

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

TALITA CABELERA DA SILVA

DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇOS, POR  
DIFERENTES MÉTODOS, PARA O AQUÍFERO CAIUÁ, NO ESTADO DO PARANÁ

PORTO ALEGRE

2019

TALITA CABELERA DA SILVA

DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇOS, POR  
DIFERENTES MÉTODOS, PARA O AQUÍFERO CAIUÁ, NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Professor Dr. Gustavo Barbosa Athayde

PORTO ALEGRE

2019

#### CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Talita Cabelera da  
DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE  
POÇOS, POR DIFERENTES MÉTODOS, PARA O AQUIFERO CAIUÁ,  
NO ESTADO DO PARANÁ / Talita Cabelera da Silva. --  
2019.  
181 f.  
Orientador: Gustavo Barbosa Athayde.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Aquífero Caiuá. 2. Perímetros de Proteção de  
Poços. 3. Raio Fixo Calculado. I. Athayde, Gustavo  
Barbosa, orient. II. Título.

TALITA CABELERA DA SILVA

DEFINIÇÃO E ANÁLISE DE PERÍMETROS DE PROTEÇÃO DE POÇOS, POR  
DIFERENTES MÉTODOS, PARA O AQUÍFERO CAIUÁ, NO ESTADO DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre,        de        de 2019.

---

Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde – UFPR  
Orientador

---

Prof. Dr. Pedro Antônio Roehe Reginato – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan – UFRGS  
Examinador

---

Dr<sup>a</sup>. Raquel Barros Binotto – CPRM  
Examinadora

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Professor Dr. Gustavo Barbosa Athayde, que sempre esteve disposto a esclarecer minhas dúvidas e a me auxiliar na construção deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, que sugeriram melhorias.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de mestrado concedida.

Ao meu companheiro Eduardo Dias, pela paciência e também por me incentivar a criar códigos de programação que viabilizaram alguns dos resultados deste trabalho.

E por último, mesmo que simbolicamente, gostaria de agradecer a minha gata, Ruby, que durante longos momentos de leitura, de escrita e de desenvolvimento deste trabalho, esteve ao meu lado, às vezes até mesmo “digitando algumas frases”, que logicamente tiveram de ser apagadas.

## RESUMO

Perímetros de proteção de poços (PPPs) são zonas circulares, tanto superficiais quanto subterrâneas, que protegem o entorno de poços utilizados para o abastecimento humano, servindo como defesa contra a captação de água contaminada. Essa proteção ocorre por meio do controle de atividades poluidoras nos interiores desses perímetros. Existem várias técnicas que possibilitam a delimitação desses PPPs; contudo, foram testados aqui os métodos de Raio Fixo Calculado (RFC), de Wyssling e de Modelagem Numérica (MN). Essas técnicas empregam o critério do tempo de trânsito da água subterrânea, onde para a busca de proteção contra contaminantes degradáveis, como bactérias, usou-se o tempo de 50 dias; mas também foram definidos PPPs para os tempos de 500 e de 1825 dias. Logo, o objetivo deste trabalho foi definir, dentre algumas técnicas presentes na bibliografia, qual ou quais apresentam uma boa possibilidade de proteção eficiente para o aquífero sedimentar Caiuá, no Paraná. Visou-se também, definir semelhanças entre os resultados obtidos e estabelecer considerações a serem efetuadas para a delimitação de PPPs no aquífero. No geral, devido à simplicidade e a maior aproximação às áreas definidas pelo MN, o RFC foi escolhido como adequado para o emprego no Caiuá, embora tenha apresentado resultados mais conservadores. Associou-se isso aos baixos gradientes hidráulicos avaliados na área de estudo e a algumas vazões elevadas na região. Porém, observou-se que para poços com vazões inferiores a 96 m<sup>3</sup>/dia, e quando houver condições, o MN pode auxiliar a proteger áreas de maneira mais assertiva, onde se deve atentar para o detalhamento dos parâmetros de recarga e de condutividade hidráulica horizontal. No entanto, caso essa técnica não possa ser empregada, também se aconselha o uso do RFC, que pode ser empregado no aquífero, mas certas considerações foram observadas: 1) para o tempo de 50 dias, os raios obtidos por meio da espessura saturada (H) para vazões até 360 m<sup>3</sup>/dia devem ser multiplicados por 3,2, e para vazões acima disto, multiplicados por 2; 2) para os tempos de 500 e de 1825 dias, os valores de raios - obtidos pelo uso de H na equação volumétrica - para poços com vazões de até em média 324 m<sup>3</sup>/dia, devem ser multiplicados por 2, e para vazões acima disso, os raios devem ser multiplicados por 1,8 e 1,7, respectivamente. Foi definido que a substituição dos valores de H do aquífero por valores de seções filtrantes dos poços para o cálculo do RFC, como indicado na bibliografia, foi eficaz, principalmente devido aos altos valores de H empregados. Contudo, para o tempo de 50 dias e para vazões baixas, o raio obtido, para proteção circular, com o uso da seção filtrante do poço pode ser levemente aumentado. Considerando essas premissas, encontraram-se raios medianos de proteção, para 50 dias, de 40, 53 e 54 metros para vazões de até 96, entre 96 e 360 e acima de 360 m<sup>3</sup>/dia, respectivamente. Para 500 dias, definiram-se raios de 78, 102 e 147 metros para os respectivos intervalos: de até 96, entre 96 e 288 e acima de 288 m<sup>3</sup>/dia.

**Palavras-chave:** Aquífero Caiuá, Perímetros de Proteção de Poços, Raio Fixo Calculado

## ABSTRACT

Wellhead Protection Areas (WhPA) are circular zones, both superficial and underground, that protect the land around wells used for human supply, serving as a defense against the uptake of contaminated water. This protection occurs through the control of polluting activities in the interiors of these perimeters. There are many techniques that allow the delimitation of these WhPAs; however, the Calculated Fixed Radius (CFR), Wyssling and Numerical Modeling (NM) methods were tested here. These techniques use the groundwater time to travel criterion, and the time of 50 days was used to search for protection against degradable contaminants, such as bacteria; but WhPAs were also defined for the times of 500 and 1825 days. Therefore, the objective of this work was to define, among some techniques present in the bibliography, which present a good possibility of efficient protection for the sedimentary aquifer Caiuá, in the state of Paraná. It was also aimed to define similarities between the results obtained and to establish considerations to be made for the delimitation of WhPAs in the aquifer. In general, due to the simplicity and the greater approximation to the areas defined by NM, the CFR was chosen as suitable for employment in the Caiuá, although it presented more conservative results. This was associated to the low hydraulic gradients evaluated in the study area and to some high pumping rates in the region. However, it was observed that for wells with pumping rates of less than 96 m<sup>3</sup>/day, and when conditions exist, the NM can help to protect areas in a more assertive way, where attention must be paid to detailing the parameters of recharge and horizontal hydraulic conductivity. However, if this technique can not be used, the use of RFC, which can be used in the aquifer, is also advised, but certain considerations have been observed: 1) for the time of 50 days, the radius obtained by the saturated thickness (H) for rates up to 360 m<sup>3</sup>/day should be multiplied by 3.2, and for pumping rates above this, multiplied by 2; 2) for the times of 500 and 1825 days, the values of radius - obtained by the use of H in the volumetric equation - for wells with an average pumping rate below 324 m<sup>3</sup>/day, must be multiplied by 2, and for rates above that, the radius should be multiplied by 1.8 and 1.7, respectively. It was defined that the substitution of the H values of the aquifer by well screen values for the calculation of the CFR, as indicated in the bibliography, was effective, mainly due to the high values of H used. However, for the 50 days time and at low pumping rates, the radius obtained, for circular protection, with the use of the filter section of the well may be slightly increased. Considering these premises, median protection radius were found for 50 days of 40, 53 and 54 meters for rates of up to 96, between 96 and 360 and above 360 m<sup>3</sup>/day, respectively. For 500 days, radius of 78, 102 and 147 meters were defined for the respective intervals: of up to 96, between 96 and 288 and above 288 m<sup>3</sup>/day.

**Key-words:** Caiuá Aquifer, Wellhead Protection Areas, Calculated Fixed Radius

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fração continental da Placa Sul-Americana, destacando a Plataforma Sul-Americana (modificado de ALMEIDA; HASUI; NEVES, 1976 por SCHOBENHAUS; NEVES, 2003, p. 8)	22
Figura 2 – a) os dois grandes compartimentos geológicos do Estado do Paraná; e b) cronologia das litologias do Estado do Paraná. Fonte: modificado de MINEROPAR (2001)	24
Figura 3 – Esboço das cinco regiões naturais distintas do Estado do Paraná. Fonte: modificado de Maack (1968)	25
Figura 4 – Domínios hidrolitológicos do Estado do Paraná. Modificado de Souza e Franzini (2015). Fontes das informações: 1) dados vetoriais dos domínios hidrolitológicos – Diniz et al. (2014), e 2) limites do Brasil e Estaduais – IBGE (2018)	27
Figura 5 – Unidades aquíferas e não aquíferas do Estado do Paraná, modificado de MMA (2015). Fonte dos dados: 1) dados vetoriais das unidades aquíferas e não aquíferas: MMA (2015); 2) dados vetoriais das drenagens: CPRM (2019); e 3) localização de municípios: IBGE (2018)	30
Figura 6 – Diferença entre a zona de captura e a zona de influência de um poço em bombeamento, ilustrada em um perfil vertical. Fonte: Foster et al. (2006)	36
Figura 7 – Esquema da Zona de Captura e de PPPs baseados no critério do tempo de trânsito ao redor de um poço em aquífero não confinado. Fonte: modificado de Foster et al. (2006)	37
Figura 8 – Área que será estudada neste trabalho. Fonte dos dados: 1) Localização do Aquífero Caiuá e poços da SANEPAR a serem trabalhados: MMA (2015); e 2) Limite do Paraná e localização de alguns municípios: IBGE (2018)	41
Figura 9 - Fluxograma organizacional dos métodos trabalhados	52
Figura 10 - Esboço de um poço em bombeamento com fluxo radial, condições aplicadas no método de RFC. Fonte: modificado de Kraemer, Haitjema e Kelson (2007)	60
Figura 11 – Espacialização das incógnitas em relação ao poço no método de Wyssling. Fonte: modificado de Wyssling (1979)	65
Figura 12 - Funcionamento da ferramenta “Near”, avaliando a proximidade de um ponto e de uma feição linear. Fonte: ESRI (2018c)	69
Figura 13 - Esquema trigonométrico criado para auxiliar na obtenção da direção de fluxo da água subterrânea relacionada a cada poço	73

Figura 14 - Esquema trigonométrico criado para a definição das coordenadas referentes aos pontos extremos que delimitam os PPPs definidos a partir do método de Wyssling (1979)	77
Figura 15 – Localização da área para aplicação da modelagem numérica. Fontes dos dados na imagem	80
Figura 16 - Esquema para a aplicação da modelagem numérica. Fonte: modificado de Iritani (1998)	82
Figura 17 - Grid com os nódulos centrados no bloco (MCDONALD; HARBAUGH, 1988)	84
Figura 18 - Malha discretizada na área de modelagem, com os poços (pontos vermelhos) a terem suas zonas de transportes definidas. Fonte da localização dos poços: MMA (2015)	85
Figura 19 - Leitura de $\Delta H$ no método WTF. Fonte: Healy e Scanlon (2010)	89
Figura 20 - Localização dos poços RIMAS observados aqui para a definição da recarga pelo método WTF. Fonte dos dados: CPRM (2018b)	91
Figura 21 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500026830	91
Figura 22 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500026831	92
Figura 23 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500029469	92
Figura 24 – Ilustração das variáveis da condutância hidráulica. Modificado de McDonald e Harbaugh (1988)	94
Figura 25 - Cursos d'água na região da modelagem numérica. Fonte do <i>shapefile</i> para construção: Diniz et al. (2014)	95
Figura 26 - Valores de condutância atribuídos ao Rio Xambrê na área a ser modelada	96
Figura 27 - Fluxograma para a realização da tentativa e erro para uma simulação numérica. Fonte: modificado de Anderson, Woessner e Hunt (2015)	98
Figura 28 - Método para comparação entre PPPs definidos por técnicas distintas (USEPA, 1987)	103
Figura 29 - Distribuição dos poços trabalhados no Aquífero Caiuá, no sistema de referência SIRGAS 2000. Fonte de dados: MMA (2015)	105

Figura 30 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 50 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015)	106
Figura 31 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 500 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015)	107
Figura 32 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 1825 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015)	108
Figura 33 - Comparação entre os valores de raio definidos, para o tempo de 50 dias, para 42 poços do aquífero Caiuá, a partir do uso da espessura saturada registrada em MMA (2015) e da seção filtrante registrada em SANEPAR (2018)	111
Figura 34 – Interpolação dos valores de raios obtidos por meio do RFC para o aquífero Caiuá, no Paraná, multiplicados por 2. É importante ressaltar que esses valores representam apenas a distribuição espacial simplificada dos raios fixos calculados para 365 poços do aquífero, não devendo esses valores serem aplicados diretamente no aquífero, devido aos largos intervalos associados a cada cor nas legendas, e devido às demais discussões e comparações que serão realizadas a seguir	116
Figura 35 - Valores, em metros, do parâmetro B de Wyssling (1979) encontrados para os 365 poços do aquífero Caiuá trabalhados. Fonte do limite do aquífero Caiuá: MMA (2015)	120
Figura 36 – Porção dos resultados do traçado de linhas de fluxo a partir do script em Python representado no Apêndice A	121
Figura 37 – Ilustração de um dos PPPs gerados, para o método de Wyssling, com o auxílio do código presente no Apêndice D	122
Figura 38 – Imagem extraída do software ModelMuse que indica os altos resíduos negativos mesmo após a inserção dos demais cursos d'água no modelo	126
Figura 39 – Poços inseridos no modelo, com exceção dos poços a terem seus PPPs definidos	126
Figura 40 – Valores ajustados de recarga após a calibração do modelo conceitual	128
Figura 41 – Valores de condutividades finais ajustados durante a calibração do modelo conceitual	129
Figura 42 – Valor de RMSE e valores dos resíduos em relação a zero apresentados pelo software ModelMuse ao final da etapa de calibração	130

Figura 43 – Visualização das zonas de contribuição geradas a partir do modelo numérico sobre mapa interpolado de potenciometria, assim como as verificações do traçado em sentido à jusante a partir de um ponto inserido na ZC de cada poço	133
Figura 44 – PPPs definidos a partir da modelagem numérica	135
Figura 45 – Relação entre vazão e áreas obtidas por meio da modelagem numérica	137
Figura 46 – Comparação visual dos resultados obtidos para os três métodos aplicados	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de atividades potencialmente poluidoras, suas maneiras de distribuição espacial e principais tipos de poluentes. Fonte: Foster et al. (2006)	34
Tabela 2 – Exemplos de trabalhos sobre PPPs já realizados e que utilizavam o critério do tempo de trânsito (TdT), e os respectivos TdT's utilizados	55
Tabela 3 – Síntese dos dados presentes no BD em SIG elaborado por MMA (2015)	57
Tabela 4 – Poços da rede RIMAS utilizados para estimativa da recarga. Fonte dos dados: CPRM (2018b)	90
Tabela 5 - Valores definidos para condutância do Rio Xambrê	96
Tabela 6 – Extensões radiais calculadas por meio do método do RFC, utilizando valores de seção filtrante	110
Tabela 7 – Comparação entre as medianas dos raios fixos calculados obtidos a partir do uso dos valores de espessura saturada total (H) e de seção filtrante	112
Tabela 8 - Comparações entre os raios obtidos em Iritani e Ezaki (2012), Carvalho e Hirata (2012) e neste trabalho	114
Tabela 9 – Avaliação dos resultados para os parâmetros de Wyssling encontrados com o auxílio da ferramenta Darcy Flow do software ArcGIS, para 385 dos poços registrados em MMA (2015) para o aquífero Caiuá. Valores em metros	118
Tabela 10 - Avaliação dos resultados para os parâmetros de Wyssling encontrados com o auxílio da metodologia expressa na seção 5.5.2.2 para 365 dos poços registrados em MMA (2015) para o aquífero Caiuá. Valores em metros	120
Tabela 11 – Valores de cargas hidráulicas simuladas para as condições iniciais de entrada e referentes ao tempo de 86.400 segundos, comparados aos valores considerados como observados	124
Tabela 12 – Efeitos da inserção dos demais cursos, após o Rio Xambrê, no erro RMSE do modelo numérico	125
Tabela 13 – Valores iniciais, finais e de sensibilidade para as variáveis utilizadas durante a calibração do modelo conceitual	131
Tabela 14 - Áreas dos PPPs obtidas por meio da modelagem numérica	136
Tabela 15 – Valores de resíduos da modelagem numérica para os pontos de observação, comparados de acordo com a condição de Badv e Deriszadeh (2005)	139

Tabela 16 – Resultados para a comparação entre as geometrias de PPPs obtidas para os três métodos utilizados, conforme a técnica de comparação apresentada em USEPA (1987)	145
Tabela 17 - Comparação entre as áreas definidas pelo RFC e pelo MN quando utilizados os valores de seções filtrantes no cálculo do raio fixo calculado	147
Tabela 18 – Comparação entre o MN e o RFC, utilizando-se, para esse último, a espessura saturada presente em MMA (2015), assim como novas multiplicações para os raios obtidos para o tempo de 50 dias	150
Tabela 19 - Comparação entre o MN e o RFC, utilizando-se, para esse último, a espessura saturada presente em MMA (2015), assim como novas multiplicações para os raios obtidos, para os tempos de 500 e 1825 dias	151
Tabela 20 - Resumo estatístico dos valores de raios fixos calculados a partir da espessura saturada e da equação volumétrica, para poços operantes e não operantes do aquífero paranaense Caiuá	152

## LISTA DE SIGLAS

AGUASPARANÁ	Instituto das Águas do Paraná
ANA	Agência Nacional das Águas
BD	Banco de Dados
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
H	Espessura Saturada
HOB	<i>Hydraulic-Head Observations</i> - Observações de Cargas Hidráulicas (Pacote do Modflow)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDEM	<i>Indiana Department of Environmental Management</i> - Departamento de Gestão Ambiental de Indiana
IDW	<i>Inverse Distance Weighted</i> – Inverso Ponderado das Distâncias
LPF	<i>Layer Property Flow</i> – Propriedade de Fluxo para a Camada (Pacote do MODFLOW)
MINEROPAR	Serviço Geológico do Paraná
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MN	Modelo Numérico
PPP	Perímetro de Proteção de Poço
RFA	Raio Fixo Arbitrário
RFC	Raio Fixo Calculado
RIMAS	Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i> - Raiz do Erro Médio Quadrático
RS	Rio Grande do Sul
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SF	Seção Filtrante
SIA	Identificação dos Poços presente no Banco de Dados
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TdT	Tempo de Trânsito

UFPR	Universidade Federal do Paraná
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> - Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
USGS	<i>U.S. Geological Survey</i> – Serviço Geológico dos Estados Unidos
WhAEM	<i>Wellhead Analytic Element Model</i> – Modelo de Elemento Analítico para Perímetro de Poço
WTF	<i>Water Table Fluctuation</i> - Flutuação do Nível D'água
ZC	Zona de Contribuição/Captura
ZI	Zona de Influência

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>20</b>
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
<b>3</b>	<b>Informações Sobre Geologia, Geomorfologia e Clima</b>	<b>21</b>
3.1	Geologia Regional	21
3.2	Geomorfologia e Clima do Estado do Paraná	24
3.3	Breve Descrição Hidrogeológica do Estado do Paraná e Especificações sobre o Aquífero Caiuá	26
<b>4</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>32</b>
4.1	Conceitos Relacionados a Perímetros de Proteção de Poços	32
4.1.1	Fontes de Contaminação de Águas Subterrâneas	33
4.1.2	Demais Conceitos Relacionados a Perímetros de Proteção de Poços	34
4.1.3	Condições mais Adequadas e Dificuldades para a Delimitação de PPPs	39
4.2	Alguns Métodos Existentes para a Delimitação de PPPs	41
4.3	Trabalhos Internacionais no Âmbito de Estudo	43
4.4	Trabalhos Nacionais no Âmbito de Estudo	46
4.5	Considerações sobre o Estado da Arte Consultado	50
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>52</b>
5.1	Escolha dos Métodos	52
5.2	Definição dos Tempos de Trânsito (TdT)	54
5.3	Fonte dos Dados para Aplicação	55
5.4	Raio Fixo Calculado	59
5.5	Método de Wyssling (1979)	63

5.5.1	Avaliação do gradiente hidráulico	65
5.5.2	Passos para a aplicação do método de Wyssling (1979)	66
5.5.2.1	Utilizando a ferramenta Darcy Flow presente no ArcGIS	66
5.5.2.2	Utilizando a ferramenta para inserção de códigos em Python presente no ArcGIS	67
5.5.2.2.1	Definição da Direção de Fluxo da Água Subterrânea em cada Ponto	72
5.5.3	Criação dos polígonos referentes às áreas de proteção definidas pelo método de Wyssling (1979)	74
5.5.4	Avaliação dos Resultados Encontrados para o Método de Wyssling (1979)	78
5.6	Método para a Modelagem Numérica	79
5.6.1	Escolha da Área para a Aplicação da Modelagem Numérica	79
5.6.2	Conceitos para a aplicação do Modelo Numérico na Área Escolhida	80
5.6.3	Modelo conceitual e condições iniciais e de contorno	82
5.6.4	O software MODFLOW e o porquê de seu uso	83
5.6.5	Recarga	88
5.6.6	Rios	94
5.6.7	Calibração e Sensibilidade	97
5.6.8	Traçado de Partículas	100
5.7	Comparação entre os Métodos	102
<b>6</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>104</b>
6.1	Resultados para o Método de Raio Fixo Calculado	104
6.1.1	Raio Fixo Calculado com Valores de Seção Filtrante	109
6.1.2	Ilustração dos Resultados de RFC	114
6.2	Resultados para o Método de Wyssling (1979)	117
6.2.1	Utilizando a Ferramenta Darcy Flow	117
6.2.2	Resultados Usando os Códigos Criados em Python para Obtenção do Sentido de Fluxo e do Gradiente Hidráulico	118

6.2.2.1	Os scripts realmente funcionaram?	120
6.2.3	Resultados, no geral, para o Método de Wyssling (1979)	122
6.3	Resultados da Modelagem Numérica	123
6.3.1	Processos de Calibração e de Avaliação de Sensibilidade	123
6.3.2	Resultados Obtidos	132
6.4	Comparação entre os Métodos	137
6.4.1	Qual Método é Indicado para o Aquífero Caiuá?	147
6.4.2	Novos Valores Resultantes para o Raio Fixo Calculado	152
<b>7</b>	<b>Conclusões</b>	<b>153</b>
	<b>Referências</b>	<b>156</b>
	<b>Apêndice A</b>	<b>166</b>
	<b>Apêndice B</b>	<b>167</b>
	<b>Apêndice C</b>	<b>168</b>
	<b>Apêndice D</b>	<b>169</b>
	<b>Apêndice E</b>	<b>175</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é toda água presente na zona saturada, ou seja, na zona que possui os poros de rochas ou de solo preenchidos totalmente por água (FITTS, 2015). Também de acordo com Fitts (2015), um aquífero se trata de uma região ou camada geológica permeável, em zona saturada, que é capaz de armazenar e de transmitir água subterrânea.

