7.531.716	1979	481
UP 27 Cruzeiro do Sul I*	702.350	7.530.400	1979	490
UP 18 Beija-Flor (Sta Luzia)	701.011	7.532.226	1981	453
UP 16 Sta. Cecília	697.834	7.533.340	1981	460
UP 39 Roosevelt I	695.936	7.532.961	1981	464
UP 20 Vânia Maria	696.143	7.531.124	1982	449
UP 42 Nova Esperança I	693.900	7.530.800	1982	454
UP 21 Jd. América	699.218	7.526.970	1982	459
UP 24 Parque Real I	692.689	7.529.517	1984	463
UP 25 Gasparini	697.447	7.536.036	1985	457

* Outlier

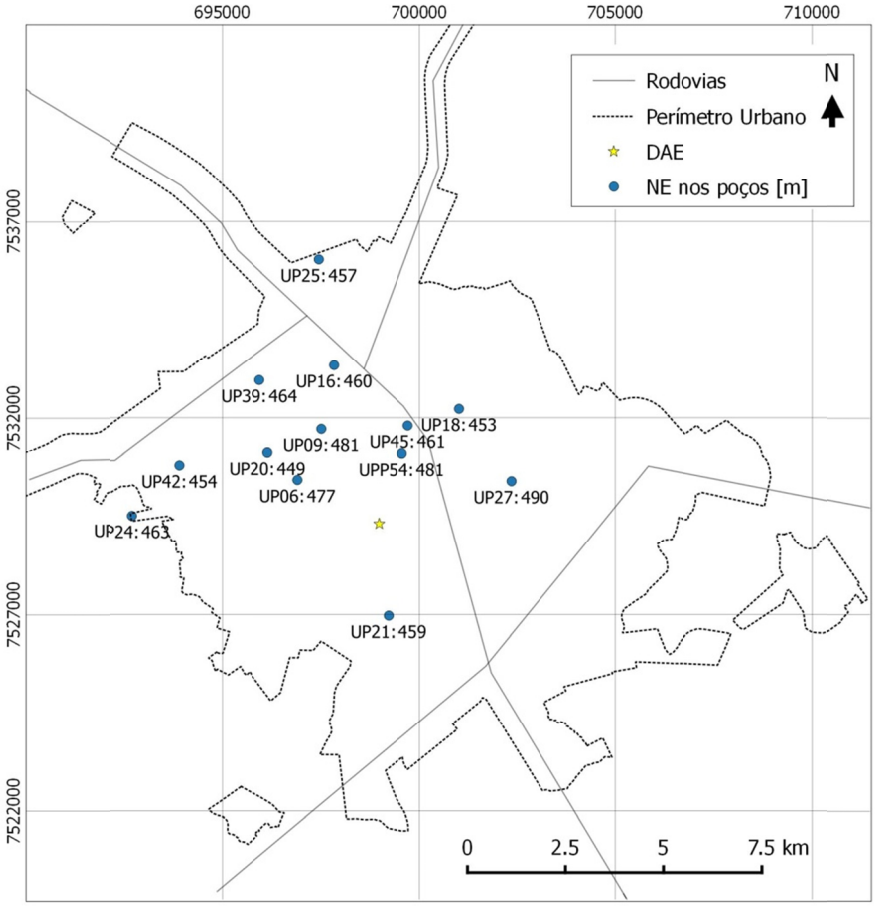


Figura 18 - Nível estático dos primeiros poços do SAG perfurados na cidade de Bauru de 1973 a 1985

Após 1985, foi considerado que o bombeamento dos poços ocorre de forma intensa o suficiente para haver interferência, ou seja, o bombeamento de um poço pode ser responsável pela redução das cotas piezométricas nos demais. Isso significa que os níveis estáticos observados nos poços perfurados após 1985 não representam a superfície potenciométrica inicial do aquífero.

A partir das cotas do NE na instalação dos poços perfurados no período de 1973 a 1985 e suas respectivas coordenadas, foi definida a equação de um plano por ajuste polinomial. Este plano representa aproximadamente a superfície potenciométrica inicial do aquífero (sem a interferência dos poços). A equação do plano é definida por:

$$f(x, y) = Ax - By + C \tag{6}$$

em que $f(x, y)$ equivale à cota piezométrica (m) no ponto de coordenadas (x, y), em que x e y são as coordenadas nas direções leste (m) e norte (m), respectivamente. A e B são coeficientes angulares e C é o coeficiente linear do plano.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE - *Root Mean Square Error*) foi calculado por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\phi_{calc}-\phi_{obs})_i^{\,2}}{n}} \tag{7}$$

em que n é o número total de poços em que foram obtidos os valores observados, i o índice referente a cada poço, ϕ_{calc} é a cota potenciométrica calculada para o poço pela Equação 6 e ϕ_{obs} é a cota potenciométrica observada no poço (nível estático).

Os coeficientes angulares representam os gradientes hidráulicos nas direções x e y, como representado nas seguintes equações:

$$A = \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{8}$$

$$B = \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} = \frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{9}$$

A partir dos gradientes, calcula-se a descarga do escoamento uniforme nas direções x (Q_{x0}) e y (Q_{y0}) e na direção do escoamento regional (Q_0), em m²/s

$$Q_{x0} = -KH\frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{10}$$

$$Q_{y0} = -KH\frac{\partial \phi}{\partial y} \tag{11}$$

$$Q_0 = \sqrt{{Q_{x0}}^2 + {Q_{y0}}^2} \tag{12}$$

em que K é a condutividade hidráulica (m/s) e H é espessura do SAG (m). A direção do escoamento α (rad) pode ser calculada pela equação:

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{Q_{y0}}{Q_{x0}}\right) \tag{13}$$

4.3.6 Carga hidráulica do ponto de referência

Para obter uma solução única do problema de escoamento (uniforme com poços e inomogeneidade) pelo MEA é necessário um valor de carga hidráulica (ϕ_0) conhecido e constante, num ponto de coordenadas x_0 e y_0, chamado de ponto de referência. A carga hidráulica no ponto de referência é utilizada para a determinação do valor da constante nas equações governantes.

O ponto de referência deve ser suficientemente distante dos poços para que não sofra influência considerável do bombeamento e, portanto, mantém a mesma carga hidráulica observada em seu estado inicial. Uma vez que o escoamento do SAG na área de estudo é influenciado pelo bombeamento dos poços, foi definida uma localização em um ponto de referência hipotético, a 28 km da área de estudo, onde o nível piezométrico não é influenciado pela explotação de água do aquífero na cidade de Bauru.

Para o cálculo da carga hidráulica no ponto de referência seguiu-se as seguintes etapas:

I adotar um ponto de referência inicial com carga hidráulica conhecida que represente o estado inicial do aquífero;
II simular o escoamento do SAG sem a explotação de água por poços pelo MEA;
III calcular a carga hidráulica no ponto de referência escolhido (hipotético).

A carga hidráulica no ponto de referência foi calculada pela simulação do escoamento do SAG considerando o poço Primavera I como ponto de referência inicial. Esse poço foi escolhido porque é um dos primeiros poços do Sistema Aquífero Guarani com registro disponível (perfurado em 1975). Consequentemente, a carga hidráulica na data de sua instalação representa o NE do SAG naquele ponto sem a interferência de outros poços, ou seja, em seu estado inicial.

O ponto de referência localiza-se a sudeste da área urbana de Bauru, coordenadas 732.000 m E, 754.0000 m N, próximo ao como representado na Figura 19.

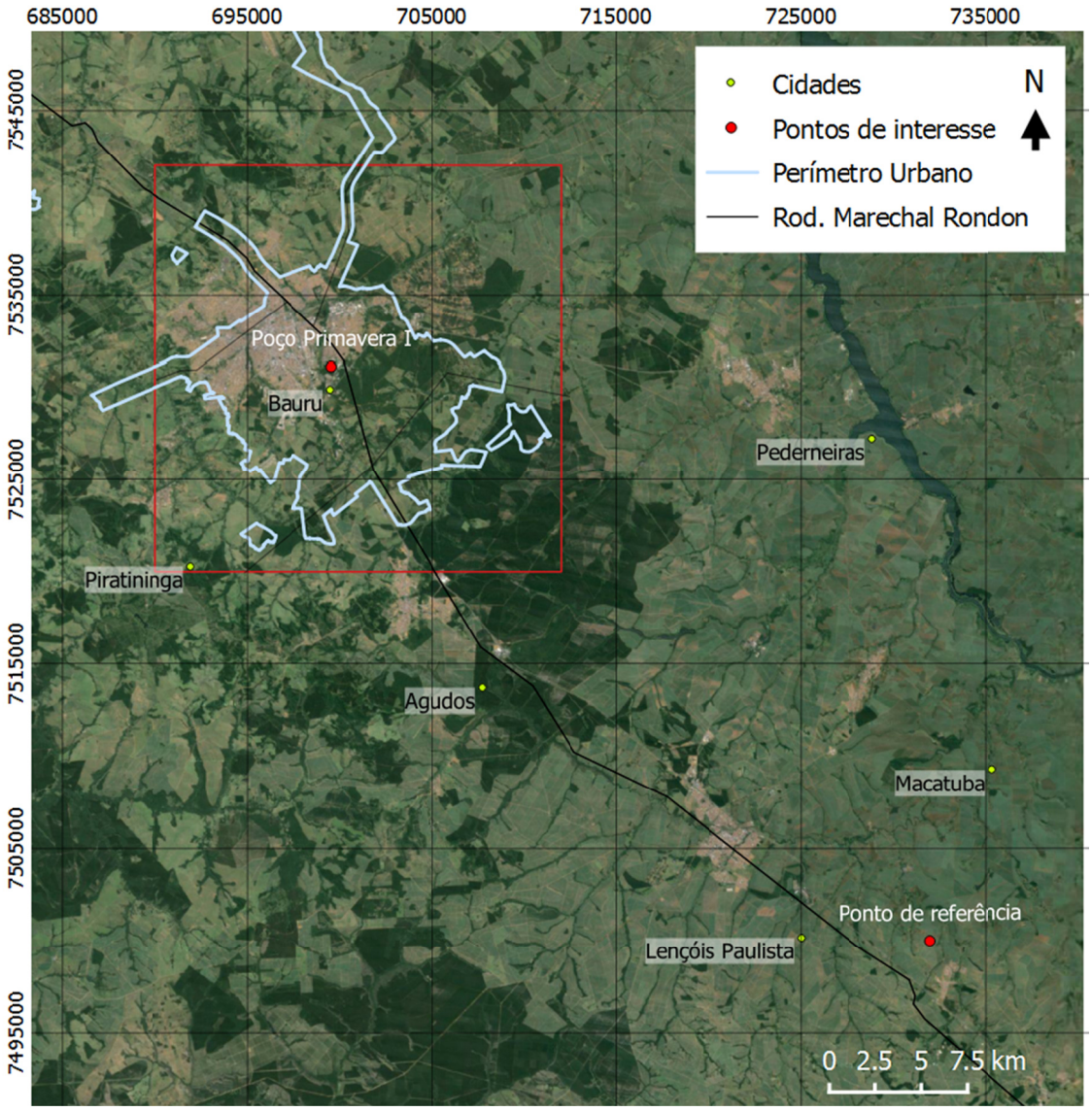


Figura 19 - Localização do ponto de referência de carga hidráulica constante, próximo à cidade de Lençóis Paulista

4.4 Método de Elementos Analíticos

Neste item, são apresentados os principais conceitos e aplicações do Método de Elementos Analíticos.

4.4.1 Definição e características do MEA

O Método de Elementos Analíticos (*Analytic Element Method*) foi desenvolvido por Otto Strack e é apresentado em seus livros "Groundwater Mechanics" e "Applied Groundwater Mechanics" (STRACK, 1989, 2015). O MEA é um método computacional baseado na superposição de expressões analíticas (STRACK, 2003) e foi desenvolvido para

resolver problemas de escoamento de água subterrânea tanto em escala local quanto regional (STRACK; HAITJEMA, 1981).

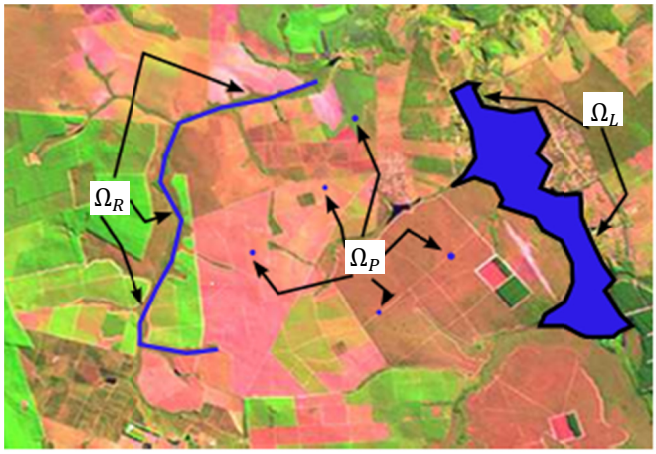
Em problemas de escoamento em aquíferos, o MEA superpõe soluções exatas e aproximadas para diferentes problemas hidrogeológicos elementares (BATISTA; WENDLAND; SCHULZ, 2007), definidos por Strack (2014) como elementos analíticos. Cada elemento analítico é usado para descrever uma característica do escoamento de água subterrânea (DE LANGE, 1996). Alguns desses elementos são escoamento regional, poços, canais, rios, áreas de recarga e inomogeneidades.

Os elementos analíticos são definidos como soluções analíticas da equação bidimensional de Laplace (ou de Poisson, caso haja recarga do aquífero), expressa em termos do potencial de descarga e da função de corrente. Os elementos analíticos são então superpostos, satisfazendo as condições de contorno para a modelagem do escoamento de águas subterrâneas.

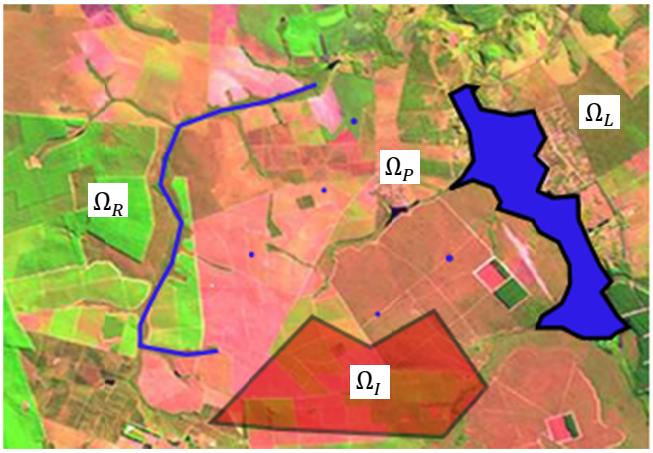
A superposição computacional de elementos analíticos tem se demonstrado eficiente na modelagem de problemas bidimensionais (ALENCAR; WENDLAND, 2013; BATISTA; WENDLAND; SCHULZ, 2007), permitindo a representação gráfica dos fenômenos que ocorrem no escoamento de águas subterrâneas. Além disso, possibilita a investigação científica apurada e focada na física dos fenômenos de escoamento subterrâneo (ALENCAR; WENDLAND, 2013).

A Figura 20 apresenta um exemplo da aplicação do MEA por meio da superposição dos elementos analíticos, em que o símbolo Ω representa o potencial de descarga complexo gerado por cada elemento hidrogeológico considerado na modelagem. O domínio hidrogeológico apresentado no quadrante esquerdo superior da Figura 20 é representado computacionalmente pelos elementos indicados no quadrante direito inferior, os quais representam os principais condicionantes que controlam o escoamento subterrâneo nesse caso.

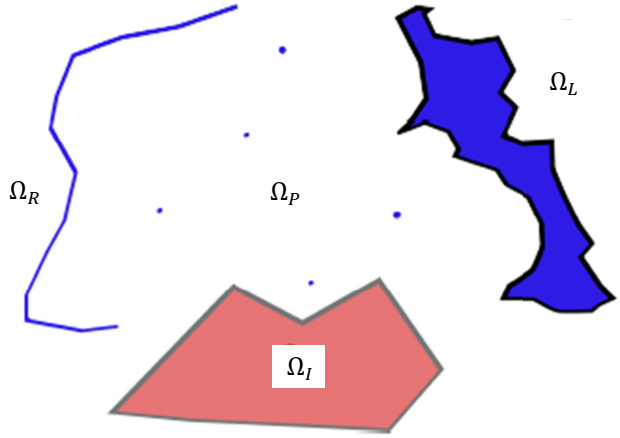
Foto aérea da bacia do Ribeirão da Onça



Elementos analíticos para rio (Ω_R), poços (Ω_P) e lago (Ω_L)



Inclusão de uma inomogeneidade de condutividade hidráulica poligonal (Ω_I)



Elementos analíticos usados para representar o domínio estudado

Figura 20 - Exemplo de aplicação do MEA pela sobreposição dos elementos analíticos representados por Ω.
Fonte: Marin (2011)

Nesta pesquisa não são utilizados elementos lineares (polígonos e polilinhas). Os elementos utilizados (poços e fluxo uniforme) têm soluções exatas e o potencial gerado pela inomogeneidade cilíndrica será aproximado por uma expansão em série de potências.

4.4.2 Escoamento potencial

Para aplicação do método de elementos analíticos, Strack (2014) assume que o escoamento de água subterrânea satisfaz a lei de Darcy e que a condutividade hidráulica é homogênea em toda a área de estudo, com exceção de inomogeneidades localizadas. É adotada a aproximação de Dupuit-Forchheimer, em que o escoamento é predominantemente horizontal. Isso é válido para aquíferos regionais, pois sua espessura é geralmente pequena comparada com sua extensão (DE LANGE, 1996). Outra interpretação para essa aproximação é de que a resistência ao escoamento na direção vertical pode ser negligenciada (STRACK, 2015).

No sistema de coordenadas x, y no plano horizontal (escoamento bidimensional isotrópico) as descargas específicas nas direções x e y configuram o escoamento irrotacional, sendo descritas como:

$$q_x = -K\frac{\partial\phi}{\partial x} \tag{14}$$

$$q_y = -K\frac{\partial\phi}{\partial y} \tag{15}$$

em que K é a condutividade hidráulica (L/T) e ϕ é a carga hidráulica no aquífero (L).

O balanço de massa, em que o escoamento vertical por unidade de área é nulo (não há recarga ou descarga), pode ser descrito por:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = 0 \tag{16}$$

em que Q_x e Q_y são descargas por unidade de largura (L^3/L.T) nas direções x e y, respectivamente. A descarga unitária pode ser descrita como o produto da descarga específica pela espessura saturada h:

$$Q_x = q_x h \tag{17}$$

$$Q_y = q_y h \tag{18}$$

A espessura saturada do aquífero h é igual à espessura H do aquífero (L) no caso de escoamento confinado (Figura 21, lado esquerdo):

$$h = H \tag{19}$$

No caso de escoamento livre, a espessura saturada é variável e igual à cota da carga hidráulica menos o nível de referência (base do aquífero) (Figura 21, lado direito):

$$h = \phi - b \tag{20}$$

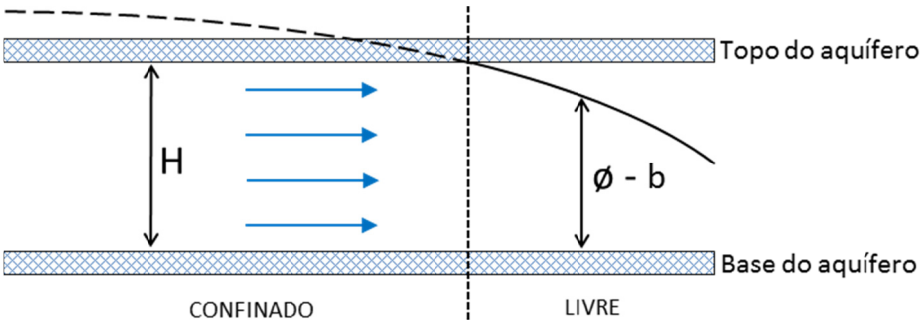


Figura 21 - Esquema das condições de escoamento confinado e livre

No caso de um aquífero confinado, o potencial de descarga é definido como:

$$\Phi = KH(\phi - b) + C_C \tag{21}$$

No caso de um aquífero livre:

$$\Phi = \frac{1}{2}K(\phi - b)^2 + C_U \tag{22}$$

As constantes C_C e C_U podem ser usadas para satisfazer a condição de continuidade da carga hidráulica ϕ na fronteira entre o escoamento confinado e livre ($\Phi_C = \Phi_U$). Adotando $C_U = 0$ (STRACK, 2015), o potencial de descarga pode ser definido em função da carga hidráulica para aquíferos confinados e semi-confinados ($\phi - b \geq H$) e para aquíferos livres ($\phi - b < H$) (STRACK, 2003):

$$\Phi = KH(\phi - b) - \frac{1}{2}KH^2; \quad \phi - b \geq H \tag{23}$$

$$\Phi = \frac{1}{2}K(\phi - b)^2; \quad \phi - b < H \tag{24}$$

Em regiões onde o aquífero é confinado, o potencial é maior que $\frac{1}{2}KH^2$, enquanto que, onde o aquífero é livre, o potencial é menor do que $\frac{1}{2}KH^2$ (HAITJEMA, 1995). Pelas Equações 23 e 24 obtemos a cota da carga hidráulica em condições de aquífero livre ou confinado:

$$\phi = \frac{\Phi + \frac{1}{2}KH^2}{KH} + b; \quad \Phi \geq \frac{1}{2}KH^2 \tag{25}$$

$$\phi = \sqrt{\frac{2\Phi}{K}} + b; \quad \Phi \leq \frac{1}{2}KH^2 \tag{26}$$

Portanto, as descargas unitárias nas direções *x* e *y* podem ser representadas por:

$$Q_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} \tag{27}$$

$$Q_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y} \tag{28}$$

em que Φ é o potencial de descarga (L^3/T). O potencial de descarga é a variável chave para o MEA, sendo todos os elementos analíticos desenvolvidos em termos deste potencial (DE LANGE, 1996).

Substituindo as Equações 27 e 28 em 16, tem-se a equação de Laplace em termos do potencial de descarga:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2}=0 \tag{29}$$

ou

$$\nabla^2\Phi=0 \tag{30}$$

Sendo esta uma equação diferencial linear, as soluções para o potencial de descarga podem ser adicionadas e subtraídas para derivar novas soluções (Princípio da Superposição).

Cada elemento analítico é uma solução da equação de Laplace e é descrito em termos do potencial de descarga, seja o escoamento confinado ou livre (DE LANGE, 1996). Uma vez que Φ foi calculado e os valores de K e H são conhecidos, a carga hidráulica pode ser obtida pelas Equações 25 e 26.

Elementos analíticos correspondem a campos contínuos tanto do potencial de descarga Φ, quanto da função de corrente Ψ (L^3/T), nos casos livres de recarga ou descarga (não divergentes). Assim como a equação de Laplace para Φ, a equação diferencial em termos da função de corrente é:

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}=0 \tag{31}$$

Em escoamentos irrotacionais e não divergentes, tem-se o escoamento harmônico, em que o potencial e a função de corrente são relacionadas pelas condições de Cauchy-Riemann (STRACK, 2015):

$$\frac{\partial\Psi}{\partial x}=-\frac{\partial\Phi}{\partial y} \tag{32}$$

$$\frac{\partial\Psi}{\partial y}=\frac{\partial\Phi}{\partial x} \tag{33}$$

De acordo com estas condições, as linhas de corrente são ortogonais às linhas equipotenciais.

Adotando o escoamento de água subterrânea em espaço bidimensional, os elementos analíticos podem ser formulados no plano complexo (DE LANGE, 1996), em que um ponto qualquer é definido por uma variável complexa z, com o conjugado definido por $\bar{z}$:

$$z=x+iy\,;\quad \bar{z}=x-iy;\quad i=\sqrt{-1} \tag{34}$$

O potencial de descarga e a função de corrente podem ser combinados em um único potencial complexo $\Omega(z)$:

$$\Omega(z) = \Phi(z) + \Psi(z)i \tag{35}$$

A função analítica da Equação 35 descreve o modelo de escoamento bidimensional para um fluido incompressível em que Ω (L^3/T) é o potencial complexo. A parte real Φ representa o potencial de descarga e a parte imaginária Ψ, a função de corrente.

Analogamente à definição das descargas nas direções *x* e *y*, que são iguais ao negativo da derivada do potencial de descarga (Equações 27 e 28), o vetor de descarga complexo W é definido como o negativo da derivada do potencial complexo Ω:

$$W = -\frac{\partial \Omega}{\partial z} \tag{36}$$

Esta equação tem suas componentes reais e imaginárias iguais aos componentes do vetor de descarga:

$$W = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} + i\frac{\partial \Phi}{\partial y} = Q_x - iQ_y \tag{37}$$

A superposição dos potenciais complexos para todos os elementos analíticos resulta em uma solução completa em função da variável z (DE LANGE, 1996). Consequentemente, os valores de Φ e Ψ podem ser calculados em qualquer ponto do domínio.