A água subterrânea é de suma importância, e de acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2007), 96% da água doce disponível no Planeta para o consumo se encontra em meio subterrâneo. Selborne (2001) também ressalta que a água subterrânea é uma importante fonte de água potável, sendo utilizada por sistemas municipais e por populações rurais, sendo imprescindível impedir a sua poluição para evitar, assim, crises de abastecimento.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), há predominância de municípios brasileiros que utilizam captações de água subterrânea como ao menos uma de suas fontes de abastecimento. Conforme informações apresentadas em MMA (2015), para o abastecimento público de cerca de 65% dos municípios presentes no aquífero Caiuá, no Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) utiliza exclusivamente a água subterrânea.

Esses fatores evidenciam não somente a importância social e econômica da água subterrânea, mas também a relevância de sua proteção.

Já na década de 1990 foram relatados dois procedimentos básicos para a proteção das águas subterrâneas: um relacionado ao aquífero, definindo o uso de solo com base na cartografia de vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea; e o outro relacionado à proteção de captações de água subterrânea, definindo-se então os perímetros de proteção de poços (ADAMS; FOSTER, 1992; HIRATA, 1993).

Conforme Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), a prática dos PPPs pode manter a qualidade dos recursos captados e contribuir para a segurança da saúde pública.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 1987), a Lei denominada *Safe Drinking Water Act* (que pode ser traduzida para o português como “Lei da

Água Potável Segura”), alterada nos Estados Unidos em 1986, definiu Perímetro de Proteção de Poço (PPP) como uma área superficial e também subterrânea ao redor de um poço (ou campo de poços) que é utilizado no sistema público de abastecimento de água, e a função desse perímetro é de proteção contra contaminantes que podem ter efeitos negativos em relação à saúde humana e que possam ser captados por esse poço.

Para MARCELINO (1999), a escolha do método a ser utilizado para a delimitação de PPPs está relacionada, entre outras características, à hidrogeologia da área. Conforme USEPA (1987), existem diferentes técnicas que mapeiam PPPs de acordo com um critério pré-selecionado, sendo a determinação apropriada dos métodos, uma das etapas compreendida pela abordagem geral para a delimitação de PPPs. Justificando-se então, o estudo da aplicação de métodos distintos em áreas específicas.

Nesse contexto, este trabalho estudará a aplicação de diferentes métodos presentes na bibliografia para a definição de PPPs no aquífero Caiuá, no estado brasileiro do Paraná.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é indicar, dentre alguns métodos presentes na bibliografia, aquele ou aqueles que apresentam uma boa possibilidade de proteção eficiente para poços no Aquífero Caiuá, no Estado do Paraná.

### **2.2 Objetivos Específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

- determinar valores de PPPs para o Aquífero Caiuá, no Paraná, por diferentes métodos;
- identificar semelhanças e diferenças entre os resultados obtidos a partir de técnicas distintas, presentes na bibliografia e testadas, em relação ao aquífero trabalhado;
- estabelecer se existem considerações que devam ser realizadas para a aplicação de algum método testado no aquífero em questão.

### **3 INFORMAÇÕES SOBRE GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E CLIMA**

Esse capítulo abrange informações gerais sobre a geologia, geomorfologia e clima do Estado do Paraná, bem como informações mais detalhadas sobre a hidrogeologia do Estado, principalmente do aquífero Caiuá.

#### **3.1 Geologia Regional**

A Plataforma Sul-Americana se trata da porção continental da placa tectônica de mesmo nome que ficou estável no decorrer da evolução das faixas móveis do Caribe e Andina, enquanto ocorria a abertura e o desenvolvimento do sul do Oceano Atlântico, durante o Meso-Cenozóico (SCHOBENHAUS; NEVES, 2003).

De acordo com Schobbenhaus e Neves (2003), essa Plataforma ocorre no Brasil, país que ocupa mais de 75% da mesma, na Colômbia, em parte da Venezuela, na Guiana, no Suriname, na Guiana Francesa, em parte da Bolívia, no Paraguai, no Uruguai e nas partes central e norte da Argentina.

Exposições do embasamento dessa Plataforma ocorrem na sua margem atlântica, do noroeste do Ceará ao estuário do Rio La Plata, localizado no Uruguai e na Argentina, e essas exposições formam o “Escudo Atlântico”, ocorrendo também outras exposições desse embasamento denominadas Escudo das Guianas e Escudo Brasil Central (SCHOBENHAUS; NEVES, 2003). Segundo Schobbenhaus e Neves (2003) também existem muitos registros de coberturas dessa Plataforma, muitas delas pertencentes ao Éon Fanerozóico (Figura 1).

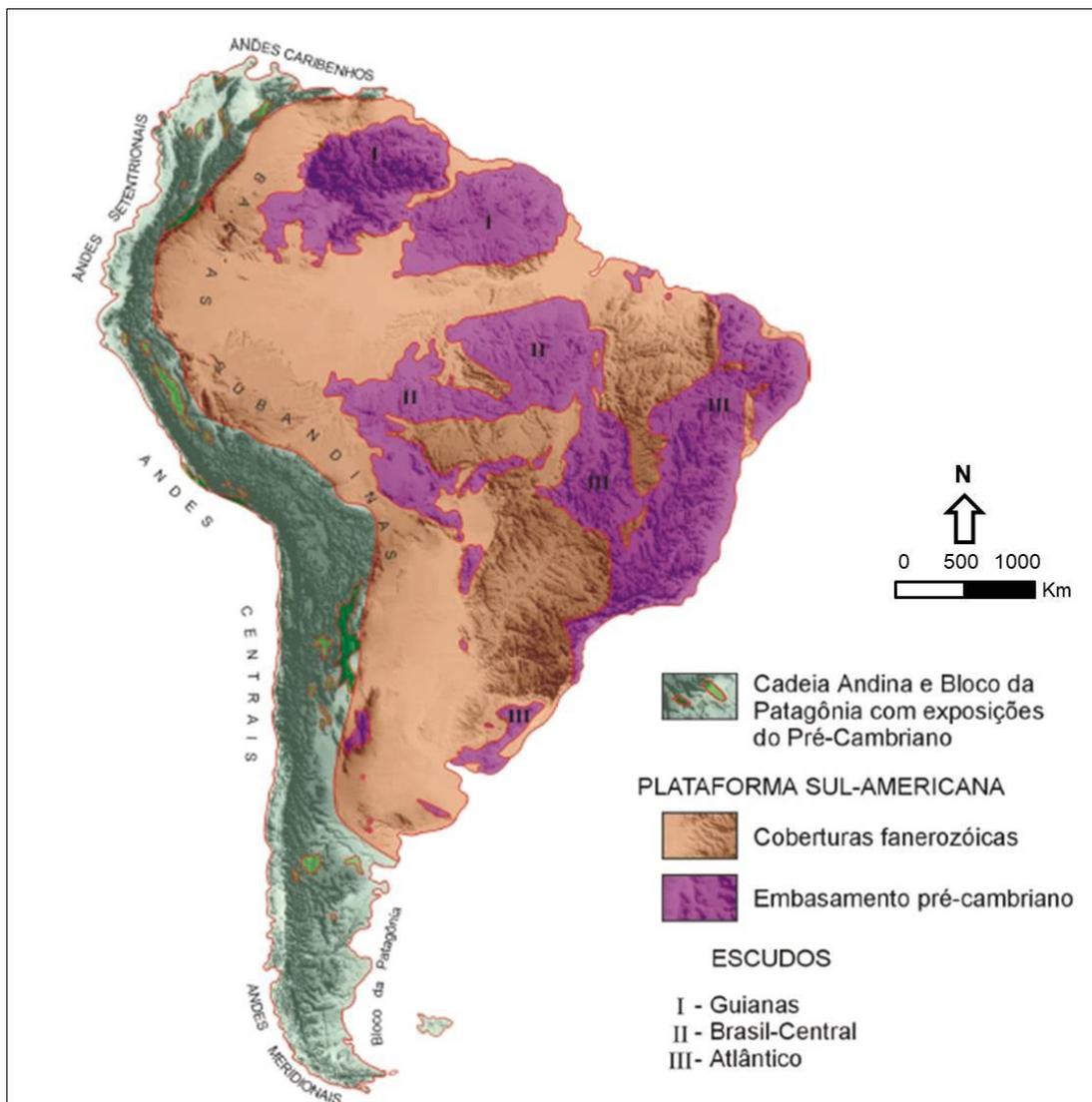


Figura 1 – Fração continental da Placa Sul-Americana, destacando a Plataforma Sul-Americana (modificado de ALMEIDA; HASUI; NEVES, 1976<sup>1</sup> por SCHOBENHAUS; NEVES, 2003, p. 8).

No Estado do Paraná, de acordo com o Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR, 2001), existem dois grandes compartimentos geológicos, o Escudo Paranaense e a Bacia do Paraná (Figura 2a).

O Escudo Paranaense aflora no leste do Estado, na região do litoral e do Primeiro Planalto, compõe as porções mais elevadas e antigas do Paraná e é formado por rochas ígneas e metamórficas da Plataforma Sul-Americana, e ao oeste, esse Escudo está coberto por rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná (MINEROPAR, 2001).

<sup>1</sup> ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B. B. The Upper Precambrian of South America. **Boletim IG**, Instituto de Geociências, USP, São Paulo, v. 7, p. 45 - 80, 1976 apud SCHOBENHAUS e NEVES, 2003, p. 8.

A Bacia do Paraná é uma região sedimentar da América do Sul, que possui uma área aproximada de 1,5 milhão de quilômetros quadrados, estando distribuída no sul do Brasil, no leste do Paraguai, no nordeste da Argentina e no norte do Uruguai (MILANI, 2004; MILANI *et al.*, 2007). De acordo com Zalán *et al.* (1987), as rochas da Bacia do Paraná possuem idades entre o Siluriano e o Cretáceo. Rosa Filho *et al.* (2011) também falam que a Bacia Sedimentar do Paraná se desenvolveu entre porções das Eras Paleozóica e Mesozóica.

MILANI (1997<sup>2</sup> apud MILANI *et al.*, 2007) identificou seis Supersequências na Bacia do Paraná, identificando-as como: 1) Rio Avaí, com idades do Ordoviciano ao Siluriano; 2) Paraná, de idade devoniana; 3) Gondwana I, com idades do Carbonífero ao Eotriássico; 4) Gondwana II (Mesotriássica a Neotriássica), 5) Gondwana III, com idades do Neojurássico ao Eocretáceo; e 6) Bauru, neocretácea.

Conforme MINEROPAR (2001), as unidades litológicas do Escudo Paranaense possuem idades variadas (Figura 2b). Segundo a mesma autoria, idades desde o Arqueano, como a Unidade do Complexo Granulítico Serra Negra, até o Ordoviciano, como o Grupo Castro. Ainda, no Escudo Paranaense também ocorrem unidades mais jovens, do Mesozóico e do Cenozóico, sendo as Mesozóicas representadas por diques de rochas básicas e rochas alcalinas e por carbonatitos, e as Cenozóicas referentes às Formações Alexandra e Guabirotuba, além de sedimentos recentes (MINEROPAR, 2001).

No Estado, a Bacia do Paraná possui uma cobertura sedimentar Paleozóica situada no Segundo e no Terceiro Planalto, logo a oeste do Escudo Paranaense, a qual é constituída pelos Grupos Paraná, Itararé, Guatá e Passa Dois; ao oeste dessa cobertura Paleozóica, existe uma cobertura sedimentar e vulcânica da Era Mesozóica, que compreende os Grupos São Bento - que apresenta as Formações Pirambóia e Botucatu, além da porção da Bacia composta por rochas ígneas extrusivas, com predominância de basaltos, denominada de Formação Serra Geral - e Bauru; e na Bacia também ocorrem sedimentos cenozóicos, que compreendem sedimentos inconsolidados cobrindo tanto a porção Paleozóica quanto a porção Mesozóica da Bacia do Paraná no Estado (MINEROPAR, 2001).

---

<sup>2</sup> MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.** 1997. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997 apud MILANI *et al.*, 2007, p. 266.

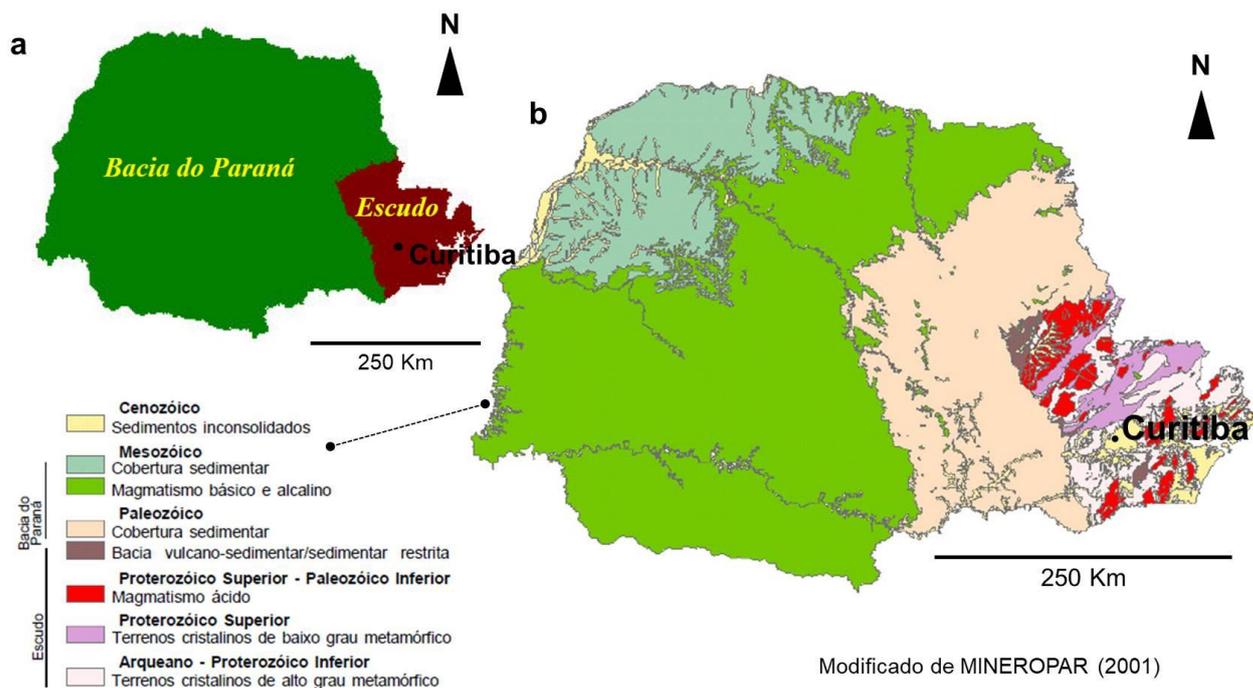


Figura 2 – a) os dois grandes compartimentos geológicos do Estado do Paraná; e b) cronologia das litologias do Estado do Paraná. Fonte: modificado de MINEROPAR (2001).

Alguns desses Grupos e Formações que são descritos pela MINEROPAR (2001) como pertencentes à Bacia do Paraná no Estado são correlacionados a algumas das Superseqüências da Bacia do Paraná (já supracitadas) conforme descrições de Milani et al. (2007). De acordo com Milani et al. (2007), por exemplo:

- A Superseqüência Gondwana III está relacionada ao intervalo geológico das Formações Botucatu e Serra Geral, enquanto que a Superseqüência Bauru é formada pelos Grupos Caiuá e Bauru, ambos cronocorrelatos.

Zalán et al. (1987), em estudos aeromagnetométricos, avaliaram um padrão de feições lineares em formato de X na Bacia do Paraná, verificando grupos de orientações NW-SE, NE-SW e E-W. Os autores ainda indicaram que as orientações mais importantes eram NW-SE e NE-SW, podendo estas estar relacionadas a falhas simples ou a grandes zonas de falhas.

### 3.2 Geomorfologia e Clima do Estado do Paraná

De acordo com Maack (1968) no Estado do Paraná foram identificadas cinco extensas regiões de paisagens naturais distintas, são elas: Litoral, Serra do Mar, Primeiro Planalto, Segundo Planalto e Terceiro Planalto (Figura 3).



Figura 3 – Esboço das cinco regiões naturais distintas do Estado do Paraná. Fonte: modificado de Maack (1968).

De acordo com Maack (1968), a fisiografia da zona litorânea apresenta feições de tectonismo de falha; e rumo ao mar, as cadeias montanhosas e os morros isolados estão envoltos por planícies aluvionares e por pântanos. O litoral paranaense também é marcado por áreas descontínuas integradas com sedimentos continentais e costeiros do Cenozóico (MINEROPAR; UFPR, 2006).

Já o Planalto Atlântico se estende do Rio de Janeiro até o norte de Santa Catarina, sendo caracterizado por um conjunto de serras, e no Paraná, esse Planalto apresenta duas unidades morfoesculturais distintas: a Serra do Mar e Morros e o Primeiro Planalto (MINEROPAR; UFPR, 2006).

Segundo MINEROPAR e UFPR (2006), a Serra do Mar se trata de uma cadeia de montanhas situada entre a Planície Litorânea e o Primeiro Planalto. Maack (1968) comenta que a Serra do Mar configura um degrau elevado entre essas duas regiões, além de formar uma serra marginal típica.

O Primeiro Planalto possui uma paisagem levemente ondulada, onde ocorrem planícies de várzeas com sedimentos fluviais e paludais recentes ao longo dos vales de rios; e ao norte esse Planalto é escavado pelos tributários do Rio Ribeira, caracterizando assim um relevo montanhoso ao norte (MAACK, 1968; MINEROPAR; UFPR, 2006). Maack (1968) também relata altitudes de Curitiba até o

Segundo Planalto entre 850 e 950 metros. Os valores entre 850 e 950 metros também são relatados em MINEROPAR e UFPR (2006) como altitudes médias do Primeiro Planalto.

Conforme Maack (1968), o Segundo Planalto é limitado ao leste por uma escarpa devoniana de rochas do Primeiro Planalto, e ao oeste por uma escarpa mesozoica de derrames vulcânicos localizados no Terceiro Planalto. No Segundo Planalto ocorrem sedimentos que não foram perturbados por orogêneses, exceto suaves inclinações para oeste (MAACK, 1968). MINEROPAR e UFPR (2006) descrevem o Segundo Planalto como formado por rochas Paleozoicas e moldado por estruturas monoclinais e sub-horizontais, além de possuir mergulho para o oeste.

O Terceiro Planalto compreende a região dos derrames vulcânicos da Formação Serra Geral (MAACK, 1968; MINEROPAR; UFPR, 2006). De acordo com MINEROPAR e UFPR (2006), nessa região ocorrem relevos planálticos, com altitudes de cumes médias entre 1.100 e 1.250 metros até altitudes inferiores entre 220 e 300 metros, sendo a inclinação geral desta região para oeste-noroeste. No Terceiro Planalto também está o arenito Caiuá, formado sobre os últimos derrames de lava, o qual indica a continuidade da deposição eólica terrestre (MAACK, 1968).

Em relação ao clima no Estado, Wrege et al. (2012), em um estudo regional, apresenta três diferentes climas para o Estado do Paraná de acordo com a classificação de Köppen: um tropical (Af) que ocorre no litoral e outros dois climas predominantes, o clima temperado quente (Cfb), que ocorre principalmente na porção sudeste do Estado, e o clima subtropical, que ocorre na porção norte e sudoeste do Estado.

Segundo Fritzens et al. (2011), o sudoeste e o litoral do Paraná apresentam maior pluviometria, ocorrendo as maiores alturas pluviométricas de inverno do Estado na sua região sudoeste e acentuadas precipitações de verão na sua região litorânea.

### **3.3 Breve Descrição Hidrogeológica do Estado do Paraná e Especificações sobre o Aquífero Caiuá**

De acordo com Rosa Filho et al. (2011), os aquíferos mais utilizados pela SANEPAR, conforme dados de 2010, são o aquífero Serra Geral, equivalente a 62%

da exploração dos aquíferos pela SANEPAR, e os aquíferos Caiuá e Carste, cada um com 12% do uso total dos aquíferos do Paraná pela Companhia. Já o aquífero Itararé corresponde a 3% da água subterrânea utilizada pela Companhia, enquanto os aquíferos Paleozóico Superior, Furnas e Rio Bonito, representam juntos e em proporções iguais outros 3% (ROSA FILHO et al., 2011).

Para uma breve e inicial avaliação hidrogeológica do território, de acordo com Azevedo e Albuquerque Filho (1998) os meios porosos podem apresentar porosidade granular, porosidade de fraturas ou porosidade cárstica. Segundo o Mapa Hidrogeológico do Estado do Paraná, de escala 1:600.000, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (SOUZA; FRANZINI, 2015), o Estado do Paraná possui três domínios hidrolitológicos distintos: 1) um cárstico, ocorrendo em parte da região sudeste do Estado; 2) um fraturado, que ocorre em maior extensão no Estado, abrangendo as porções sudoeste, central e parte da região sudeste; e um terceiro domínio 3) granular, que ocorre em áreas distintas do Estado (Figura 4).



Figura 4 – Domínios hidrolitológicos do Estado do Paraná. Modificado de Souza e Franzini (2015). Fontes das informações: 1) dados vetoriais dos domínios hidrolitológicos – Diniz et al. (2014), e 2) limites do Brasil e Estaduais – IBGE (2018).

Souza e Franzini (2015) descreveram unidades hidroestratigráficas para o Estado do Paraná, definindo-as como formações geológicas com características de armazenamento e de transmissão semelhantes. Foram definidas no domínio hidrolitológico granular do Estado do Paraná, de acordo com Souza e Franzini (2015):

- a Unidade Hidroestratigráfica de Depósitos Aluvionares, que ocorre em menos de 5% do Estado;
- a Unidade Hidroestratigráfica de Depósitos Litorâneos, utilizados como fonte de abastecimento em pequenas propriedades;
- a Unidade Hidroestratigráfica Guabirotuba, que constitui um aquífero utilizado em Curitiba;
- a Formação Caiuá, onde foram registrados ao todo 489 poços;
- o Sistema Aquífero Guarani (Aquíferos Botucatu e Pirambóia), que possui pouca seção aflorante no Estado, com larguras aflorantes inferiores a um quilômetro;
- a Unidade Hidroestratigráfica Passa Dois, onde foram registrados apenas 5 poços com vazões acima de 18 m<sup>3</sup>/h pelos autores;
- a Unidade Hidroestratigráfica Palermo, classificada como unidade não aquífera ou pouco produtiva;
- o Aquífero Rio Bonito, cujos autores relatam, setorialmente, para poços dessa unidade, vazões medianas de 10 e de 22,5 m<sup>3</sup>/h;
- o Aquífero Itararé, onde foram registrados 179 poços com produtividades variadas;
- a Unidade Hidroestratigráfica Ponta Grossa, considerada como não aquífera e constituída predominantemente por folhelhos e siltitos;
- e a Unidade Hidroestratigráfica Furnas, de baixa produtividade, mas com poços cadastrados.

Em relação aos aquíferos cársticos, a unidade hidroestratigráfica de maior importância é a Unidade Capiú, formada principalmente por metadolomitos, filitos e quartzitos (SOUZA; FRANZINI, 2015).

E em relação aos aquíferos fraturados no Estado do Paraná, a Unidade Hidroestratigráfica Serra Geral é mais importante, essa é constituída por basaltos e dacitos, mas no sudoeste do Estado também ocorre o aquífero fraturado relacionado às rochas Pré-Cambrianas, embora este possua menor produtividade que o Aquífero Serra Geral (SOUZA; FRANZINI, 2015).

Este trabalho será focado no aquífero Caiuá, devido a razões que serão mais bem apresentadas na seção 4.1.3, sendo esse aquífero comentado a seguir.

Conforme MMA (2015), nos poços do aquífero Caiuá ocorrem, em sua maioria, até três entradas de água. Essa pesquisa também indicou valores de espessura saturada para o aquífero entre 16,38 e 287,4 metros; porém, uma espessura mediana de 79,28 metros; assim como condutividades hidráulicas estimadas entre  $8,7 \times 10^{-7}$  e  $6,4 \times 10^{-5}$  m/s, além de uma vazão mediana de 10 m<sup>3</sup>/h e vazões de até 160 m<sup>3</sup>/h.

Em relação à produtividade, o aquífero Caiuá foi classificado por MMA (2015), com base em Diniz et al. (2014), nos seguintes intervalos: 1) de produtividade moderada ao norte do Rio Ivaí; 2) de produtividade geralmente baixa ao sul do Rio Ivaí; 3) de produtividade geralmente muito baixa, em locais do nordeste do aquífero; e 4) de pouca produtividade ou não aquífero na região sudeste, próxima ao contato com a Formação Serra Geral.

Segundo Foster (1987<sup>3</sup> apud FOSTER; HIRATA, 1988), a vulnerabilidade de um aquífero define a sua sensibilidade, de acordo com as suas características, de ser atingido por cargas contaminantes. Assim, MMA (2015) avaliou que o aquífero Caiuá possui, na maioria de sua extensão (89,4%), alta vulnerabilidade à contaminação de suas águas.

A figura 5 indica as localizações das unidades aquíferas no Estado do Paraná, de acordo com MMA (2015), definidas por esse com base em classificação de Diniz et al. (2014).

---

<sup>3</sup> FOSTER, S. S. D. **Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability, Pollution Risk and Protection Strategy**: International Conference, 1987, Noordwijk Aan Zee, the Netherlands Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants The Hague, Netherlands Organization for Applied Scientific Research. Netherlands Organization for Applied Scientific Research, 1987 apud FOSTER; HIRATA, 1988, p. 56.

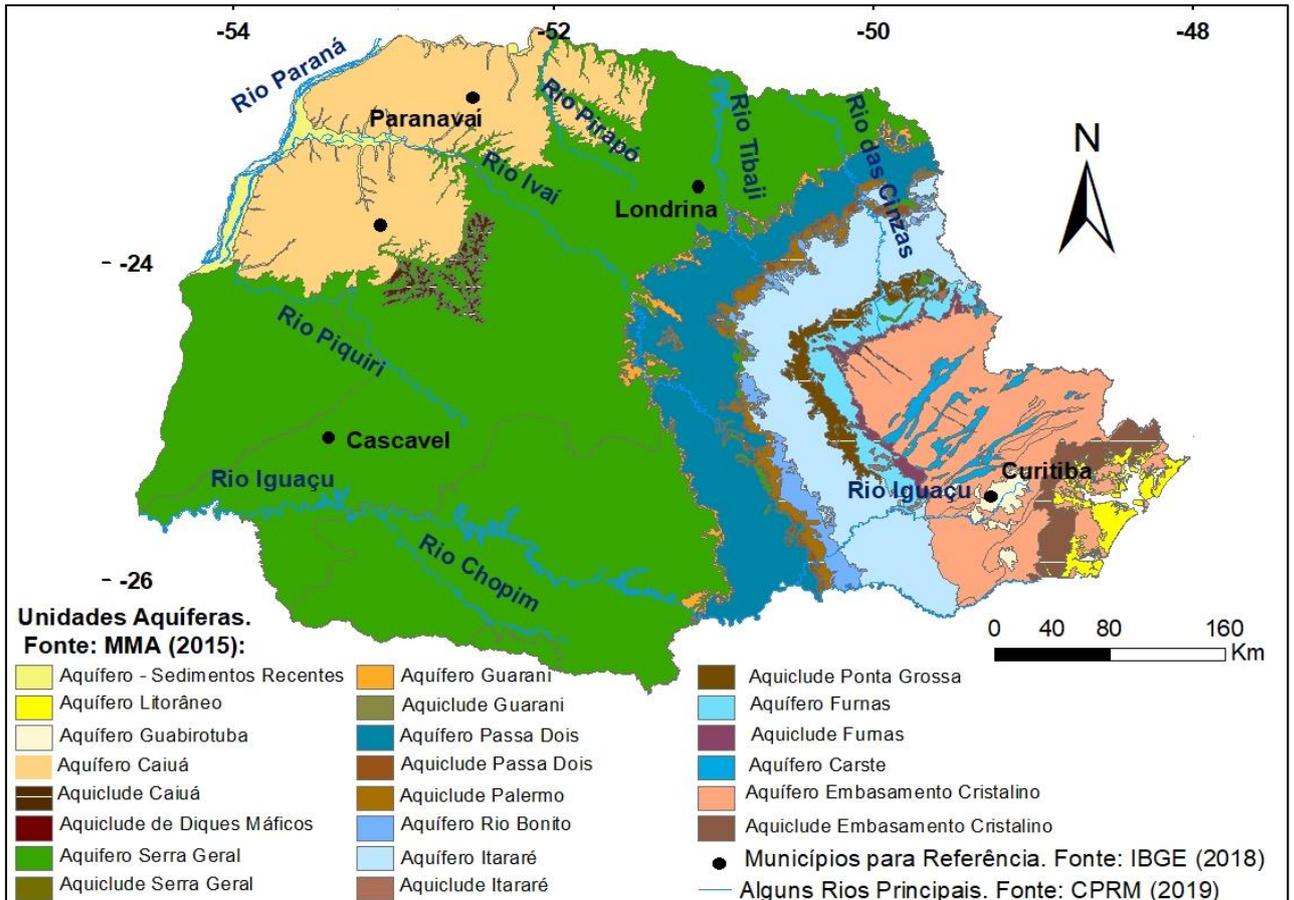


Figura 5 – Unidades aquíferas e não aquíferas do Estado do Paraná, modificado de MMA (2015). Fonte dos dados: 1) dados vetoriais das unidades aquíferas e não aquíferas: MMA (2015); 2) dados vetoriais das drenagens: CPRM (2019); e 3) localização de municípios: IBGE (2018).

No geral, as águas do Aquífero Caiuá foram consideradas como próprias para o consumo humano (CELLIGOI; DUARTE, 2002; ROSA FILHO et al., 2011). Porém, de acordo com Rosa Filho et al. (2011), deve ser dada atenção à suscetibilidade de o mesmo ser contaminado por agroquímicos. O estudo de MMA (2015), a partir de laudos do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas da Universidade Federal do Paraná, mostrou poços que possuíam parâmetros acima do valor máximo permitido para o consumo humano; porém, os autores indicaram que muitas vezes esse parâmetro era o pH, que segundo eles, pode ser corrigido nas estações de tratamento.

Bettú et al. (2006) comentaram que aquíferos que são livres e granulares possuem boa correlação entre as superfícies potenciométrica e topográfica, e conseqüentemente registraram isso no aquífero Caiuá. Esses autores discutiram também como feições estruturais influenciam nas misturas de águas entre os Sistemas Aquíferos Caiuá e Serra Geral, no Paraná, e avaliaram que as águas do

aquífero Serra Geral ascendem para o Caiuá por meio de fraturas, isso onde a potenciometria é favorável à conectividade hidráulica desses dois sistemas.

Hoje, o Caiuá é tido como Grupo; porém, já foi considerado como Formação basal do Grupo Bauru (ROSA FILHO et al., 2011). De acordo com Rosa Filho et al. (2011) o Grupo Caiuá, no Paraná, está distribuído em 22.700 Km<sup>2</sup>, e é composto pelas Formações: Santo Anastácio, formada por arenitos quartzosos marrom arroxeados claro, muito finos a finos; Rio Paraná, composta por unidades de arenitos com estratificação cruzada de grande porte; e Goioerê, com estratos arenosos cruzados de pequeno a médio porte.

Segundo Rosa Filho et al. (2011), o aquífero Caiuá é formado principalmente por arenitos de granulação fina a média, com uma matriz siltico-argilosa de 30% e de cimentação limonítica e carbonática, e estes arenitos possuem intercalações com camadas de siltitos e de argilitos. Contudo, Celligoi (2000), ao avaliar perfis geofísicos do aquífero Caiuá, não avaliou quantidades expressivas de argilas compactas, assim, inferiu relativa homogeneidade litológica aos perfis e considerou o aquífero Caiuá como não confinado. Dessa maneira, neste trabalho, para fins de cálculos, o aquífero foi considerado como homogêneo e livre, não havendo distinções entre as camadas, como será mostrado mais adiante.

Celligoi (2000) também avaliou, a partir de testes de laboratório, para amostras da região de Nova Esperança e Terra Rica, um valor médio de 19,7% para a porosidade efetiva relacionada ao aquífero Caiuá.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para uma melhor compreensão sobre o conceito de perímetros de proteção de poços, assim como de suas funções e de como defini-los apropriadamente, a revisão bibliográfica foi direcionada a esses assuntos, onde pesquisas tanto internacionais como nacionais foram consultadas para a avaliação da situação em que os estudos relacionados a PPPs se encontram.

### 4.1 Conceitos Relacionados a Perímetros de Proteção de Poços

De acordo com Adams e Foster (1992), as áreas de proteção de fontes, sejam essas fontes naturais ou poços, servem como uma defesa adicional para essas captações de água subterrânea, sendo essa intervenção obtida por meio do controle das atividades potencialmente poluidoras no interior, total ou em parte da área de recarga relacionada a essas captações de água subterrânea.

Logo, o PPP é um procedimento utilizado para definir limitações à ocupação antrópica em toda ou em parte da zona de recarga que é captada por um determinado poço ou fonte de água subterrânea (HIRATA, 1994).

Iritani e Ezaki (2012) falam também que PPPs protegem o entorno de captações utilizadas no abastecimento humano, devendo ser impostos juridicamente.

Assim, percebe-se que a definição de PPPs por si só não compreende uma ferramenta de defesa, mas que a intervenção antrópica no entorno de poços de interesse também precisa ser compreendida, para a percepção de contra quem se busca proteção. Ainda, de acordo com FOSTER *et al.* (2006), uma das maneiras de proteger a água subterrânea contra a contaminação é manejar o uso do solo, restringindo o mesmo tanto no presente como no futuro. Logo, o manejo de atividades futuras no entorno de poços de abastecimento humano também é importantíssimo.

Por isso, antes de aprofundar os conceitos intrinsecamente relacionados a PPPs, serão tratados a seguir alguns conceitos sobre fontes de contaminação às águas subterrâneas.

#### 4.1.1 Fontes de contaminação de águas subterrâneas

O termo contaminação da água subterrânea remete à existência de solutos dissolvidos na água, os quais podem torná-la imprópria para o ecossistema ou para o seu uso, tornando-se um problema quando o contaminante apresenta concentrações que podem trazer riscos à saúde humana ou ao próprio ecossistema em que se encontra (FITTS, 2015).

A contaminação antrópica da água subterrânea ocorre quando atividades desenvolvidas na superfície geram emissões e lixiviados contaminantes que são controlados inadequadamente e suas concentrações excedem a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura do aquífero (FOSTER et al., 2006). E de acordo com Foster et al. (2006), pode haver variação do grau de atenuação entre perfis e camadas distintas, e essa variação está relacionada com o tipo de contaminante e com os processos hidrogequímicos associados ao ambiente.

De acordo com a distribuição espacial da fonte de contaminação, a mesma pode ser pontual, difusa ou até mesmo linear (MANOEL FILHO, 2000). Segundo Manoel Filho (2000) uma fonte pontual trata-se daquela que está localizada em uma pequena superfície e que geralmente está relacionada a concentrações elevadas, enquanto que uma fonte difusa é aquela que ocupa grande superfície, como áreas urbanas, por exemplo, e a fonte linear existe quando a origem de contaminação se trata de um curso d'água.

Ainda, a contaminação da água subterrânea pode ocorrer de maneira direta, quando essa atinge o aquífero diretamente, sem a ocorrência de diluição, por poços abandonados, por exemplo; e também por maneira indireta, quando o contaminante chega ao aquífero após alterações devido ao transporte do mesmo desde o ponto de origem (MANOEL FILHO, 2000).

A carga contaminante ainda pode ocorrer de forma acidental, incidental ou então estar associada ao processo, sendo parte integral do mesmo (HIRATA, 1993).

Segundo FOSTER et al. (2006), a ameaça de contaminação por atividades antrópicas das águas subterrâneas captadas está associada à localização da atividade em relação à captura (se a mesma está na zona de captura do poço) e ao tempo de trânsito horizontal da água subterrânea.

A tabela 1 apresenta uma síntese de atividades potencialmente poluidoras.

Tabela 1 – Tipos de atividades potencialmente poluidoras, suas maneiras de distribuição espacial e principais tipos de poluentes. Fonte: Foster et al. (2006).

<b>Atividade</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Principais tipos de poluentes</b>
<b>Desenvolvimento Urbano</b>		
Falta de esgoto	P-D	nfot
Vazamento de esgoto*	P-L	ofnt
Lagoas de oxidação de águas residuais*	P	ofnt
Despejo de esgoto no solo*	P-D	nsoft
Esgoto em rio influente*	P-L	noft
Lixiviação de aterros sanitários/lixões*	P	osht
Tanques de armazenamento e tubulações de combustível	P-D	t
Valas de drenagem em auto-estrada	P-D	st
<b>Produção Industrial</b>		
Vazamentos em tanques/tubulações**	P-D	th
Derramamentos Acidentais	P-D	th
Águas do Processo/Lagos de efluentes	P	tohs
Despejos de efluentes no solo	P-D	tohs
Efluentes em rio influente	P-L	tohs
Lixiviação de depósitos de resíduos	P	ohst
Drenagem em valas	P	th
Precipitação de substâncias por meio aéreo	D	st
<b>Produção Agrícola***</b>		
a) Cultivo agrícola:		
Com agroquímicos	D	nt
Com irrigação	D	nts
Com lodo ou borra	D	ntso
Com irrigação com águas residuais	D	ntosf
b) Criação de gado/Beneficiamento da colheita:		
Lagoas de efluentes	P	font
Despejo de efluentes no solo	P-D	nsoft
Efluentes em rio influente	P-L	onft

Atividade	Distribuição	Principais tipos de poluentes
<b>Extração Mineral</b>		
Perturbação hidráulica	P-D	sh
Despejo de águas de drenagem	P-D	hs
Lagoas de águas de processo/lodo	P	hs
Lixiviação de depósitos de resíduos	P	sh
<b>Legenda:</b>		
*Pode incluir componentes industriais	P – Pontual	o – carga orgânica geral
**Também pode ocorrer em áreas não industriais	L – Linear	s – salinidade
***O principal perigo de contaminação é a intensificação	D – Difusa	h – metais pesados
	n – nutrientes	t – micro-organismos tóxicos
	f – patógenos fecais	

Fonte: Foster et al. (2006).

#### 4.1.2 Demais conceitos relacionados a Perímetros de Proteção de Poços

Consoante com Adams e Foster (1992), a maior área de proteção que um poço pode ter equivale à área de sua recarga, denominada também de zona de captura, que corresponde à zona onde a recarga do aquífero – seja essa devido à precipitação pluviométrica ou aos cursos d'água superficiais – será captada pelo poço. Os autores também comentam que não se deve confundir a zona de interferência causada pelo bombeamento do poço com a zona de captura citada acima.

De acordo com USEPA (1987), o bombeamento de um poço gera uma zona de influência (ZI) ao redor desse, que também pode ser chamada de “cone de depressão”, e parte dessa zona de influência está inserida na zona de contribuição (ZC), que inclui todas as áreas que contribuem para a recarga de água do referido poço ou até mesmo de determinado campo de poços. Um cone de depressão é produzido pelo rebaixamento de uma superfície equipotencial, e trata-se de um cone invertido, cujo centro equivale ao poço que se encontra em bombeamento (WREGG, 1995). De acordo com Foster *et al.* (2006), a zona de influência devido ao bombeamento de um poço ultrapassa a área da zona de captura à jusante do poço em questão (Figura 6).

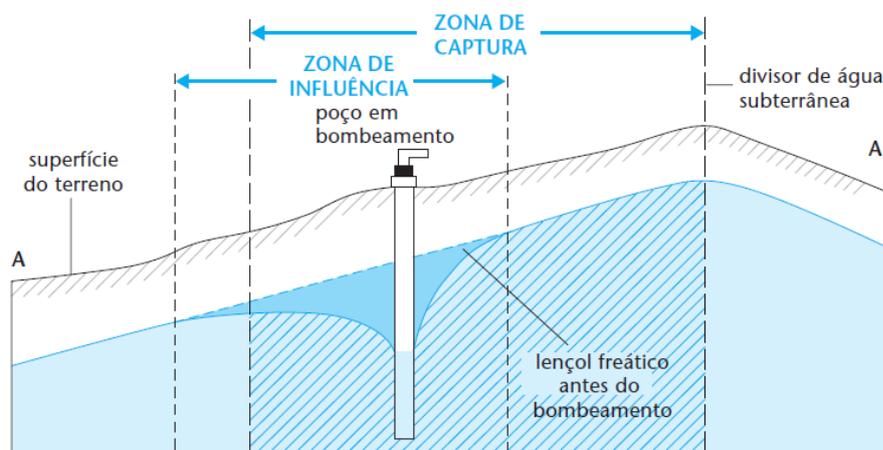


Figura 6 – Diferença entre a zona de captura e a zona de influência de um poço em bombeamento, ilustrada em um perfil vertical. Fonte: Foster et al. (2006).

Em relação à proteção, a medida ideal para eliminar totalmente o risco de contaminação da água subterrânea captada por poços ou por fontes naturais seria a proibição de atividades potencialmente poluidoras em toda a zona de captura dessas fontes; porém, essa é uma medida inviável devido a fatores socioeconômicos (ADAMS e FOSTER, 1992; FOSTER *et al.*, 2006).

Assim, de acordo com Adams e Foster (1992), para a viabilidade da aplicação de zonas de proteção, a zona de captura total pode ser subdividida em três zonas de proteção, sendo elas, de acordo com Adams e Foster (1992):

- Zona Operacional do Poço: é a menor área de proteção que um poço pode ter, e compreende uma pequena área ao redor do mesmo. Nessa área são permitidas apenas atividades relacionadas à própria captação de água, que deve ocorrer com precaução para evitar possíveis contaminações à fonte de captação. Para os autores, avaliando as condições do Reino Unido, um raio de 30 metros seria adequado para essa primeira proteção contra contaminações;

- Zona de Proteção Interior: é uma zona de proteção cuja distância é baseada em um tempo de trânsito horizontal específico da água subterrânea, cuja função é proteger as águas subterrâneas captadas de contaminantes patogênicos. Adams e Foster (1992) citam, conforme base bibliográfica, que os tempos de trânsito considerados para a delimitação dessa área variam; porém, comentam que o valor de 50 dias é um valor razoável como base para a delimitação dessa área;

- Zonas de Proteção Externas: tratam-se de zonas mais externas que as duas anteriores, com a função de proteção contra demais contaminantes. De acordo com

os autores, quanto maior a extensão dessa zona, menores serão as chances de contaminantes degradáveis atingirem a captação, e maior será o tempo disponível para a remediação da área em casos de conhecimento da degradação da água subterrânea. Os autores ainda comentam que essa área mais externa pode ser traçada a partir de um tempo de trânsito horizontal da água subterrânea, mas superior ao avaliado anteriormente, como por exemplo, de 500 dias, e indicam também que essa zona de proteção mais externa possua um limite inferior de 25% da área correspondente à zona de recarga total.

Foster *et al.* (2006) denominam a Zona de Proteção Interior, como Zona de Proteção Microbiológica (Figura 7), cuja contaminação patogênica em aquíferos rasos pode ser proveniente de fossas sépticas, esgotos, cursos de água contaminados, entre outros; e quanto a Zona de Operação do Poço, consideram uma distância mínima de 20 metros, e também consideram a necessidade de inspeção detalhada das condições sanitárias do poço em um raio mínimo de 200 metros. Já Iritani e Ezaki (2012) se referem ao perímetro focado à proteção contra micro-organismos patogênicos como Perímetro de Alerta.

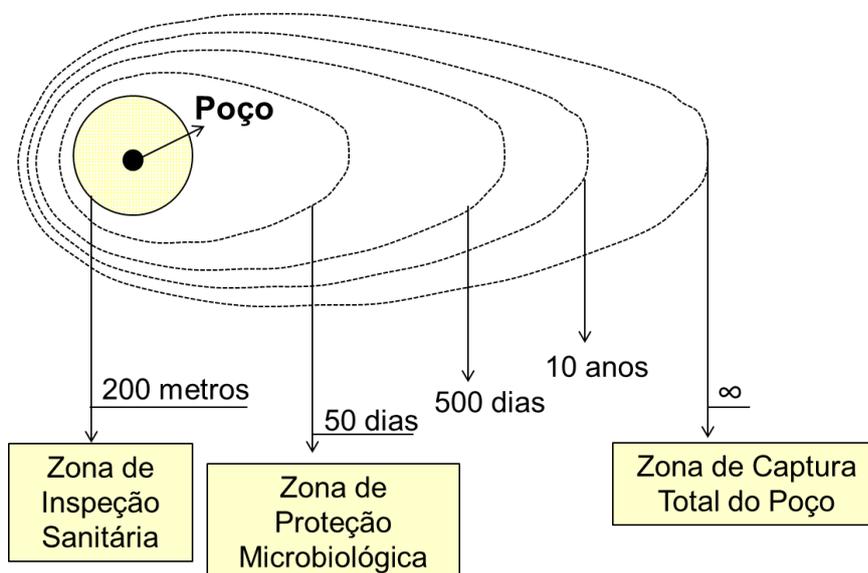


Figura 7 – Esquema da Zona de Captura e de PPPs baseados no critério do tempo de trânsito ao redor de um poço em aquífero não confinado. Fonte: modificado de Foster *et al.* (2006).

De acordo com Foster *et al.* (2006) a subdivisão da área de captura total pode ser realizada com base em diversos critérios; porém, uma combinação dos critérios

do tempo de trânsito do fluxo horizontal da água e da distância até a fonte são os mais adequados.

Para esclarecimento, os perímetros de proteção são delimitados com base em conjuntos de padrões conceituais, denominados de critérios (USEPA, 1987). E esses critérios podem ser: distância, rebaixamento do nível da água subterrânea, tempo de trânsito da água subterrânea, limites de fluxo (barreiras hidráulicas) e capacidade assimilativa (USEPA, 1987).

Conforme USEPA (1987), o critério da distância permite a delimitação de PPPs de uma maneira direta, que usa um raio ou uma extensão, comumente decidida de forma arbitrária, do poço até o ponto de interesse, e isso pode causar uma área de proteção insuficiente ou ineficaz ao redor do poço. Porém, o critério da distância pode ser um “primeiro passo” para a proteção de um poço, havendo uma posterior delimitação baseada em técnicas mais sofisticadas (USEPA, 1987).