4.4.3 Pesquisas anteriores sobre MEA no Brasil

A aplicação do MEA para elaboração de modelos de escoamento de água em aquíferos foi aplicado no Brasil por:

- Gomes e Castro (2002), para comparar modelos de aquíferos regionais elaborados pelo MEA e pelo MDF. Nesse estudo, foi necessário menos tempo para entrada dos dados usando o MEA do que o MDF, sendo verificado que, usando o MEA, a carga hidráulica pode ser visualizada em qualquer ponto do aquífero, sem a necessidade de interpolação;
- Batista, Penner e Schulz (2004), para simular três técnicas de controle hidráulico para a contenção do avanço de uma possível pluma formada por substâncias poluentes;
- Gomes e Castro (2005), para analisar a eficiência do MEA em representar o escoamento no aquífero da região do Cariri, Ceará. Foi verificado que esse método permite a variação da escala em detalhes, sendo sua aplicação interessante para análises regionais e locais do escoamento, sem prejuízo da precisão dos resultados do modelo;

- Batista (2006), que estende a aplicação do MEA para a modelagem de escoamento em aquíferos longos. Além disso, Batista (2006) descreve o escoamento subterrâneo da região do Sistema Lacustre Bonfim e introduz novos subsídios ao entendimento da hidrodinâmica da área de estudo.
- Batista, Wendland e Schulz (2007), para avaliar a interação entre águas subterrâneas e superficiais no aquífero Barreiras, no Rio Grande do Norte (RN), e demonstrar a funcionalidade do MEA em aquíferos estreitos. Observou-se que o MEA foi adequado para representar o escoamento no aquífero, com exceção das proximidades das fronteiras do sistema, onde só foi possível realizar uma análise grosseira. Além disso, foi possível estimar a taxa de recarga na região e o efeito do bombeamento sobre a lagoa do Bonfim, RN.

Ainda no Brasil, Alencar Neto (2008) implementou a descontinuidade do potencial complexo ao longo de elementos lineares de ordem n do binômio de Newton. Alencar Neto (2008) também implementou o MEA utilizando um SIG e a técnica de programação orientada a objetos. Mais recentemente, Marin (2011) desenvolveu o elemento analítico para um sistema de fraturas, desenvolvendo um método matricial usando elementos para métodos iterativos.

4.5 Descrição dos elementos analíticos

Neste item são apresentados os elementos analíticos considerados nesta pesquisa. Os potenciais complexos dos elementos são descritos em função da variável complexa z. Esta variável também pode ser escrita em coordenadas polares (STRACK, 2015):

$$z = x + iy = re^{i\theta} \tag{38}$$

em que θ é o ângulo (rad) indicado na Figura 22 e

$$e^{i\theta} = cos\theta + isen\theta \tag{39}$$

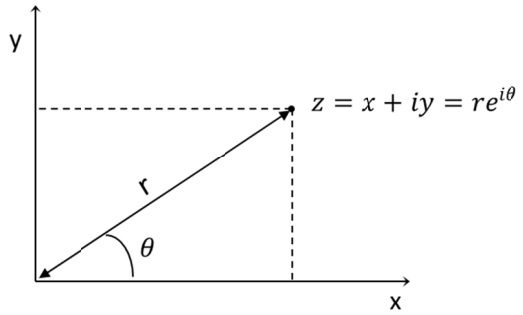


Figura 22 - Representação de um ponto em um plano complexo

A utilização dos elementos analíticos em equações na forma de potencial complexo permite que as soluções para os potenciais e as funções de corrente sejam calculadas simultaneamente, reduzindo o esforço computacional.

Uma vez conhecida a descarga unitária do escoamento uniforme Q_0 (L^2/T) e sua orientação com relação ao eixo das abscissas α (Figura 23), o vetor de descarga complexo do escoamento uniforme pode ser representado por:

$$W_0 = Q_{x0} - iQ_{y0} = Q_0 e^{-i\alpha} \tag{40}$$

sendo,

$$Q_0 = \sqrt{{Q_{x0}}^2 + {Q_{y0}}^2} \tag{41}$$

$$tg(\alpha) = \frac{Q_{y0}}{Q_{x0}} \tag{42}$$

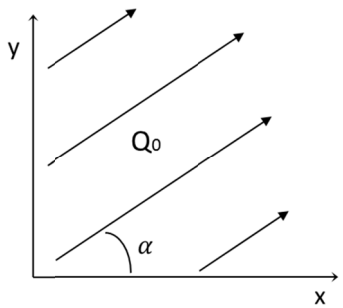


Figura 23 - Escoamento uniforme orientado no plano bidimensional com ângulo α em relação à direção x

O potencial complexo para o escoamento uniforme pode ser obtido pela integral da equação 36 e pela equação 40, resultando em:

$$\Omega = -W_0 z = -Q_0\, z e^{-i\alpha} \tag{43}$$

O potencial complexo de um poço localizado na origem do sistema de coordenadas é representado por (STRACK, 2015):

$$\Omega = \frac{Q}{2\pi}\ln(\mathrm{z}) = \frac{Q}{2\pi}\ln\left(\mathrm{r}e^{i\theta}\right) = \frac{Q}{2\pi}[\ln(\mathrm{r}) + i\theta] \tag{44}$$

em que Q é a vazão do poço (L^3/T), e z é a variável complexa (L). A parte real (potencial de descarga) e a parte imaginária (função de corrente) do potencial complexo para o poço são (STRACK, 2015):

$$\Phi = \frac{Q}{2\pi}\ln(\mathrm{r}) \tag{45}$$

$$\Psi = \frac{Q}{2\pi}\theta \tag{46}$$

A partir de valores de Φ e Ψ, determinam-se os equipotenciais e as linhas de corrente para um poço em um aquífero de extensões infinitas (Figura 24).

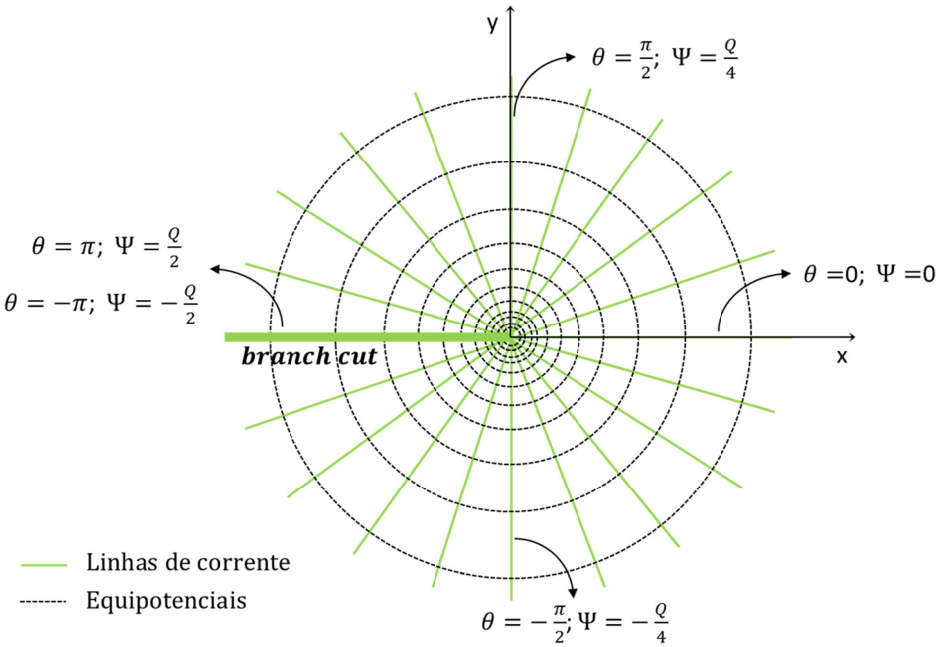


Figura 24 - Equipotenciais e linhas de corrente para um poço localizado na origem do sistema de coordenadas (modificado de Fitts (2002))

Alguns valores de Ψ e θ são apresentados próximos às respectivas linhas de corrente, obtidas pela Equação 46. Observa-se que o valor de Ψ é descontínuo na direção negativa do eixo das abscissas: ao se adotar $\theta = \pi$, obtém-se $\Psi = \frac{Q}{2}$, ao se adotar $\theta = -\pi$, obtém-se $\Psi = -\frac{Q}{2}$. A linha em que a função de corrente é descontínua (direção negativa do eixo x) é chamada de *branch cut* (STRACK, 2015) ou ramo de função. Isso ocorre porque o poço extrai água do sistema e, consequentemente, não há a continuidade do escoamento. De fato, o salto de Ψ no *branch cut*, $\Psi(-\pi) - \Psi(\pi) = -Q$, indica, matematicamente, o incremento de vazão $(-Q)$ necessário para satisfazer a condição de continuidade do sistema de escoamento. Strack (2014) compara o *branch cut* a um canal fictício que veicula água do poço para o infinito. Entretanto, o *branch cut* é um ente matematicamente correto que não tem significado físico.

O potencial complexo de um poço localizado no ponto z_w do sistema de coordenadas é representado por:

$$\Omega = \frac{Q}{2\pi}\ln(z - z_w)\,; \quad z_w = x_w + iy_w \tag{47}$$

em que x_w é a coordenada do poço no eixo das abscissas e y_w, no eixo das ordenadas.

O potencial complexo da inomogeneidade descreve o comportamento do escoamento em regiões de condutividade hidráulica diferente daquela considerada como homogênea para o sistema de escoamento.

As condutividades hidráulicas dentro e fora da inomogeneidade são representadas por K^+ e K, respectivamente. O centro da inomogeneidade é representado por z_C (Figura 25).

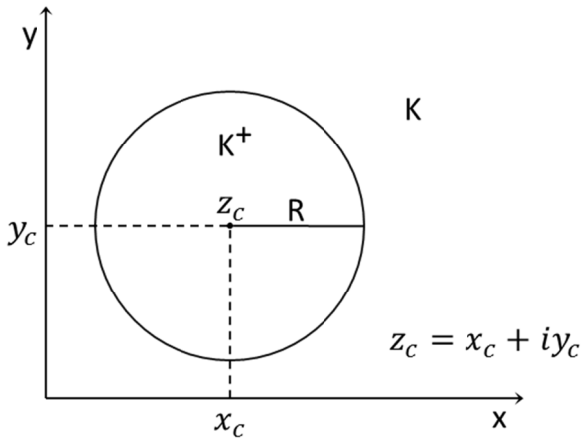


Figura 25 - Representação de uma inomogeneidade cilíndrica de raio R e condutividade hidráulica K^+ em um plano complexo

A condição:

$$(z - z_c)\overline{(z - z_c)} > R^2 \tag{48}$$

indica que o ponto z analisado situa-se fora da inomogeneidade. A condição:

$$(z - z_c)\overline{(z - z_c)} < R^2 \tag{49}$$

indica que o ponto z analisado situa-se dentro da inomogeneidade, em que z é a variável complexa que indica a posição em que é calculado o potencial complexo Ω.

Para simplificar a implementação matemática do modelo conceitual (Figura 12), a inomogeneidade de espessura $H^+ < H$ foi representada como uma inomogeneidade de condutividade $K^+ < K$, uma vez que a transmissividade $T^+ < K \cdot H^+ = K^+ \cdot H$ não se altera.

A Figura 26 ilustra as características do SAG adotadas no modelo conceitual e analítico, sendo H a espessura; K a condutividade hidráulica do aquífero; T a transmissividade; H^+ a espessura dentro da inomogeneidade (adotada no modelo conceitual); K^+ a condutividade hidráulica dentro da inomogeneidade (adotada no modelo analítico).

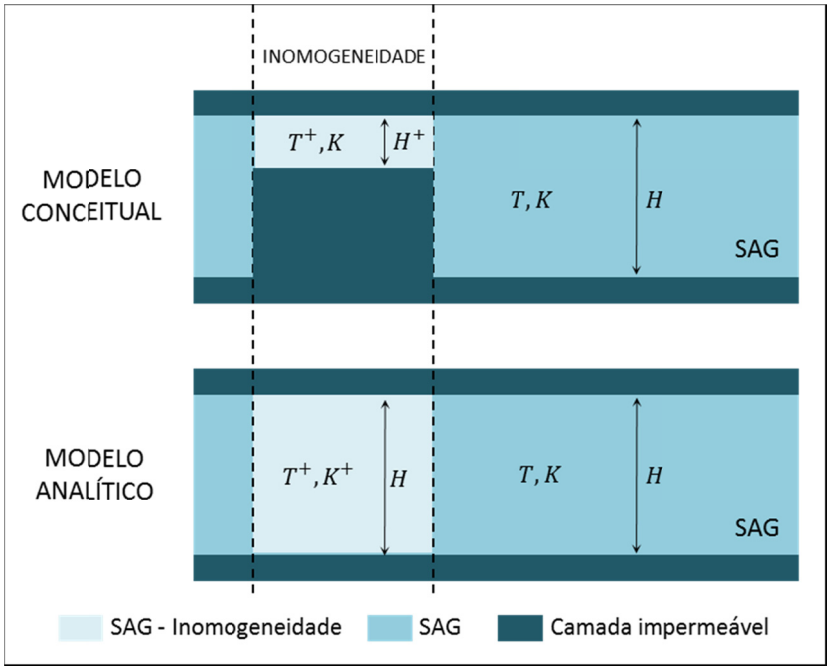


Figura 26 - Representação das inomogeneidade do SAG no modelo conceitual e no modelo analítico

Assim, a condutividade hidráulica dentro da inomogeneidade adotada no modelo analítico resulta em:

$$K^+ = \frac{H^+ \cdot K}{H} \tag{50}$$

$$K^+ = \frac{60 \cdot K}{250} \tag{51}$$

Nesta pesquisa, utilizou-se a solução aproximada para escoamento bidimensional através de uma inomogeneidade desenvolvida por Barnes e Janković (1999). Esta solução satisfaz a equação de Laplace. O sistema de coordenadas local é definido por (BARNES; JANKOVIĆ, 1999):

$$Z = \frac{z - z_c}{R} \tag{52}$$

em que z é o ponto de interesse e $Z = X + iY$ é a mesma localização em coordenadas locais. A fronteira (contorno) da inomogeneidade pode ser escrita por:

$$Z = e^{i\theta}; \quad 0 \leq \theta < 2\pi \tag{53}$$

O potencial complexo gerado pela inomogeneidade pode ser aproximado por uma série de potências:

$$\Omega_c(Z) = \Phi_c(Z) + \Psi_c(Z)i = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\infty} a_n Z^n; \quad |Z| < 1\,, dentro\ da\ inomogeneidade \\ -\sum_{n=1}^{\infty} \bar{a}_n Z^{-n}; \quad |Z| \geq 1\,, fora\ da\ inomogeneidade \end{cases} \tag{54}$$

em que a_0 é real e os demais coeficientes da expansão a_n são complexos. O potencial complexo para todos os demais elementos, com exceção da inomogeneidade, é definido por (BARNES; JANKOVIĆ, 1999):

$$\Omega_{\neq c}(Z) = \Phi_{\neq c}(Z) + \Psi_{\neq c}(Z)i \tag{55}$$

Consequentemente, tem-se:

$$\Omega(\mathrm{Z}) = \Omega_c(Z) + \Omega_{\neq c}(Z) \tag{56}$$

Assume-se que $\Omega_{\neq c}(Z)$ é contínuo através da inomogeneidade, ou seja, os demais elementos não interceptam a inomogeneidade circular (BARNES; JANKOVIĆ, 1999). A função $\Psi_c(Z)$ (Equação 54) é contínua através da inomogeneidade. A soma infinita da equação 54 escrita de forma truncada, mantendo-se a continuidade de $\Psi_c(Z)$, resulta em (BARNES; JANKOVIĆ, 1999):

$$\Omega_c(Z) = \Phi_c(Z) + \Psi_c(Z)i = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} a_n Z^n; \quad |Z| < 1 \\ -\sum_{n=1}^{N-1} \bar{a}_n Z^{-n}; \quad |Z| \geq 1 \end{cases} \tag{57}$$

em que $2N - 1$ indica o número de graus de liberdade (incógnitas) dos coeficientes a_n. Para o cálculo dos coeficientes, Barnes e Janković (1999) usam o método dos mínimos quadrados. São selecionados M pontos de controle na fronteira da inomogeneidade circular, sendo:

$$Z_m = e^{i\theta_m}; \quad m = 0,1, \dots, M-1 \tag{58}$$

em que θ_m são frequências de Fourier dadas por $\theta_m = 2\pi m/M$. Embora Strack (1989) tenha usado $M = 2N - 1$, Barnes e Janković (1999) recomendam o uso de M maiores do que esse. As equações para obtenção dos coeficientes da série a_n são representadas por (BARNES; JANKOVIĆ, 1999):

$$a_0 = \left(\frac{K^+ - K}{K}\right)\frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1}\Phi_{\neq c}(\theta_m) \tag{59}$$

$$a_n = 2\left(\frac{K^+ - K}{K^+ + K}\right)\frac{1}{M}\sum_{m=0}^{M-1}\Phi_{\neq c}(\theta_m)\, e^{-in\theta_m} \tag{60}$$

$$n = 1,2 \dots$$

Nesta pesquisa foi utilizado o valor de $N = 20$ e $M = 50$.

4.6 Cenários propostos

Para avaliação do escoamento de água subterrânea na cidade de Bauru e região foram consideradas condições passadas, presente e futuras de explotação do SAG.

O estudo de cenários anteriores auxilia na análise das alterações no sentido do escoamento e na quantificação do rebaixamento da carga hidráulica do SAG, desde a instalação dos primeiros poços no município de Bauru. O cenário presente indica a situação atual dos níveis potenciométricos e é utilizado como ano de referência para a avaliação de cenários futuros de explotação. A partir dos cenários futuros é possível comparar quais medidas de redução de vazão (ou regime de funcionamento) são mais indicadas para o controle do rebaixamento do SAG na área de estudo.

Cada cenário de explotação tem características distintas quanto ao número de poços em operação e a respectiva vazão média anual de bombeamento.

O cenário inicial, ou C0, representa o estado do SAG antes de ser utilizado como fonte de abastecimento de água. O registro do poço mais antigo que capta água do SAG em Bauru é de 1973, ou seja, o estado inicial seria o regime de escoamento antes deste ano.

Por falta de informações dos poços em operação e da vazão explotada nos anos de 1988 e 1997, foram consideradas as vazões médias de 2006, ano mais antigo com relatórios mensais disponibilizados pelo DAE. Nos casos de poços desativados em 2006, mas ativos nos anos anteriores (UP 00 Parque Viaduto) foi utilizada a vazão média de outorga do poço, obtida em seu relatório de perfuração.

Os cenários de explotação passados considerados nesta pesquisa foram:

- C0: cenário inicial, antes da explotação de água do SAG, portanto, anterior a 1973;
- Cenário de 1988: poços em operação estimados para o ano de 1988 e vazões médias anuais de 2006 ou vazões outorgadas;
- Cenário de 1997: poços em operação estimados para o ano de 1997 e vazões médias anuais de 2006 ou vazões outorgadas;
- Cenário de 2012: poços em operação e vazões médias anuais de 2012;
- Cenário de 2013: poços em operação e vazões médias anuais de 2013.

O cenário de 2014 representa o cenário atual, com poços em operação e vazões médias anuais de 2014.

O cenário futuro C1 foi estimado com base na previsão do DAE Bauru em instalar novos poços entre os anos de 2014 e 2017 para suprir o consumo de água no município até o ano de 2034. A área de maior rebaixamento no cenário C1 é a área central da cidade. Este cenário apresenta as maiores vazões explotadas do SAG na cidade de Bauru.

Foram considerados cenários de redução de vazão média anual dos poços do DAE com o objetivo de controlar o rebaixamento do nível piezométrico na área de estudo. As vazões dos poços particulares não foram reduzidas nos cenários futuros por duas razões:

- maior dificuldade em se restringir e monitorar o regime de operação e as vazões bombeadas;
- o volume total de água extraído é pouco significativo (ver vazões no item 4.6.1).

Os seguintes procedimentos podem ser realizados para se restringir a vazão dos poços:

- redução das vazões bombeadas;
- redução do regime de operação diário ou mensal dos poços ou
- combinação os dois procedimentos anteriores.

Os cenários analisados para representar a explotação em 2034 são:

- Cenário 1: vazão média dos poços instalados igual à de 2014, vazão dos poços futuros estimada com base nas previsões do DAE Bauru e vazão dos poços particulares igual à de 2014;
- Cenário 2: vazão média dos poços do DAE igual a 90% das vazões em C1 e vazão dos poços particulares igual à de 2014;
- Cenário 3: vazão média dos poços do DAE igual a 80% das vazões em C1 e vazão dos poços particulares igual à de 2014;
- Cenário 4: vazão média dos poços do DAE localizados na área central igual a 90% das vazões em C1 e vazão dos poços particulares igual à de 2014;
- Cenário 5: vazão média dos poços do DAE localizados na área central igual a 80% das vazões em C1 e vazão dos poços particulares igual à de 2014.

Além dos cenários futuros de C1 a C5, foram analisados dois cenários futuros hipotéticos, C6 e C7, descritos a seguir:

- Cenário 6: explotação apenas por poços do DAE com vazões iguais às de C1;
- Cenário 7: explotação apenas por poços particulares, com vazões iguais às de 2014.

A vazão média anual dos poços do SAG por cenário de explotação da cidade de Bauru é apresentada na Tabela 10 e na Figura 27.

Tabela 10 - Vazão média anual dos poços do SAG por cenário de explotação na cidade de Bauru

Cenário	Vazão média anual poços DAE (m³/h)	Vazão média anual poços particulares (m³/h)	Vazão média anual total (m³/h)
C0	0	0	0
1988	1.475	36	1.511
1997	2.433	149	2.581
2012	2.982	435	3.417
2013	3.377	435	3.812
2014	3.247	451	3.699
C1	4.017	448	4.465
C2	3.615	448	4.063
C3	3.214	448	3.662
C4	3.742	448	4.190
C5	3.467	448	3.916
C6	4.017	0	4.017
C7	0	448	448

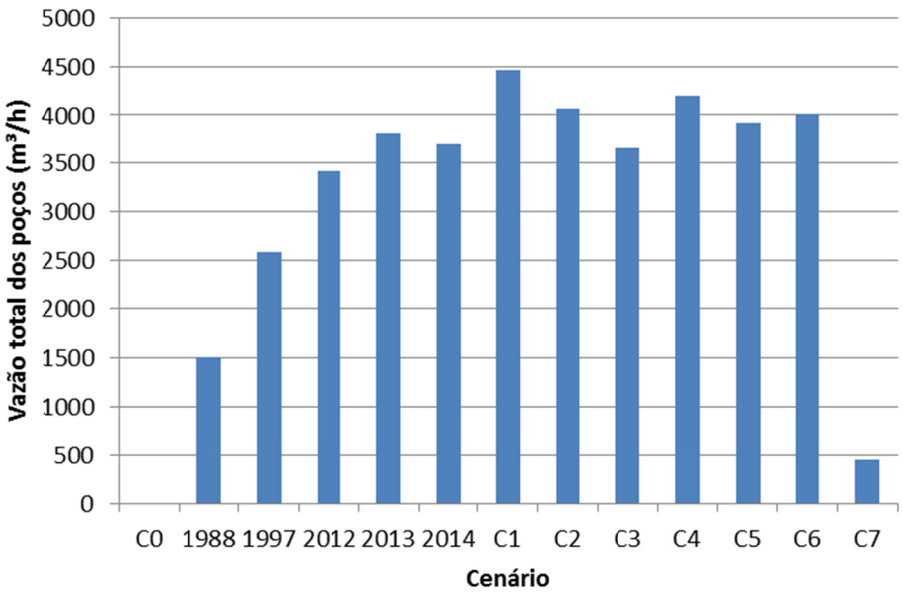


Figura 27 - Vazão média anual dos poços do SAG por cenário de explotação na cidade de Bauru

4.6.1 Vazão dos poços

As vazões dos poços utilizadas no modelo foram calculadas com base nos relatórios mensais dos poços, disponibilizados pelo DAE (2015a). Para representar o escoamento causado pela explotação de água do SAG nos anos de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014, foram utilizadas vazões médias anuais de cada poço, de acordo com a Equação 61:

$$Q_{média} = \frac{\sum_{i=1}^{12}(Q_i \cdot h_i)}{12} \cdot \frac{1}{720} \tag{61}$$

em que,

$Q_{média}$: vazão média anual (m³/h);

i: mês de 1 a 12;

Q_i: vazão instantânea medida pelos técnicos do DAE no mês i (m³/h);

h_i: número de horas de funcionamento do poço no mês i (h/mês).