Já o critério do tempo de trânsito é baseado no tempo de viagem da água no meio subterrâneo; assim, aquíferos com altas velocidades de fluxo da água subterrânea possivelmente transportarão um contaminante de maneira mais rápida em direção ao poço (USEPA, 1987). Segundo USEPA (1987) o critério do tempo de trânsito é uma medida operacional das velocidades de fluxo da água subterrânea, as quais dependem fortemente das condições hidrogeológicas do local em que se encontram. E conforme Marcelino (1999), o poluente quando chega à zona saturada tende a adquirir uma dinâmica horizontal de fluxo.

Consoante com Foster et al. (2006), uma zona delimitada a partir do tempo de trânsito de 10 anos ou mais, para o fluxo horizontal, pode substituir a zona de captura total para aquíferos de grande armazenamento e com condições de contorno ou de extração complexas, estando essa zona delimitada para uma isócrona de 10 anos sujeita a incertezas menores do que à zona de captura se delimitada nessas condições complexas.

Existe ainda a nomenclatura Zona de Transporte, que se trata de um perímetro delimitado por uma isócrona (IRITANI, 1998; IRITANI; EZAKI, 2012); assim, esse termo remete às zonas de proteção internas à Zona de Captura, já comentadas e referenciadas anteriormente. Iritani e Ezaki (2012, p. 5) comentam que uma isócrona é um contorno delimitado por pontos de igual tempo de trânsito e também exemplificam que uma “zona de transporte de 50 dias indica que qualquer

partícula de água contida internamente a este perímetro atingirá o poço em um tempo máximo de 50 dias”.

#### 4.1.3 Condições mais adequadas e dificuldades para a delimitação de PPPs

USEPA (1993) relata que a definição de áreas de proteção para poços que bombeiam água de aquíferos confinados, fraturados e cársticos é mais difícil, e isso é devido à complexidade hidrogeológica desses aquíferos.

Então, a estratégia de perímetros de proteção de poços é melhor aplicável para aquíferos homogêneos, caracterizados por porosidades primárias (não fraturados e não cársticos) e com um número razoável e fixo de poços que possuam uma taxa de bombeamento razoavelmente estável (FOSTER et al., 2006; HIRATA, 1994). Ainda, de acordo com Foster et al. (2006), em aquíferos confinados, a zona de captura estará distante do ponto de captação.

Outro fator importante a ser avaliado, é que aquíferos não confinados são mais vulneráveis à contaminação antrópica, uma vez que possuem conexões hidrogeológicas diretas com a superfície (USEPA, 1987).

Desta maneira, existem algumas dificuldades associadas à definição de PPPs.

De acordo com Hirata (1994), a heterogeneidade e a anisotropia do meio são características que proporcionam dificuldades na delimitação de PPPs, principalmente quando se trata da condutividade hidráulica, podendo gerar incertezas relacionadas a perímetros traçados.

A condutividade hidráulica expressa a facilidade em que a água subterrânea se move no meio geológico, materiais com condutividades hidráulicas mais elevadas são capazes de transmitir a água com maior facilidade em relação a um meio com materiais de baixa condutividade (FITTS, 2015). Conforme Fitts (2015), em um meio heterogêneo o valor da condutividade hidráulica varia no espaço, ou seja, depende do local, enquanto que em um meio anisotrópico, o valor da condutividade varia com a direção, ou seja, a condutividade na direção X é diferente da condutividade na direção Y, sendo um meio totalmente isotrópico aquele que apresenta a mesma condutividade em todas as suas direções. Para Fitts (2015), um meio totalmente homogêneo e isotrópico inexistente, mas quando for razoável, um meio pode ser considerado dessa maneira para fins matemáticos.

Outra dificuldade está relacionada à interferência entre poços, que pode gerar incertezas, uma vez que poços em bombeamento, mesmo que utilizados para outros fins que não o abastecimento humano, podem aumentar a zona de captura no aquífero; e a variação da demanda da água subterrânea também pode gerar incertezas na definição de PPPs (FOSTER; SKINNER, 1995). Para Foster, Hirata e Rocha (1988) uma das restrições da delimitação de PPPs é o aumento excessivo de poços que podem causar interferências entre si e assim, na definição de zonas de proteção fixas. Porém, de acordo com Foster e Skinner (1995), uma das maneiras de obter a aceitação para PPPs que apresentem variações de suas áreas, devido às variações das taxas de bombeamento, por exemplo, é a definição de um perímetro de proteção máximo, que englobe as possíveis variações dos mesmos.

A ocorrência de cursos de água superficiais, que recebem água da descarga de aquíferos, quando próximas de poços ou de fontes, também pode influenciar na delimitação de zonas de proteção de poços (FOSTER; SKINNER, 1995); assim, como poços que podem bombear água desses cursos d'água, havendo a possibilidade até mesmo de interferência na qualidade da água, como comentado por Hirata (1994) e por Foster et al. (2006).

Juntamente, a deficiência de dados, assim como as incertezas técnicas referentes ao traçado também podem dificultar a definição de PPPs (FOSTER; HIRATA; ROCHA, 1988).

Por consequência do que foi expresso acima e também das várias etapas de estudo, apenas o Aquífero Caiuá será trabalhado aqui, isso por se tratar de um aquífero granular, e também, por abastecer, conforme AGUASPARANÁ (2010), cerca de 80% da população que reside sobre ele. Além disso, MMA (2015) utilizou um total de 404 poços tubulares profundos nesse aquífero para caracterizar sua hidrogeologia, indicando um bom número de poços para avaliação. Ainda, conforme MMA (2015), esse aquífero possui, predominantemente, alta vulnerabilidade.

Celligoi (2000) caracterizou o Aquífero Caiuá como homogêneo, e essa premissa também auxiliou na escolha desse aquífero (Figura 8) para a definição de PPPs a partir de diferentes metodologias.

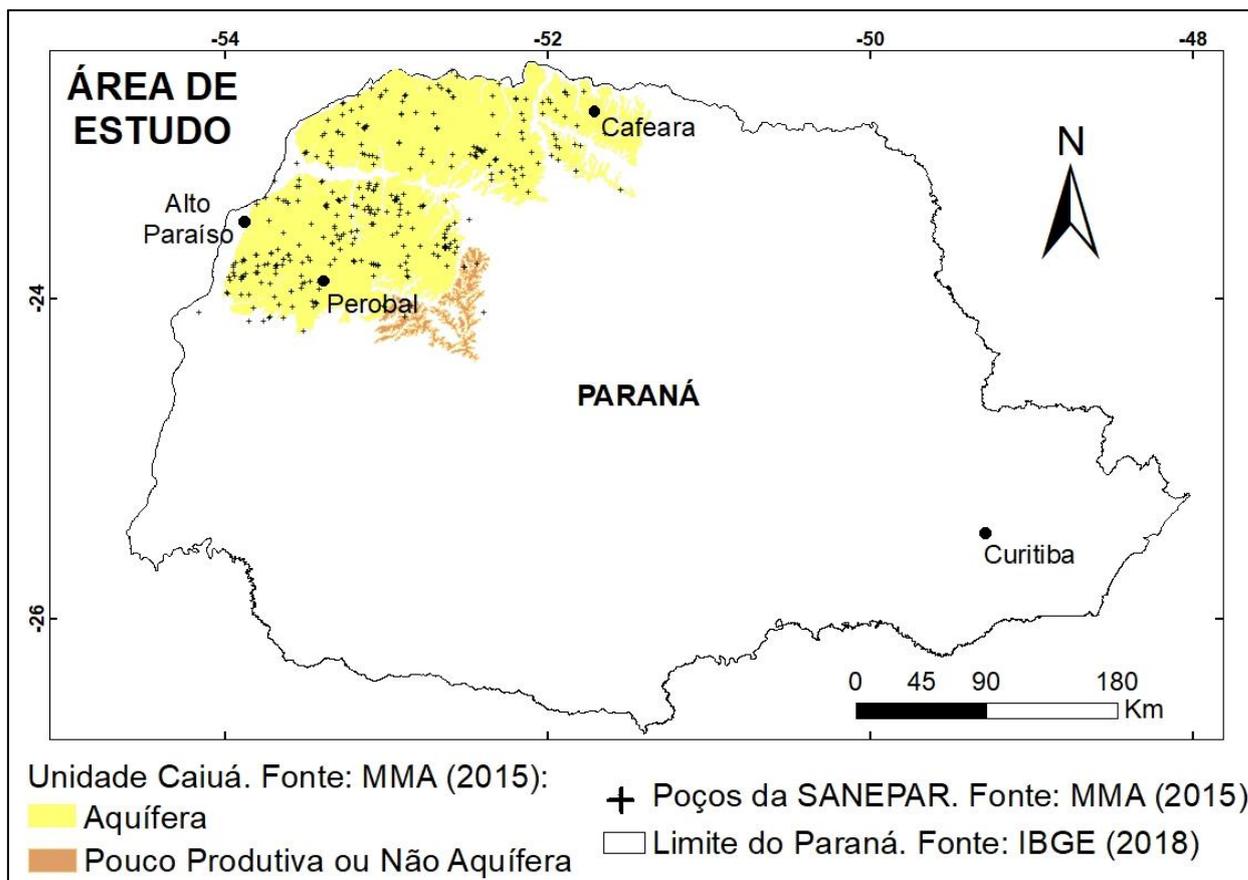


Figura 8 – Área que será estudada neste trabalho. Fonte dos dados: 1) Localização do Aquífero Caiuá e poços da SANEPAR a serem trabalhados: MMA (2015); e 2) Limite do Paraná e localização de alguns municípios: IBGE (2018).

## 4.2 Alguns Métodos Existentes para a Delimitação de PPPs

A metodologia a ser aplicada neste trabalho será definida e explicada posteriormente (Seção 5); porém, a seguir, os principais métodos existentes para a delimitação de perímetros de proteção de poços serão brevemente explicitados de acordo com a bibliografia sobre o tema.

O método do raio fixo arbitrário (RFA) consiste em desenhar um círculo de raio específico, selecionado arbitrariamente por meio do critério da distância, ao redor do poço de interesse (USEPA, 1987). Conforme a USEPA (1987), a distância arbitrária pode ser decidida de acordo com algumas considerações geológicas muito generalizadas, e a técnica possui a vantagem de ser uma técnica de fácil e barata aplicação; porém, possui um alto grau de incerteza associado, principalmente em áreas de heterogeneidade hidrogeológica ou onde existem barreiras hidrológicas, devido ao uso de dados com pouco embasamento científico, podendo esse método

criar áreas de proteção muito conservadoras ou até mesmo insuficientes para as condições reais.

O método do raio fixo calculado (RFC) consiste em delimitar o entorno do poço de interesse por um círculo que representa um tempo de trânsito específico, sendo o raio desse círculo obtido por meio de equações analíticas baseadas no volume de água que será bombeada pelo poço em determinado período de tempo; assim, a vantagem deste método é que ele também possui fácil aplicação; no entanto, por não utilizar muitos parâmetros relacionados ao transporte de contaminantes, ele pode gerar resultados imprecisos, principalmente em áreas com características hidrogeológicas heterogêneas (USEPA, 1987).

Segundo a USEPA (1987), o método das formas variáveis simplificadas gera áreas com formas padronizadas ao redor do poço, sendo baseada nos critérios de limite de fluxo e de tempo de trânsito. E de acordo com a USEPA (1994), o método combina soluções analíticas relacionadas ao tempo de trânsito e a equações de rebaixamento. A forma padrão apropriada é obtida por meio de análises das condições hidrogeológicas e de bombeamento do poço, e após, essa forma é alinhada de acordo com o fluxo da água subterrânea, sendo o critério do tempo de trânsito utilizado para calcular a extensão da área de proteção, e assim como os métodos anteriores, esse também é de fácil aplicação; porém, em áreas com hidrogeologia heterogênea ou barreiras hidrológicas, ele não possui boa precisão (USEPA, 1987).

Os métodos analíticos para delimitação de PPPs são baseados em equações para definição do fluxo da água subterrânea e do transporte de contaminantes, e as equações de fluxo uniforme, por exemplo, requerem diversos parâmetros hidrogeológicos para a definição da zona de contribuição de um poço em bombeamento (USEPA, 1987). USEPA (1994) relatou diferentes equações analíticas relacionadas à delimitação de PPPs e observadas na bibliografia, sendo essas baseadas no critério do tempo de trânsito ou no critério de rebaixamento no nível d'água. Conforme a USEPA (1987), as vantagens da utilização do método analítico (MA) são os fáceis entendimento e resolução das equações; porém, o método também não considera barreiras hidrológicas, como por exemplo, lagos, canais, entre outros, assim como não observa heterogeneidades do aquífero.

Para USEPA (1994), o método do mapeamento hidrogeológico pode ser uma técnica complementar para os métodos mais simples de definição de PPPs. Em

muitas situações hidrogeológicas é possível, por meio de mapeamento hidrogeológico (geológico, geofísico e outros), definir os parâmetros de limite de fluxo e de tempo de trânsito; por exemplo, os limites de fluxo podem ser definidos por diferentes litologias com contraste de permeabilidade, e um mapeamento geológico da superfície pode contribuir para a avaliação da variação de litologias (USEPA, 1987). Assim, de acordo com a USEPA (1987), o método do mapeamento hidrogeológico é adequado para definir PPPs em locais que possuem limites de fluxo da água subterrânea próximos da superfície do terreno; sendo inadequado para grandes ou profundos aquíferos.

Os modelos numéricos são definidos como técnicas utilizadas na definição de PPPs a partir de equações numéricas que se aproximam das condições de fluxo das águas subterrâneas e do transporte de contaminantes em meio subterrâneo, existindo inúmeros modelos numéricos para isto, que são principalmente usados em condições hidrogeológicas complexas (USEPA, 1987). De acordo com a USEPA (1987), entre as vantagens desses métodos estão a potencialidade de resultados mais acurados e a sua aplicabilidade em quaisquer condições hidrogeológicas; contudo, os custos para a aplicação de modelagem numérica, dependendo da disponibilidade e da qualidade dos dados, podem ser muito elevados; além de exigir bastante conhecimento técnico para a sua aplicação.

Outro método existente para a definição de PPPs é o de Wyssling (1979). De acordo com Iritani e Ezaki (2012) o método de Wyssling permite a definição de PPPs e inclusive da zona de contribuição do poço, considerando o fluxo uniforme do aquífero e também o fluxo radial devido ao bombeamento do poço que terá seu perímetro de proteção delimitado. Sendo o método de Wyssling semelhante ao método do fluxo uniforme (IRITANI; EZAKI, 2012).

#### **4.3 Trabalhos Internacionais no Âmbito de Estudo**

Segundo Hirata (1994), o primeiro País do continente americano a utilizar perímetros de proteção de poços foi Barbados que, em 1963, estabeleceu uma divisão territorial com base em PPPs e na cartografia de vulnerabilidade. E de acordo com Foster e Skinner (1995), o conceito de proteção de fontes de água subterrânea já existia em leis de alguns países da Europa desde o século XIX,

embora o aumento do conhecimento sobre hidrogeologia e sobre ameaças às águas subterrâneas tenha evoluído esse conceito.

Em 1986, nos Estados Unidos, as alterações referentes à Lei da Água Potável Segura ("*Safe Drinking Water Act*"), promulgada em 1974, incluíram além de outros programas para proteção das águas subterrâneas, o programa de proteção de poços, que passou a requerer dos estados americanos áreas de proteção no entorno de poços utilizados para abastecimento público, ficando a USEPA responsável por disponibilizar aos estados os critérios para as definições dessas áreas (USEPA, 1986).

Assim, a USEPA (1987), por meio do "Guia para Delineação de Perímetros de Proteção de Poços", criou um roteiro geral para soluções iniciais na definição de zonas de proteção ao redor de poços, que abrangeu principalmente seis métodos, ou seja, maneiras de mapear PPPs, que já haviam sido utilizados nos Estados Unidos e na Europa Ocidental, sendo eles, em ordem crescente de sofisticação de implementação: a) raio fixo arbitrário, b) raio fixo calculado, c) formas variadas simplificadas, d) métodos analíticos, e) mapeamento hidrogeológico e f) modelos numéricos de transporte.

De acordo com Raymond et al. (2006), muitos estados americanos optaram por utilizar métodos mais simplificados, como o do raio fixo arbitrário ou o do raio fixo calculado, na delimitação de PPPs. Os autores avaliaram, por meio de consulta a *Websites* ou por meio de contato com gerenciadores de programas de proteção de poços estaduais, que de 37 estados pesquisados, 26 utilizavam o método do raio fixo arbitrário (RFA) para delimitar PPPs ao menos para algumas estimativas, e a pesquisa ainda indicou um raio médio de proteção de 945 metros.

Segundo o Departamento de Gestão Ambiental de Indiana - *Indiana Department of Environmental Management* - (IDEM, 2018), desde a década de 1930 o Estado americano vem, por meio de uma política informal, requerendo uma área de proteção de 200 pés, ou seja, de aproximadamente 60 metros, entre poços utilizados no abastecimento público e fontes de contaminantes bacteriológicos, como esgotos sanitários, por exemplo; mas atualmente, a construção de novos poços precisa ser aprovada pelo próprio IDEM, e o processo de aprovação inclui avaliar o uso de solo em um raio de aproximadamente 1 quilômetro ao redor do local pretendido. Em Indiana, para a implantação de um novo campo de poços, por exemplo, antes de sua construção, é necessário um estudo de PPPs, onde é

recomendada uma avaliação preliminar com o uso de métodos analíticos ou semi-analíticos; porém, no Estado, o uso do método do raio fixo arbitrário é permitido para pequenos sistemas, cujo bombeamento de água não é significativo (IDEM, 2018).

Na bibliografia, existem muitos trabalhos sobre a delimitação de PPPs, e muitos deles comparam a aplicação de distintos métodos em uma determinada área de estudo, como pode ser observado a seguir.

Miller, Chudek e Babcock (2003), por meio de sobreposições de dados em um sistema de informação geográfica (SIG), compararam perímetros de proteção delimitados por meio do método de RFC e por outros métodos mais complexos, como por exemplo, o método analítico, o modelo numérico (MN) e o mapeamento hidrogeológico, para poços do sistema público de abastecimento de água do Condado de Whatcom, no Estado americano de Washington. Os autores utilizaram como tempo de trânsito os valores de 1, de 5 e de 10 anos, e observaram que para os tempos de 1 e 5 anos e para as condições estudadas, o método do RFC delimitou áreas de proteção comparáveis às estimadas por modelos hidrogeológicos mais complexos; assim, também concluíram que o método do RFC, por ser de rápida e barata aplicação, pode representar um efetivo primeiro passo para a proteção de pequenos sistemas de abastecimento, que não possuem recursos suficientes para a aplicação de métodos mais sofisticados.

Após definir áreas de vulnerabilidade no aquífero do Vale do Toluca, no México, e de avaliarem poços que necessitavam de proteção urgente, Expósito et al. (2010) compararam a aplicação do método do RFC e de métodos analíticos em diferentes versões para a definição de perímetros de proteção em dois poços na área estudada pelos mesmos. Os autores utilizaram os tempos de trânsito equivalentes a 60 e a 3650 dias, tempos baseados na bibliografia avaliada por eles. E partir disso, verificaram diferentes resultados para os métodos executados, avaliando, para as delimitações por meio do RFC, uma superproteção para as áreas de baixa carga hidráulica ao redor do poço, e uma proteção inadequada para as áreas de alta carga hidráulica (montante), o que os autores associaram à desconsideração do gradiente hidráulico do aquífero pelo método do RFC. Expósito et al. (2010) então definiram, que para seu caso de estudo, o método analítico na versão de Minkin foi o melhor aplicável.

A USEPA (2018) fala de seu modelo de fluxo de águas subterrâneas, o *Wellhead Analytic Element Model* (WhAEM2000), que de acordo com a agência,

trata-se de um *software* de domínio público projetado para facilitar a definição de Zonas de Captura de Poços e o mapeamento de PPPs, sendo baseado nos métodos de raio fixo, de fluxo uniforme e também de modelagem hidrogeológica.

Badv e Deriszadeh (2005) utilizaram o modelo WhAEM2000 para definir perímetros de proteção de poços na bacia do Rio Shar-Chai, no Irã, onde a água subterrânea é muito importante, estudando aquíferos confinado e não confinado. Os autores utilizaram o modelo analítico, e para isso, tiveram que criar um modelo conceitual, e para a validação do modelo, os autores utilizaram o fator de que a diferença entre a carga observada e a carga modelada deveria ser menor ou igual que 10% do valor da espessura do aquífero. Badv e Deriszadeh (2005) utilizaram dois poços para o estudo, assim como um tempo de trânsito de 2 anos, e avaliaram zonas de proteção mais curtas e estreitas para o poço situado em condições de menor permeabilidade; logo, atribuíram a menor extensão do PPP à baixa permeabilidade e à taxa de recarga, e o formato estreito do PPP, imputaram à variação da espessura do aquífero na localização do poço de menor permeabilidade. E no final do estudo, os autores avaliaram que os PPPs haviam abrangido áreas residenciais.

A Agência de Proteção Ambiental do Estado americano de Ohio (Ohio EPA) comparou, por meio de tecnologia de SIG, PPPs delimitados com o uso dos métodos RFA, RFC e de elementos analíticos, e avaliou que se tivessem utilizado o método do RFC ao invés do método de elementos analíticos, o Estado estaria protegendo uma área (em tamanho) aproximada da qual protege atualmente; porém, não protegeria 265 Km<sup>2</sup> de área crítica (de alto gradiente hidráulico), e estaria protegendo sem necessidade uma área de 269 Km<sup>2</sup> de baixo gradiente hidráulico, ou seja, à jusante (RAYMOND et al., 2006).

#### **4.4 Trabalhos Nacionais no Âmbito de Estudo**

Um exemplo de legislação no Brasil, é o Decreto Estadual Nº 32.955 (ESTADO DE SÃO PAULO, 1991), que em seu artigo 25, estabeleceu a implementação de Perímetros de Alerta contra contaminantes não conservativos, que devem ser delimitados a partir do ponto de captação da água subterrânea e por uma distância coaxial ao sentido do fluxo equivalente ao tempo de trânsito da água no aquífero de 50 dias. O estado de São Paulo possui muitas pesquisas sobre a

delimitação de PPPs em seus aquíferos, como os de Hirata (1994), Iritani (1998), Marcelino (1999) e Carvalho e Hirata (2012).

Legalmente, no Brasil, também existe a Portaria de número 231 de 1998 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 1998), antes desse se tornar a Agência Nacional de Mineração, que exige que relatórios finais de pesquisa para exploração de águas classificadas como minerais ou potáveis de mesa apresentem a delimitação de áreas de proteção de fontes, para qual devem ser utilizados métodos adequados.

Um dos objetivos do trabalho de Hirata (1994) era avaliar diferentes técnicas para a definição de perímetros de proteção de poços públicos no município de São José dos Campos, São Paulo, área a qual o autor analisou como de alta vulnerabilidade à contaminação e de elevada atividade industrial. Hirata (1994) utilizou três técnicas para a delimitação dos PPPs, sendo elas o método de RFC, do fluxo uniforme e o método numérico, e para esse último, o autor utilizou o *software Flowpath*, que o mesmo relata ser um modelo bidimensional que utiliza diferenças finitas. Os tempos de trânsito utilizados por Hirata (1994) foram de 50, 365 e 3650 dias, e ao comparar os resultados para os variados métodos, o autor avaliou diferenças evidentes entre eles, tanto no tamanho quando nos formatos das áreas, sendo o método do RFC o mais conservador, uma vez que abrangeu maiores áreas. Hirata (1994) concluiu que para as condições estudadas, com dados disponíveis pouco confiáveis, o método do fluxo uniforme foi o mais adequado, uma vez que a falta de informações sobre o fluxo vertical e de potenciometria atualizada implicaram em restrições ao uso do método numérico. O autor também avaliou a existência de atividades no interior das zonas de proteção definidas, enfatizando os 19 postos de serviços situados no interior de PPPs definidos pelo método do fluxo uniforme.

Outra pesquisa existente no Estado de São Paulo é o trabalho de Iritani (1998), em síntese, o objetivo da autora foi analisar a viabilidade da modelagem numérica tridimensional na definição de Zonas de Contribuição de captações de água subterrânea no município de Caçapava, mais precisamente na porção sul do rio Paraíba, e para isso, a autora utilizou o *software MODFLOW*, utilizando os tempos de trânsito de 10 e de 50 anos; e assim, comprovou a viabilidade da aplicação do método, indicando que com o mesmo também é possível delimitar zonas de transporte, por meio de tempos de trânsito adequados. De acordo com a

autora, sua pesquisa também permitiu avaliar, segundo os caminhos de transporte das partículas, locais adequados para a instalação de poços de monitoramento.

Marcelino (1999) definiu PPPs para poços situados na Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, inseridos em um aquífero sedimentar. O autor também fez um levantamento das atividades com potencial de geração de contaminantes para águas subterrâneas existentes na região dos poços na época do estudo. Marcelino (1999) escolheu para o seu trabalho a aplicação de Modelagem Matemática Numérica, e para isso, utilizou o *software MODFLOW*; ele definiu Perímetros como o de Alerta, com tempo de trânsito de 50 dias, o de Prevenção, para um tempo de 150 dias, e o de Contribuição, para um tempo de trânsito infinito. O estudo do autor também avaliou a possibilidade de inversão de fluxo em relação ao Rio Pinheiros, mas o autor verificou que esta situação ocorreria somente com um bombeamento muito expressivo com vazões maiores que 4.000 m<sup>3</sup>/dia.

Carvalho e Hirata (2012) avaliaram a aplicação da técnica do RFC, do método analítico – por meio da equação de fluxo uniforme -, e do modelo matemático de simulação de fluxo (método numérico) para a delimitação de Zonas de Captura em aquíferos não confinados do Estado de São Paulo, os autores utilizaram 50 dias, 1, 5 e 10 anos como os tempos de trânsito, e para o modelo numérico, também utilizaram o *MODFLOW*. De acordo com Carvalho e Hirata (2012), os métodos resultaram em zonas com tamanhos e dimensões distintas, e os autores também avaliaram que o método do RFC definiu áreas extensas não compatíveis com a realidade, podendo ser utilizado, para as condições de estudo, apenas para tempos de trânsito inferiores a 50 dias, e recomendaram assim, o uso do método analítico como uma primeira etapa, para quando não existirem dados disponíveis para o uso do método numérico, mas para casos onde a definição da ZC é mais sensível, recomendaram o uso do método numérico.

Porém, existem trabalhos relacionados a PPPs também situados em outros Estados do País, como por exemplo as pesquisas de Barbosa (2007), de Wottrich (2012) e de Menezes et al. (2014).

Barbosa (2007) aplicou a técnica do RFC para delimitar PPPs no município de João Pessoa, no Estado da Paraíba, mais precisamente em 30 poços de captação de água subterrânea do aquífero confinado Beberibe. Uma das razões para o uso do método relatada pela autora foi a possibilidade de uso de dados hidrogeológicos mais gerais, e para a delimitação de diferentes áreas de proteção a autora utilizou os

tempos de trânsito de 24 horas, 50 dias e 10 anos, com base no estudo de Ciabatti e Lobo-Ferreira (1994<sup>4</sup> apud BARBOSA, 2007). Para a zona definida para o tempo de 50 dias, a autora avaliou raios entre 16,8 e 18,9 metros, enquanto que para as zonas definidas para 10 anos, os valores observados foram entre 158,2 e 977,2 metros. Barbosa (2007), utilizando o *software ArcGIS* versão 3.0, também elaborou um Sistema de Informações, com funções de visualização das zonas de proteção estimadas na sua pesquisa e até mesmo de geração de novas informações.

Em seguida, Toscano e Silva (2012) analisaram o uso do solo nas zonas de proteção estipuladas por Barbosa (2007). Os autores coletaram informações sobre as atividades junto à Companhia de Água e Esgotos da Paraíba assim como junto à Superintendência de Administração do Meio Ambiente do respectivo Estado, e as atividades avaliadas foram colocadas em um SIG. De acordo com Toscano e Silva (2012), dentre os 30 poços trabalhos por Barbosa (2007), 16 estavam em operação, detectando-se a ausência de rede de esgoto em três perímetros relacionados a esses poços operantes, uma rede de esgoto inoperante dentro de outro perímetro, e a ocorrência de um posto de combustíveis no interior de um perímetro de proteção estimado para 50 dias.

Wottrich (2012) realizou seus estudos em Santana do Livramento, RS, onde de acordo com o mesmo, a maioria da água subterrânea utilizada provém do Sistema Aquífero Guarani, que na região é livre. O autor realizou simulação estocástica do fluxo de partículas em um bairro do Município, simulando dois cenários distintos, um referente a 20 anos de trajetória e o outro a 270 anos, e para isso utilizou o *software MODFLOW*. Assim, o autor, avaliou que mesmo em 200 anos, as partículas presentes nas porções mais poluídas do Município não chegariam aos poços do bairro avaliado, sendo este bairro um bom local para o abastecimento da região; porém, o autor ressalva a importância da consideração das variações da porosidade efetiva; embora essa tenha sido considerada como constante em seu estudo.

Brito (2013), para atender seu objetivo de avaliar o risco de contaminação das águas subterrâneas na macrozona Cidade Radiocêntrica do Município de Porto Alegre, RS, necessitou, além de outros estudos, delimitar perímetros de proteção

---

<sup>4</sup> CIABATTI, P.; LOBO-FERREIRA, J.P.C. Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal. Análise da Legislação sobre Zoneamento de Proteção de Captações de Águas Subterrâneas. Aplicação a Dois Casos de Estudo Portugueses. Lisboa, LNEC, Relatório 247/94 – GIAS, 1994 apud BARBOSA, 2007, p. 67.

para poços. E para poços que captavam água de meios porosos, o autor utilizou o método do Raio Fixo Calculado para estimar proteções para o tempo de 50 dias de trânsito, obtendo valores de raios entre 20,09 e 53,66 metros, para poços trabalhados com vazões de 24,72 e 117,6 m<sup>3</sup>/dia, respectivamente.

Também no Estado do RS, FERON (2013), com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade e o potencial de risco à contaminação da água subterrânea, na região central do Município de Canoas, por hidrocarbonetos provindos de postos de combustíveis, complementou seu estudo delimitando PPPs a partir do método de raio fixo calculado. Desse modo, o autor avaliou raios de proteção entre 7,8 e 62,25 metros, para o tempo de 50 dias, e entre 21,09 e 168,19 metros para o tempo de 365 dias.

Menezes et al. (2014), para correlacionar parâmetros de uso do solo e de qualidade de água subterrânea no Município de Alegre, no Espírito Santo, e para a fase de definição das zonas de influência dos poços, utilizaram o método do raio fixo arbitrário, adotando um raio, baseado em demais bibliografias, de 200 metros. Menezes et al. (2014) utilizaram este método devido a sua simplicidade, a sua rapidez de aplicação e ao seu baixo custo, e avaliaram como possível o seu uso em escala de detalhe pois os poços estudados eram situados em zonas baixas, com o nível de água subterrânea menos profundo, e circundadas pelas suas possíveis áreas de recarga.

#### **4.5 Considerações sobre o Estado da Arte Consultado**

As ideias expressas acima mostram que os Estados Unidos, assim como a Europa são locais onde os perímetros de proteção de poços estão bem consolidados. Enquanto no Brasil, São Paulo se trata do Estado com melhor fundamentação e aplicação desse conceito. Dessa maneira, este trabalho contribui para expansão do conceito de PPPs no Estado do Paraná, abrangendo o aquífero Caiuá, podendo este trabalho ser base para a definição de PPPs no aquífero supracitado. Algumas das pesquisas citadas anteriormente também demonstram a importância da comparação entre métodos para a delimitação de PPPs, sendo apresentadas essas comparações para locais distintos, uma vez que a geologia é variável.

Foi perceptível também, a existência de estudos conjuntos de vulnerabilidade de aquíferos, de mapeamento de fontes de contaminação e de PPPs, sendo assim, este trabalho contribui para pesquisas mais aprofundadas nesse tema, onde valores de PPPs serão indicados, assim como qual metodologia utilizar para poços a serem protegidos na região.

## 5 METODOLOGIA

Para a definição da metodologia, e dos passos que devem ser seguidos, primeiramente é preciso definir qual critério para a definição de PPPs será utilizado (USEPA, 1987) - além dos valores desse critério - assim como as técnicas de delimitação que serão empregadas, e como será possível indicar um método sobre o outro no Aquífero Caiuá. Dessa maneira, as próximas seções expõem essas decisões, assim como explicam detalhadamente a metodologia empregada, que, resumidamente, pode ter seu esquema visualizado na Figura 9.

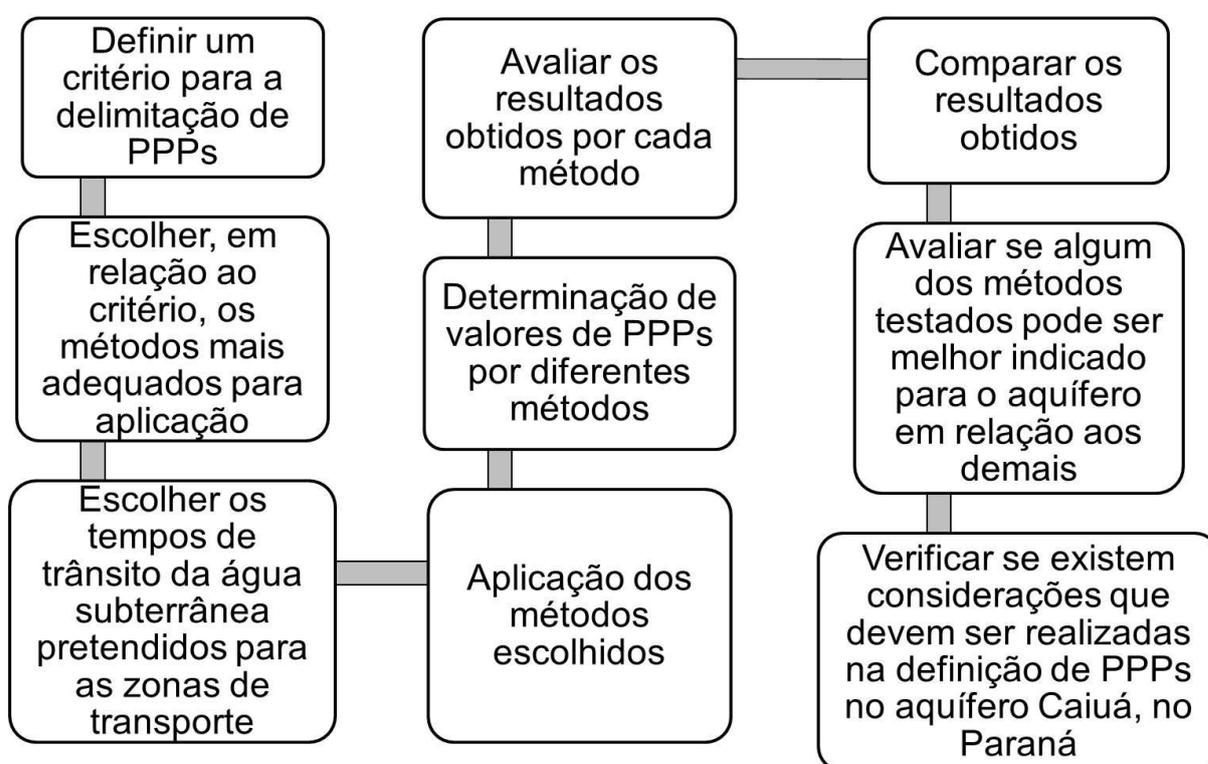


Figura 9 – Fluxograma organizacional dos métodos trabalhados.

### 5.1 Escolha dos Métodos

Como este trabalho tem objetivo de avaliar o resultado da aplicação de diferentes métodos para a delimitação de perímetros de proteção de poços no Aquífero Caiuá, no Paraná, não foi escolhido um único método, de possível melhor aplicação para o estudo. Porém, de acordo com as condições de trabalho, foram verificadas as possíveis aplicações de alguns métodos. Ainda, cada método, de acordo com a sua complexidade, o seu requerimento de dados, e a hidrogeologia do

local, apresenta níveis distintos de acurácia (USEPA, 1987); assim, a avaliação em conjunto de metodologias pode auxiliar na definição mais adequada de PPPs.

De acordo com a USEPA (1987) quando já se possui um critério de delimitação definido, a tarefa de escolher métodos se torna mais fácil.

Assim, quando o objetivo é gerar uma zona de ação para remediação que proporcione um tempo de reação para a proteção de um poço contra a captação de contaminantes, o critério do tempo de trânsito é eficaz, sendo embasado no tempo máximo que um contaminante presente na água subterrânea demora para chegar ao poço (USEPA, 1987).

Assim, o critério do tempo de trânsito foi o escolhido. Os métodos de delimitação de PPPs que melhor aplicam esse critério são os métodos do raio fixo calculado, os métodos analíticos e o modelo numérico de fluxo (USEPA, 1987). Em relação aos dados requeridos por cada método, a USEPA (1987) também relata que o método do modelo numérico pode requerer dados mais complexos. Também, de acordo com Foster et al. (2006), os métodos numéricos são mais demorados.

Assim, escolheu-se trabalhar, primeiramente, com o método do Raio Fixo Calculado e com o Método Analítico. Uma das equações utilizadas neste último método é a equação de fluxo uniforme, definindo o método analítico do fluxo uniforme (USEPA, 1987).

Iritani e Ezaki (2012), como já mencionado, comentam que o método de Wyssling possui semelhanças com o método do fluxo uniforme; assim, o método de Wyssling foi escolhido para aplicação da técnica analítica.

A escolha do método de Wyssling sobre o método do fluxo uniforme foi devido às distâncias resultantes que cada um oferece. Conforme USEPA (1987) o método de fluxo uniforme é utilizado em locais onde a superfície potenciométrica é inclinada. O método de fluxo uniforme resulta em distâncias perpendiculares ao sentido do fluxo referentes à zona de captura; porém, na direção do fluxo, apenas se conhece a distância de proteção à jusante (TODD, 1959). USEPA (1987) comenta que para a definição da distância de proteção à montante, é necessário aplicar outros cálculos referentes ao critério de tempo de trânsito ou de limite de fluxo, como considerar um contato geológico, por exemplo. Enquanto que o método de Wyssling (1979) apresenta equações para definir distâncias de proteção tanto à montante quanto à jusante, como podem ser observadas na seção 5.5, acreditando-se então, ser o método de Wyssling de mais simples aplicação em relação à equação de fluxo

uniforme expressa em Todd (1959); uma vez que ambas metodologias são muito semelhantes.

Mais adiante, o método numérico será aplicado para fins de avaliação e de comparações, análise que será explicada mais detalhadamente no decorrer deste trabalho.

## **5.2 Definição dos Tempos de Trânsito (TdT)**

Foster et al. (2006) relatam que os perímetros de proteção oferecem defesa contra contaminantes que se degradam em função do tempo (sendo neste caso o tempo de residência da água no subsolo uma ferramenta de proteção), e contra contaminantes mais persistentes, não degradáveis, onde poderá haver a interferência humana para atenuação. Segundo Kraemer, Haitjema e Kelson (2007) o critério do tempo de trânsito é aplicado na delimitação de PPPs baseado nas suposições de que contaminantes degradáveis poderão ser assimilados após determinado tempo em subsuperfície ou então, de que ao se detectar a infiltração de um contaminante persistente na área de proteção definida e implantada ao redor do poço, haverá tempo para a instalação de um novo poço para captação de água ou para ações de remediação da área antes da chegada de água contaminada ao devido poço.

O foco deste trabalho é a delimitação de perímetros de proteção de poços menores que a zona de captura. Assim, para a Zona de Proteção Microbiológica será utilizado o tempo de 50 dias, tempo que é relatado por Adams e Foster (1992) e também foi utilizado na maioria dos trabalhos presentes no capítulo de revisão (Tabela 2). Será utilizado, ainda, o tempo de 500 dias, outro tempo sugerido por Adams e Foster (1992) para a delimitação de zonas de proteção mais externas, e de acordo com os autores, quanto maior essa zona, maiores as chances de remediação em casos de acidentes conhecidos.

Assim, para testes de resultados de PPPs para uma maior isócrona, foi utilizado ainda o tempo de 5 anos (1825 dias), tempo também utilizado nos trabalhos de Miller, Chudek e Babcock (2003) e de Carvalho e Hirata (2012).

A partir de pesquisa bibliográfica foi possível construir a tabela 2, que indica os tempos de trânsito utilizados em algumas pesquisas presentes na bibliografia e que já foram mencionados mais detalhadamente nas seções 4.3 e 4.4.

Tabela 2 – Exemplos de trabalhos sobre PPPs já realizados e que utilizavam o critério do tempo de trânsito (TdT), e os respectivos TdTs utilizados.

<b>Trabalho (Autor/Data)</b>	<b>TdTs Aplicados</b>
Trabalhos Internacionais	
Miller, Chudek e Babcock (2003)	1, 5 e 10 anos
Expósito et al. (2010)	60 dias e 10 anos
Badv e Deriszadeh (2005)	2 anos
Trabalhos Nacionais	
Hirata (1994)	50 dias, 1 ano e 10 anos
Marcelino (1999)	50 dias, 150 dias e “infinito”
Carvalho e Hirata (2012)	50 dias, 1 ano , 5 e 10 anos
Barbosa (2007)	24 horas, 50 dias e 10 anos

### 5.3 Fonte dos Dados para Aplicação

É necessário mencionar que os dados utilizados na aplicação da metodologia foram oriundos de um banco de dados em SIG gerado pelo Ministério do Meio Ambiente em conjunto com demais instituições (MMA, 2015), produto elaborado para a criação da “Carta das Águas Subterrâneas do Estado do Paraná” pelos autores. Segundo MMA (2015), a produção dessa Carta abrangeu, entre outras etapas, a etapa de elaboração, de atualização e de detalhamento de informações referentes às águas subterrâneas no Estado do Paraná, criando-se uma base de dados em SIG, onde foi citado o envolvimento de diversos autores, como:

AGUASPARANÁ, IAP, CPRM, ANA, MINEROPAR, SANEPAR, IPARDES, ITCG, IBGE, COMEC, universidades, instituições de pesquisa, empresas, sociedade civil, entre outros (MMA, 2015, p. 322).

A tabela 3 identifica algumas das informações referentes ao Aquífero Caiuá contidas nessa base/banco de dados (BD); porém, a mesma possui muitas outras informações que englobam a hidrogeologia e outras características de todo o Estado do Paraná, até mesmo em relação ao Aquífero Caiuá, mas que não foram utilizadas neste trabalho. A base de dados também apresenta mapas de algumas das informações apresentadas na tabela 3, como de vazão e de potenciometria, por

exemplo; no entanto, pela praticidade, foram utilizados os valores presentes nas tabelas de atributos dos dados vetoriais.

Além dessas informações, MMA (2015) também traz uma coletânea de registros sobre atividades que ocorrem no Estado do Paraná, inclusive sobre o aquífero Caiuá; como a localização de aterros sanitários, de lixões desativados, de indústrias, de cemitérios, de estações de saneamento, entre outras.

Logo, conhecendo os dados disponíveis e os métodos que se deseja aplicar, ao se estudar cada técnica, é possível avaliar quais dados ainda são necessários para a execução de cada método, ou se o banco de dados utilizado apresenta todas as informações necessárias. Assim, as próximas seções descrevem os métodos utilizados e as suas aplicações.

Tabela 3 – Síntese dos dados presentes no BD em SIG elaborado por MMA (2015).

<b>Dado</b>	<b>Tipo do Dado</b>	<b>Observações e Fonte</b>
Poços Tubulares	Vetorial (Ponto)	Localização com coordenadas de 404 poços tubulares cuja fonte citada é a SANEPAR
Identificação de nomenclatura SIA desses poços	Informação presente na Tabela de Atributos	Numeração de identificação de cada poço, que coincide com outras informações na base de dados
Municípios e Localidades	Informação presente na Tabela de Atributos	Atribui cada poço ao Município e à Localidade em que ele está inserido
Situação	Informação presente na Tabela de Atributos	Armazena a situação de cada poço, estando registrados 30 como desativados, 3 como improdutivos, 225 como não operantes, 145 como operantes e 1 como selado
Profundidade	Informação presente na Tabela de Atributos	Profundidade dos poços em metros
Vazão	Informação presente na Tabela de Atributos	Alguns valores de vazão foram verificados no SIAGAS (CPRM, 2018), igualando-se com os valores de vazão de estabilização presentes nesse sistema, estando os valores expressos em m <sup>3</sup> /h
Nível Dinâmico (ND)	Informação presente na Tabela de Atributos	Valores em metros do nível dinâmico
Nível Estático (NE)	Informação presente na Tabela de Atributos	Valores em metros do nível estático

<b>Dado</b>	<b>Tipo do Dado</b>	<b>Observações e Fonte</b>
Espessura Saturada (H)	Informação presente na Tabela de Atributos	De acordo com MMA (2015) não se conhecem as espessuras saturadas reais do aquífero; porém, esse valor foi estimado pelos autores subtraindo-se da profundidade dos poços os respectivos valores de NE.
Potenciometria	Informação presente na Tabela de Atributos	Valores em metros da potenciometria estimados para cada poço. Conforme MMA (2015), esse valor foi obtido subtraindo-se da cota altimétrica de cada poço (nível acima do mar) o respectivo valor de NE.
Transmissividade (T) e Condutividade Hidráulica (K)	Informação presente na Tabela de Atributos	Segundo MMA (2015) os valores de transmissividade ( $m^2/s$ ) foram obtidos por meio da análise de testes de bombeamentos de durações superiores a 12 horas, e a condutividade hidráulica ( $m/s$ ) foi obtida por meio da equação $T = KH$
Cota Altimétrica do Terreno	Informação presente na Tabela de Atributos	Valor em metros da altitude dos poços acima do nível do mar. Conforme MMA (2015), quando esses valores não existiam, as cotas foram obtidas por meio de imagem SRTM (2014 <sup>5</sup> apud MMA, 2015)

Fonte: MMA (2015). Lembra-se que estes são apenas alguns dos dados constantes no BD.

<sup>5</sup> SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*. USGS, Eros Data Center, Data Services Branch. Seamless Data Distribution System. 2014. Disponível em: <<http://seamless.usgs.gov/>> apud MMA, 2015, p. 72.

## 5.4 Raio Fixo Calculado

O método do Raio Fixo Calculado (RFC) assume um fluxo radial para a água subterrânea em direção ao poço instalado em um aquífero de espessura saturada (H) constante, e assim delimita um cilindro de raio R ao redor do poço a partir de uma isócrona de tempo de residência t (Figura 10) (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007). Porém, de acordo com os autores, esse fluxo radial dentro da isócrona só pode ser considerado em casos onde o fluxo não é forte ou onde haja dominância do bombeamento do poço, podendo este método ser razoável para cálculos com tempos de 1 ou 2 anos e para poços de alta capacidade.