As vazões médias anuais dos poços do DAE que explotam água do SAG na cidade de Bauru, utilizadas na modelagem do escoamento do SAG para os anos de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014, são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Vazões médias anuais estimadas para os poços do DAE que explotam água do SAG na cidade de Bauru nos anos de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014

Poço	**Vazão média anual (m³/h)**				
	1988*	1997*	2012	2013	2014
UP 03 Primavera I	204	204	0	0	0
UP 06 Consolação	50	50	53	53	51
UP 09 Padilha	67	67	46	41	37
UP 16 Sta. Cecília	71	71	20	16	2
UP 18 Beija-Flor (Sta Luzia)	147	147	214	120	161
UP 39 Roosevelt I	129	129	0	0	0
UP 20 Vânia Maria	17	17	16	19	18
UP 21 Jd. América	74	74	79	75	72
UP 24 Parque Real I	20	20	19	18	17
UP 25 Gasparini	201	201	205	204	187
UP 00 Parque Viaduto	72	72	0	0	0
UP 26 Bíblia	104	104	87	86	67
UP 27 Cruzeiro do Sul II	133	133	107	119	136
UP 29 Nações Unidas	138	138	0	0	0
UP 42 Nova Esperança II	49	49	0	0	0
UP 30 Jaraguá II	0	71	63	191	21
UP 31 Mary Dotta	0	273	265	286	258
UP 32 Geisel II (Shopping)	0	125	119	119	78
UP 43 Bauru XVI II	0	56	64	57	53
UP 33 Parque Real II	0	44	57	53	52
UP 34 Bauru XXV	0	88	111	120	85
UP 35 Distrito III - IPA	0	167	126	124	110
UP 36 Samambaia II	0	134	139	146	91
UP 39 Roosevelt II	0	0	124	88	0
UP 40 Lotes Urbanizados	0	0	249	249	239
UP 42 Nova Esperança III	0	0	64	63	56
UP 44 Vargem Limpa	0	0	314	248	195
UP 45 Primavera II	0	0	239	166	243
UP 46 Villágio III	0	0	31	26	22
UP 47 Chácara Bauruenses	0	0	4	3	4
UP 49 Cardia	0	0	92	175	181
UP 50 Marabá II	0	0	36	68	155
UP 51 Octávio Rasi II	0	0	39	41	49
UP 52 Bauru XVI III	0	0	0	175	156
UP 53 Nações Unidas II	0	0	0	143	180
UP 54 Manchester	0	0	0	86	33
UP 55 Roosevelt III	0	0	0	0	188
UP 56 Zona Norte (Nova Bauru)	0	0	0	0	34
UP 57 Val de Palmas	0	0	0	0	20
Total	1.475	2.433	2.982	3.377	3.247

* média anual de 2006

Os poços localizados na região de maior rebaixamento simulado (de 55 a 65 m) no cenário C1 (área central) que tiveram as vazões reduzidas em 10 e 20 %, nos cenários C4 e C5, respectivamente, são:

- UP 18 Beija-Flor (Sta Luzia);
- UP 21 Jd. América;
- UP 25 Gasparini;
- UP 26 Bíblia;
- UP 27 Cruzeiro do Sul II;
- UP 31 Mary Dotta;
- UP 32 Geisel II (Shopping);
- UP 35 Distrito III - IPA;
- UP 40 Lotes Urbanizados;
- UP 45 Primavera II;
- UP 49 Cardia;
- UP 52 Bauru XVI III;
- UP 53 Nações Unidas II;
- UP 55 Roosevelt III;
- UP 56 Zona Norte;
- UP 58 Jardim TV;
- UP 61 Zona Norte IV;
- UP 63 Padilha.

As vazões médias anuais dos poços do DAE, que explotam água do SAG na cidade de Bauru, utilizadas na modelagem do escoamento para os cenários C1, C2, C3, C4, C5 e C6 são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Vazões médias anuais estimadas dos poços do DAE que explotam água do SAG na cidade de Bauru nos cenários C1 a C6

Poço	Vazão média anual (m³/h)					
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
UP 18 Beija-Flor (Sta Luzia)	161	145	129	145	129	161
UP 21 Jd. América	72	65	57	65	57	72
UP 25 Gasparini	187	168	149	168	149	187
UP 26 Bíblia	67	60	53	60	53	67
UP 27 Cruzeiro do Sul II	124	111	99	111	99	124
UP 31 Mary Dotta	242	218	193	218	193	242
UP 32 Geisel II (Shopping)	69	62	55	62	55	69
UP 33 Parque Real II	47	42	37	47	47	47
UP 34 Bauru XXV	76	69	61	76	76	76
UP 35 Distrito III - IPA	99	89	79	89	79	99
UP 36 Samambaia II	91	82	73	91	91	91
UP 40 Lotes Urbanizados	239	215	191	215	191	239
UP 43 Bauru XVI II	53	48	43	53	53	53
UP 44 Vargem Limpa	195	175	156	195	195	195
UP 45 Primavera II	243	219	194	219	194	243
UP 46 Villágio III	22	20	17	22	22	22
UP 47 Chácara Bauruenses	4	4	3	4	4	4
UP 49 Cardia	181	163	145	163	145	181
UP 50 Marabá II	155	139	124	155	155	155
UP 51 Octávio Rasi II	49	44	39	49	49	49
UP 52 Bauru XVI III	156	140	125	140	125	156
UP 53 Nações Unidas II	180	162	144	162	144	180
UP 54 Manchester	33	29	26	33	33	33
UP 55 Roosevelt III	188	170	151	170	151	188
UP 56 Zona Norte	101	91	80	91	80	101
UP 57 Val de Palmas	120	108	96	120	120	120
UP 58 Jardim TV	167	150	133	150	133	167
UP 59 Jardim Imperial	83	75	67	83	83	83
UP 60 Zona Norte III	192	173	153	192	192	192
UP 61 Zona Norte IV	192	173	153	173	153	192
UP 62 Santa Cândida	150	135	120	150	150	150
UP 63 Padilha	83	75	67	75	67	83
Total	4.017	3.615	3.214	3.742	3.467	4.017

As vazões de bombeamento dos poços particulares utilizadas no modelo foram as vazões médias outorgadas. A Tabela 13 apresenta as vazões médias anuais dos poços particulares, que explotam água do SAG na cidade de Bauru, consideradas na modelagem do escoamento do SAG para os cenários C1 a C5 e C7.

Tabela 13 - Vazões médias anuais estimadas dos poços particulares que explotam água do SAG na cidade de Bauru

Poço	Vazão média anual (m³/h)	Poço	Vazão média anual (m³/h)
UPP 01 FOB	17	UPP 36 Hidrogeo	16
UPP 02 UNESP	21	UPP 37 JA Com. De Refeições	2
UPP 03 Adams	25	UPP 38 Shayeb e Cia	7
UPP 04 Bauru Shopping Center	7	UPP 39 Plasútil	2
UPP 05 Aciflora	1	UPP 41 Nacional Gas Butano	1
UPP 06 Hospital Beneficencia Portuguesa	3	UPP 43 Mectrol do Brasil	0
UPP 07 Marselha residencial	2	UPP 44 Zoológico	12
UPP 09 Hotel Anna	15	UPP 46 Posto Sem Limites	3
UPP 10 Monte Castelo	3	UPP 47 José Eduardo A Santoro	0
UPP 11 BTC	7	UPP 48 Confiança II	1
UPP 13 Associação Hospitalar	8	UPP 49 MPA	4
UPP 14 EADI	6	UPP 50 Mori Motors	0
UPP 15 Ajax	7	UPP 52 Moacir de C Pita	0
UPP 19 Frigorífico Mondelli I	72	UPP 54 CPI 4	1
UPP 20 Frigorífico Mondelli II	72	UPP 55 Horto Florestal	1
UPP 21 Xavier Metais	1	UPP 56 Tilibra	8
UPP 23 Hospital de base	11	UPP 57 UNIMED	5
UPP 25 Claudia Daré	8	UPP 59 USP Centrinho	5
UPP 26 Casa Alta Construções	17	UPP 61 Vertico Empreendimentos	25
UPP 27 Anhanguera	1	UPP 62 USP Prefeitura Campus	6
UPP 29 Colégio São José	4	UPP 65 Instituto Lauro Souza Lima	13
UPP 30 USC II	14	UPP 67 SESC	3
UPP 31 Marzochi Extração de Água	15	UPP 68 Biazi Plaza Hotel Ltda	0
UPP 32 Khalil Obeid	0	Total	448

Para analisar se as vazões produzidas são suficientes para atender o consumo da população urbana de Bauru, foram também considerados os poços do DAE que captam água do SAB. Estes poços são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Vazão média anual dos poços do DAE que explotam água do Sistema Aquífero Bauru

Poços	Vazão média no ano de 2014 (m³/h)
UP 41 Tibiriçá	23
UP 48 Lago Sul	13
Total	35

O gráfico da Figura 28 apresenta a vazão média anual dos poços do DAE utilizados para simulação do ano de 2014 (cenário atual). Em 2014, os poços UP 16, UP 24 e UP 30 foram desativados e os UP 56 e UP 57 foram instalados. Consequentemente, esses poços têm vazão igual a zero em algum ou alguns dos meses do ano de 2014. Portanto, no cenário C1, suas vazões foram corrigidas para a vazão média dos meses em que estiveram em operação. A vazão média dos demais poços foi mantida constante e igual a de 2014.

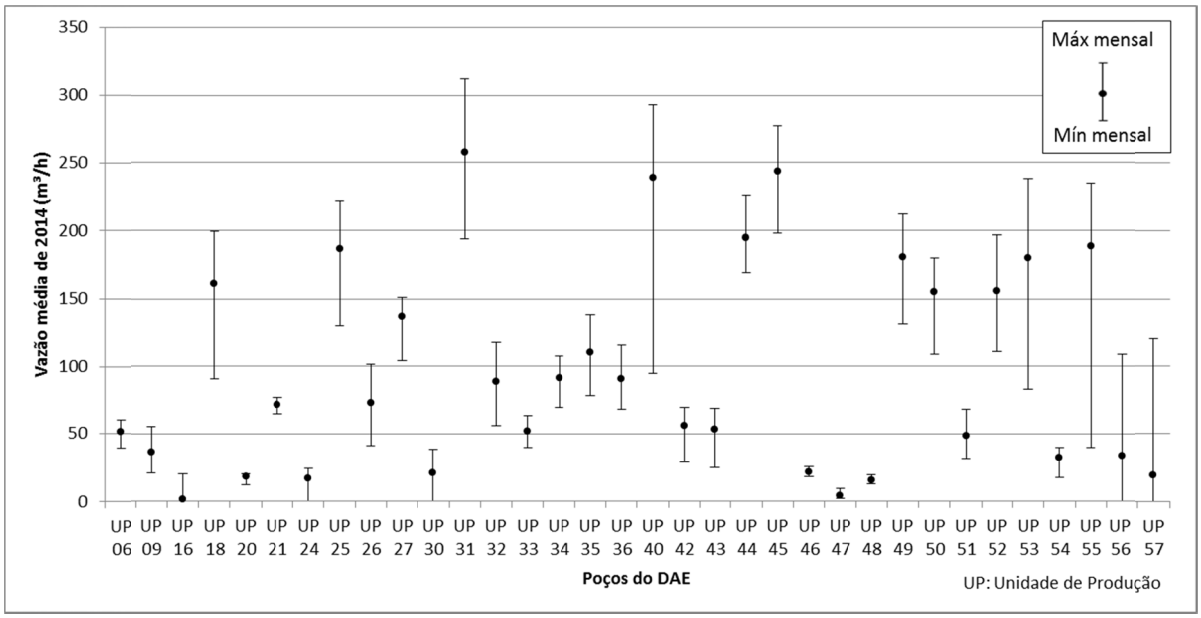


Figura 28 - Vazão média do ano de 2014 e vazões mensais máximas e mínimas para cada poço do DAE

Na Figura 28, nota-se que as vazões dos poços variaram no decorrer do ano de 2014. Logo, o modelo não deve reproduzir exatamente os níveis piezométricos medidos nos poços em um determinado instante, porém representa um valor aproximado. A medição pode ocorrer com qualquer vazão bombeada, enquanto o modelo representa um comportamento médio de longo prazo (regime permanente), mais adequado aos estudos de disponibilidade hídrica e devido à inexistência de detalhamento geológico suficiente.

4.7 Simulação e visualização dos resultados

Para geração e visualização dos resultados foram utilizados os seguintes programas:

- MATLAB (MATHWORKS, 2011);
- Microsoft Excel (planilhas eletrônicas) (MICROSOFT, 2010);
- QGIS (Sistema de Informação Geográfica) (OSGEO, 2015).

A sequência das principais atividades desenvolvidas para a modelagem do escoamento de água subterrânea utilizada nessa pesquisa é sintetizada na Figura 29.

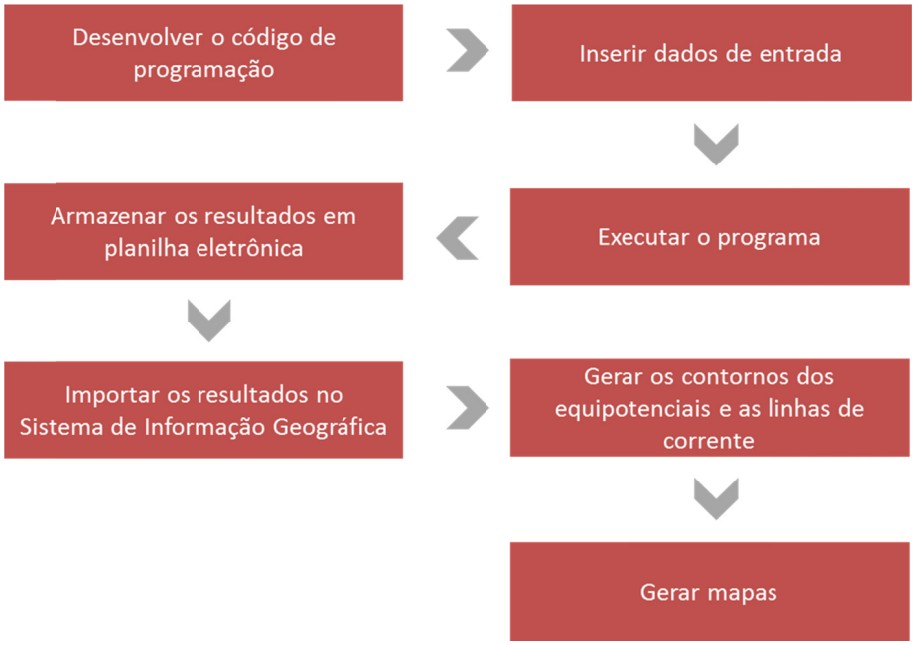


Figura 29 - Sequência das principais atividades desenvolvidas para a modelagem de água subterrânea

Após a definição das equações governantes, o código foi implementado no MATLAB. No código são inseridos os dados de entrada e o número e localização dos pontos em que se deseja calcular o potencial complexo. Os dados dos poços (localização e vazão média anual) são armazenados em planilhas eletrônicas, que são lidas pelo programa. Assim, se houver necessidade de gerar os resultados novamente, os dados dos poços podem ser alterados diretamente nas planilhas eletrônicas, por qualquer pessoa que tenha conhecimentos básicos de informática. O código de programação elaborado é apresentado no APÊNDICE B.

Por meio das soluções analíticas implementadas, foram calculados os potenciais complexos para cada ponto definido. A componente real do potencial complexo (Φ) foi utilizada para o cálculo da cota piezométrica em cada ponto de interesse. Estes valores e a componente imaginária (Ψ) foram armazenados em uma variável matricial no Matlab, em que as duas primeiras colunas representam as coordenadas UTM e as demais colunas representam os resultados da simulação. Em cada linha foram armazenados os valores em um ponto. Este procedimento foi repetido para todos os cenários avaliados.

Durante a implementação do código em Matlab, foram gerados mapas das cotas piezométricas e das linhas de corrente para a área da Figura 13, de 484 km², onde se concentra a extração de água do SAG por meio de poços públicos e industriais no município de Bauru.

A Figura 30 apresenta o mapa de contorno dos níveis piezométricos e das linhas de corrente gerado em Matlab, para o SAG em Bauru, no cenário de 1988.

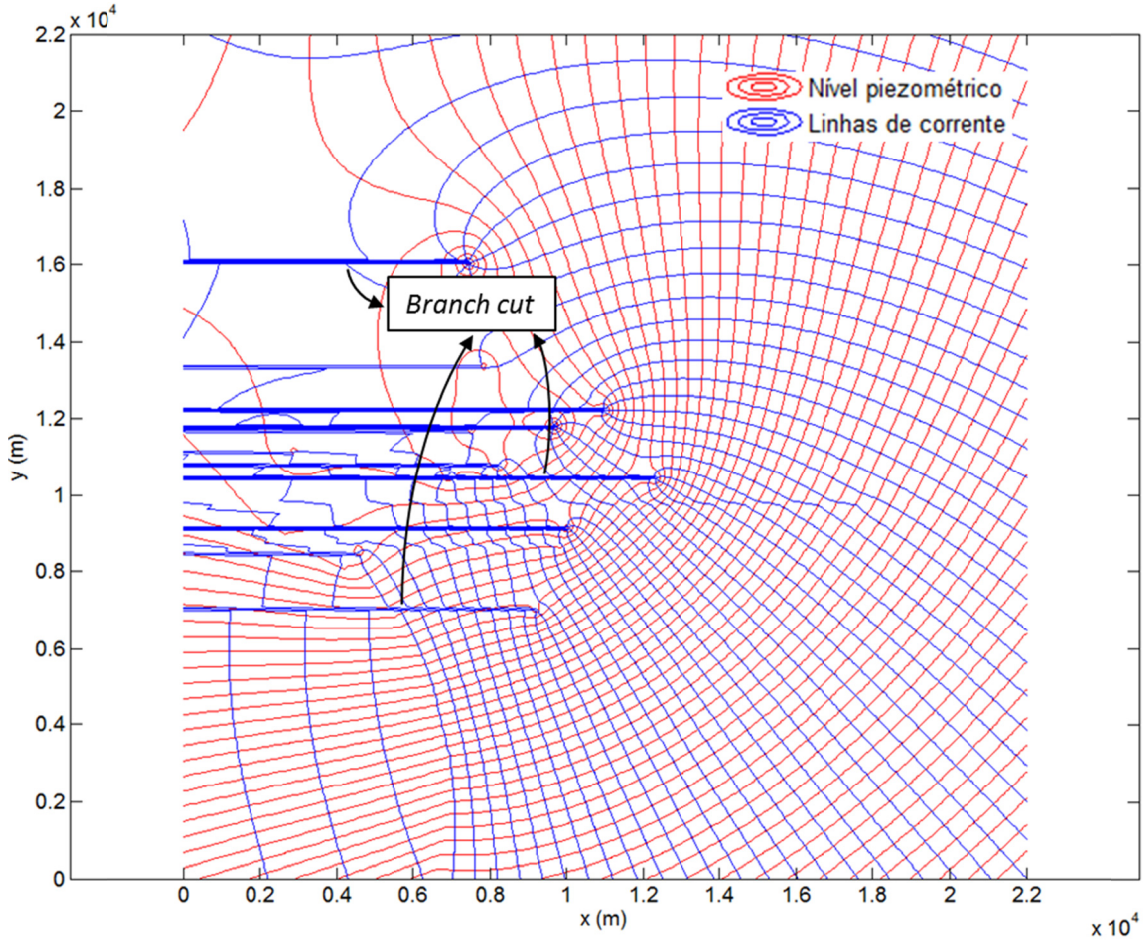


Figura 30 - Simulação dos níveis piezométricos e das linhas de corrente na área de estudo geradas após a implementação do código de programação em Matlab para o ano de 1988

Observa-se que as curvas dos níveis piezométricos e das linhas de corrente são perpendiculares, de acordo com as condições de Cauchy-Riemann (ver mais no item 4.4.2). Além disso, há linhas horizontais a partir de cada poço representando os *branch cuts*, os quais não podem ser evitados ao se elaborar mapas de contorno (STRACK, 2015) (ver item 4.4.2).

Os resultados, dispostos em matriz no MATLAB, foram copiados e colados em uma planilha eletrônica. Com os resultados dispostos em planilha eletrônica, o rebaixamento do nível piezométrico com relação ao cenário inicial (sem extração de água) e o rebaixamento com relação a 2014 (rebaixamento adicional a partir de 2014) foram calculados para cada ponto, de acordo com as equações 62 e 63.

$$Rebaixamento = \phi_{\ cenário} - \phi_{\ inicial} \tag{62}$$

$$Rebaixamento\ adicional = \phi_{\ cenário} - \phi_{\ 2014} \tag{63}$$

Os valores de cota piezométrica, função de corrente e rebaixamento foram então importados por um SIG livre, o QGIS 2.8. Os resultados e as coordenadas armazenados nos pontos são dispostos no SIG de acordo com a Figura 31.

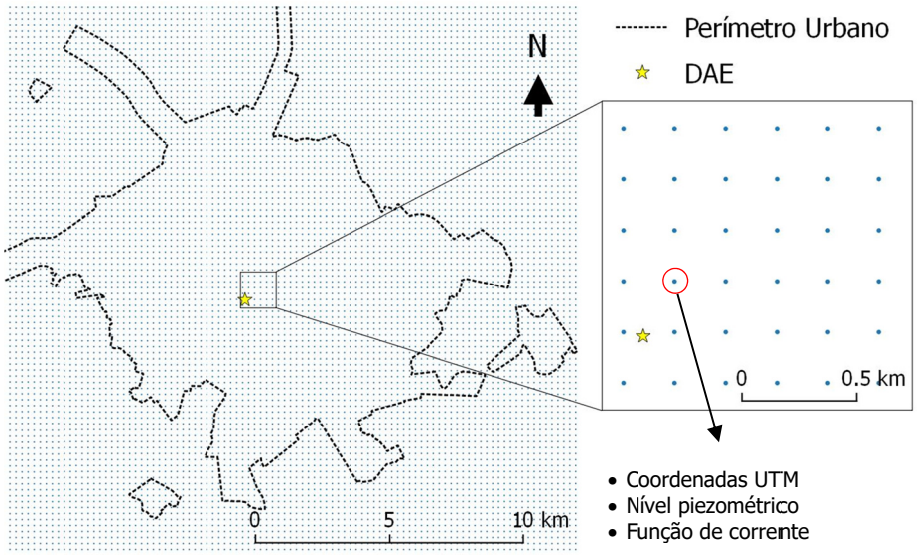


Figura 31 - Pontos de coordenadas conhecidas em que foram calculados os resultados do modelo em um SIG para a geração de mapas

No SIG foram gerados os mapas finais dos contornos das cotas piezométricas e as linhas de corrente. Contudo, as linhas de corrente foram redesenhadas antes da elaboração dos mapas, devido à geração dos *branch cuts*.

4.8 Calibração

Foi adotado o processo de calibração de tentativa e erro, em que os parâmetros são ajustados manualmente através de simulações sucessivas e comparação entre os níveis potenciométricos calculados e observados. Esta comparação foi realizada por meio da média dos erros e do desvio padrão, sendo o erro (E) definido como o nível piezométrico calculado (ϕ_{calc}) menos o observado (ϕ_{obs}). A média aritmética dos erros (ME - *Mean Error*) é então definida como:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\phi_{calc} - \phi_{obs})_i}{n} \tag{64}$$

em que n é o número total de valores observados e i é o índice referente a cada medição. A média aritmética dos erros absolutos (MAE - *Mean Absolute Error*) é definida por:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |(\phi_{calc} - \phi_{obs})_i|}{n} \tag{65}$$

O desvio padrão dos erros (s) foi calculado pela equação:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (E_i - ME)^2}{n-1}} \tag{66}$$

em que E_i é o erro do valor simulado no ponto i.

A análise dos erros foi realizada utilizando um gráfico de dispersão dos valores simulados e observados de nível potenciométrico no SAG em Bauru.

4.9 Projeção da produção e do consumo de água

Após o estudo do comportamento do SAG sob as condições estabelecidas nos cenários de explotação futuros (C1 a C5), foi analisado se as vazões produzidas nestes cenários seriam capazes de atender ao consumo de água projetado para os próximos anos. A análise inclui a produção de água pelo DAE e o consumo da população urbana de Bauru, ou seja, o consumo residencial. O consumo dos setores industrial, comercial e de serviços, atendido prioritariamente por poços particulares, não foi analisado nesta pesquisa.

Segundo o Plano Diretor de Água de Bauru (HIDROSAN, 2014), toda a população urbana será abastecida pela produção de água de poços públicos, do SAG e do SAB, e da Estação de Tratamento de Água. Dessa forma, a projeção da vazão média total produzida para abastecimento público de água foi estimada considerando as vazões produzidas pelos poços públicos do SAG e do SAB e da Estação de Tratamento de Água.

A ETA estará menos susceptível à variação de vazão do Rio Batalha durante os períodos de estiagem após a implantação da captação complementar prevista no PDA (HIDROSAN, 2014). Dessa maneira, a vazão média da ETA deverá ser constante e igual a 46.094 m³/d (HIDROSAN, 2014) até 2034. As vazões dos poços em cada cenário são apresentadas no item 4.6.1.

A projeção da vazão de água destinada ao abastecimento público, considerando o consumo per capita da população e o volume perdido (por vazamentos, não faturado, etc.), foi calculada para o período de 2014 a 2034, que corresponde ao horizonte de projeto do PDA de Bauru. Para cada ano, foram estimadas as vazões distribuídas em dias de consumo médio e nos dias de maior consumo usando as seguintes equações:

$$Q_{média\ diária} = \frac{Pop \cdot q_{pc}}{1000\left(1 - \frac{IP}{100}\right)} \tag{67}$$

$$Q_{DMC} = K_1 \cdot Q_{média\ diária} = \frac{Pop \cdot q_{pc} \cdot K_1}{1000\left(1 - \frac{IP}{100}\right)} \tag{68}$$

em que,

$Q_{média\ diária}$: vazão média diária destinada ao abastecimento da população urbana (m³/d);

Q_{DMC}: vazão do dia de maior consumo de atendimento à população urbana (m³/d);

Pop: população urbana (hab);

q_{pc}: consumo per capita da população urbana (litro/hab.d);

IP: Índice de Perdas (%);

K_1: coeficiente do dia de maior consumo.

O consumo médio diário *per capita*, definido no PDA, foi calculado para a população urbana de Bauru, considerando toda ela atendida pelo DAE e tendo como base o volume médio micromedido em 2013. Logo, o consumo de água produzida pelo DAE resulta no consumo per capita de 184 litros/hab.d da população urbana de Bauru (HIDROSAN, 2014).

No PDA, considerou-se o coeficiente do dia de maior consumo (K_1) igual a 1,2 e foi estabelecido que o índice de perdas diminuirá gradativamente, devido a medidas de controle e redução de perdas (aparentes e reais). O IP deverá variar de 49% em 2014 a 25% em 2034 (HIDROSAN, 2014), conforme descrito no item 3.2.2.