De acordo com Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), a equação do balanço hídrico para um poço em bombeamento, nessas condições, e para um determinado período de tempo, pode ser entendida a partir de três termos: o primeiro que corresponde à entrada de água devido à recarga do aquífero; o segundo que representa a quantidade de água contida em uma porção cilíndrica do aquífero ao redor do poço; e a terceira relacionada à quantidade de água bombeada pelo poço durante um tempo t. Sendo esta equação expressa como (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007):

$$Qt = N\pi R^2 t + \eta_e \pi R^2 H \quad (1)$$

E isolando o termo R:

$$R = \sqrt{\frac{Qt}{N\pi t + \eta_e \pi H}} \quad (2)$$

onde N se trata da recarga pela precipitação, R é o raio do cilindro assumido e  $\eta_e$  é a porosidade efetiva.

Conforme Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), ao utilizar um tempo de trânsito muito elevado, será traçada a Zona de Captura referente ao poço, podendo ser utilizada a Equação 3; e caso o valor da recarga N, ou do tempo de trânsito utilizado, ou até mesmo de ambos serem pequenos, a Equação 1 pode ser expressa

conforme a Equação 4. Esse método considera uma espessura saturada constante, o que não ocorre em aquíferos não confinados, que variam sua espessura devido ao rebaixamento do nível da água; porém, na tentativa de um resultado cauteloso, pode ser utilizado o menor valor de H registrado (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007).

$$R \approx \sqrt{\frac{Q}{N\pi}} \quad (3)$$

$$R \approx \sqrt{\frac{Qt}{\eta_e\pi H}} \quad (4)$$

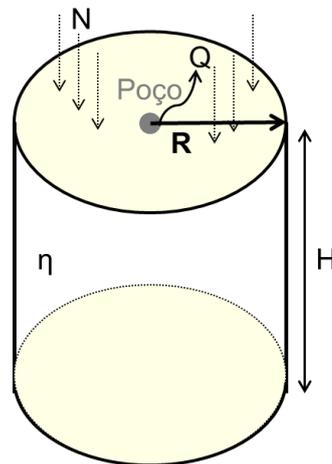


Figura 10 – Esboço de um poço em bombeamento com fluxo radial, condições aplicadas no método de RFC. Fonte: modificado de Kraemer, Haitjema e Kelson (2007).

Apesar de o método considerar uma espessura saturada constante, de acordo com a USEPA (1987), o Departamento de Regulamentos Ambientais da Flórida requeria o uso da equação volumétrica (Equação 4) para a delimitação de PPP para um tempo de trânsito de 5 anos, sendo essa equação aplicada no aquífero de Biscayne, que conforme Klein e Hull (1978), trata-se de um aquífero não confinado.

De acordo com Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), para o uso das equações 1 a 4, a hipótese de Dupuit (DUPUIT, 1863<sup>6</sup> apud KRAEMER; HAITJEMA; KELSON,

<sup>6</sup> DUPUIT, Jules Étienne Juvénal. **Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables: avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et**

2007) deve ser atendida, ou seja, o aquífero deve ser raso e ter um fluxo horizontal. E segundo os autores, um raio calculado a partir da equação 4, para um poço parcialmente penetrante, e que possua valor menor que o dobro da espessura saturada do aquífero, pode indicar uma área de proteção subestimada; no entanto, esse problema pode ser evitado com o uso da extensão da seção filtrante do poço ao invés da espessura saturada do aquífero.

Assim, para a delimitação dos PPPs foram calculados os valores de raio a partir da Equação 4 (equação volumétrica de acordo com USEPA, 1987) e com a utilização do *software Excel*, sendo as unidades organizadas da seguinte forma:

$$\sqrt{\frac{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) \left(\frac{24\text{h}}{\text{dia}}\right) (\text{dia})}{\text{m}}} = \sqrt{\text{m}^2} = \text{m}$$

No banco de dados utilizado (MMA, 2015), os valores de vazão estavam expressos em m<sup>3</sup>/h, que em breve consulta ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS – do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2018), foi observado que essas vazões correspondem a vazões após estabilização encontradas em testes. Assim, para supor uma vazão em m<sup>3</sup>/dia simplesmente se multiplicou por 24 horas; apesar de acreditar-se que os poços não operam durante dias inteiros, usou-se este valor para obter-se raios mais conservadores. Como modelo disso, Iritani e Ezaki (2012) exemplificam a conversão de vazões para dias utilizando 24 horas.

De acordo com Fitts (2015), a porosidade efetiva expressa a razão entre o volume de vazios que são interconectados e transmitem água e o volume total do material, e é adimensional. E para os cálculos de PPPs para o Aquífero Caiuá foi utilizado o valor médio dos indicados por AGUASPARANÁ (2010, p. 18), isto é, de 0,15. Porém, Celligoi (2000) ao testar em laboratório amostras oriundas dos municípios de Nova Esperança e Terra Rica, verificou valores médios de 0,168 e 0,226 para porosidade efetiva, respectivamente. Assim, esses valores foram atribuídos nos cálculos para os poços dentro dos limites desses municípios.

A espessura saturada avaliada em cada poço corresponde à subtração do nível estático da profundidade registrada para cada poço (MMA, 2015), e também foram disponibilizados intervalos das seções filtrantes de alguns poços (SANEPAR,

2018), esses intervalos foram somados, para cada poço, para posteriormente serem utilizados como espessura saturada no cálculo de RFC, como sugerem Kraemer, Haitjema e Kelson (2007).

Antes da execução dos cálculos, os valores máximos e mínimos das vazões e de espessura saturada foram avaliados, para simples confirmação se não havia valores muito distantes do realismo, oriundos de algum erro de digitação, por exemplo; e logo após, o cálculo de RFC foi realizado.

Ainda, a constatação indicada por Kraemer, Haitjema e Kelson (2007) foi realizada com a função “se” presente no *software Excel*, verificando se o raio obtido era ou não menor que 2 vezes a espessura saturada do aquífero, ou nesse caso, a espessura registrada no banco de dados.

Para representar esses raios de maneira ilustrativa foram reproduzidos mapas interpolados desses valores, lembrando que para transformá-los em áreas no entorno de poços, é possível utilizar a ferramenta *buffer* do ArcGIS. Hernandez, Athayde e Athayde (2018) ao estudarem aquíferos sedimentares do Paraná, verificaram que o interpolador IDW (*Inverse Distance Weighted*) foi o mais adequado entre os demais utilizados por eles.

Assim, o método Inverso Ponderado das Distâncias (IDW, sigla em inglês) foi utilizado para a ilustração dos valores de raios obtidos neste trabalho. De acordo com Varella e Sena Júnior (2008), esse método considera uma potência  $p$  para o parâmetro de distância entre os valores estimado e conhecido, que quanto maior o seu valor, maior a influência do vizinho mais próximo no valor estimado. E de acordo com Babak e Deutsch (2009), o valor de  $p$  mais utilizado é 2.

Porém, em seu trabalho, Hernandez (2019, no prelo), para os aquíferos sedimentares do Paraná, utilizou para o método IDW um tamanho de célula de 200 x 200 metros e um valor de  $p$  equivalente a 4.

De acordo com Voltz e Webster (1990), na geoestatística, um dos métodos usados para validação de estimadores é a validação cruzada. A validação cruzada compara os valores estimados com os valores reais; assim, um coeficiente de correlação linear desses valores próximo de um, pode indicar uma boa estimativa (ANDRIOTTI, 2002). Hernandez (2019, no prelo) notou em seu trabalho que, no geral, o interpolador IDW foi o que mais mostrou uma variação de zero por cento entre o valor estimado e o real. E aqui, então, para avaliar a aplicação desse método na ilustração dos resultados de RFC, utilizando os parâmetros de tamanho de célula

e de  $p$  avaliados por Hernandez (2019, no prelo), fez-se a correlação entre os valores interpolados e os observados (calculados) para os raios definidos pelo RFC.

### 5.5 Método de Wyssling (1979)

Wyssling (1979) desenvolveu um método que determina parâmetros para a delimitação de zonas de proteção, e para esse método são considerados os seguintes pressupostos: a) a porção considerada do aquífero possui características homogêneas; b) a taxa de bombeamento é pequena em relação à taxa de descarga do aquífero; e c) os resultados se limitam ao eixo de fluxo considerando o poço em bombeamento.

Para a aplicação deste método são necessários os seguintes parâmetros (WYSSLING, 1979):

- Espessura saturada (H);
- Condutividade hidráulica (K);
- Gradiente hidráulico do fluxo das águas subterrâneas (i);
- Porosidade efetiva ( $\eta_e$ );
- Vazão de bombeamento do poço (Q).

Iritani e Ezaki (2012) relatam que o método de Wyssling é de fácil aplicação, que com ele pode ser calculada a ZC e também zonas de transporte menores, e que o mesmo considera o aquífero como confinado e de fluxo uniforme e radial, esse último devido ao bombeamento pelo poço.

A largura da zona de contribuição à montante de um poço em bombeamento a uma taxa  $Q$  é dada por (WYSSLING, 1979):

$$B = \frac{Q}{HKi} \quad (5)$$

Enquanto que a definição da largura da zona de contribuição no alinhamento do poço é dada por (WYSSLING, 1979):

$$b = \frac{B}{2} \quad (6)$$

E a distância no eixo x (direção do fluxo) do poço até o limite da zona de contribuição à jusante do poço é expressa assim (WYSSLING, 1979):

$$x_o = \frac{B}{2\pi} \quad (7)$$

De acordo com o autor, essas seriam as medidas para a delimitação da Zona de Contribuição, considerando a distância X à montante do poço como infinita. Ou então, sendo avaliada, como mencionado pela USEPA (1987), por critérios de limite de fluxo.

Porém, para o cálculo de áreas de proteção com base em tempos de trânsito, Wyssling (1979) definiu outras equações, são elas:

$$S_{o/u} = \frac{\pm d + \sqrt{d(d + 8x_o)}}{2} \quad (8)$$

$$d = v_o * t \quad (9)$$

$$v_o = \frac{ki}{\eta_e} \quad (10)$$

onde  $S_o$  corresponde à distância no eixo central de fluxo (Figura 11) do poço até o ponto limite à montante equivalente ao tempo de trânsito desejado;  $S_u$  equivale à distância do poço até o ponto à jusante no eixo do fluxo de acordo com o tempo de trânsito aplicado;  $d$  é a distância linear percorrida pela água subterrânea, que é produto da velocidade natural do fluxo da água devido ao gradiente hidráulico ( $v_o$ ) e do tempo de trânsito desejado  $t$ .

Iritani e Ezaki (2012) entenderam a equação 8 como:  $S_o = [+ d + \sqrt{d(d + 8x_o)}]/2$  e  $S_u = [- d + \sqrt{d(d + 8x_o)}]/2$ ; assim, o valor de  $S_u$  tenderá a ser menor, como também é mostrado na figura 11.

A figura 11 permite compreender espacialmente os parâmetros a serem definidos nas equações 5 a 8. E Wyssling (1979) enfatiza a importância da consistência dos dados de entrada, ou seja, que todos se encontrem em unidades compatíveis entre si. O autor também salienta que é impossível o valor  $S_u$  ser maior que o valor  $x_o$ , como também pode ser observado na figura 11.

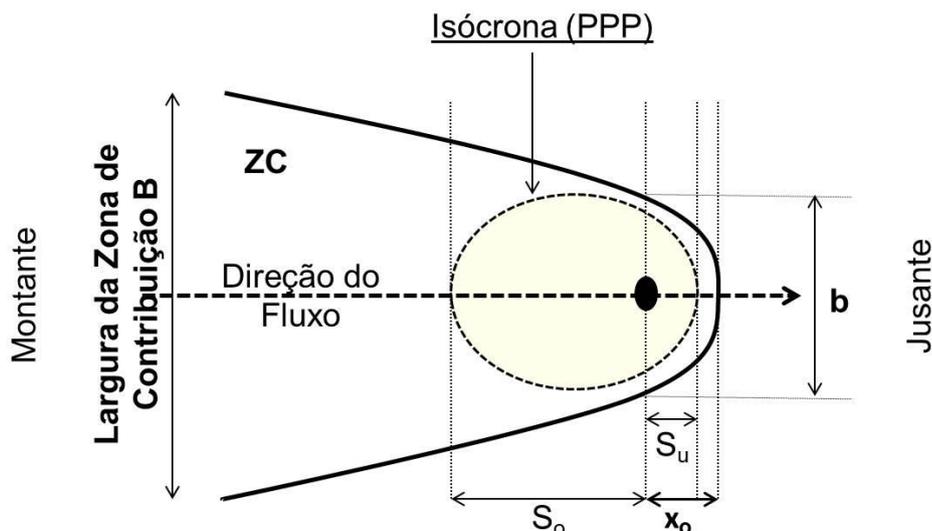


Figura 11 – Espacialização das incógnitas em relação ao poço no método de Wyssling. Fonte: modificado de Wyssling (1979).

Moinante e Lobo-Ferreira (2007) comentam que o método de Wyssling é de fácil aplicação e pode ser utilizado em aquíferos homogêneos, salientando que o mesmo considera um cone de depressão inclinado para o poço em bombeamento, resultado de um gradiente hidráulico também inclinado.

Esse método, assim como o do fluxo uniforme, não calcula as distâncias na direção perpendicular ao fluxo para as zonas de transporte; porém, conforme a visualização nas ilustrações de Foster et al. (2006) e de Wyssling (1979), percebe-se que as zonas de proteção possuem larguras à montante semelhantes às larguras de proteção na altura do poço; dessa maneira, os PPPs poderão ser traçados.

### 5.5.1 Avaliação do gradiente hidráulico

Como visto nas equações 5 e 10, o gradiente hidráulico é importante nos cálculos de Wyssling (1979). De acordo com Heath (1982), o gradiente hidráulico trata-se da mudança de carga hidráulica por unidade de distância, em uma determinada direção. Heath (1982) fala que a partir de 3 pontos onde as cargas hidráulicas são conhecidas, é possível calcular o gradiente hidráulico, onde uma equipotencial (linha de mesmo potencial hidráulico) é traçada, e perpendicular a essa, uma linha de fluxo é desenhada até um outro ponto de carga hidráulica conhecida; e assim, com a razão entre a variação de carga hidráulica do ponto até a equipotencial e a distância na direção ortogonal à equipotencial até o ponto, o gradiente hidráulico pode ser calculado. O autor ainda salienta que o movimento das

águas subterrâneas ocorre no sentido do decréscimo de carga hidráulica, sendo a carga de posição avaliada pela posição do nível de água (nível freático) em relação a uma posição referencial.

Logo, uma vez que o banco de dados (MMA, 2015) apresenta dados de potenciometria, que conforme os autores foram obtidos subtraindo-se da cota dos poços o nível estático da água nos mesmos (sendo que para alguns poços a cota altimétrica foi obtida por meio de imagem SRTM), foi possível traçar linhas de equipotencial hidráulico a partir desses dados; e posteriormente, possíveis linhas de fluxo até cada poço de interesse. E a maneira como isso foi realizado, se encontra na sessão 5.5.2.2. Porém, para teste, o gradiente hidráulico também foi obtido de outra maneira, como comentado a seguir.

### 5.5.2 Passos para a aplicação do método de Wyssling (1979)

#### 5.5.2.1 Utilizando a ferramenta Darcy Flow presente no ArcGIS

O *software* ArcGIS apresenta uma ferramenta que se baseia na Lei de Darcy para calcular o balanço volumétrico, em estado estacionário, em aquíferos, sendo utilizada a equação (ESRI, 2018a):

$$q = -Ki \quad (11)$$

onde  $q$  se trata da velocidade de Darcy ou descarga específica (volume/tempo/área),  $K$  é a condutividade hidráulica e  $i$  é o gradiente hidráulico na direção do fluxo em um aquífero isotrópico.

Os dados de entrada para a execução dessa ferramenta são: carga hidráulica, porosidade efetiva (valor de 0 a 1), espessura saturada e transmissividade; e essas informações devem ser utilizadas no formato *raster*, onde todos os arquivos devem possuir o mesmo tamanho de célula, além de possuírem unidades consistentes, uma vez que as saídas não apresentam unidades, sendo compatíveis com as unidades de entrada (ESRI, 2018a).

Assim, os dados necessários e contidos no banco de dados (MMA, 2015), para 399 poços do Aquífero Caiuá (retirando-se poços que estavam registrados com profundidade igual a zero), foram interpolados com base nos parâmetros indicados

em Hernandez, Athayde e Athayde (2018) e em Hernandez (2019, no prelo), ou seja, pelo método IDW - *Inverse Distance Weighted* -, com tamanho de célula de 200 metros e um valor de potência  $p$  solicitado pelo método de 4. Enquanto que foram consideradas e interpoladas do mesmo modo as porosidades efetivas, no geral, de 0,15 (AGUASPARNÁ, 2010) e para os poços inseridos em Nova Esperança e Terra Rica, de 0,168 e 0,226 (CELLIGOI, 2000), respectivamente.

As saídas dessa ferramenta, que também são arquivos *rasters*, contêm: 1) a direção, para cada centro de célula, do vetor de velocidade média linear; 2) a magnitude, para cada célula, da velocidade média linear; e 3) o balanço volumétrico residual para o sistema (ESRI, 2018a). E para a posterior aplicação nos cálculos de Wyssling foram utilizados apenas os itens 1 e 2.

De acordo com a ESRI (2018a), a velocidade média de um fluido que percorre um meio poroso é dada pela razão entre a velocidade de Darcy e a porosidade efetiva desse meio. Assim, como a ferramenta gera informações sobre a velocidade média linear, esses valores foram extraídos do arquivo *raster* para cada poço a ser trabalhado, a partir da ferramenta “*Extract Multi Values to Points*” do ArcGIS, e multiplicados pela porosidade efetiva; para obter-se então a velocidade de Darcy, e conforme a equação 11, obter-se o gradiente hidráulico.

Uma vez conhecido o gradiente hidráulico, e as informações de velocidade geradas a partir da ferramenta Darcy Flow - pois a especificação de velocidade linear média concedida e utilizada por ESRI (2018a) é a mesma de  $v_0$  para o método de Wyssling (1979) –, os parâmetros de Wyssling foram calculados.

#### 5.5.2.2 Utilizando a ferramenta para inserção de códigos em Python presente no ArcGIS

A obtenção do gradiente hidráulico a partir do uso de linhas equipotenciais obtidas por meio da base de dados (MMA, 2015), dos conceitos de Heath (1982) e de códigos criados em linguagem Python inseridos no ArcGIS se trata de um processo de inúmeras etapas. Portanto, para entendimento e também para base de reprodutibilidade dessa metodologia, as etapas seguidas estão elencadas abaixo:

1. O banco de dados possui informações de potenciometria para todos os poços registrados; porém, os dados de transmissividade caracterizam apenas alguns poços. Conforme MMA (2015), esses últimos dados foram obtidos a partir de

testes de bombeamento com mais de 12 horas de duração e utilizando o método de Jacob (1950<sup>7</sup> apud MMA, 2015). Dos 404 poços registrados para o Aquífero Caiuá, por exemplo, apenas 32 possuíam dados de transmissividade. Assim, ambos os dados de potenciometria e de transmissividade foram interpolados de acordo com os parâmetros definidos como adequados por Hernandez (2019, no prelo), ou seja, pelo método IDW, com tamanho de célula de 200 metros e fator p equivalente a 4. Mas primeiramente, foram verificados os valores máximos e mínimos dessas variáveis, e a interpolação para transmissividade foi realizada utilizando apenas os 32 poços com valores registrados, contudo, para a extensão que abrangia a todos os poços do Aquífero Caiuá, isto é, para a mesma extensão de interpolação referente à potenciometria;

2. Por conseguinte, a base de dados foi reorganizada, contendo agora as informações registradas no BD somente para os poços não operantes e para os operantes, mas também valores de transmissividade, extraídos do arquivo *raster* interpolado, para cada poço de interesse, a partir da ferramenta “*Extract Multi Values to Points*”, do *ArcGIS*, cuja aplicação foi anterior aos dados serem exportados para o *Excel* (por meio da função de conversão “*Table To Excel*”, ou “tabela para Excel”, do *ArcGIS*) e reorganizados;

3. Existiam poços sem valores de profundidade, impossibilitando o cálculo de espessura saturada de acordo com a forma utilizada em MMA (2015); assim, esses poços também foram desconsiderados, restando 365 poços para a aplicação do método;

4. Esses dados foram ordenados em uma tabela, onde a primeira coluna tratava-se da identificação SIA do poço em ordem crescente;

5. Essa tabela com dados dos poços foi importada para o *ArcGIS*, sendo salva como uma camada de pontos em formato *shapefile*, onde as coordenadas dos poços foram utilizadas para a criação dos pontos;

6. Foram criadas isolinhas de mesmo potencial hidráulico a partir da imagem *raster* de potenciometria criada e do uso da ferramenta “*Contour*”, do *ArcGIS*; como não encontrou-se um melhor valor de espaçamento entre essas isolinhas, foram criadas isolinhas espaçadas a 20, 40 e 60 metros; para avaliação

---

<sup>7</sup> JACOB, C. E. Flow of groundwater. **Engineering Hydraulics**, p. 321-386, 1950 apud MMA, 2015, p. 74.

dos resultados, sendo cada passo a seguir, realizado para cada um dos três conjuntos de espaçamento de isolinhas gerados;

7. Um novo arquivo de banco de dados (“*File Geodatabase*”) foi criado no ArcGIS, onde as seguintes feições foram armazenadas: o conjunto de poços e seus atributos; o conjunto de linhas equipotenciais a ser trabalhado; e uma nova feição de linhas vazia, a serem preenchidas por linhas de fluxo;

8. A criação das linhas de fluxo ocorreu da seguinte maneira:

A criação de linhas de fluxo se deu pelo uso da ferramenta de proximidade “*Near*” do ArcGIS. Essa ferramenta indica qual feição, dentro de uma classe específica, está mais próxima da feição de entrada considerada (ESRI, 2018b). Assim, ao utilizar essa ferramenta considerando os poços (pontos) de interesse como as feições de entrada e as linhas equipotenciais como as feições a terem sua proximidade avaliada; a ferramenta “*Near*” da ESRI definiu o número de identificação da linha equipotencial mais próxima de cada ponto, assim como as coordenadas X e Y do vértice da equipotencial mais próximo de cada poço e também a distância entre esse vértice e o poço (ponto) de interesse. Mas, como avaliado no estudo de Heath (1982), percebe-se que a linha de fluxo deve ser perpendicular a linha equipotencial, mas de acordo com ESRI (2018c), é exatamente isto que a ferramenta “*Near*” faz, pois trigonometricamente, ao comparar um ponto e uma feição linear, o trajeto mais próximo entre eles se trata de uma linha ortogonal à feição linear; e caso esse ponto ortogonal não ocorra, a ferramenta usará um vértice mais próximo do que seria esse ponto perpendicular (Figura 12).