A projeção da produção e do consumo de água foi utilizada para analisar a relação entre a oferta e a demanda de água na cidade Bauru. A distribuição, a operação e o tratamento de água não são analisados nesta pesquisa.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do estudo do escoamento regional e os demais parâmetros do modelo, da calibração e das simulações, considerando cenários passados, presente e futuros. Dessa maneira, é possível compreender a variação da potenciometria do SAG na cidade de Bauru devido à explotação para abastecimento.

5.1 Escoamento regional no SAG

O vetor de descarga e o sentido de escoamento regional do SAG, na área de estudo, foram calculados com base nos níveis estáticos de poços perfurados nas décadas de 70 e 80, como descrito no item 4.3.5. Foi considerado que o escoamento regional não varia ao longo do período estudado (de 1973 a 2034). Assim, foi possível descrever a superfície potenciométrica inicial do SAG por um plano, cuja equação linear polinomial é:

$$f(x,y) = 5{,}7 \cdot 10^{-4}x - 5{,}9 \cdot 10^{-4}y + 465{,}9 \tag{69}$$

O mapa da Figura 32 ilustra a variação de cota potenciométrica em função das coordenadas locais x e y.

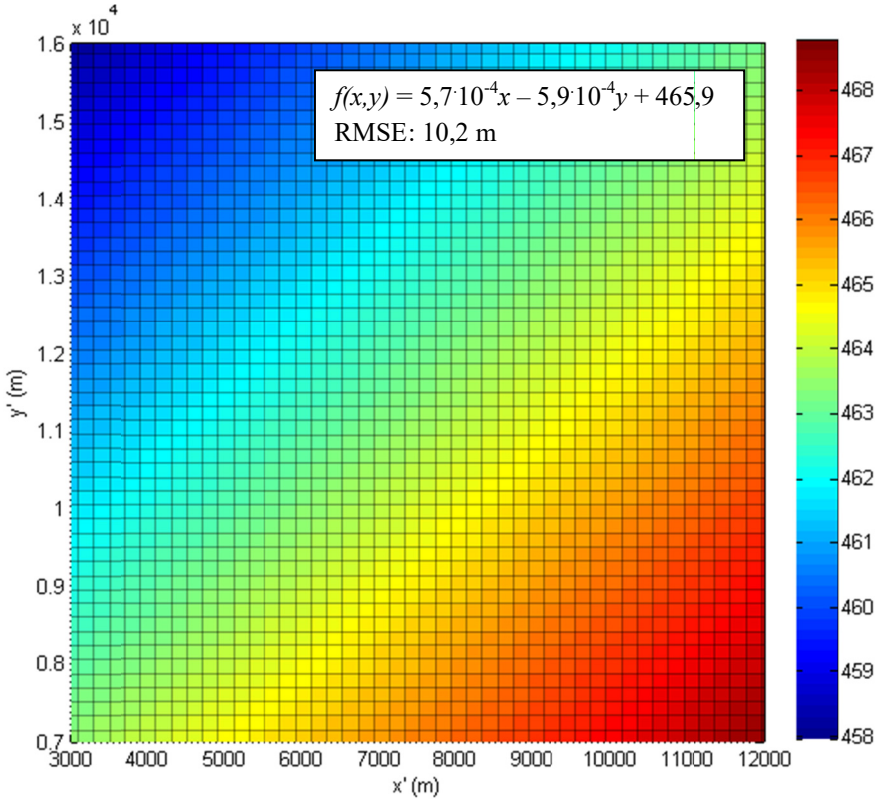


Figura 32 - Variação de cota potenciométrica em função das coordenadas x e y

Os coeficientes de x e y na equação polinomial equivalem aos gradientes hidráulicos nas direções x e y, respectivamente. Logo,

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 5{,}7 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m/m} \tag{70}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = -5{,}9 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m/m} \tag{71}$$

Na direção do escoamento, o gradiente hidráulico é de $8{,}2 \cdot 10^{-4}$ m/m (0,82 m/km).

O gradiente hidráulico calculado foi comparado com valores obtidos em estudos anteriores. A Tabela 15 mostra as referências utilizadas nessa pesquisa para efeito de comparação do gradiente hidráulico do SAG.

Tabela 15 - Estimativas do gradiente hidráulico e do sentido de escoamento a partir de superfícies potenciométricas

Fontes	Gradiente hidráulico estimado (m/km)	Sentido de escoamento
Araújo, França e Potter (1999)	1,2	Noroeste
Rocha et al. (2006)	1,0	Noroeste
LEBAC (2008)	1,0	Noroeste

5.2 Parâmetros do modelo

A partir dos gradientes hidráulicos foi possível definir a descarga do escoamento uniforme nas direções x e y e na direção do escoamento:

$$Q_{x0} = -3{,}7.10^{-5} \cdot 250 \cdot 5{,}7 \cdot 10^{-4} = -5{,}2 \cdot 10^{-6}\ m^2/s \tag{72}$$

$$Q_{y0} = -3{,}7.10^{-5} \cdot 250 \cdot (-5{,}9 \cdot 10^{-4}) = 5{,}5 \cdot 10^{-6}\ m^2/s \tag{73}$$

$$Q_0 = \sqrt{(-5{,}2 \cdot 10^{-6})^2 + (5{,}5 \cdot 10^{-6})^2} = 7{,}6 \cdot 10^{-6}\ m^2/s \tag{74}$$

A Figura 33 representa o vetor de descarga na direção do escoamento regional.

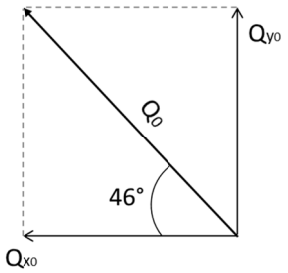


Figura 33 - Representação das descargas do escoamento uniforme nas direções x e y e na direção do escoamento

O sentido do escoamento regional definido nessa pesquisa é representado na Figura 34, elaborada a partir dos dados do Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo (DINIZ et al., 2014a).

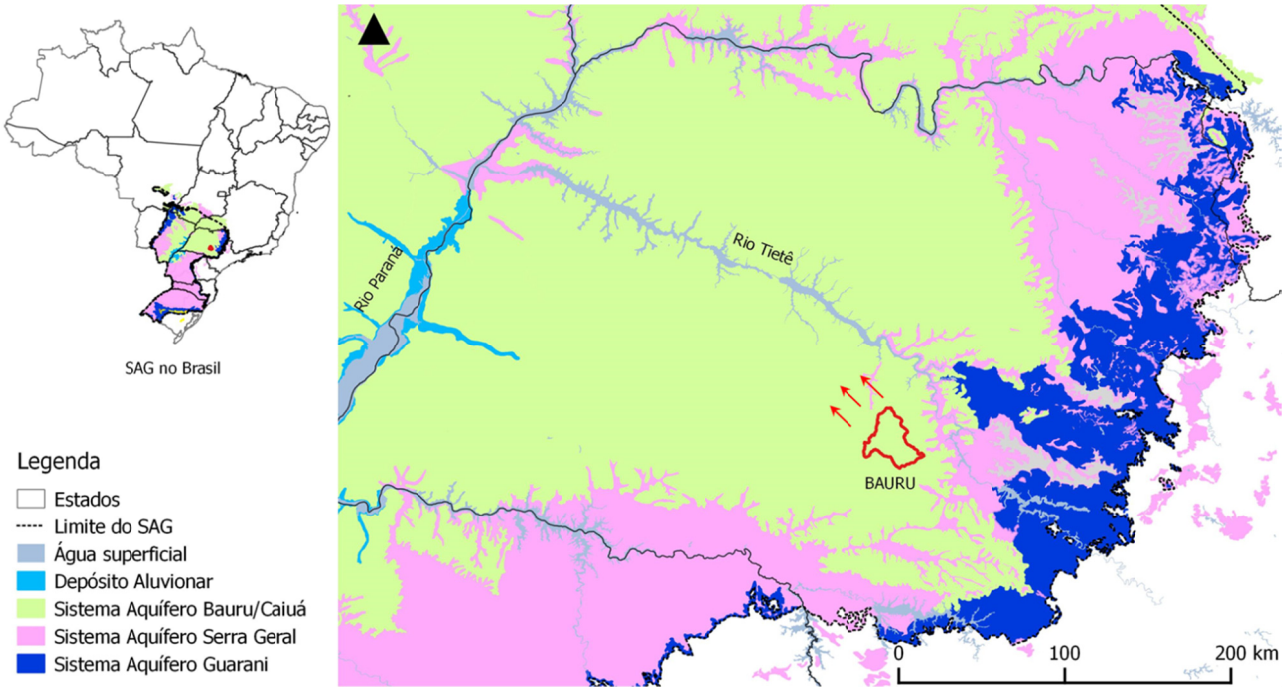


Figura 34 - Direção do escoamento de água no SAG no município de Bauru e principais aquíferos da região.
Fonte: elaborado com base nas informações de Diniz et al. (2014a)

Os valores dos parâmetros considerados no modelo são:

- espessura do aquífero: $H = 250$ m;
- espessura da inomogeneidade: $H^{+} = 60$ m;
- escoamento uniforme: $Q_0 = 7{,}6 \cdot 10^{-6}$ m²/s;
- condutividade hidráulica: $K = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ m/s;
- raio da inomogeneidade: $R = 7.000$ m;
- coord. UTM centro da inomogeneidade: 690.000 m E, 7.522.500 m N;
- cota base do aquífero com relação ao nível do mar: $b = 180$ m.

A carga hidráulica e as coordenadas do ponto de referência são:

- carga hidráulica no ponto de referência: $\phi_0 = 498{,}5$ m;
- coord. UTM do ponto de referência: 732.000 m E, 7.500.000 m N.

5.3 Calibração

O principal parâmetro variado para a calibração do modelo foi a condutividade hidráulica. A calibração foi realizada utilizando dados de nível estático medido logo após a perfuração de poços com filtro nas formações Botucatu e/ou Piramboia, de acordo com os perfis estratigráficos fornecidos pelo DAEE. Todos os poços escolhidos têm relatório de perfuração e perfil construtivo disponíveis no DAEE de Araraquara.

Primeiramente, foram utilizados poços públicos e particulares. Verificou-se, contudo, que a calibração com os poços particulares apresenta valores discrepantes, ou seja, os valores de cota piezométrica calculados são muito diferentes dos valores observados (tanto maiores quanto menores). Isso pode evidenciar que:

I o modelo não é adequado para representar o escoamento de água no aquífero ou

II os dados dos poços particulares são inconsistentes, ou seja, há erros nos relatórios de perfuração dos poços quanto aos níveis estáticos e ao aquífero explorado.

Havendo erros nos relatórios de perfuração, não é possível identificar se há conexão hidráulica entre o SAG e o SAB, por exemplo. Para análise da teoria II, prosseguiu-se com a simulação usando apenas poços públicos ou particulares. Verificou-se que os NE dos poços do DAE observados se ajustam muito melhor aos simulados do que os NE dos poços particulares.

Logo, para a calibração do modelo, foram usados valores de nível estático dos poços do DAE e do poço particular UPP 19 Frigorífico Mondelli. Os poços do DAE foram escolhidos, pois seus relatórios de perfuração são avaliados por geólogos do DAEE e corrigidos quando necessário. O poço particular do Frigorífero Mondelli, por sua vez, apresenta vazão característica de poços do SAG, da ordem de 70 m^3/h. Logo, mesmo que seu relatório não tenha sido verificado pelo DAEE, ele foi considerado na calibração.

Os dados dos poços usados na calibração e sua localização são apresentados na Tabela 16. O nível do poço 564 (Nações Unidas I, desativado) foi medido durante a realização do Diagnóstico Hidrogeológico por C3 Consultoria (2015).

Tabela 16 - Dados dos poços utilizados na calibração do modelo

Poço	Coordenadas UTM		Ano de medição do NE	Cota NE na perfuração (m)
	m E	m N		
UP 30 Jaraguá II	694.106	7.532.061	1990	440
UP 31 Mary Dotta	702.395	7.533.162	1990	444
UPP 19 Frigorífico Mondelli I	701.920	7.532.250	1990	442
UP 39 Roosevelt II	695.936	7.532.961	1999	437
UP 40 Lotes Urbanizados	701.520	7.535.110	1999	432
UP 51 Octávio Rasi II	704.961	7.531.792	2012	420
UP 52 Bauru XVI III	693.399	7.531.616	2012	424
UP 53 Nações Unidas II	700.150	7.528.974	2012	417
UP 54 Manchester	706.432	7.529.041	2012	443
UP 56 Zona Norte (Nova Bauru)	699.783	7.536.164	2014	423
UP 57 Val de Palmas	692.092	7.532.793	2014	421
UP 55 Roosevelt III	695.880	7.532.900	2013	413
UP 58 Jardim TV	697.150	7.534.330	2015	412
564 (Nações Unidas I)	700.153	7.528.967	2015	411

Para a calibração do modelo usando medições do NE em anos diferentes, foi necessário reproduzir as condições de explotação do aquífero em épocas distintas. Considerando o escoamento regional constante, a localização e a vazão dos poços são os únicos parâmetros que foram variados. Dessa maneira, foram simulados os anos de 1988, 1997, 2012, 2013, 2014. Os anos de medição dos níveis estáticos e os correspondentes anos simulados são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Anos de medição dos níveis estáticos e os correspondentes anos simulados

Poço	Ano de medição do NE	Ano simulado	Observação
UP 30 Jaraguá II	1990	1988	Não houve perfuração de novos poços em 1989
UP 31 Mary Dotta	1990	1988	
UPP 19 Frigorífico Mondelli I	1990	1988	
UP 39 Roosevelt II	1999	1997	Não houve perfuração de novos poços em 1998
UP 40 Lotes Urbanizados	1999	1997	
UP 51 Octávio Rasi II	2012	2012	Poços perfurados no final do ano de 2012
UP 52 Bauru XVI III	2012	2012	
UP 53 Nações Unidas II	2012	2012	
UP 54 Manchester	2012	2012	
UP 56 Zona Norte (Nova Bauru)	2014	2013	
UP 57 Val de Palmas	2014	2013	
UP 55 Roosevelt III	2013	2013	Poço perfurado no final do ano de 2013
UP 58 Jardim TV	2015	2014	
564 (DAEE - Nações)	2015	2014	

Pela Tabela 17, verifica-se que nem sempre os anos simulados correspondem aos anos de medição do NE dos poços usados na calibração. Isso é justificado porque o modelo calcula as cotas piezométricas do aquífero depois de atingido o estado estacionário. Isso significa que ao entrar com informações do ano de 2014, a saída do modelo representará as condições de escoamento após atingido o regime permanente, que pode demorar alguns anos ao longo dos quais o equilíbrio é estabelecido.

Após sucessivas simulações, observou-se que o uso da condutividade hidráulica de $3{,}7 \cdot 10^{-5}$ m/s no modelo foi o que resultou em melhor ajuste entre os valores observados e simulados. Esse valor é similar ao obtido por Paula e Silva e Cavaguti (1992), de $2{,}9 \cdot 10^{-5}$, em teste de bombeamento realizado por C3 Consultoria (2015), de $3{,}8 \cdot 10^{-5}$ m/s, e ao utilizado nas regiões centrais e oeste da cidade de Bauru no modelo de Waterloo Brasil (2001), de $4{,}0 \cdot 10^{-5}$.

O gráfico de dispersão dos níveis potenciométricos observados e calculados dos poços utilizados para a calibração do modelo é apresentado na Figura 35. Na Figura 37 são localizados os poços de medição de NE usados para calibração do modelo. A correlação de Pearson e o desvio padrão foram de 0,926 e 4,7 m, respectivamente.

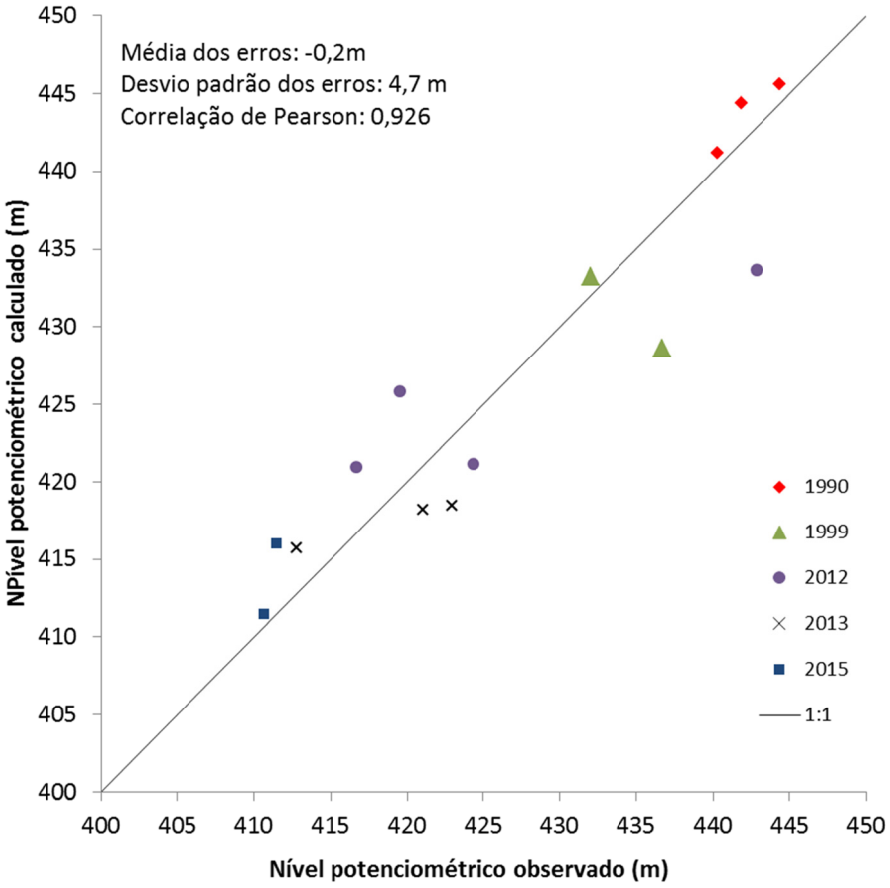


Figura 35 - Gráfico de dispersão dos níveis piezométricos observados e calculados dos poços do SAG utilizados para a calibração do modelo

A Tabela 18 apresenta a média, a média absoluta e o desvio padrão dos erros (níveis dinâmicos simulados menos os observados), quando se varia os parâmetros calibrados (condutividade hidráulica, espessura do aquífero e vetor de descarga uniforme).

Tabela 18 - Média e desvio padrão dos erros ao se variar os valores de K, H e Q_0 e o sentido do escoamento regional

Parâmetro	Variação	Valor	Média dos erros (m)	Desvio padrão dos erros (m)	Média absoluta dos erros (m)
K (m/s)	- 50%	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$	-36,1	13,8	36,1
		$3{,}7 \cdot 10^{-5}$	-0,2	4,7	3,7
	+ 50%	$5{,}6 \cdot 10^{-5}$	11,3	6,3	11,0
H (m)	- 50%	125	-31,4	10,7	31,4
		250	-0,2	4,7	3,7
	+ 50%	375	-10,9	5,4	10,9
Q0 (m²/s)	- 50%	$3{,}8 \cdot 10^{-6}$	18,8	4,9	18,8
		$7{,}6 \cdot 10^{-6}$	-0,2	4,7	3,7
	+ 50%	$1{,}1 \cdot 10^{-5}$	-18,8	5,3	18,8
Q0 (sentido do escoamento regional)	- 20°	N 59° W	1,6	4,7	4,1
		N 44° W	-0,2	4,7	3,7
	+ 20°	N 29° W	2,0	4,8	4,5

Ao variar a condutividade hidráulica para menos ($1{,}9 \cdot 10^{-5}$ m/s), os erros são maiores do que quando K é variada para mais ($5{,}6 \cdot 10^{-5}$ m/s), em 50%. Os erros também são maiores quando H é variada para menos (125 m), do que para mais (375 m). A variação do valor e do sentido do vetor de descarga uniforme pouco influenciou no desvio padrão, que variou em, no máximo, 0,6 m. Isso significa que as variações em Q_0 têm menos interferência nos resultados obtidos. Observa-se que os resultados são mais sensíveis às alterações nos valores de condutividade hidráulica, do que dos demais parâmetros.

5.4 Potenciometria do SAG na cidade de Bauru

O mapa da Figura 36 ilustra os níveis piezométricos e as linhas de corrente antes da exploração do SAG na cidade de Bauru. O primeiro poço que extrai água do SAG foi perfurado em 1973. Logo, o mapa da Figura 36 ilustra o escoamento no aquífero até 1973.

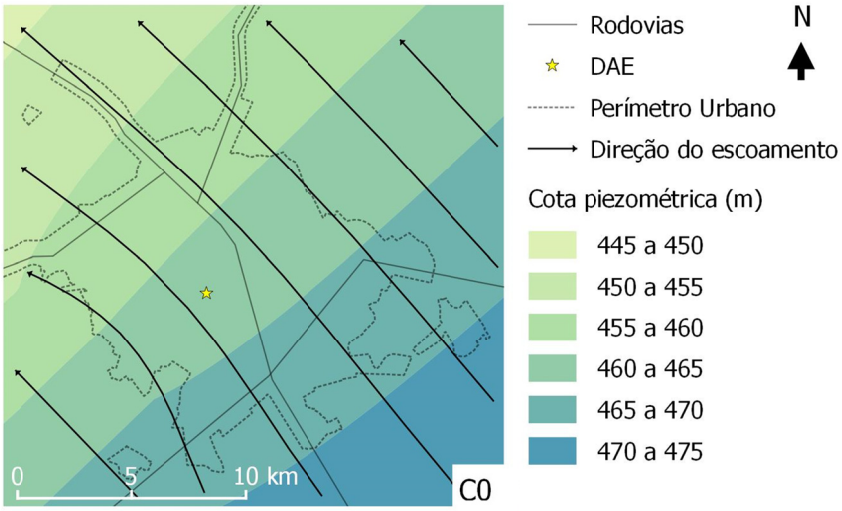


Figura 36 - Potenciometria e direção do escoamento no SAG na cidade de Bauru antes da explotação por poços tubulares profundos, iniciada em 1973

As linhas de corrente no sentido noroeste representam a direção do escoamento uniforme do SAG. As linhas são praticamente paralelas, com pequena deformação a sudoeste da área estudada, onde se situa a inomogeneidade cilíndrica de espessura menor do que a espessura do aquífero. A deformação ocasionada pela inomogeneidade será observada também nas linhas de corrente dos demais cenários, embora haja deformações mais significativas provocadas pelo bombeamento dos poços.

Quanto ao nível piezométrico, observa-se que ele reduz gradativamente no sentido noroeste, ou seja, no sentido do escoamento. Na região sudoeste, onde se encontra a inomogeneidade, a variação da cota piezométrica é maior, devido à menor espessura do aquífero.

A Figura 37 apresenta os mapas potenciométricos do SAG sob o regime de explotação dos poços dos anos de 1988 (1.511 m³/h), 1997 (2.581 m³/h), 2012 (3.417 m³/h), 2013 (3.812 m³/h) e 2014 (3.699 m³/h). Os resultados representam o escoamento no aquífero considerando o estado estacionário.

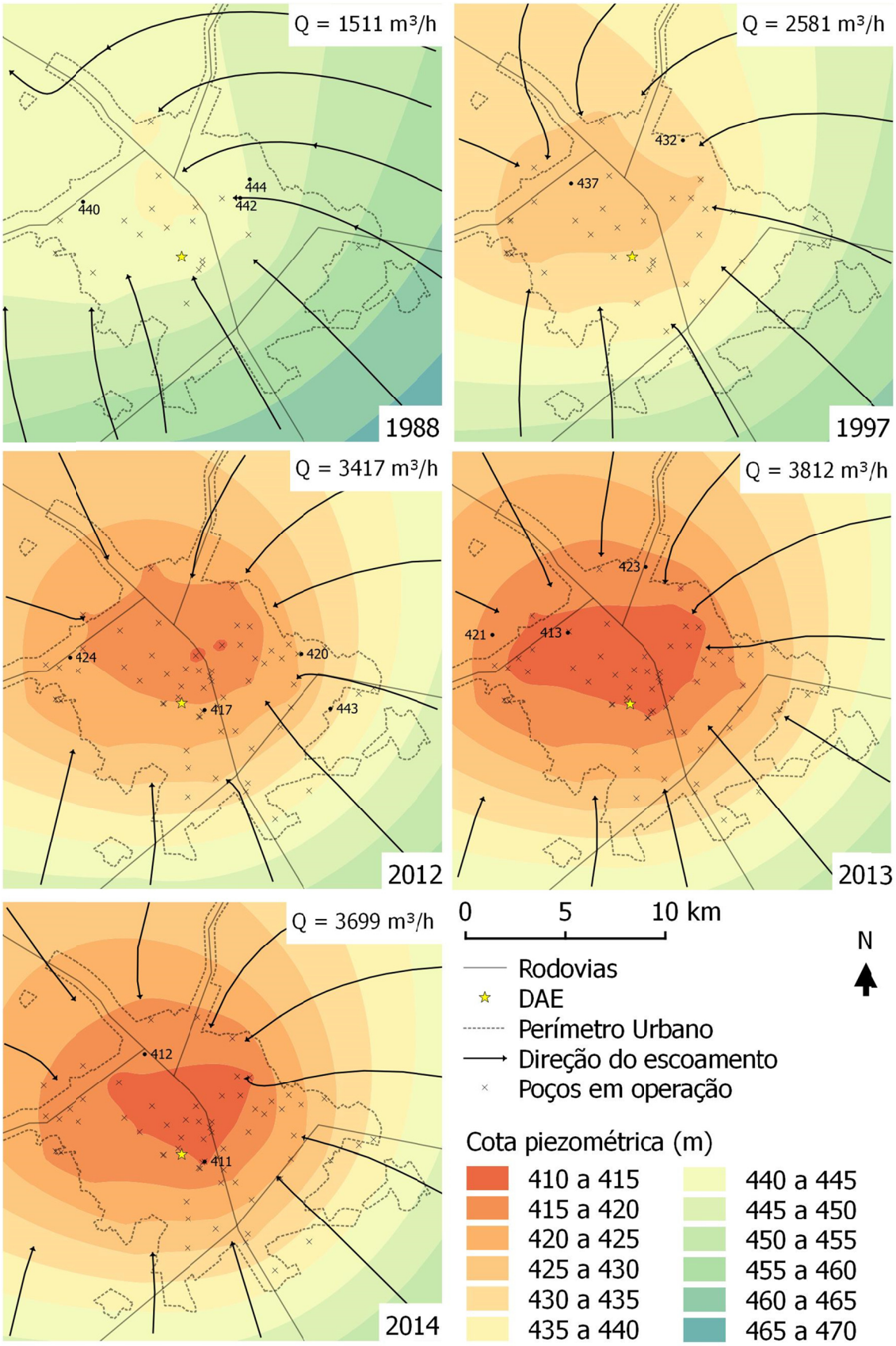


Figura 37 – Potenciometria, escoamento no SAG e vazões explotadas em 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014 na cidade de Bauru, com NE dos poços usados para calibração do modelo

Ao se comparar as linhas de corrente simuladas para os anos de 1988 a 2014 com o cenário inicial, nota-se que o sentido do escoamento foi alterado em quase toda a área de estudo, sendo direcionado para o centro da cidade de Bauru.

Considerando as cotas do topo do SAG observadas nos perfis estratigráficos dos poços, observa-se que os níveis piezométricos calculados estão abaixo das cotas do topo do aquífero. A Figura 38 apresenta a diferença entre os níveis piezométricos simulados e observados nos poços e a respectiva cota observada do topo do SAG. Os valores negativos indicam que, naquele poço, o aquífero se comporta como aquífero livre. Para o cenário de 2014, os resultados simulados indicam que apenas 5 dos 29 poços em operação (e com dados disponíveis) não apresentarão nível dinâmico abaixo da cota de topo do aquífero.

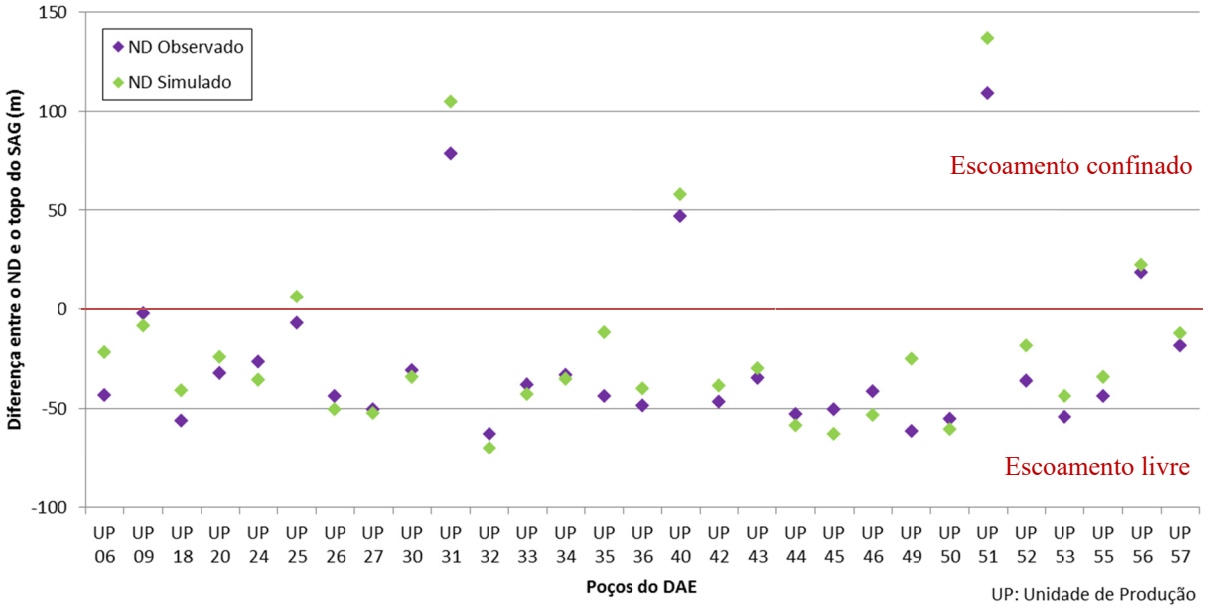


Figura 38 - Diferença entre os níveis dinâmicos simulados (verde) e observados (roxo) nos poços e a respectiva cota do topo do SAG para vazões médias do ano de 2014

Os poços do DAE que apresentam níveis piezométricos acima do topo do aquífero, ou seja, escoamento confinado (UP 25, UP 31, UP 40, UP 51, UP 56) estão localizados nas regiões norte, nordeste e leste do município (Figura 39). Em regime de escoamento livre, o Sistema Aquífero Guarani pode ficar mais susceptível à contaminação devido às variações no gradiente hidráulico.

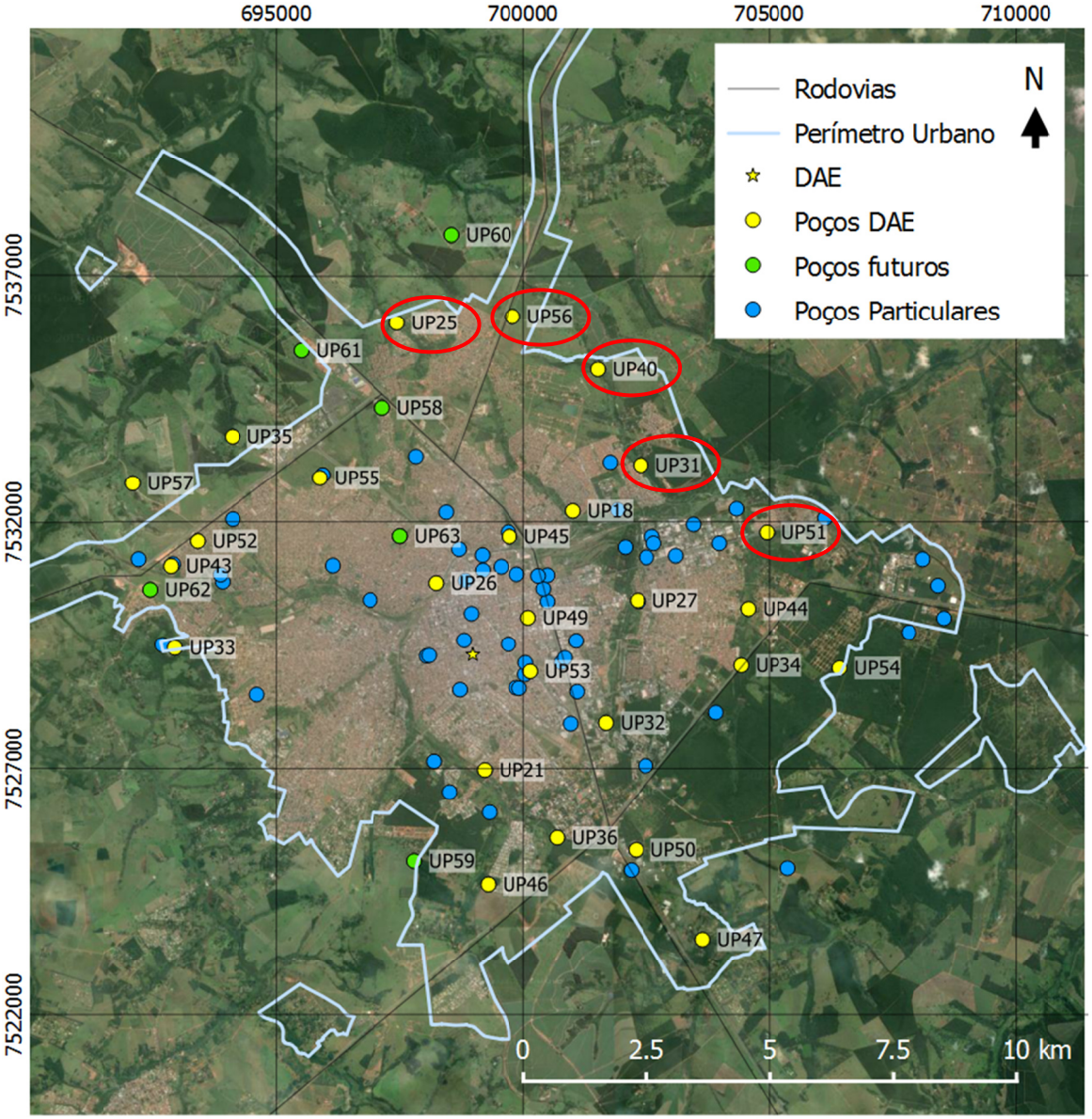


Figura 39 - Poços públicos do SAG no município de Bauru com nível potenciométrico acima do topo do aquífero para as condições de bombeamento de 2014 destacados por uma elipse em cor vermelha

5.5 Cenários futuros

Os cenários futuros de explotação com as respectivas vazões médias anuais dos poços do SAG estão resumidos na Tabela 19.

Tabela 19 - Vazão média anual dos poços públicos e particulares do SAG por cenário futuro de explotação

Cenário	Resumo dos cenários em 2034	Vazão total dos poços (m^3/h)
C1	Explotação dos poços prevista pelo DAE	4.465
C2	Redução de 10% da vazão dos poços em C1	4.063
C3	Redução de 20% da vazão dos poços em C1	3.662
C4	Redução de 10% da vazão dos poços na área central	4.190
C5	Redução de 20% da vazão dos poços na área central	3.916
C6	Explotação apenas por poços do DAE em C1	4.017
C7	Explotação apenas por poços particulares em C1	448

Na Figura 40, são apresentados os mapas potenciométricos do SAG sob o regime de explotação dos cenários C1 a C5. Os resultados representam o escoamento no aquífero após atingido o estado estacionário.

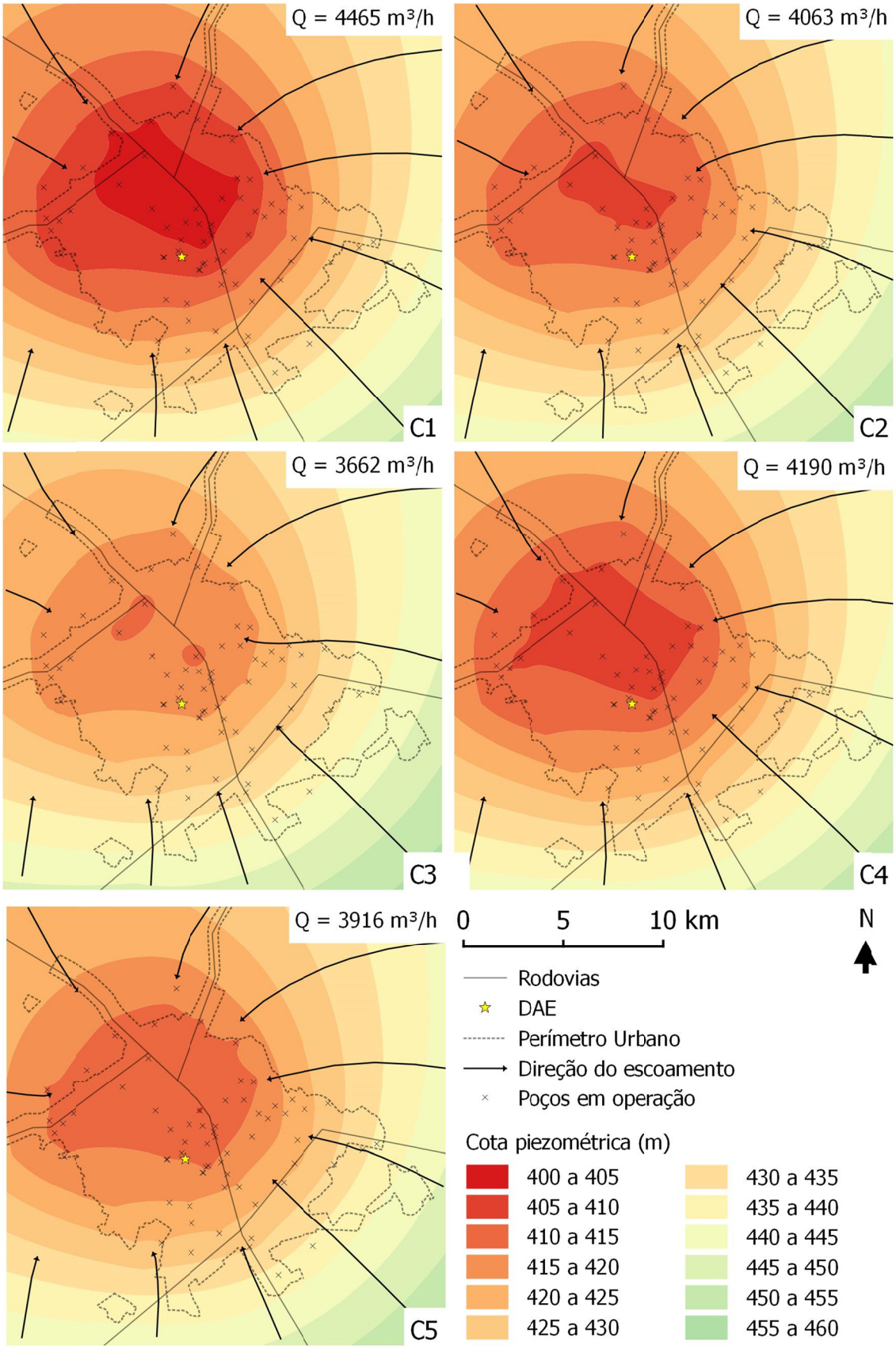


Figura 40 - Potenciometria e escoamento no SAG simulados sob condições de explotação de C1, C2, C3, C4 e C5 na cidade de Bauru

No centro, norte e leste da cidade de Bauru são observadas as cotas mais baixas dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 (ver valores na Tabela 20).

Tabela 20 - Valores mínimos de cota piezométrica simulados para os cenários de explotação futuros do SAG na cidade de Bauru

Cenário	Cota piezométrica (m)
C1	400 a 405
C2	405 a 410
C3	410 a 415
C4	405 a 410
C5	405 a 410

Na Figura 41, são apresentados os mapas potenciométricos do SAG sob o regime de explotação dos cenários C6 e C7. Os resultados representam o escoamento no aquífero após atingido o estado estacionário.

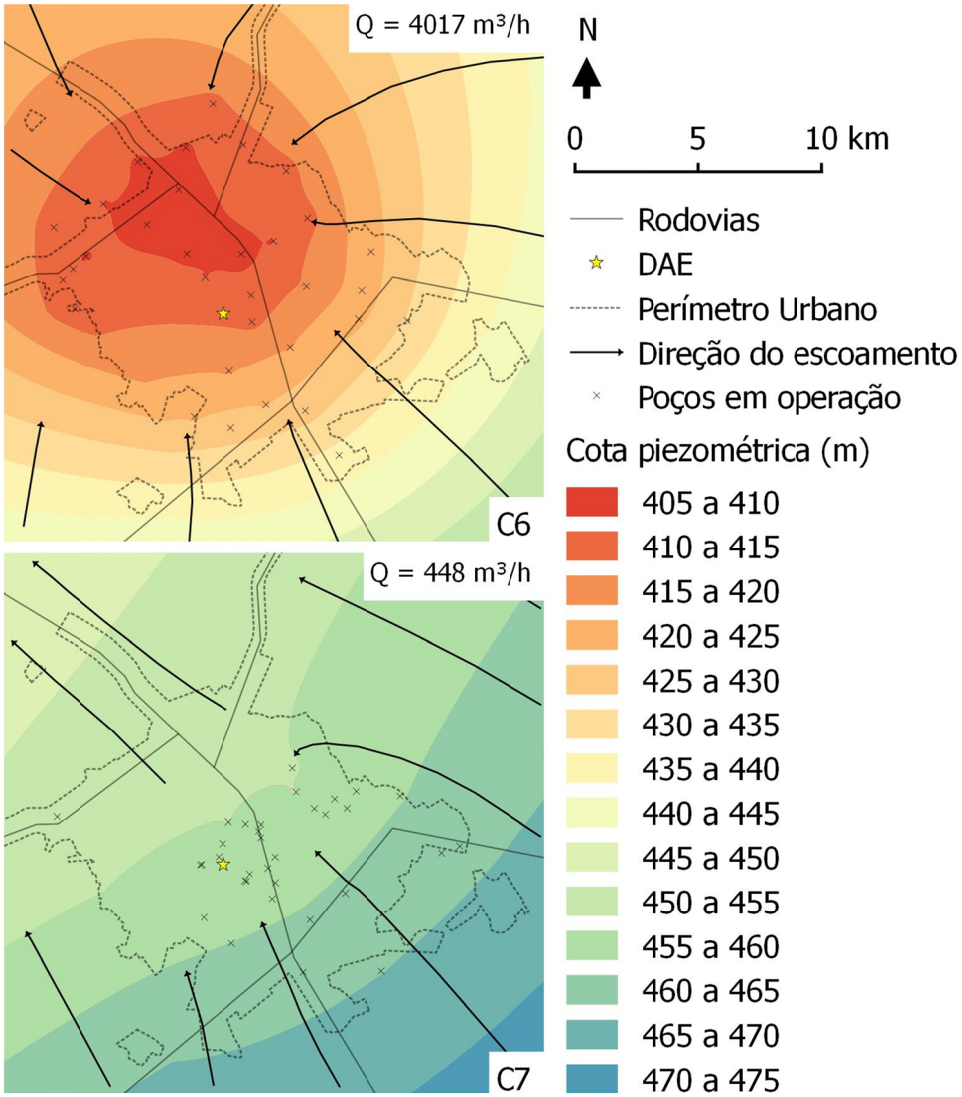


Figura 41 - Potenciometria e escoamento do SAG sob condições de explotação de C6 e C7 na cidade de Bauru

No norte da cidade de Bauru são observadas as cotas piezométricas mais baixas do cenário C6, sendo as cotas mais baixas do cenário C7 observadas no nordeste da área de estudo (ver valores na Tabela 21).

Tabela 21 - Valores mínimos de cota piezométrica simulados para os cenários de explotação futuros do SAG na cidade de Bauru

Cenário	Cota piezométrica (m)
C6	405 a 410
C7	445 a 450

Os mapas potenciométrico dos cenários C6 e C7 mostram que os poços particulares têm menor influência no rebaixamento dos níveis potenciométricos do que os poços públicos (ver item 5.6). Entre os particulares, os dois poços do Frigorífero Mondelli são os maiores responsáveis pela alteração do escoamento e rebaixamento dos níveis potenciométricos. A vazão média anual desses poços é de 144 m³/h, o que corresponde a 31% da vazão total bombeada pelos poços particulares (448 m³/h).

5.6 Rebaixamento do SAG na cidade de Bauru

O rebaixamento do nível potenciométrico do SAG foi calculado pela diferença entre as cotas piezométricas simuladas do cenário inicial e do cenário de explotação analisado. Dessa forma, tem-se uma estimativa de quantos metros o nível potenciométrico rebaixa até atingir o regime estacionário, devido à explotação de água subterrânea na cidade de Bauru.

A Figura 42 apresenta o rebaixamento do nível potenciométrico para os cenários de explotação dos anos simulados de 1988 a 2014.

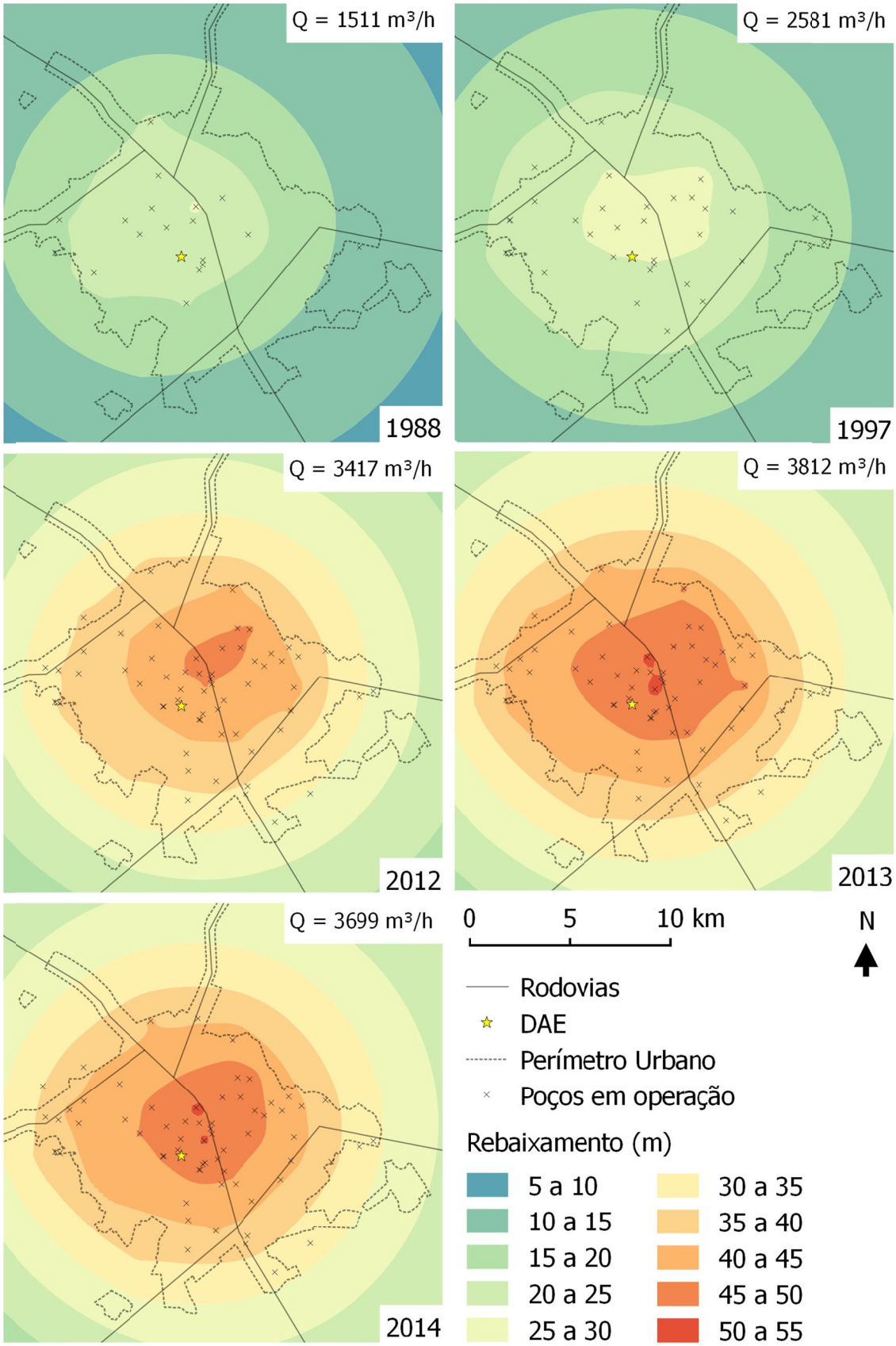


Figura 42 - Rebaixamento potenciométrico no SAG, em regime permanente, sob condições de explotação de 1988, 1997, 2012, 2013 e 2014 na cidade de Bauru

O rebaixamento é maior em condições de explotação dos anos de 2013 e 2014. Na Figura 43 são apresentadas as variações de vazão média entre os anos de 2013 e 2014. A variação de vazão dos poços não indicados na Figura 43 é inferior a 2 m³/h.