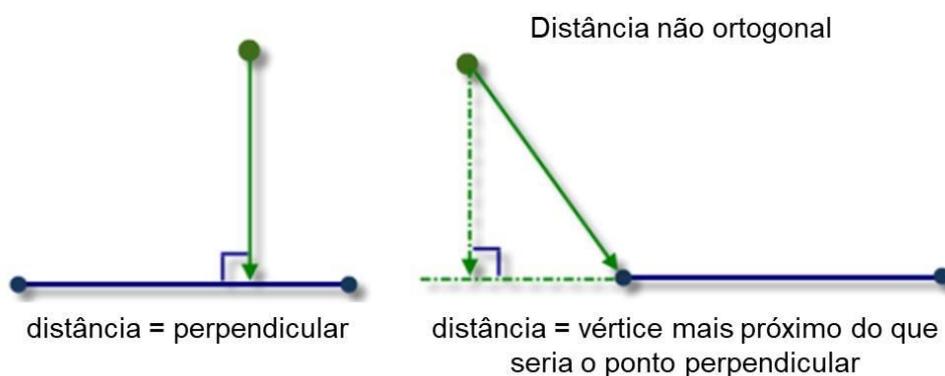


Figura 12 – Funcionamento da ferramenta “*Near*”, avaliando a proximidade de um ponto e de uma feição linear. Fonte: ESRI (2018c).

Conforme ESRI (2018b), a ferramenta “Near” necessita das seguintes informações para a sua aplicação: a) as feições de entrada que serão avaliadas, no caso os pontos que representam os poços operantes e não operantes do Caiuá; b) as feições que terão sua proximidade avaliada de acordo com a feição de entrada, no caso as linhas equipotenciais; c) um raio máximo de procura, ou seja, um raio de busca máximo a partir de cada poço; d) a escolha sobre o armazenamento, na tabela referente aos dados de entrada, das coordenadas X e Y das feições mais próximas, no caso, essas coordenadas são importantes, então esse parâmetro foi preenchido com “Location”; e) a escolha sobre armazenar a direção do ângulo de orientação da distância entre a feição de entrada (poços) e a feição de avaliação de proximidade (equipotenciais); e por último, f) indicar o método que se deseja apresentar a distância de proximidade, seja ele Planar, que usa distâncias planares, ou Geodésico, que usa distâncias geodésicas entre as feições. Logo, escolheu-se selecionar o método planar, uma vez que as coordenadas dos dados estavam em um sistema planar, o que auxiliará na maneira de cálculo do azimute de fluxo da água subterrânea em relação a cada poço, informação necessária para o método de Wyssling.

Então, sabendo o vértice mais próximo de cada poço, que está inserido em uma linha equipotencial e é perpendicular a essa, pôde-se criar vetores lineares que representaram as linhas de fluxo até cada poço.

Para isso, foi utilizada a janela Python existente no ArcGIS; onde foi possível executar um código que define a criação dessas linhas, de maneira automática. O código foi criado em linguagem Python, com base nas sintaxes apresentadas na página ArcGIS Pro (ESRI, 2018d). Esse código pode ser visualizado no Apêndice A; porém, o pseudocódigo<sup>8</sup> se encontra abaixo, sendo importante salientar que o mesmo, antes da criação da linha de fluxo, executa a ferramenta “Near” explicada e citada acima.

- 1 edição = criar seção de edição(base de dados)
- 2 executar a ferramenta Near(feição de entrada, feição a comparar, raio de busca, localização, ângulo, método)
- 3 iniciar a edição
- 4 para cada poço no arquivo de poços:

---

<sup>8</sup> Pseudocódigo se trata de uma forma genérica e informal de escrever um algoritmo, que pode ser entendido sem que o leitor conheça a linguagem de programação utilizada (MOTA; PEREIRA; FAVERO, 2008).

- 5 ponto inicial = coordenadas X e Y do poço
- 6 ponto final = coordenadas X e Y dos respectivos campos “Near\_X” e “Near\_Y” criados pela ferramenta *Near* para o poço em questão
- 7 iniciar operação de edição
- 8 linha = união(ponto inicial, ponto final)
- 9 inserir no arquivo de linhas de fluxo a linha criada
- 10 parar operação de edição
- 11 parar edição(salvar)

9. Como o *loop* “para cada poço no arquivo, faça tal...” (linha 4) foi utilizado, e como os poços estavam em ordem crescente de sua identificação SIA, as linhas perpendiculares foram traçadas nessa mesma ordem; assim, seus alinhamentos e identificações correspondem a mesma ordem crescente de identificação dos poços, e isto pode ser verificado avaliando se a primeira linha de fluxo traçada está ligada ao poço de número SIA mais baixo, no caso do aquífero Caiuá, foi o de SIA 48. Estando essa verificação correta, pode-se calcular o comprimento da linha de fluxo, caso esse valor ainda não conste na tabela de atributos, por meio da Calculadora de Geometria (“*Geometry Calculator*”) presente no ArcGIS. Embora a ferramenta “*Near*” crie um campo na feição de entrada, no caso, referente aos poços, que armazena as informações denominadas “*NEAR\_DIST*”, que representam as distâncias entre o poço trabalhado e a feição (linha equipotencial) mais próxima (ESRI, 2018b), que coincidirá com o comprimento de cada linha de fluxo;

10. A ferramenta “*Near*” também gerou, na tabela de atributos dos poços de entrada, dados contidos em uma nova coluna denominada “*NEAR\_FID*” que, de acordo com ESRI (2018b), armazena o número de identificação da feição mais próxima da feição de entrada avaliada. Ao comparar esse campo criado pelo *software*, percebeu-se a compatibilidade entre os valores desse campo e a identificação das linhas equipotenciais e, com isso, pôde-se criar o código abaixo e aplicá-lo na calculadora de campo para obter os valores de potenciometria de cada equipotencial utilizada para formar cada linha de fluxo referente a cada poço trabalhado. O código para essa finalidade foi construído com base em informações contidas em ESRI (2018d) e é mostrado integralmente do Apêndice B; sendo o pseudocódigo escrito abaixo.

- 1 para cada ponto da feição de poços:
- 2 defina a função para obter o valor da equipotencial mais próxima(ponto):
- 3 para cada linha da feição de equipotenciais:
- 4 se identificação “*NEAR\_FID*” do ponto = identificação da linha equipotencial:
- 5 retorna o valor de potenciometria da linha equipotencial

O código do Apêndice B foi utilizado na calculadora de campo do ArcGIS, para a coluna criada na feição dos poços, para armazenar o valor de potenciometria referente à equipotencial mais próxima de cada poço, sendo a expressão *GetContour(!NEAR\_FID!)* utilizada para o preenchimento do campo. E após o preenchimento desse campo, com os valores de interesse, os três primeiros e os três últimos valores foram conferidos, observando se os mesmos coincidiam com os valores de carga hidráulica das equipotenciais usadas para a criação das respectivas linhas de fluxo;

11. Assim, a partir dos valores de potenciometria referentes ao início (potenciometria do poço) e ao final (potenciometria referente à linha equipotencial mais próxima ao poço) da linha de fluxo, e a distância destas linhas (ver item 9), foi possível calcular o gradiente hidráulico. E então, com os valores de transmissividade interpolados e extraídos para os pontos de interesse e também com as demais informações presentes no banco de dados, foi possível efetuar os cálculos de Wyssling (equações 5 a 10) no *software Excel*, lembrando que para isto, as linhas de fluxo criadas devem estar na mesma ordem dos poços utilizados como base para o traçado dessas linhas, para a consistência das informações.

#### 5.5.2.2.1 Definição da Direção de Fluxo da Água Subterrânea em cada Ponto

Para a definição do ângulo azimutal referente ao sentido do fluxo para cada poço foi considerada, primeiramente, a definição de que o sentido do fluxo da água subterrânea se dá das maiores cargas para as menores cargas hidráulicas (FITTS, 2015; HEATH, 1982).

Assim, com o uso da calculadora de campo ("*Field Calculator*") do ArcGis, na feição de linhas de fluxo, inseriu-se um código na linguagem Python (Apêndice C), que foi construído com base em informações de ESRI (2018d), ESRI (2018e), Python (2019) e conhecimento trigonométrico. Esse esquema pode ser brevemente avaliado a seguir:

- 1 função para obter o azimute(arquivo *shapefile*):
- 2 azimute (em graus) = arco tangente ((coordenada Y do ponto final – coordenada Y do ponto inicial)/(coordenada X do ponto final – coordenada X do ponto inicial da linha de fluxo))

- 3 se coordenada Y do ponto final > coordenada Y do ponto inicial e coordenada X do ponto final < coordenada X do ponto inicial da linha de fluxo:
- 4 azimute = 90 - azimute
- 5 senão se coordenada Y do ponto final > coordenada Y do ponto inicial e coordenada X do ponto final > coordenada X do ponto inicial da linha de fluxo:
- 6 azimute = 270 - azimute
- 7 senão se coordenada Y do ponto final < coordenada Y do ponto inicial e coordenada X do ponto final > coordenada X do ponto inicial da linha de fluxo:
- 8 azimute = 270 - azimute
- 9 senão se coordenada Y do ponto final < coordenada Y do ponto inicial e coordenada X do ponto final < coordenada X do ponto inicial da linha de fluxo:
- 10 azimute = 90 - azimute
- 11 retorna azimute

E para a execução desse código e o devido preenchimento da coluna com os valores de azimute, a expressão GetAzimuth( !SHAPE! ) foi utilizada, onde o termo entre parênteses representa a geometria linear de cada linha de fluxo.

Para a criação das condições “se” no código acima, considerou-se que a linha de fluxo teria seu primeiro ponto sempre em um poço, o que foi definido no passo 7 da criação dessas linhas. Definiu-se também que o poço sempre seria ligado a uma equipotencial de maior valor em relação à sua própria potenciometria, restando assim; apenas quatro condições para a obtenção do azimute, como mostra a figura 13.

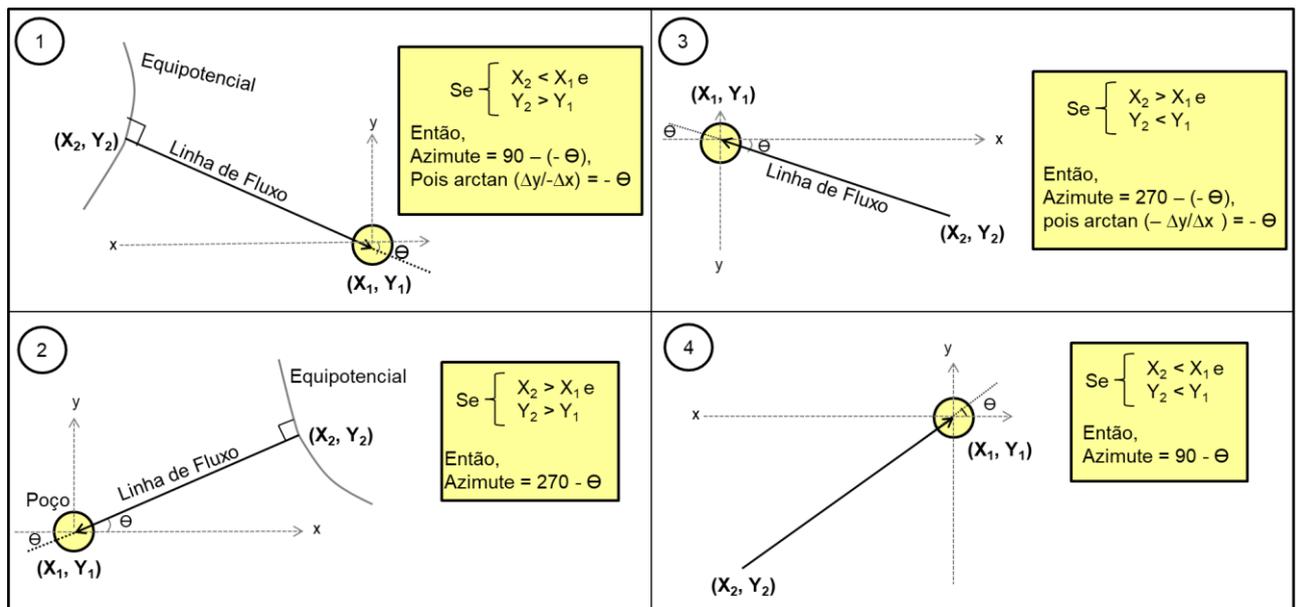


Figura 13 – Esquema trigonométrico criado para auxiliar na obtenção da direção de fluxo da água subterrânea relacionada a cada poço.

Porém, o código de criação das linhas de fluxo não garante que as mesmas sempre ligarão um poço a uma equipotencial de maior potenciometria que ele. Logo, o cálculo do gradiente hidráulico ( $i$ ), com base na equação apresentada em Heath (1982), foi realizado da seguinte maneira:

$$\frac{\text{Potenciometria do Poço (m)} - \text{Potenciometria da Equipotencial (m)}}{\text{Comprimento da Linha de Fluxo (m)}} \quad (12)$$

Então, se o valor de  $i$  for positivo, a linha de fluxo estará ligando um poço a uma linha de menor potenciometria que a do mesmo; assim, para o sentido do fluxo, deve-se adicionar  $180^\circ$ , o que foi feito com o uso da função “SE”, no *software Excel*.

### 5.5.3 Criação dos polígonos referentes às áreas de proteção definidas pelo método de Wyssling (1979)

Primeiramente, para gerar os polígonos referentes aos PPPs foi criado um esquema para encontrar as coordenadas UTM dos extremos das áreas de proteção definidas pelo método de Wyssling, e para isso, foi utilizada a lei dos senos, além de outras teorias trigonométricas básicas. O esquema elaborado com base na lei dos senos para definir essas coordenadas é mostrado na figura 14. A lei dos senos define que a razão entre cada lado de um triângulo e o seno do ângulo que está ao seu oposto é constante, sendo (IEZZI et al., 1977):

$$\frac{a}{\text{sen } \hat{A}} = \frac{b}{\text{sen } \hat{B}} = \frac{c}{\text{sen } \hat{C}} \quad (13)$$

Com base nisso, o código expresso a seguir foi criado para a etapa de vetorização dos PPPs definidos a partir do método de Wyssling. Esse código foi baseado nas informações contidas na página *online* da ESRI (ESRI, 2018d) e em conhecimento de programação na linguagem *Python*, também sendo inserido no *software* ArcGIS por meio da janela *Python*. Após o algoritmo ser executado, e as coordenadas encontradas, foram criados pontos em um novo arquivo de formato *shapefile*. E a partir desses pontos, os polígonos de proteção para cada poço foram gerados.

O código real criado e executado pode ser verificado no Apêndice D. Ele compreende o início da edição, e em seguida, para cada poço no arquivo que contém as variáveis de Wyssling ( $S_o$ ,  $S_u$  e  $b$ ) e o azimute do fluxo d'água, o código calcula a coordenada dos pontos extremos da área de proteção. Nessa fase, a largura das zonas de transporte à montante foi considerada como  $b$  e não como  $B$ , devido à tendência de  $B$  ser um valor muito elevado neste trabalho. Assim, para cada poço, o código verifica e calcula, utilizando as coordenadas projetadas em metros da seguinte maneira:

- 1 Se o azimute é menor ou igual a  $90^\circ$ :
- 2  $\Theta = 180^\circ - \text{azimute} - 90^\circ$ ;
- 3 Coordenada X do extremo  $S_o = \text{coordenada X do poço} - \text{sen}(\text{azimute}) * S_o$ ;
- 4 Coordenada Y do extremo  $S_o = \text{coordenada Y do poço} - \text{sen}(\Theta) * S_o$ ;
- 5  $\alpha = 90^\circ - \text{azimute}$ ;
- 6  $\Phi = 180^\circ - \alpha - 90^\circ$ ;
- 7 Coordenada X do extremo  $S_u = \text{coordenada X do poço} + \text{sen}(\Phi) * S_u$ ;
- 8 Coordenada Y do extremo  $S_u = \text{coordenada Y do poço} + \text{sen}(\alpha) * S_u$ ;
- 9  $\beta = 90^\circ - \text{azimute}$ ;
- 10  $\psi = 180^\circ - \beta - 90^\circ$ ;
- 11 Coordenada X para largura acima do poço = coordenada X do poço -  $\text{sen}(\beta) * (b/2)$ ;
- 12 Coordenada Y para largura acima do poço = coordenada Y do poço +  $\text{sen}(\psi) * (b/2)$ ;
- 13 Coordenada X para largura abaixo do poço = coordenada X do poço +  $\text{sen}(\beta) * (b/2)$ ;
- 14 Coordenada Y para largura abaixo do poço = coordenada Y do poço -  $\text{sen}(\psi) * (b/2)$ ;
- 15 Coordenada X para largura acima do ponto  $S_o = \text{coordenada X do extremo } S_o - \text{sen}(\beta) * (b/2)$ ;
- 16 Coordenada Y para a largura acima do ponto  $S_o = \text{coordenada Y do extremo } S_o + \text{sen}(\psi) * (b/2)$ ;
- 17 Coordenada X para a largura abaixo do ponto  $S_o = \text{coordenada X do extremo } S_o + \text{sen}(\beta) * (b/2)$ ;
- 18 Coordenada Y para a largura abaixo do ponto  $S_o = \text{coordenada Y do extremo } S_o - \text{sen}(\psi) * (b/2)$ .
- 19 Ponto (X, Y) extremo à montante ( $S_o$ ) = (Coordenada X do extremo  $S_o$ , Coordenada Y do extremo  $S_o$ );
- 20 Ponto (X, Y) extremo à jusante ( $S_u$ ) = (Coordenada X do extremo  $S_u$ , Coordenada Y do extremo  $S_u$ );
- 21 Ponto (X, Y) em relação ao norte do poço ( $b/2$ ) = (Coordenada X para largura acima do poço, Coordenada Y para largura acima do poço);
- 22 Ponto (X, Y) em relação ao sul do poço ( $b/2$ ) = (Coordenada X para largura abaixo do poço, Coordenada Y para largura abaixo do poço);
- 23 Ponto (X, Y) em relação ao norte do extremo  $S_o$  ( $b/2$ ) = (Coordenada X para largura acima do ponto  $S_o$ , Coordenada Y para largura acima do ponto  $S_o$ );
- 24 Ponto (X, Y) em relação ao sul do extremo  $S_o$  ( $b/2$ ) = (Coordenada X para largura abaixo do ponto  $S_o$ , Coordenada Y para largura abaixo do ponto  $S_o$ ).

Além dessa condição escrita acima, foram também testadas as condições para o azimute menor ou igual a  $180^\circ$ , menor ou igual a  $270^\circ$  ou menor ou igual a  $360^\circ$ . As coordenadas foram definidas de acordo com o esquema da figura 14. Após

a definição desses pontos, os mesmos foram armazenados de forma ordenada (Su, b acima do poço, b acima de So, So, b abaixo de So, b abaixo do poço) em um novo arquivo de pontos.

Para o funcionamento adequado do código, os ângulos obtidos, antes da execução das funções trigonométricas, foram passados para radianos, pois de acordo com Python (2019), a sua função `math.sin` retorna ao seno de um valor em radianos.

Os pontos condizentes com os extremos das áreas de proteção foram criados de forma ordenada devido ao *loop* “for” (para) do código escrito, para que posteriormente os pontos fossem ligados sucessivamente. E para ligá-los, foi utilizada a ferramenta “*Points to Line*” (Pontos para Linha) do ArcGIS, que de acordo com a ESRI (2018f), tem como um de seus parâmetros de entrada o “*Line\_Field*”, que permite a criação de uma mesma linha conforme um arranjo de pontos que possuem o mesmo valor para determinado atributo, denominado de “*Line\_Field*”. Assim, como foram encontrados 6 pontos a partir do método de Wyssling para proteção de cada poço; no arquivo que armazena o conjunto de 2.190 pontos, ou seja, 6 pontos para cada um dos 365 poços, foi criado um campo de variável inteira que organiza de 1 a 365 os pontos extremos da área de proteção, de modo que todos os pontos pertencentes a área de proteção de um mesmo poço foram classificados com o mesmo número. Isso foi possível devido à inserção da fórmula  $((\text{OBJECTID} - 1) / 6) + 1$  na coluna de classificação “*Line\_Field*” criada. O termo OBJECTID se trata do número, de 1 a 2.190, dos pontos criados; e para exemplificação da solução da fórmula acima, para o ponto de identificação 1.895, o novo campo (*Line\_Field*) foi preenchido com o valor 316, isto é, o valor inteiro obtido a partir dessa fórmula; e isso também aconteceu para os objetos com identificação de 1.891 a 1.896, que resultaram no mesmo valor inteiro de 316.

Após a criação dessas linhas de forma ordenada, as mesmas foram transformadas em polígonos por meio da ferramenta “*Feature to Polygon*” (Feição para Polígono), do ArcGIS. Posteriormente, a ferramenta de edição, do mesmo *software*, denominada “*Smooth*” foi utilizada para a suavização da geometria dos polígonos; porém, apenas para áreas pequenas, uma vez que polígonos muito extensos ao serem suavizados foram transformados em áreas de no mínimo o triplo de seu tamanho inicial; por exemplo, uma das áreas definidas para o poço 1.411 apresentou 160.855 m<sup>2</sup>, e após suavização, passou a ter 2.095.593 m<sup>2</sup>.

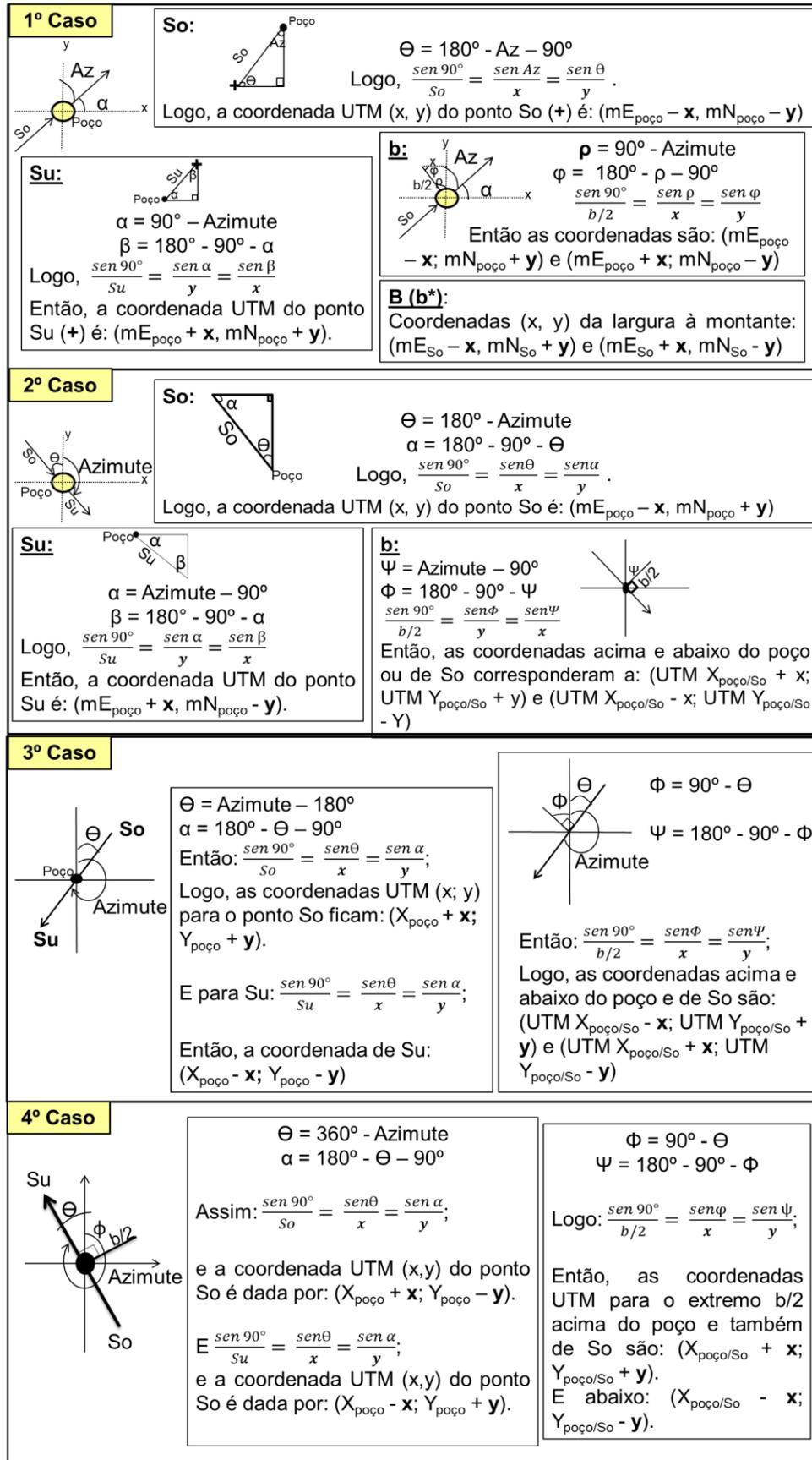


Figura 14 – Esquema trigonométrico criado para a definição das coordenadas referentes aos pontos extremos que delimitam os PPPs definidos a partir do método de Wyssling (1979).