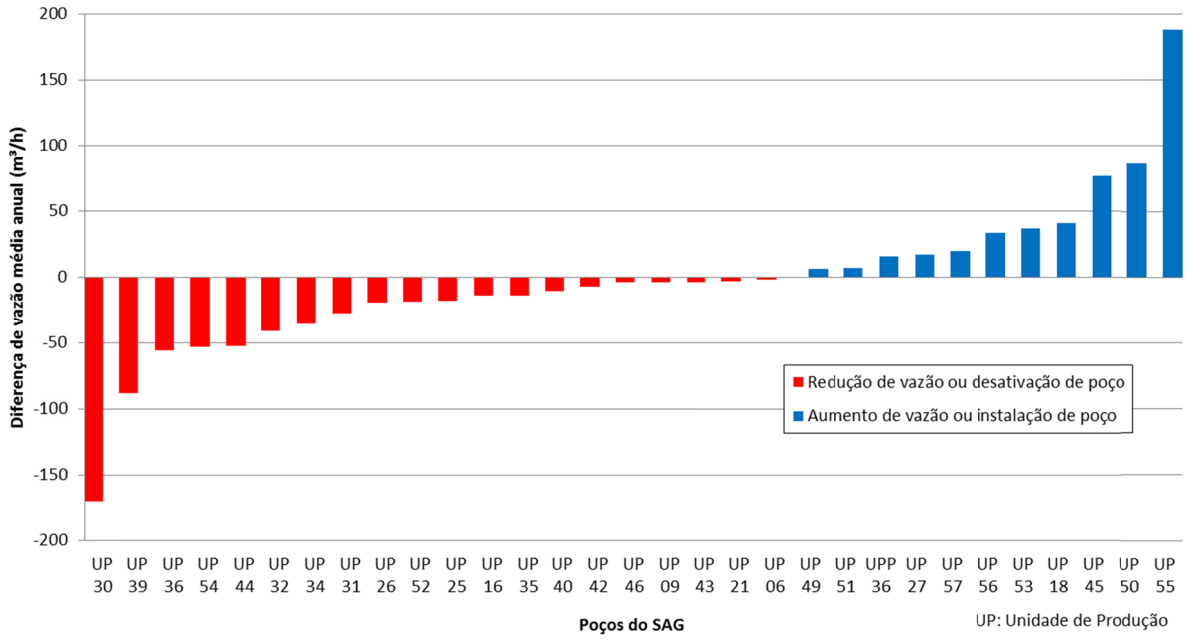


Figura 43 - Diferença de vazão média dos poços do SAG entre 2013 e 2014

De 2013 a 2014, houve o incremento da vazão explotada por alguns poços e a instalação do poço UP 55 Roosevelt III. Contudo, o decréscimo de vazão ocasionado por outros poços e pela desativação do poço UP 30 Jaraguá II foi maior. Como resultado, a vazão média explotada pelos poços públicos do SAG entre 2013 e 2014 reduziu de 3.699 para 3.812 m³/h, ou seja, uma redução de 114 m³/h.

A comparação entre esses dois cenários mostra como a redução de 114 m³/h pode impactar o sistema de escoamento no SAG na área de estudo. Este valor equivale à vazão média do poço UP 35 Distrito III - IPA em 2014 (110 m³/h). Observa-se no cenário de 2013, que o rebaixamento pode atingir a faixa de 50 a 55 m, onde estão localizados os poços UP 49 Cardia, UP 45 Primavera e UP 18 Beija-Flor (Santa Luzia).

Os mapas da Figura 44 apresentam o rebaixamento dos cenários de explotação C1 a C5.

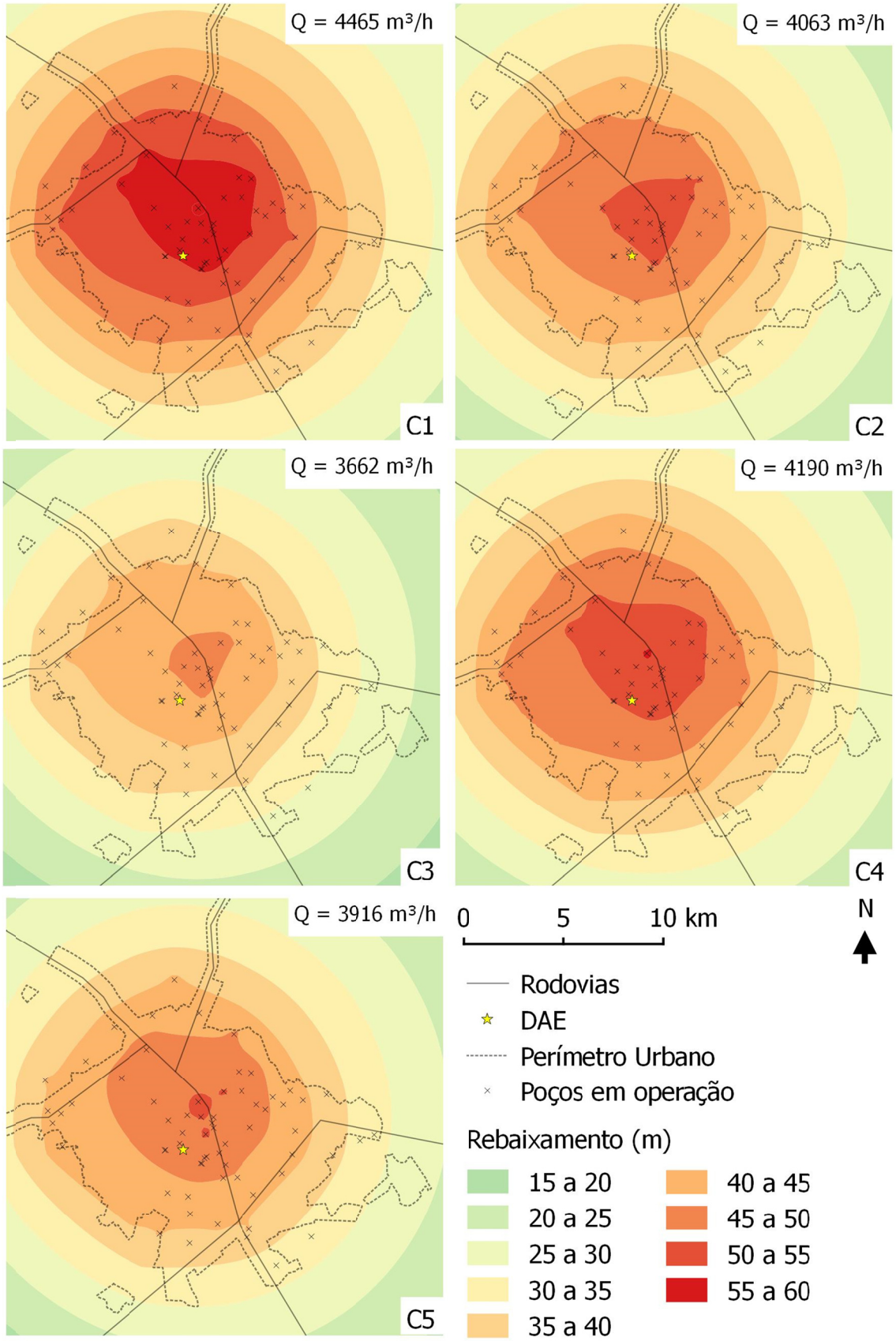


Figura 44 - Rebaixamento do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C1 a C5 na cidade de Bauru

As principais regiões com rebaixamento mais intenso (de 50 a 60 m) no cenário C1 são o centro, região adensada próxima ao centro, regiões de lotes médios e pequenos e áreas de expansão (ao norte). Nas regiões de lotes grandes, de expansão industrial e de expansão urbana (ao sul) o rebaixamento é menor.

No mapa do cenário C1, os rebaixamentos são da ordem de 55 a 60 m próximo aos poços UP 18, UP 26, UP 45, UP 49, UP 53 e UP 55 (centro da área de estudo). Os rebaixamentos na região central são menores nos demais cenários, atingindo 50 a 55 m nos cenários C2, C4 e C5, e 45 a 50 m no cenário C3.

Os mapas da Figura 45 apresentam o rebaixamento dos cenários de explotação apenas com poços do DAE (C6) e particulares (C7).

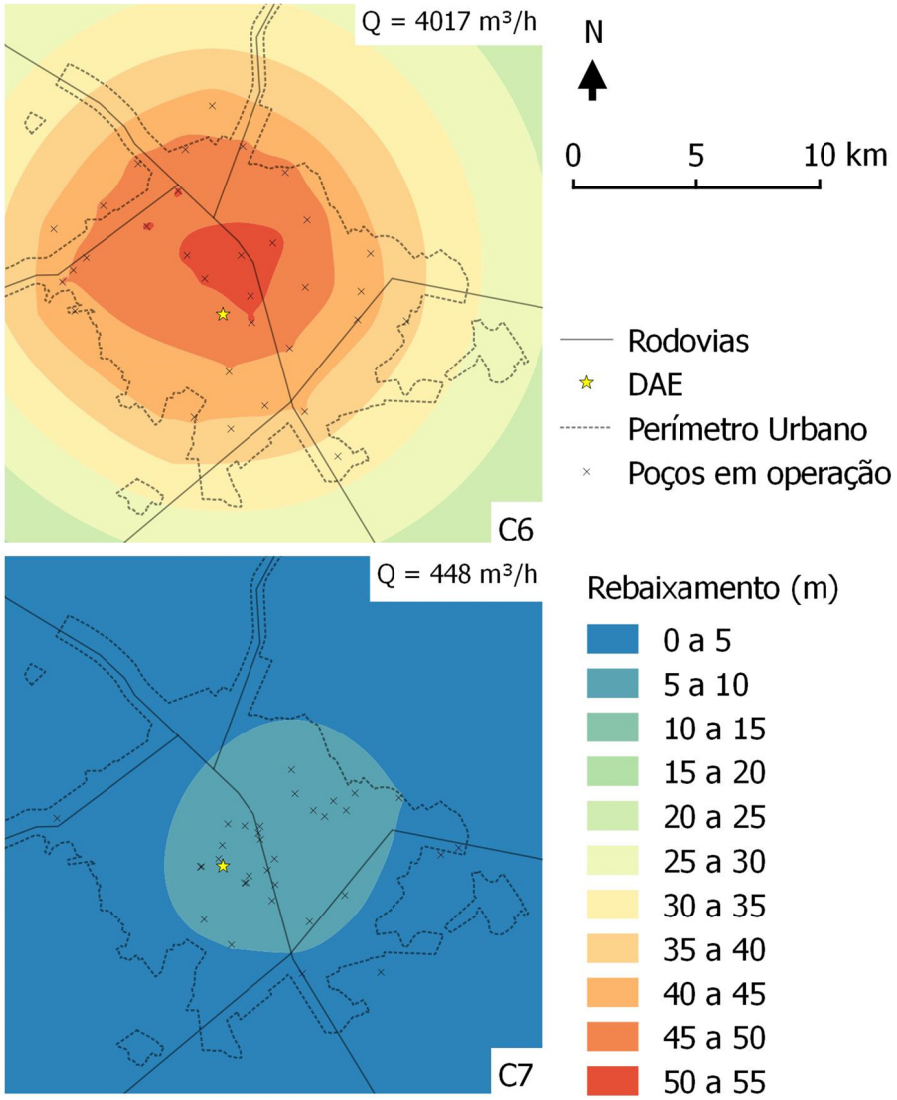


Figura 45 - Rebaixamento do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C6 e C7 na cidade de Bauru

Pelo mapa do cenário C6 (apenas poços do DAE) observa-se que, embora a vazão extraída por poços particulares seja menor, sua interferência no rebaixamento atinge valores de até 10 m, com maior impacto no centro e nordeste da cidade (ver mapa do cenário C7), onde estão localizados os poços UP 18, UP 21, UP 26, UP 27, UP 31, UP 32, UP 34, UP 40, UP 44, UP 45, UP 49, UP 51, UP 53 e UP 63.

O rebaixamento adicional do nível potenciométrico do SAG foi estimado a partir do cenário atual (2014), caso o sistema de explotação seja submetido às condições de explotação dos cenários C1, C2, C3, C4 ou C5. A Figura 46 mostra o rebaixamento do nível potenciométrico do SAG, calculado pela diferença entre as cotas piezométricas simuladas do cenário de 2014 e do cenário futuro analisado.

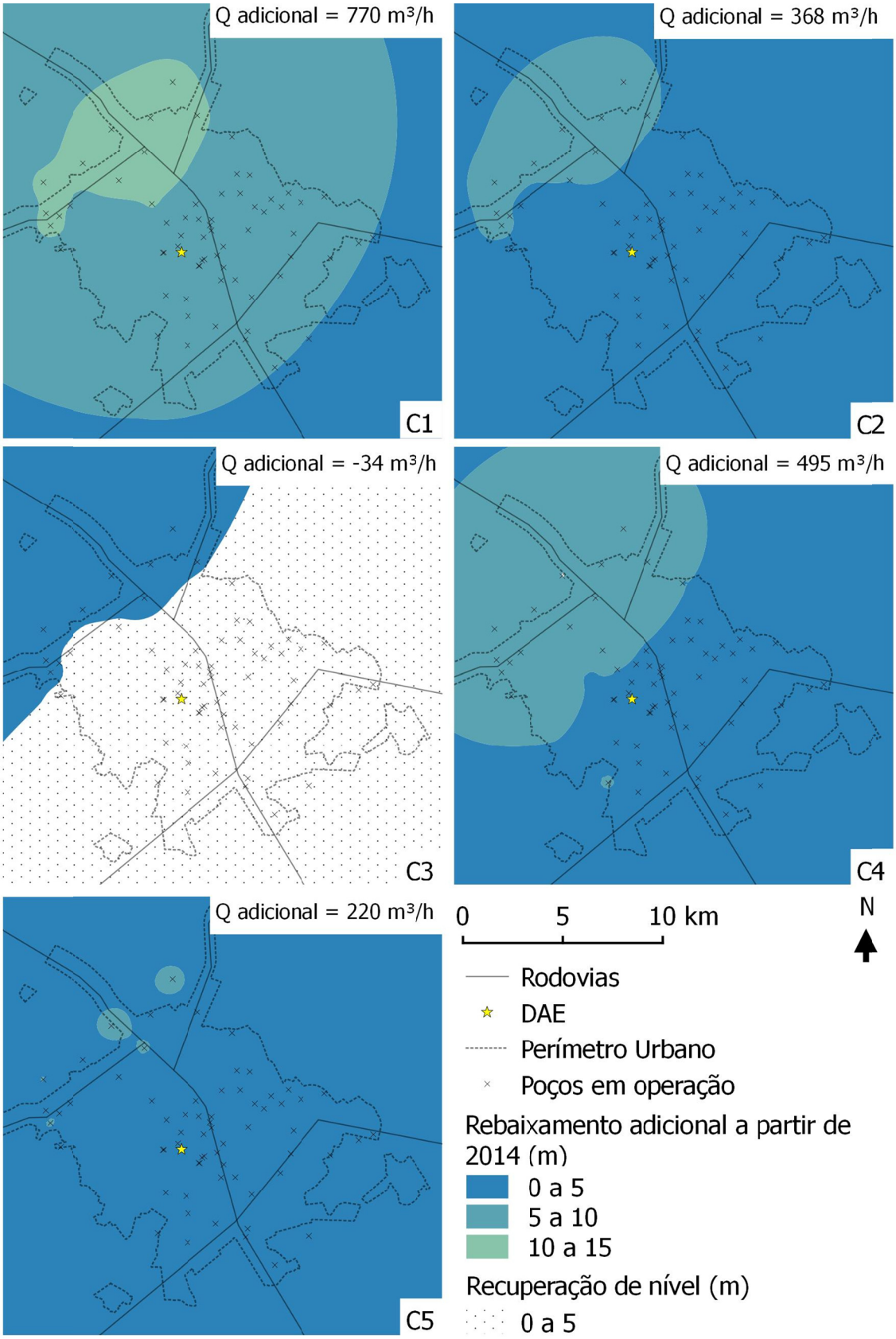


Figura 46 - Rebaixamento adicional do SAG em regime permanente sob condições de explotação dos cenários C1 a C5 na cidade de Bauru com relação ao ano de 2014

O cenário C1 (Q_{total} = 4.465 m³/h) apresenta rebaixamento adicional superior a 10 m, localizado no entorno dos poços da zona norte: UP 25, UP 35, UP 43, UP 55, UP 56, UP 57, UP 58, UP 60, UP 61, UP 62. Em longo prazo, o rebaixamento previsto sob condições de explotação dos cenários C2, C3, C4 e C5 é inferior a 10 m em toda área estudada.

Observa-se que o rebaixamento de 5 a 10 m sob condições de explotação de C2 (Q_{total} = 4.063 m³/h) e C4 (Q_{total} = 4.190 m³/h) ocorre em regiões similares (norte, noroeste e oeste da área de estudo). Contudo, sua área de ocorrência em C2 é menor do que em C4.

A redução em 20% na vazão dos poços da área central (C5, Q_{total} = 3.916 m³/h) limita o rebaixamento em até 5 m em quase toda a área estudada. A redução de 20% em todos os poços (C3, Q_{total} = 3.662 m³/h), por sua vez, resulta na recuperação de até 5 m no nível piezométrico em praticamente toda a cidade de Bauru, exceto a nordeste da área de estudo.

Para melhor ilustrar o rebaixamento do nível piezométrico na cidade de Bauru nos cenários de 2014 e 2034, em regime permanente, foram elaborados os perfis das Figuras 48 a 50, de acordo com o cortes do mapa da Figura 47.

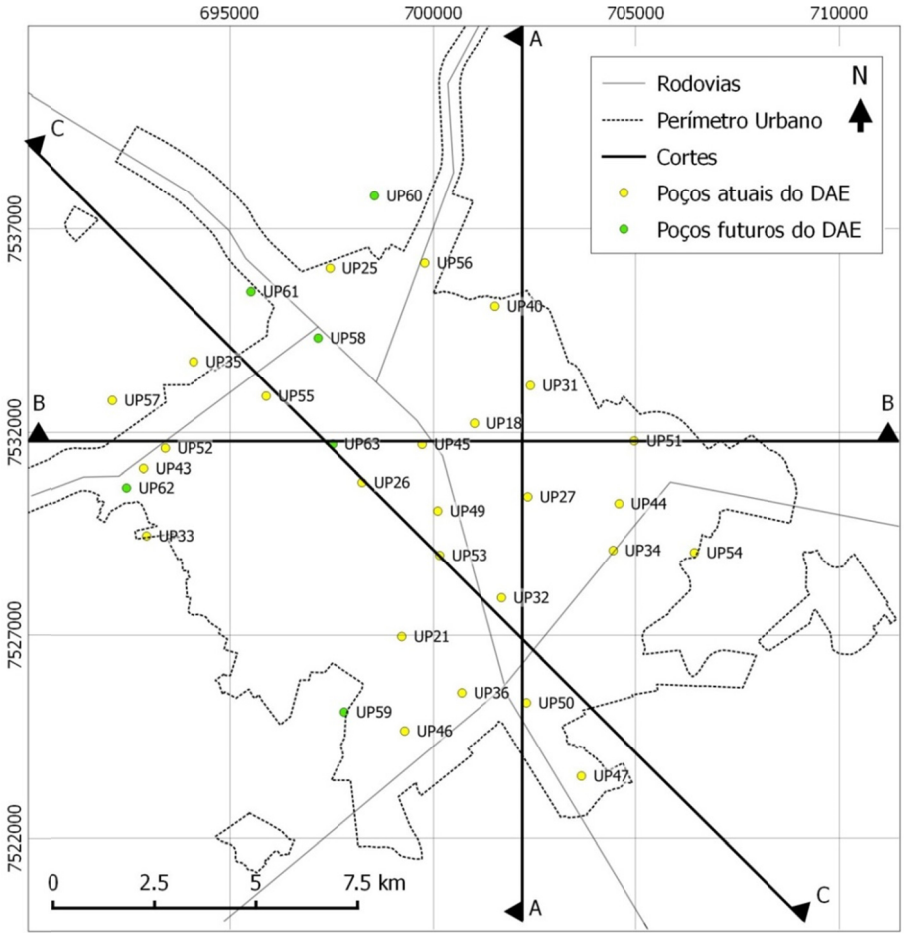


Figura 47 - Cortes AA, BB e CC na área de estudo para representação da potenciometria do SAG em perfil

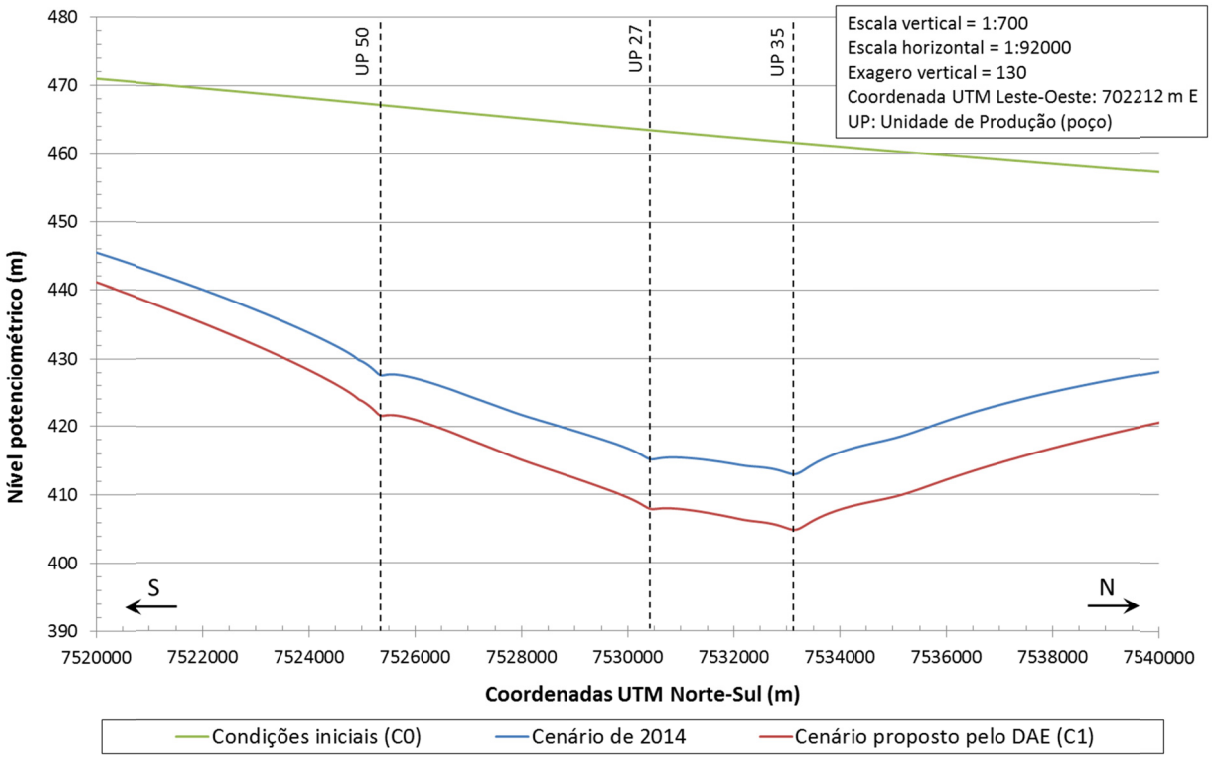


Figura 48 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte AA

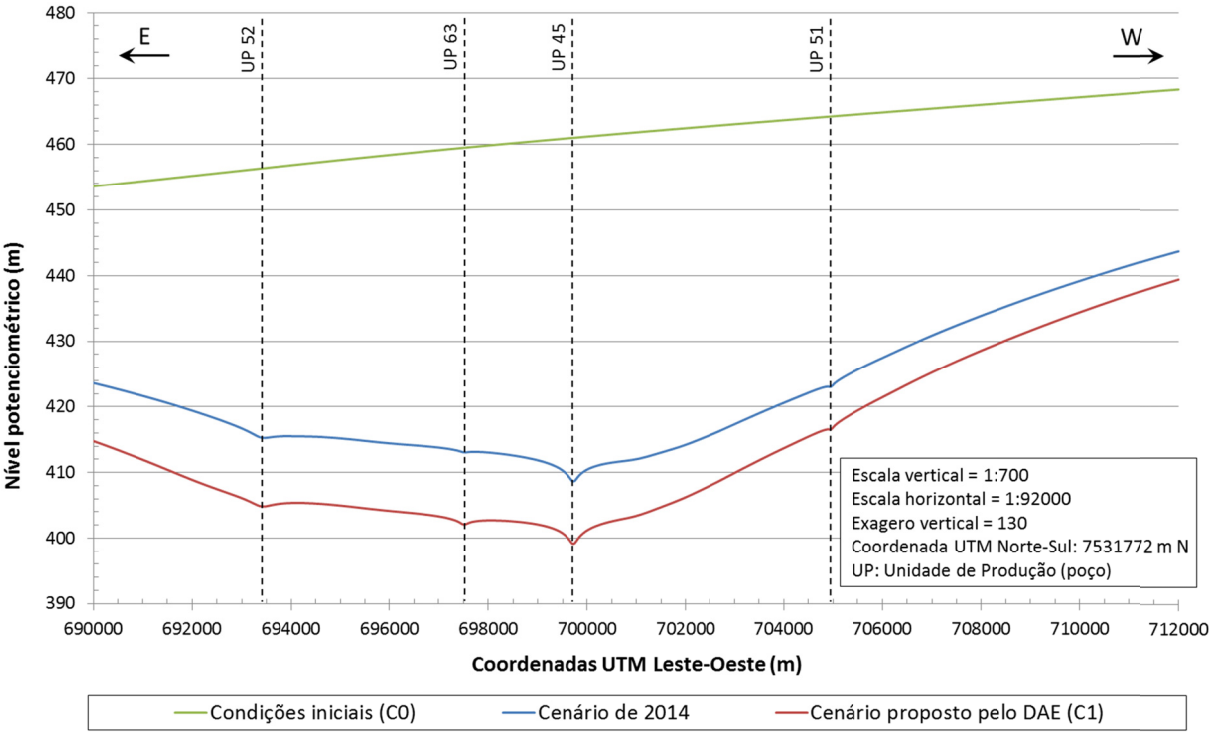


Figura 49 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte BB

Na Figura 49, verifica-se que o cone de rebaixamento ocasionado pelo poço UP 45 é maior do que aqueles formados pelos demais poços. Isso ocorre, pois a vazão média de

243 m³/h do UP 45 é maior do que a vazão dos demais poços apresentados, tanto nos cenários de 2014 quanto em C1. A Figura 50 mostra o rebaixamento do nível piezométrico na cidade de Bauru para o Corte CC, de mesma direção do escoamento regional do aquífero.

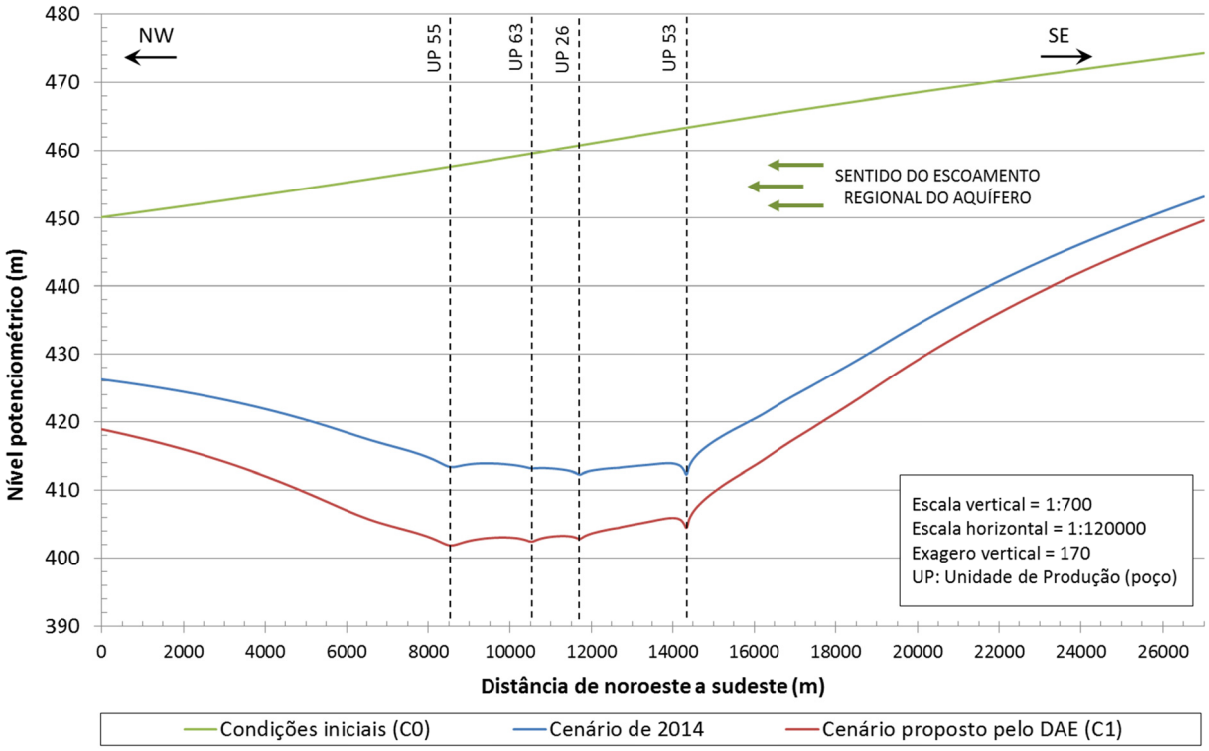


Figura 50 - Potenciometria do SAG em regime permanente antes da explotação de água, no cenário de 2014 e no cenário previsto pelo DAE (C1) - Corte CC

Na Figura 50, nota-se que o rebaixamento é maior a jusante do centro da cidade, do que a montante, devido ao sentido do escoamento regional. Em todos os perfis apresentados, o rebaixamento ocasionado na área urbana (centro da área de estudo) é maior, devido à maior concentração e vazão dos poços.

5.7 Relação entre a produção e o consumo de água em Bauru

Os cenários de bombeamento C1 a C5 representam diferentes condições de explotação de água do SAG para o abastecimento público de Bauru. Contudo, a viabilidade em satisfazer tais condições depende da variação no consumo de água e do índice de perdas ao longo dos anos. Para saber se a produção de água nos cenários futuros é maior do que a vazão que deve ser distribuída à população, até 2034, a produção total de água pelo DAE (ETA e poços do SAB e do SAG) foi comparada com o consumo diário da população urbana mais as perdas.

As vazões que devem ser distribuídas à população urbana no período de 2014 a 2034 foram calculadas para consumo per capita de 184 litros/hab.d e coeficiente do dia de maior consumo de 1,2 (HIDROSAN, 2014). A Tabela 22 mostra as projeções da população, do índice de perdas (físicas e aparentes), das vazões distribuídas médias diárias e das vazões distribuídas no dia de maior consumo no município de Bauru (período de 2014 a 2034). As vazões distribuídas foram calculadas pelas Equações 67 e 68 (item 4.9).

Tabela 22 - Projeções da população urbana e das vazões distribuídas médias diárias e do dia de maior consumo no período de 2014 a 2034 para a cidade de Bauru

Ano	População urbana (hab)	IP (%)	Vazão média diária distribuída (m^3/d)	Vazão distribuída no dia de maior consumo (m^3/d)
2014	357.140	48,7	128.097	153.716
2015	362.039	46,7	124.982	149.978
2016	367.004	44,7	122.114	146.536
2017	372.036	42,7	119.467	143.361
2018	377.137	40,7	117.020	140.425
2019	382.305	38,7	114.754	137.705
2020	387.544	37,8	114.619	137.542
2021	392.854	36,9	114.508	137.410
2022	398.235	36,0	114.421	137.305
2023	403.689	35,0	114.357	137.228
2024	409.216	34,1	114.315	137.178
2025	414.818	33,2	114.295	137.155
2026	420.496	32,3	114.297	137.156
2027	426.250	31,4	114.318	137.182
2028	432.082	30,5	114.360	137.232
2029	437.993	29,6	114.421	137.305
2030	443.983	28,7	114.501	137.402
2031	450.055	27,7	114.600	137.520
2032	456.208	26,8	114.717	137.660
2033	462.444	25,9	114.852	137.822
2034	468.765	25,0	115.004	138.004

A Figura 51 apresenta a projeção da população urbana, do índice de perdas e das vazões médias e máximas diárias distribuídas de 2014 a 2034 na cidade de Bauru.

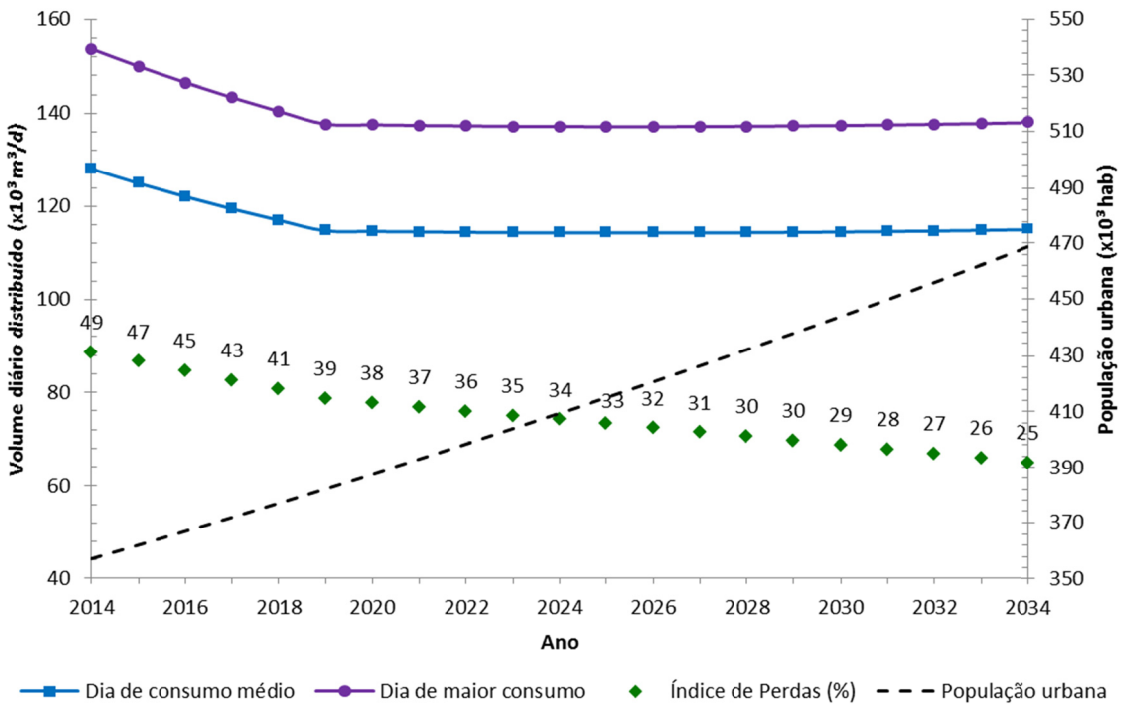


Figura 51 - Projeção da população urbana, do índice de perdas e das vazões médias e máximas diariamente distribuídas de 2014 a 2034 na cidade de Bauru

Observa-se no período de 2014 a 2034 que, embora a população aumente em mais de 100 mil habitantes, o percentual de água desperdiçada (índice de perdas) diminui. De 2014 a 2019 há um decréscimo das vazões diárias a ser distribuídas (médias e máximas), que ocorre devido à maior taxa de redução do índice de perdas neste período. No período de 2019 a 2034, a variação das vazões distribuídas é menor e as vazões diárias destinadas à população são mantidas praticamente constantes.

As vazões de explotação dos poços do DAE, considerando poços do SAG e do SAB, são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Vazão média anual dos poços públicos do SAG e do SAB por cenário futuro de explotação

Cenário	Resumo dos cenários em 2034	Vazão total dos poços (m^3/d)
C1	Explotação dos poços prevista pelo DAE	97258
C2	Redução de 10% da vazão dos poços em C1	87617
C3	Redução de 20% da vazão dos poços em C1	77976
C4	Redução de 10% da vazão dos poços na área central	90662
C5	Redução de 20% da vazão dos poços na área central	84066

Para garantir o abastecimento de água para a população urbana de 468.765 hab, em 2034, será necessária a produção de 115.000 m³/d, em média, e de 138.000 m³/d, no dia de

maior consumo. No gráfico da Figura 52 é apresentada a vazão total produzida na cidade de Bauru, considerando a explotação dos poços para cada cenário (C1 a C5) e a produção de 46.094 m³/d da Estação de Tratamento de Água (ETA).

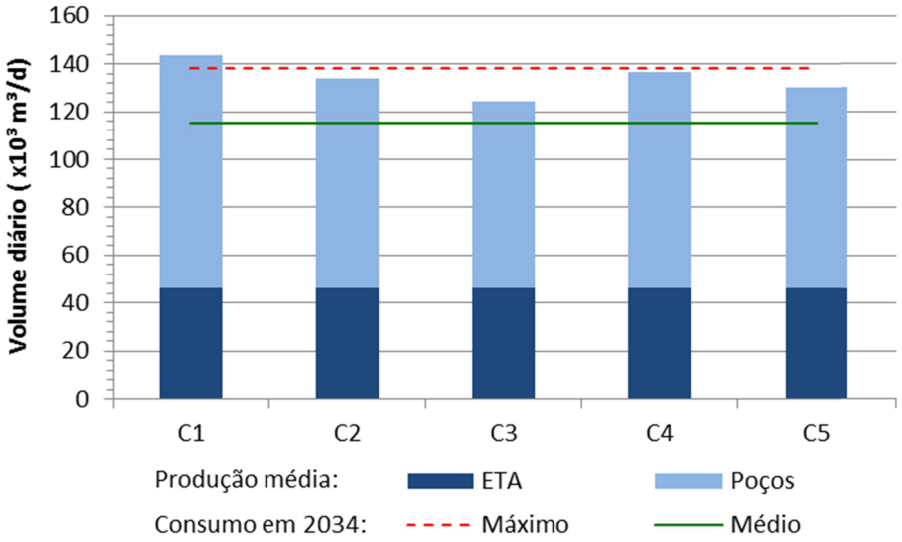


Figura 52 - Projeção das vazões médias diárias produzidas em cada cenário e das vazões média e máxima diárias distribuídas em 2034

Verifica-se que há um superávit de produção em todos os cenários, quando comparado à demanda média diária. Contudo, nos dias de máximo consumo há déficit de produção em quase todos os cenários. Apenas o volume de água produzido no cenário C1 atende a demanda de água (consumo e perdas) no dia de maior consumo. Logo, embora o rebaixamento do nível potenciométrico seja menor para os cenários C2, C3, C4 e C5, suas produções não são suficientes para abastecer o município de Bauru nos dias de maior consumo.

Um comportamento similar é também observado ao se comparar a vazão média produzida e as vazões distribuídas nos anos de 2020 e 2025. Logo, é possível explorar o Sistema Aquífero Guarani de maneira mais eficiente do que o previsto atualmente pelo DAE (C1). Para garantir o abastecimento de água em Bauru, pode ser adotado o cenário 2, 3, 4 ou 5 de maneira flexível: mantê-lo na maior parte do ano e, nos dias de maior consumo, adotar o cenário C1. Além de reduzir o rebaixamento do SAG na área de estudo, essa medida resultaria em um menor consumo de energia elétrica, devido à menor vazão média anual bombeada.

5.8 Avaliação do escoamento na região de Bauru

Uma das vantagens de se utilizar o Método de Elementos Analíticos é que seu equacionamento permite a simulação do potencial de descarga e da função de corrente considerando o domínio infinito. Ou seja, embora as características hidrogeológicas do aquífero fora da área de estudo não tenham sido analisadas detalhadamente, é possível simular o escoamento do SAG em escala regional.

Calculou-se o escoamento do SAG em escala regional, usando as mesmas equações governantes e considerando apenas poços do município de Bauru. Foram analisadas as condições de explotação de 2014 e do cenário C1, com a extração de 3.247 e 4.017 m³/h, respectivamente. A região analisada tem área de 10.404 km². Foram mantidos os mesmos modelo conceitual e parâmetros hidrogeológicos do modelo analítico em escala local.

Pelo mapa da Figura 53 nota-se que, caso as vazões médias de explotação do ano de 2014 sejam mantidas em longo prazo, o rebaixamento do nível piezométrico atingirá as cidades vizinhas. Contudo, somente as cidades mais próximas serão afetadas por rebaixamentos maiores do que 10 m (Piratininga e Agudos).

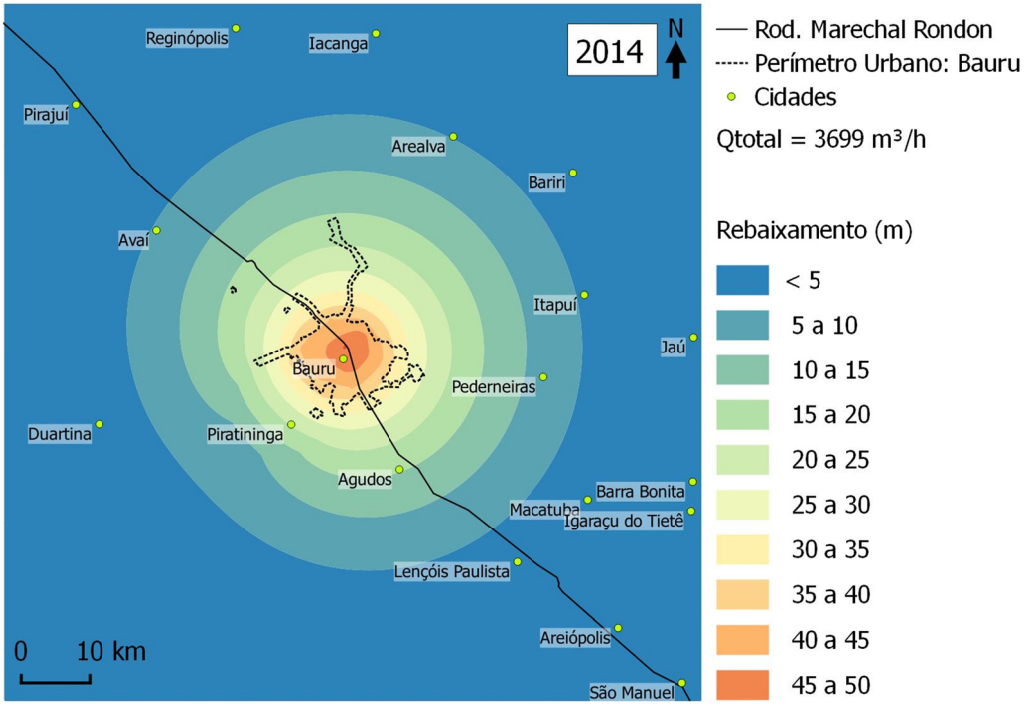


Figura 53 - Rebaixamento regional do SAG sob as condições de explotação de 2014 da cidade de Bauru

Quanto ao escoamento no SAG, observa-se no mapa da Figura 54 a região em que o escoamento uniforme contribui diretamente para a vazão captada pelos poços (zona de captura).

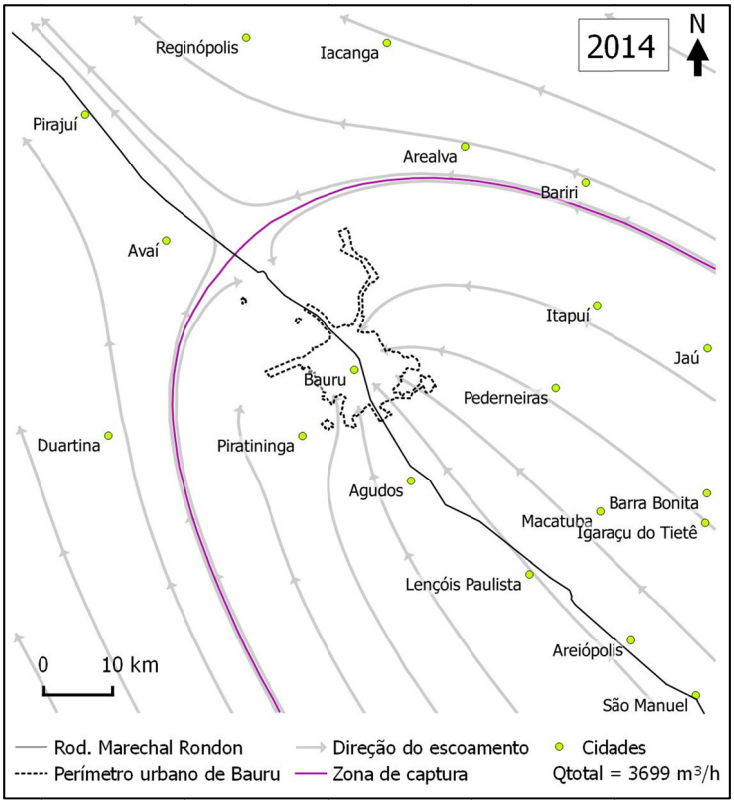


Figura 54 - Escoamento regional do SAG e zona de captura dos poços da cidade de Bauru sob condições de explotação de 2014

Pelo mapa da Figura 55 nota-se que, se o cenário de explotação C1 for adotado e mantido em longo prazo, o rebaixamento do nível piezométrico atingirá as cidades vizinhas. Da mesma maneira que no caso do cenário de 2014, somente as cidades mais próximas serão afetadas por rebaixamentos maiores do que 10 m (Piratininga e Agudos).

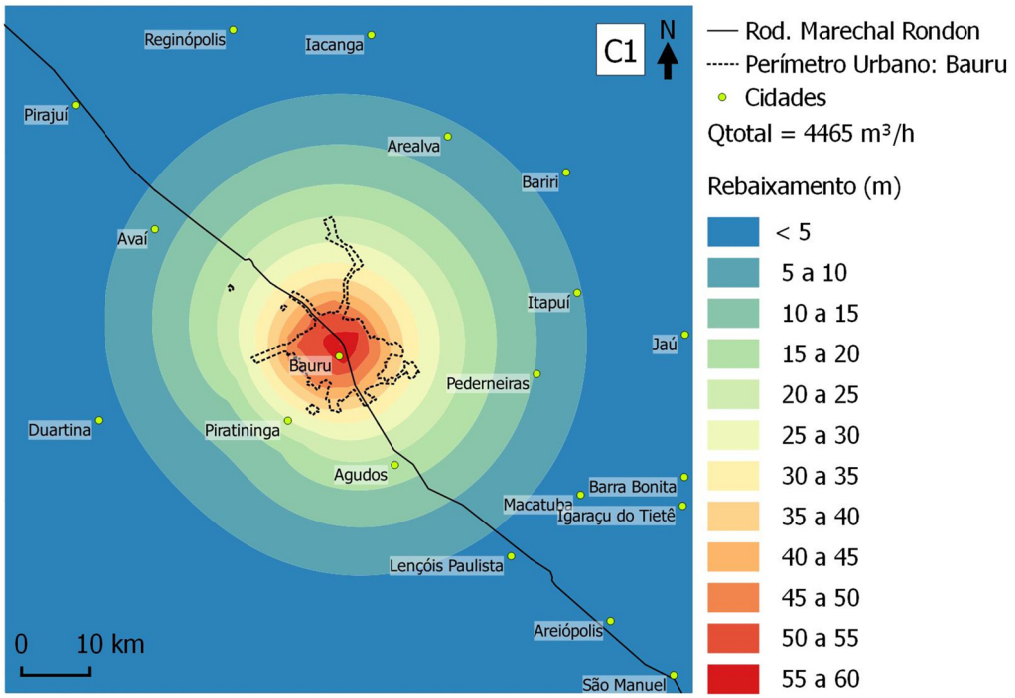


Figura 55 - Rebaixamento regional do SAG sob as condições de explotação do cenário C1 da cidade de Bauru

O sentido do escoamento de água no SAG e a zona de captura obtidos pela simulação do cenário C1 podem ser observados no mapa da Figura 56.

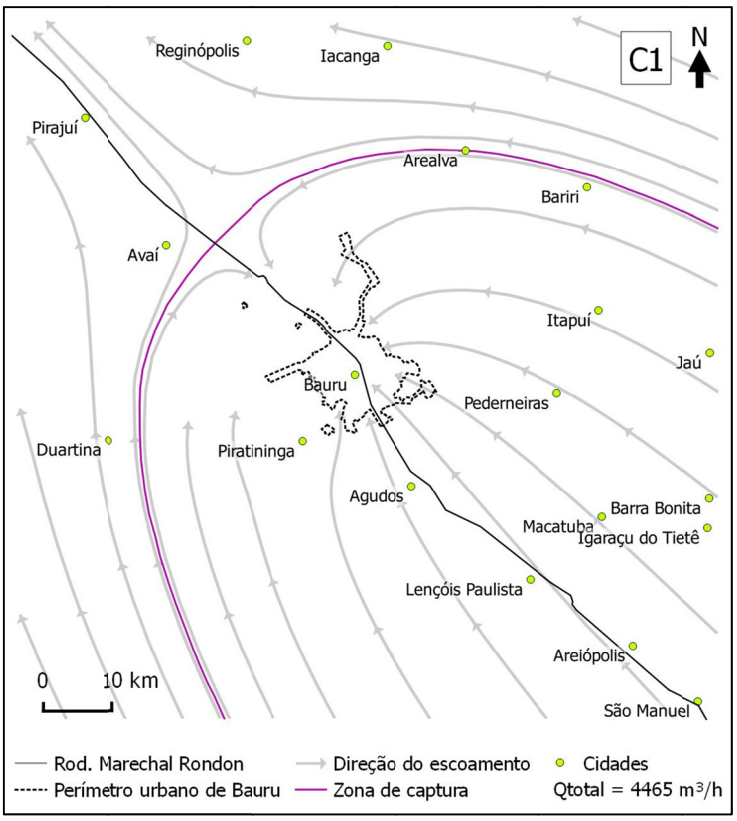


Figura 56 - Escoamento regional do SAG e zona de captura dos poços da cidade de Bauru sob condições de explotação do cenário C1

Ao comparar as zonas de captura dos cenários de 2014 e C1, observa-se que o aumento da explotação dos poços aumenta a zona de captura, que passa a incluir as cidades de Bariri e Arealva.

A largura das zonas de captura foi estimada para uma distância de 400 km da cidade de Bauru, para os cenários de 2014 e C1. A multiplicação da largura pelo vetor de descarga uniforme ($Q_0 = 7{,}6 \cdot 10^{-6}\ m^2/s$) fornece a vazão extraída do sistema de escoamento. Essa vazão deve ser igual à vazão dos poços, pois esta é a única forma de extração de água do sistema considerado no modelo analítico. As larguras das zonas de captura, as vazões extraídas resultantes e as vazões dos poços, para os cenários de 2014 e C1, são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Informações das zonas de captura dos poços para os cenários de 2014 e C1

Cenário	**Largura (km)**	**Vazão resultante (m^3/h)**	**Vazão dos poços (m^3/h)**
2014	134	3636	3708
C1	159	4320	4464

Observa-se que as vazões resultantes da multiplicação da largura por Q_0 são menores do que as vazões dos poços em 72 m^3/h e 144 m^3/h, para os cenários de 2014 e C1, respectivamente. Essa largura deve aumentar quanto mais afastada for a sua medição, com relação ao início da zona de captura, até atingir um valor constante. Neste caso, a vazão resultante deve ser igual à vazão dos poços.

6 CONCLUSÕES

O escoamento de água subterrânea do SAG foi simulado para cenários passados, presente e futuros na cidade de Bauru/SP e região, por meio do Método de Elementos Analíticos. Os mapas potenciométricos e de rebaixamento gerados mostram o comportamento do aquífero em regime permanente, considerando vazões médias anuais e um modelo conceitual simplificado.

Durante a etapa de calibração do modelo, verificou-se que o modelo elaborado pelo Método de Elementos Analíticos fornece resultados para a análise do escoamento e do rebaixamento na cidade de Bauru, com desvio de cerca de 5 m com relação ao valor esperado nos poços usados para calibração.

Os mapas potenciométricos dos cenários estudados mostraram que:

- Em geral, as vazões explotadas aumentaram no decorrer dos anos fazendo com que o sentido do escoamento regional seja cada vez mais direcionado para a área urbana de Bauru. Dentre os cenários de 1988 a 2014 e C1 a C5, apenas em 1988 há uma região da área de estudo (ao norte) onde a água em escoamento não contribui para a vazão extraída pelos poços.
- No cenário de explotação previsto pelo DAE para 2034 (C1), os níveis potenciométricos podem atingir cotas mínimas de até 400 m na região central da cidade. Quando reduzida a vazão dos poços em 20%, a cota piezométrica mínima é de 410 m. Nos demais cenários (redução de 10% de vazão em todos os poços e de 10 e 20 % nos poços da área central) o valor mínimo é de 405 m.

Dentre as condições de explotação de água dos anos de 1988, 1997, 2011, 2012, 2013 e 2014, a de 2013 resulta em maior rebaixamento, atingindo valores na faixa de 50 a 55 m, nas proximidades dos poços UP 49 Cardia, UP 45 Primavera e UP 18 Beija-Flor (Santa Luzia). As cotas piezométricas mínimas observadas para o cenário de 2013 estão em torno de 415 m.

Embora a vazão extraída por poços particulares seja menor (448 m^3/h), o rebaixamento ocasionado por esse poços com relação ao estado inicial do SAG atinge valores de até 10 m, com maior impacto no centro e nordeste da cidade. Dentre os particulares, os poços do Frigorífico Mondelli são os maiores responsáveis pelo rebaixamento dos níveis

potenciométricos na área de estudo. Estes poços apresentam vazões equivalentes a poços públicos do DAE (em torno de 72 m³/h), logo, é recomendado que também sejam monitorados.

O rebaixamento adicional do nível potenciométrico do SAG, ocasionado pelo cenário previsto pelo DAE (C1) com relação ao cenário atual (2014), é de até 15 m. É possível controlar o rebaixamento adicional em até 5 m no cenário C3 (redução de 20% da vazão em todos os poços) e em até 10 m nos cenários C2, C4 e C5 (redução de 10 % em todos os poços e redução de 10 e 20% nos poços da área central, respectivamente).

As vazões produzidas sob condição de explotação de todos os cenários futuros analisados (C1 a C5) são maiores do que as vazões médias diárias a ser distribuídas nos 3 anos analisados (2020, 2025 e 2034). Contudo, apenas a vazão produzida no cenário C1 é superior às vazões nos dias de maior consumo em 2020, 2025 e 2034. Considerando apenas a quantidade de água, seria possível adotar cenários de menor extração de vazão nos dias de consumo médio (C2 a C5) e adotar o cenário C1 nos dias de maior consumo. Além dos rebaixamentos dos níveis potenciométricos no SAG serem menores, essa medida resultaria em um menor consumo de energia elétrica para o bombeamento de água dos poços.

Com o mesmo modelo computacional, foi possível calcular o potencial complexo e gerar mapas potenciométricos e de escoamento em escala local e regional. Observou-se que, nas cidades de Piratininga e Agudos, os rebaixamentos provocados pela explotação do SAG em Bauru podem ser de até 15 m.

Os mapas das zonas de captura dos poços da cidade de Bauru reforçam o caráter regional do gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. Além disso, nota-se que o aumento das vazões explotadas irá aumentar a zona de captura, incluindo outras cidades na área de contribuição dos poços.

Verificou-se que, uma vez que o sistema de escoamento é simplificado, poucos dados de entrada são necessários, o que é conveniente sendo que estudos de detalhe raramente estão disponíveis. Além disso, os dados dos poços podem ser alterados facilmente por meio de planilhas eletrônicas. Entretanto, para considerar variações no sistema de escoamento (heterogeneidade, anisotropia etc.) a complexidade matemática e computacional aumenta.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são descritas a seguir:

- Considerar outros detalhes ao modelo conceitual definido nesta pesquisa, alterando o tipo e o número de elementos analíticos, e analisar o efeito destes na calibração do modelo;
- Verificar a representatividade do modelo novamente, com novos dados de poços a serem perfurados;
- Aplicar o Método de Elementos Analíticos para modelagem do escoamento de água no SAG em outros municípios em que o aquífero seja confinado e comparar com os resultados obtidos nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, M. F. **Interpolação por splines para modelação de inomogeneidades no Método de Elementos Analíticos: implementação por programação orientada a objetos**. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

ALENCAR, M. F.; WENDLAND, E. C. Método de Elementos Analíticos: uma alternativa para a modelagem de escoamento subterrâneo. **Águas Subterrâneas**, v. 27, p. 110–124, 2013.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. Second ed. [s.l.] Academic Press, 2015.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Hydrogeology of the Mercosul aquifer system in the Paraná and Chaco-Paraná Basins, South America, and comparison with the Navajo-Nugget aquifer system, USA. **Hydrogeology Journal**, v. 7, n. 3, p. 317–336, 1999.

BAKKER, M. et al. Regional groundwater modeling of the Yucca Mountain site using analytic elements. **Journal of Hydrology**, v. 226, n. 3-4, p. 167–178, 1999.

BARNES, R.; JANKOVIĆ, I. Two-dimensional flow through large numbers of circular inhomogeneities. **Journal of Hydrology**, v. 226, p. 204–210, 1999.

BATISTA, J. A. DO N.; PENNER, G. C.; SCHULZ, H. E. **Simulação de alternativas de barreiras hidráulicas para a pluma de poluentes do antigo lixão de São Carlos baseada no Método dos Elementos Analíticos.** XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais**...Cuiabá/MT: 2004

BATISTA, J. A. DO N.; WENDLAND, E.; SCHULZ, H. E. Simulação da interação entre águas subterrâneas e superficiais no aqüífero barreiras na região da Lagoa do Bonfim por elementos analíticos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, p. 107–116, 2007.

BATISTA, J. A. DO N.. **Modelagem de Escoamento em Aqüíferos Longos Baseada no Método de Elementos Analíticos**. Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

BAURU. **LEI 5631, de 22 de agosto de 2008. Institui o Plano Diretor Participativo do Município de Bauru.** Bauru, 2008.

BELCHER, B. W. R.; WELCH, A. H. **Ground-Water Flow Modeling by the U . S . Geological Survey in Nevada : Uses and Approaches.** Carson City, NV, 2006.

BICUDO, C. E. DE M. et al. **Carta de São Paulo: Recursos hídricos no Sudeste: segurança, soluções, impactos e riscos.** Academia Brasileira de Ciências. **Anais**...São Paulo, SP: 2014. Disponível em: <http://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-5926.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2015

C3 CONSULTORIA. **Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP.** Bauru, SP, 2015.

CAVAGUTI, N. **Geologia, Estruturas e Características Hidrogeológicas Mesozóicas da região de Bauru - Estado de São Paulo**. Universidade do Sagrado Coração, Bauru, SP, 1981.

CAVICCHIA, M. E. **Modelo numérico de escoamento subterrâneo na região de São José do Rio Preto – SP**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method of evaluating formation constants and summarizing well-field history. **Ground Water Notes**, n. 7, p. 90–102.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon**. Disponível em: <https://bae.okstate.edu/faculty-sites/Darcy/French/index.htm>. Acesso em: 2 abr. 2016.

DE LANGE, W. J. **Groundwater modeling of large domains with analytic elements**. Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 1996.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. **Relatórios de operação dos poços do Departamento de Água e Esgoto de Bauru.**Bauru, SP, 2015a.

DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. **Informações relativas à instalação de novos poços (informação verbal).** Bauru, SP. Departamento de Água e Esgoto de Bauru, 2015b.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Água subterrânea: uma riqueza de São Paulo**. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/acervoepesquisa/relatorios/revista/raee9904/aguasubterranea.htm>. Acesso em: 12 fev. 2015.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios dos poços de abastecimento público do município de Bauru.** Araraquara, SP, 2015.

DINIZ, J. A. O. et al. **Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo.** Recife, PE. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, , 2014a. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html>

DINIZ, J. A. O. et al. **Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo - Nota técnica.** Recife, PE. Serviço Geológico do Brasil (CPRM), , 2014b. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Hidrologia/mapas_publicacoes/MHB/Nota_tecnica.pdf>

ESCOBAR, H. Water security. Drought triggers alarms in Brazil's biggest metropolis. **Science (New York, N.Y.)**, v. 347, n. 6224, p. 812, 20 fev. 2015.

FITTS, C. R. **Groundwater Sciences**. San Diego, California: Academic Press, 2002.

GOMES, C. C.; CASTRO, M. A. H. DE. **Análise comparativa entre a modelagem de aquíferos regionais utilizando o Método de Elementos Analíticos (Split) e o Método de Diferenças Finitas (Modflow).** XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais**...2002

GOMES, C. C.; CASTRO, M. A. H. DE. Método de Elementos Analíticos aplicado no aquifero da região do Cariri – Ceará - Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, p. 25–35, 2005.

GÓMEZ, A. A.; RODRÍGUEZ, L. B.; VIVES, L. S. The Guarani Aquifer System: Estimation of recharge along the Uruguay-Brazil border. **Hydrogeology Journal**, v. 18, p. 1667–1684, 2010.

GUANABARA, R. C. **Modelo Transiente de Fluxo em Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

HAITJEMA, H. M. **Analytic Element Modeling of Groundwater Flow**. San Diego, CA: Acedemic Press, 1995.

HIDROSAN. **Plano Diretor de Água de Bauru.** Bauru, São Paulo, 2014.

HIRATA, R. et al. Explotação do sistema aquífero Guarani em Araraquara. **Geologia USP - Serie Cientifica**, v. 12, n. 2, p. 115–127, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE | Cidades | Infográficos | São Paulo | Bauru | Dados Gerais**. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=350600&search=sao-paulo|bauru|infograficos:-dados-gerais-do-municipio>. Acesso em: 15 out. 2014.

IRITANI, M. A. **Modelação Matemática Tridimensional para a Proteção das Captações de Água Subterrânea**. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1999.

KRESIC, N. **Hydrogeology and groundwater modeling**. Second ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.

LABORATÓRIO DE ESTUDO DE BACIAS. **Advances on Guarani Aquifer System Knowledge.** Rio Claro, 2008.

MARIN, I. S. P. **Aperfeiçoamento do Método de Elementos Analíticos para Simulação de Escoamento em Rochas Porosas Fraturadas**. 2011. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

MATHWORKS. **Matlab.** The MathWorks Inc., , 2011.

MICROSOFT. **Excel: planilhas eletrônicas.** Microsoft Corporation, , 2010.

ORGANIZATION OF AMERICAN STATES. **Guarani Aquifer: Strategic Action Program**, 2009.

OSGEO. **QGIS: Open Source Geographic Information System.** OSGeo: Open Source Geospatial Foundation, 2015. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/index.html>

PAULA E SILVA, F. DE; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R. Perfis de referência do Grupo Bauru (k) no Estado de São Paulo. **Geociências**, v. 22, n. Especial, p. 21–32, 2003.

PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. **Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru - SP, face às características hidrogeológicas especiais da região.** VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais**...1992

RABELO, J. L.; WENDLAND, E. **Estudo da interação rio-aquífero no sistema Jacaré-Tietê.** XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. **Anais**...2010

REBOUÇAS, A. DA C. **Recursos hídricos subterrâneos da Bacia do Paraná**. 1976. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1976.

ROCHA, G. et al. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo.** XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Anais**...2006

SEYF-LAYE, A.-S. M. et al. Groundwater flow and contaminant transport modeling applications in urban area: scopes and limitations. **Environmental science and pollution research international**, v. 19, n. 6, p. 1981–93, 2012.

SILVA, S. R. DA. **Caracterização Hidrogeoquímica dos Sistemas Aquíferos Bauru e Guarani no Município de Bauru.** 2009. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2009.

SILVA, S. R. DA; CHANG, H. K. Hidroquímica dos sistema aquíferos Bauru e Guarani ma região metropolitana de Bauru. **Águas Subterrâneas**, v. 24, n. 1, p. 69–84, 2010.

SILVA, R. B. G. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. 1983. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1983.

SRACEK, O.; HIRATA, R. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 10, n. 6, p. 643–655, 2002.

STRACK, O. D. L. **Groundwater Mechanics**. Minnesota, USA. Prentice-Hall, 1989.

STRACK, O. D. L. Theory and applications of the Analytic Element Method. **Reviews of Geophysics**, v. 41, n. 2, p. 1005, 2003.

STRACK, O. D. L. **Applied Groundwater Mechanics.** Minnesota, USA, 2014.

STRACK, O. D. L.; HAITJEMA, H. M. Modeling Double Aquifer Flow Using a Comprehensive Potential and Distributed Singularities 1. Solution for Homogeneous Permeabilit. **Water Resources Research**, v. 17, p. 1535–1549, 1981.

WATERLOO BRASIL. **Modelagem matemática de fluxo das águas subterrâneas.** Bauru, SP, 2001.

WU, F.-T.; CAETANO-CHANG, M. R. Estudo mineralógico dos arenitos das formações Pirambóia e Botucatu no Centro-Leste do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto Geológico**, v. 13, n. 1, p. 58–68, 1992.

APÊNDICE A: LOCALIZAÇÃO E ANO DE PERFURAÇÃO DOS POÇOS DO SAG

Tabela 25 - Localização e ano de perfuração dos poços públicos do SAG

Estado em 2014	Poço	Coordenadas UTM		Ano de perfuração
		m E	m N	
Ativo	UP 18 Beija-Flor (Sta Luzia)	701.011	7.532.226	1981
Ativo	UP 21 Jd. América	699.218	7.526.970	1982
Ativo	UP 25 Gasparini	697.447	7.536.036	1985
Ativo	UP 26 Bíblia	698.241	7.530.772	1986
Ativo	UP 27 Cruzeiro do Sul II	702.331	7.530.420	1986
Ativo	UP 31 Mary Dotta	702.395	7.533.162	1990
Ativo	UP 32 Geisel II (Shopping)	701.683	7.527.928	1994
Ativo	UP 33 Parque Real II	692.936	7.529.454	1995
Ativo	UP 34 Bauru XXV	704.436	7.529.096	1995
Ativo	UP 35 Distrito III – IPA	694.101	7.533.746	1996
Ativo	UP 36 Samambaia II	700.699	7.525.588	1997
Ativo	UP 40 Lotes Urbanizados	701.520	7.535.110	1999
Ativo	UP 43 Bauru XVI II	692.863	7.531.114	1994
Ativo	UP 44 Vargem Limpa	704.581	7.530.250	2004
Ativo	UP 45 Primavera II	699.720	7.531.708	2005
Ativo	UP 46 Villágio III	699.290	7.524.645	2006
Ativo	UP 47 Chácara Bauruenses	703.651	7.523.531	2007
Ativo	UP 49 Cardia	700.103	7.530.069	2010
Ativo	UP 50 Marabá II	702.297	7.525.341	2010
Ativo	UP 51 Octávio Rasi II	704.961	7.531.792	2012
Ativo	UP 52 Bauru XVI III	693.399	7.531.616	2012
Ativo	UP 53 Nações Unidas II	700.150	7.528.974	2012
Ativo	UP 54 Manchester	706.432	7.529.041	2012
Ativo	UP 55 Roosevelt III	695.880	7.532.900	2013
Ativo	UP 56 Zona Norte	699.783	7.536.164	2014
Ativo	UP 57 Val de Palmas	692.092	7.532.793	2014
Futuro	UP 58 Jardim TV	697.150	7.534.330	
Futuro	UP 59 Jardim Imperial	697.798	7.525.114	
Futuro	UP 60 Zona Norte III	698.545	7.537.815	
Futuro	UP 61 Zona Norte IV	695.509	7.535.467	
Futuro	UP 62 Santa Cândida	692.443	7.530.637	
Futuro	UP 63 Padilha	697.510	7.531.716	

Fonte: Relatórios de perfuração dos poços (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2015)

Tabela 26 - Localização e ano de perfuração dos poços particulares do SAG em operação em 2015

Estado em 2014	Poço	Coordenadas UTM m E	m N	Ano de perfuração
Ativo	UPP 01 FOB	699.861	7.528.640	1987
Ativo	UPP 02 UNESP	702.493	7.527.058	1993
Ativo	UPP 03 Adams	704.340	7.532.270	2005
Ativo	UPP 04 Bauru Shopping Center	700.969	7.527.911	2002
Ativo	UPP 05 Aciflora	702.510	7.531.290	2005
Ativo	UPP 06 Hospital Beneficencia Portuguesa	698.803	7.529.610	2007
Ativo	UPP 07 Marselha residencial	698.720	7.528.600	2011
Ativo	UPP 09 Hotel Anna	702.200	7.524.930	2006
Ativo	UPP 10 Monte Castelo	701.080	7.529.600	2012
Futuro	UPP 11 BTC	698.198	7.527.147	2015
Ativo	UPP 13 Associação Hospitalar	698.100	7.529.300	2006
Ativo	UPP 14 EADI	692.208	7.531.252	2008
Ativo	UPP 15 Ajax	703.110	7.531.320	2001
Ativo	UPP 19 Frigorífico Mondelli I	701.920	7.532.250	1990
Ativo	UPP 20 Frigorífico Mondelli II	701.770	7.533.220	2010
Ativo	UPP 21 Xavier Metais	702.624	7.531.705	1992
Ativo	UPP 23 Hospital de base	698.050	7.529.290	1991
Ativo	UPP 25 Claudia Daré	705.387	7.524.969	2010
Ativo	UPP 26 Casa Alta Construções	706.143	7.532.082	2010
Ativo	UPP 27 Anhanguera	698.443	7.532.200	2011
Ativo	UPP 29 Colégio São José	698.949	7.530.153	2010
Ativo	UPP 30 USC II	700.780	7.529.154	2009
Ativo	UPP 31 Marzochi Extração de Água	700.500	7.530.930	2009
Ativo	UPP 32 Khalil Obeid	699.702	7.529.530	2012
Ativo	UPP 36 Hidrogeo	701.100	7.528.560	2014
Ativo	UPP 37 JA Com. De Refeições	703.990	7.531.570	1997
Ativo	UPP 38 Shayeb e Cia	702.660	7.531.570	2009
Ativo	UPP 39 Plasútil	703.472	7.531.953	2011
Ativo	UPP 41 Nacional Gas Butano	708.120	7.531.250	1994
Ativo	UPP 43 Mectrol do Brasil	708.430	7.530.720	2014
Ativo	UPP 44 Zoológico	703.920	7.528.134	2009
Ativo	UPP 46 Posto Sem Limites	700.416	7.530.657	2008
Ativo	UPP 47 José Eduardo A Santoro	700.308	7.530.918	2011
Ativo	UPP 48 Confiança II	698.700	7.531.453	2010
Ativo	UPP 49 MPA	699.315	7.526.104	2005
Ativo	UPP 50 Mori Motors	699.172	7.531.332	2009
Ativo	UPP 52 Moacir de C Pita	698.510	7.526.520	2003
Ativo	UPP 54 CPI 4	699.550	7.531.100	1973
Ativo	UPP 55 Horto Florestal	702.078	7.531.493	2000
Ativo	UPP 56 Tilibra	699.870	7.530.950	2010
Ativo	UPP 57 UNIMED	708.552	7.530.057	1992
Ativo	UPP 59 USP Centrinho	700.040	7.528.910	1987
Ativo	UPP 61 Vertico Empreendimentos	699.180	7.531.030	2003
Ativo	UPP 62 USP Prefeitura Campus	699.920	7.528.630	2002
Ativo	UPP 65 Instituto Lauro Souza Lima	707.834	7.529.773	1987
Ativo	UPP 67 SESC	700.500	7.530.400	1999
Ativo	UPP 68 Biazi Plaza Hotel Ltda	698.830	7.530.827	1999

Fonte: Relatórios de perfuração dos poços (DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA, 2015)

APÊNDICE B: CÓDIGO DO MODELO COMPUTACIONAL

```
clc; clear; format long g;

% Run script for circular inhomogeneity with well
b=180;                  %base
H=250;                  %espessura fora da inomogeneidade
k=3.7*10^-5;            %condutividade hidráulica
R=7000;                 %raio da inomogeneidade circular
zc=2500*1i;             %z no centro da inom.

z0=42000-20000*1i;
fi0 = 498.5;
rw=0.15;
Q=0; zw=0;
Omega0=Phi_from_fi(fi0,k,H,b);
H1=60;                  %espessura dentro da inomogeneidade
k1=k*H1/H;              %condutividade hidráulica na inomogeneidade

Phi0=Phi_from_fi(fi0,k,H,b);
dfidx = 0.0005657; %m/m
dfidy = -0.0005895; %m/m
Qx0=-k*H*dfidx; %m²/s
Qy0=-k*H*dfidy;   %m²/s
alpha=pi()+atan(Qy0/Qx0); %rad
Q0=sqrt(Qy0^2+Qx0^2);  %m²/s

xfrom=0; xto=22000; Nx=200;
yfrom=0; yto=22000; Ny=200;
nint=100;

N=20; %series expansion order
M=50; %control points at inhomogeneities border

%Lê e armazena as informações dos poços para o período escolhido
ano='1988';   %Options: zero 1988 1997 2012 2013 2014 C1 C2 C3 C4 C5 C6 C7
[data,titles]=xlsread('Dadospocos14.xlsx',ano);
[n_wells,n] = size(data);     %m=number of rows n=columns
for l=1:n_wells
    Q(l) = data(l,5);       %m³/s
    xw(l) = data(l,3);
    yw(l) = data(l,4);
    zw(l) = xw(l)+1i*yw(l);
end

a=compute_coeffs(N,M,k,k1,R,zc,Q,zw,rw,Phi0,Q0,alpha,z0,n_wells);

func=@(z)(Omega_inh_janko(N,a,R,zc,Q,zw,rw,Phi0,z,Q0,alpha,z0,n_wells));

Grid = zeros(Ny,Nx);
X = linspace(xfrom, xto, Nx);
Y = linspace(yfrom, yto, Ny);
x0_UTM = 690000;
y0_UTM = 7520000;

for row = 1:Ny
```

```
    for col = 1:Nx
        z=complex(X(col),Y(row));
        Grid(row,col) = func(z);
        if abs(z-zc)<R
            fi(row,col)=fi_from_Phi(real(func(z)), k1, H, b);
        else
            fi(row,col)=fi_from_Phi(real(func(z)), k, H, b);
        end
        ResTable(Ny*(row-1)+col,1) = X(col)+x0_UTM;
        ResTable(Ny*(row-1)+col,2) = Y(row)+y0_UTM;
        ResTable(Ny*(row-1)+col,3) = fi(row,col);
        ResTable(Ny*(row-1)+col,4) = real(Grid(row,col));
        ResTable(Ny*(row-1)+col,5) = -imag(Grid(row,col));
    end
end

figure;
contour(X,Y,fi,nint,'r');
hold on
contour(X, Y,imag(Grid),nint,'b');
legend('Nível piezométrico','Linhas de corrente')
xlabel ('x (m)');
ylabel ('y (m)');
axis equal
hold on


function [ a ] =
compute_coeffs(N,M,k,k1,R,zc,Q,zw,rw,Phi0,Q0,alpha,z0,n_wells)
%Solve for the unknowns.
Phi_c=0;
k0=(k1-k)/k/M;
kn=2*(k1-k)/(k1+k)/M;
a=zeros(1,N);
for m=1:M
    teta_m=2*pi()*(m-1)/M;
    z=zc+R*exp(1i*teta_m);
    for l=1:n_wells
        Phi_c=Phi_c+real(Omega_well(z,zw(l),rw,Q(l),z0));
    end
    Phi_c=Phi_c+real(-Q0*(z-z0)*exp(-1i*alpha)+Phi0);
    a(1)=a(1)+k0*Phi_c;
    for n=2:N;
        a(n)=a(n)+kn*Phi_c*exp(-1i*(n-1)*teta_m);
    end
    Phi_c=0;
end
end


function [ Omega ] =
Omega_inh_janko(N,a,R,zc,Q,zw,rw,Phi0,z,Q0,alpha,z0,n_wells)
%Omega for circular inhomogeneity with a well, series approximation

Omega=0;
Z=(z-zc)/R;
if(norm(Z))<1
    for n=1:N
        Omega=Omega+a(n)*Z^(n-1);
```

```
    end
else
    for n=2:N
        Omega=Omega-conj(a(n))*Z^(1-n);
    end
end
for l=1:n_wells
    Omega=Omega+Omega_well(z,zw(l),rw,Q(l),z0);
end
Omega=Omega-Q0*(z-z0)*exp(-1i*alpha)+Phi0;

end


function [ Omega ] = Omega_well( z,zw,rw,Q,z0 )
if abs(z-zw)>rw
    Omega=Q/(2*pi)*log(z-zw)-Q/(2*pi)*log(z0-zw);
else
    Omega=Q/(2*pi)*log(rw)-Q/(2*pi)*log(z0-zw);
end
end


function [ fi ] = fi_from_Phi( Phi, k, H, b )
if Phi>=1/2*k*H^2
    fi = (Phi+1/2*k*H^2)/(k*H)+b;
else
    fi = sqrt(2*Phi/k)+b;
end
end


function [ Phi ] = Phi_from_fi( fi, k, H, b )
if fi < b
    Phi=0;
else if fi>H+b
        Phi=k*H*(fi-b)-0.5*k*H^2;
    else
        Phi=0.5*k*(fi-b)^2;
    end
end
end
```