#### 5.5.4 Avaliação dos Resultados Encontrados para o Método de Wyssling (1979)

Kraemer, Haitjema e Kelson (2007) falaram que é interessante comparar os métodos de fluxo uniforme e de raio fixo calculado, os autores inclusive exemplificaram que ao supor um gradiente hidráulico muito pequeno, como 0,00001, para o método de fluxo uniforme, sua zona de captura se aproximará da zona inferida por meio do método de RFC. Assim, acredita-se que para gradientes hidráulicos muito pequenos, os valores de  $S_o$  e de  $S_u$ , avaliados para o método de Wyssling, que é similar ao método do fluxo uniforme como até mesmo sugerem Iritani e Ezaki (2012), serão semelhantes. Logo, uma das verificações feitas foi avaliar a diferença existente entre  $S_o$  e  $S_u$ , para cada poço trabalhado.

Wyssling (1979) recomendou avaliar as distâncias  $S_o$  e  $S_u$  a partir da equação abaixo, uma vez que os tempos de trânsito são conhecidos, e se necessário, sugeriu até a adequação dessas distâncias.

$$t = \frac{(S_o - S_u) \ln(1 + \frac{S_o}{S_u})}{v_o} \quad (14)$$

Logo, também foi efetuada essa avaliação, verificando se as soluções para a equação 14 coincidiram com o tempo de trânsito pretendido, e entendeu-se que caso o tempo verificado pela equação acima tenha sido inferior ao tempo de trânsito desejado, o método não poderá ser aplicado para o poço em questão.

## 5.6 Método para a Modelagem Numérica

Quando as condições do local e o objetivo indicam mais de um método para o cálculo de áreas de proteção, e esses são aplicados, existem maneiras de compará-los, seja de acordo com a sua acurácia, custo ou facilidade de aplicação; mas também, considerando um desses métodos como o mais acurado, e comparando as áreas obtidas pelos demais métodos às alcançadas por esse, tendendo o método de modelagem numérica de fluxo a gerar resultados mais acurados (USEPA, 1987). Porém, de acordo com Foster et al. (2006), a qualidade do modelo estará atrelada aos dados de entrada e também ao conhecimento sobre o fluxo da água subterrânea.

USEPA (1987) mostrou a comparação entre os métodos do raio fixo calculado, analítico e de modelagem numérica em locais distribuídos em quatro estados dos Estados Unidos, e dentre esses, três utilizaram o modelo numérico como o padrão para avaliação entre as áreas. Assim, para uma melhor avaliação dos resultados obtidos pelos métodos de Raio Fixo Calculado e de Wyssling (1979), e também para a análise, o modelo numérico foi aplicado em uma área específica do aquífero Caiuá.

### 5.6.1 Escolha da Área para a Aplicação da Modelagem Numérica

Para a realização do modelo numérico são necessárias informações de contorno como recarga e informações de rios, de tipo de aquífero e sua geometria, de potenciometria, de condutividade hidráulica tridimensional, porosidade efetiva, além de coeficiente de armazenamento e taxas de bombeamento (IRITANI; EZAKI, 2012).

Logo, foi avaliada uma área (Figura 15) onde havia um número considerável de valores de condutividade hidráulica apresentados no banco de dados trabalhado (MMA, 2015), assim como valores variantes de vazão, de potenciometria e de gradiente hidráulico, no intuito de comparar os três métodos em condições hidrogeológicas um pouco diferentes dentro do aquífero Caiuá. Outra informação importante foi a verificação de poços da Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas - RIMAS – (CPRM, 2018b) no local, para atender a necessidade de dados de recarga para o modelo.

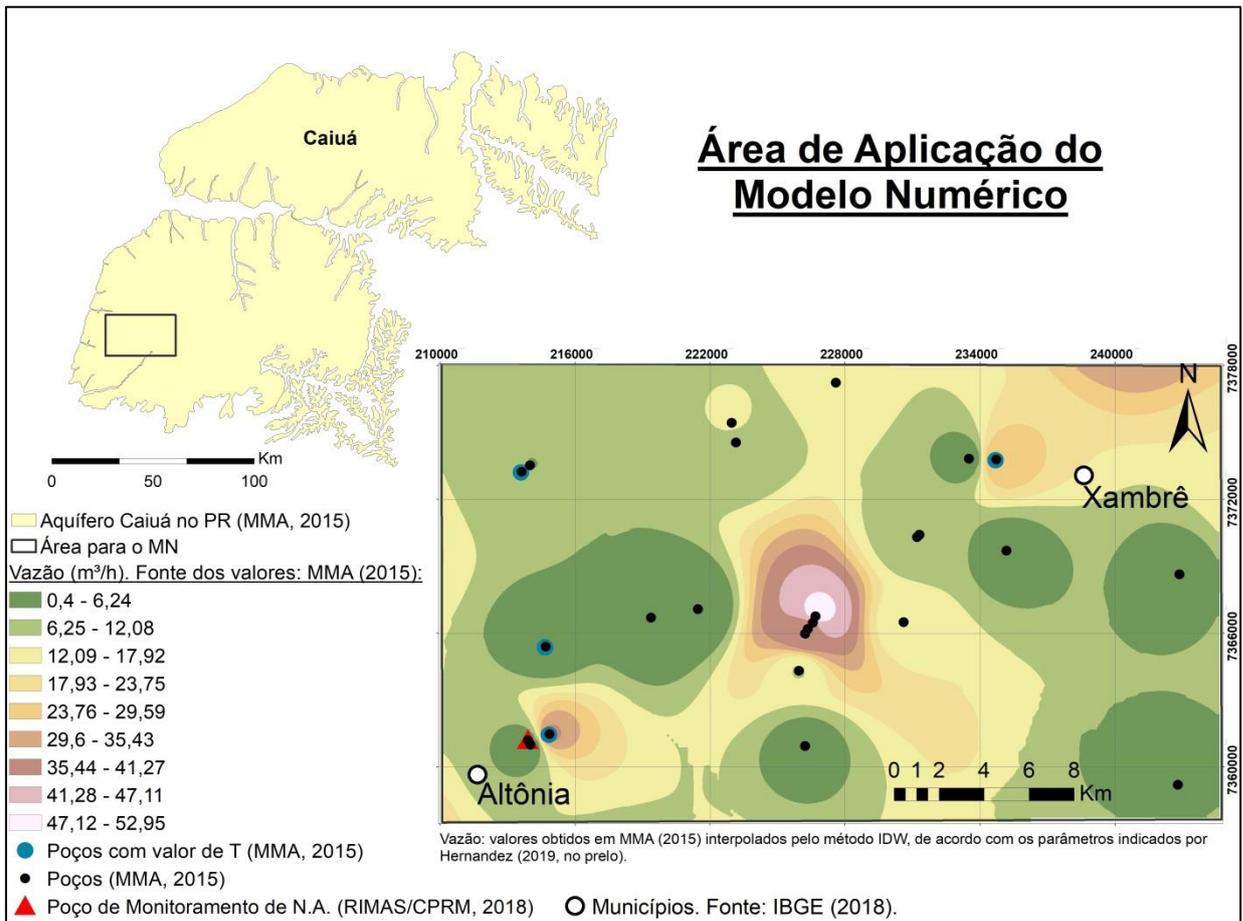


Figura 15 – Localização da área para aplicação da modelagem numérica. Fontes dos dados na imagem.

Essa área, praticamente no sudoeste do aquífero Caiuá e de aproximadamente 708 Km<sup>2</sup>, engloba 12 poços cadastrados como operantes e 13 poços registrados como não operantes no banco de dados (MMA, 2015).

### 5.6.2 Conceitos para a aplicação do Modelo Numérico na Área Escolhida

Um modelo tem a função de representar uma versão simplificada da realidade; porém, logicamente, a validade desse modelo estará diretamente ligada a sua boa aproximação das condições reais (WANG; ANDERSON, 1982). E conforme os autores supracitados, um modelo matemático utilizará equações que governam o fluxo da água subterrânea.

De acordo com Fitts (2015), o método de diferenças finitas (*Finite Difference Method*) é o mais utilizado atualmente, sendo ele versátil e moderadamente simples, sendo o *software* “padrão” para a aplicação desse método, o MODFLOW.

Considerando a água com uma densidade constante, o fluxo tridimensional da mesma em um meio subterrâneo, pode ser expresso pela equação diferencial parcial abaixo (MCDONALD; HARBAUGH, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( Kx \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( Ky \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( Kz \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = Ss \frac{\partial h}{\partial t} \quad (15)$$

onde  $Kx$ ,  $Ky$  e  $Kz$  são os valores de condutividade hidráulica ao longo dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ ;  $h$  é a carga hidráulica,  $W$  se trata do fluxo volumétrico por unidade volumétrica e caracteriza entradas ou saídas de água,  $Ss$  se trata do armazenamento específico do meio poroso e  $t$  é o tempo.

Raramente a solução dessa equação é encontrada; com exceções de sistemas muitíssimo simples (MCDONALD; HARBAUGH, 1988). Assim, o desenvolvimento dessa equação de fluxo na forma de diferenças finitas é baseado na equação da continuidade, onde “a soma de todos os fluxos dentro e fora da célula deve ser igual à taxa de mudança no armazenamento dentro da célula” (MCDONALD; HARBAUGH, 1988, p. 2-5).

Fitts (2015) fala que o passo inicial do processo de modelagem é a construção do modelo conceitual, e que a partir daí, um modelo matemático simula o modelo conceitual criado.

Iritani (1998), partindo do modelo conceitual, construiu um fluxograma para expressar a modelagem matemática realizada em seu trabalho, que pode ser muito bem empregado neste trabalho (Figura 16).

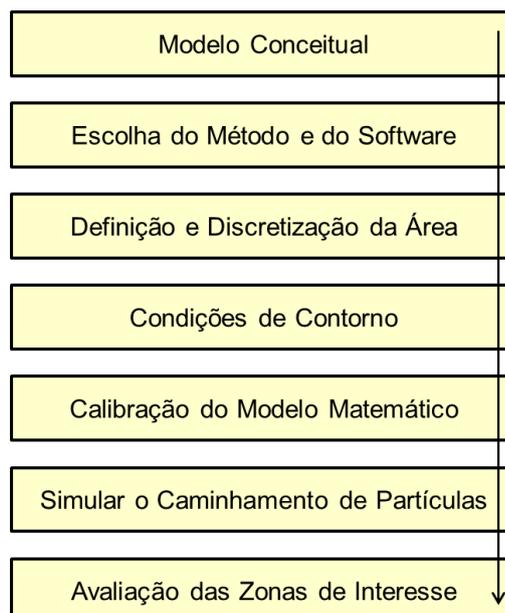


Figura 16 – Esquema para a aplicação da modelagem numérica. Fonte: modificado de Iritani (1998).

Dessa maneira, a metodologia empregada aqui será descrita abaixo de acordo com a organização do fluxograma acima.

### 5.6.3 Modelo conceitual e condições iniciais e de contorno

De acordo com Anderson, Woessner e Hunt (2015), um modelo conceitual deve ser simples, onde devem ser inseridas apenas as propriedades relevantes à proposta de modelagem, mas também, deve ter um nível de complexidade que represente o comportamento do sistema. O modelo conceitual estabelecerá os domínios do modelo, o tipo de aquífero trabalhado, suas condições iniciais e de contorno; além de entradas e saídas de água do sistema (IRITANI, 1998). Modelos conceituais irão necessitar de informações como condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento, informações de corpos superficiais de água, informações de recarga, taxas de bombeamento, além de informações sobre o tipo de camada e de suas elevações (ANDERSON; WOESNNER; HUNT, 2015). Ainda, de acordo com esses últimos autores, para realizar o traçado de partículas, é necessário informar a porosidade efetiva do sistema.

Logo, trabalhou-se com as informações presentes no banco de dados (MMA, 2015); assim como assumindo a porosidade efetiva média indicada pela bibliografia, de 0,15 (AGUASPARANÁ, 2010) e uma única camada não confinada.

O topo do modelo foi considerado como a potenciometria registrada no banco de dados, que de acordo com MMA (2015), trata-se da diferença entre a cota do terreno e o nível estático. E como o bombeamento foi considerado constante, ou seja, de 24 horas por dia, supôs-se que o valor do nível dinâmico não ultrapassaria o valor do nível estático presente no banco de dados, isto para o caso do modelo conceitual. Logo, decidiu-se trabalhar com um tempo de bombeamento de 24 horas/dia, assim como para os outros métodos, devido também ao quesito de comparação entre eles. Esse tempo não parece ser muito usual na bibliografia, Iritani (1998), por exemplo, utilizou o valor de 24 horas por dia apenas para a calibração de seu modelo considerando o bombeamento; e Marcelino (1999) utiliza um tempo de 16 horas diárias.

Também, como o cálculo da espessura saturada do aquífero considerou a diferença entre a profundidade do poço e o nível estático (MMA, 2015), resolveu-se considerar a base do aquífero, para o modelo conceitual, como sendo a profundidade do poço subtraída da cota altimétrica do mesmo, ambos valores presentes no BD.

Logo, foi trabalhada apenas a espessura considerada como saturada do aquífero, não sendo inseridas outras camadas hidroestratigráficas ou a espessura de solo no modelo, e isso se deve ao fato de o método de modelagem ter sido utilizado para fins de comparação, seguindo o padrão dos demais métodos utilizados, onde os cálculos aplicam a espessura saturada.

Além disso, inicialmente, considerou-se o modelo como isotrópico; ou seja, os valores de condutividade hidráulica não variaram de acordo com a sua direção, sendo  $K_x = K_y = K_z$  (FITTS, 2015).

As demais informações sobre o modelo conceitual serão tratadas após a explicação do *software* utilizado, o MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

#### 5.6.4 O software MODFLOW e o porquê de seu uso

Iritani (1998) recomenda utilizar um *software* que possua um manual detalhado, assim como um que seja amplamente utilizado em cenários semelhantes ao que se deseja trabalhar. Assim, escolheu-se utilizar o MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), aplicado por diversos outros autores, como Hirata (1994), Iritani (1998), Marcelino (1999) e Renken et al. (2001).

E para sua escolha, também foi considerada a bibliografia que serve como suporte para o seu uso: McDonald e Harbaugh (1988), Harbaugh et al. (2000), Renken et al. (2001), Harbaugh (2005) e Langevin et al. (2017). Como interface gráfica para o uso do MODFLOW versão 2005 (HARBAUGH, 2005), foi utilizada a interface denominada ModelMuse (WINSTON, 2009). Essa interface é gratuita, o que motivou a sua escolha, além do fato de possuir uma série de tutoriais em vídeos, disponíveis *online* pelo Serviço Geológico Americano (*United States Geological Survey* – USGS, 2018).

Para o uso do Modflow é necessário uma malha (*grid*), a qual necessita ser espacialmente discretizada, sendo que a origem desse *grid* coincidirá com a origem do sistema de coordenada definido (WINSTON, 2009).

Assim, inseriu-se uma malha correspondente ao tamanho da área de interesse, e as células da malha foram inicialmente configuradas com um tamanho de 200 m x 200 m, valor utilizado para interpolações por Hernandez et al. (2019, no prelo) em seu trabalho nos aquíferos do Paraná. Porém, as células foram divididas e centradas por bloco, cujo tipo de formulação é especificada por McDonald e Harbaugh (1988). De acordo com esses últimos autores, os blocos do modelo serão formados pelas linhas especificadas, sendo que os nódulos a serem trabalhados, estarão no centro de cada bloco (Figura 17). Assim,  $\Delta r_j$  se trata da extensão da coluna  $j$  na direção das linhas, e  $\Delta c_i$  se trata da largura da linha  $i$  avaliada, e a espessura (profundidade) da célula é dada pela espessura da camada definida (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

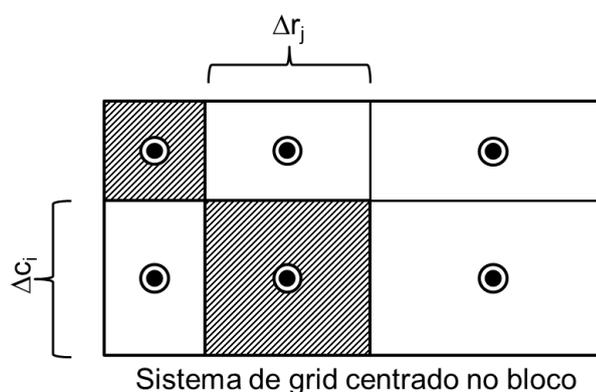


Figura 17 – Grid com os nódulos centrados no bloco (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

No caso deste trabalho, usou-se o pacote denominado LPF (*“Layer Property Flow”*) presente no Modflow (HARBAUGH et al., 2000). Esse pacote é semelhante

ao pacote de fluxo de bloco centrado; porém, nele os dados hidrológicos de entrada não dependem do tamanho da célula (HARBAUGH et al., 2000). Assim, decidiu-se diminuir o tamanho das células nas áreas de interesse para definição de zonas de proteção, ou seja, no entorno dos poços. Essa decisão foi tomada considerando que poços sempre seriam ponderados no centro de células de 200 m x 200 m; podendo atrapalhar o traçado de zonas de transporte. Assim, no entorno dos poços de interesse, a malha foi redimensionada para 50 x 50 metros, valor próximo do raio de proteção médio previamente avaliado pelo método de RFC (Figura 18).

Iritani (1998) comenta que o espaçamento de células é um fator limitante para a definição de zonas de transporte, principalmente das menores, como o Perímetro de Alerta; porém, a autora também salienta a importância da avaliação de escala de trabalho. Aqui o tamanho de 50 metros foi aplicado na tentativa de delimitação de perímetros de alerta, que também são foco deste trabalho, não se tentando trabalhar com blocos menores devido à quantidade limitada de poços e fontes de informação para o tamanho da área modelada.

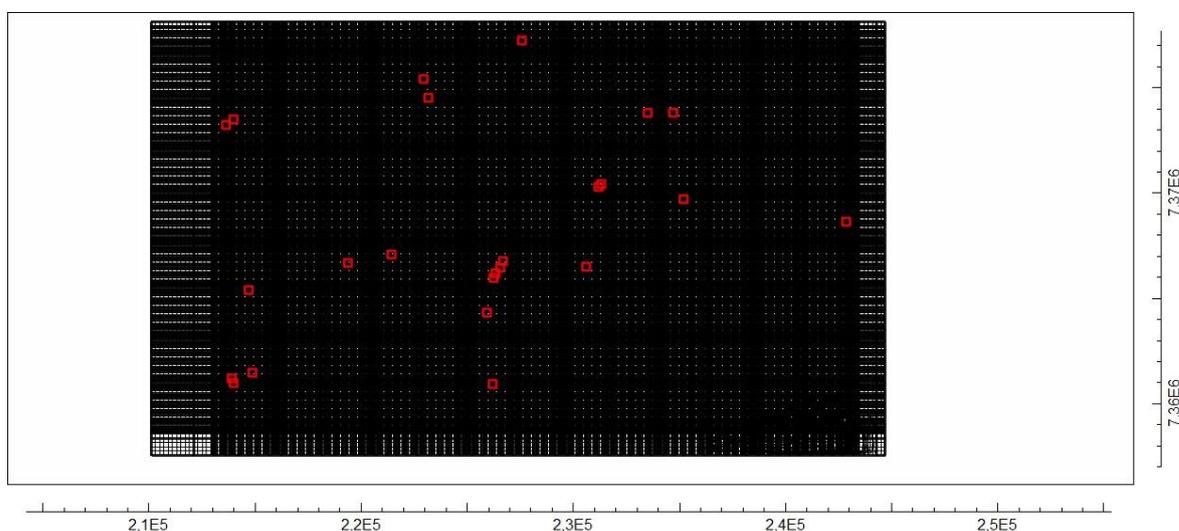


Figura 18 - Malha discretizada na área de modelagem, com os poços (pontos vermelhos) a terem suas zonas de transportes definidas. Fonte da localização dos poços: MMA (2015).

Para utilizar o Modflow a partir da interface *ModelMuse*, são sempre requeridos os seguintes conjuntos de dados: 1) informação sobre se as células estão ativas ou não, geralmente, a maioria estão ativas; 2) carga hidráulica inicial; além disso, quando o pacote LPF está ativo, são necessários e aplicáveis a este trabalho: 3) condutividade hidráulica na direção X ( $K_x$ ); 4) coeficiente de anisotropia,

ou seja, valor que relaciona a condutividade ao longo das colunas ( $K_y$ ) e  $K_x$ ; 5) condutividade hidráulica vertical ( $K_z$ ); e 6) coeficiente de armazenamento (WINSTON, 2018).

Uma célula inativa é aquela sem fluxo (MCDONALD; HARBAUGH, 1988); assim, consideraram-se todas as células ativas.

De acordo com McDonald e Harbaugh (1988), na fase de definição do projeto a ser simulado, indica-se o tamanho do projeto, como já explicado anteriormente; o tipo de simulação (transiente ou estacionária), o número de “períodos de estresse” temporais, as características hidrológicas e o esquema de solução para a simulação.

Logo, antes de falar sobre as características hidrológicas do sistema, é necessário entender os tipos temporais de simulação e o que são “períodos de estresse”.

No estado estacionário, estima-se que o termo referente ao armazenamento do aquífero na Equação 15 é zero (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015; HARBAUGH et al., 2000). O estado estacionário é independente do tempo, nele as condições hidrológicas não variam com o decorrer do tempo, e em simulações transientes, o estado estacionário é normalmente o primeiro tempo especificado (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Já quando se simula em estado transiente, se indica que há variação nas propriedades do aquífero em relação ao tempo, e para isso, é necessário iniciar a modelagem inserindo dados de variação de taxa de bombeamento, ou de recarga, por exemplo (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Segundo Anderson, Woessner e Hunt (2015), na natureza raramente existirão condições estacionárias; porém, a modelagem em estado estacionário muitas vezes é preferível, pois é mais simples, além de necessitar de um único conjunto de dados para a calibração. Dessa maneira, optou-se por trabalhar com uma simulação estacionária, principalmente devido aos dados disponíveis. O trabalho de Iritani (1998) também é um exemplo de simulação em estado estacionário.

A simulação no estado estacionário necessita de um único “período de estresse” sem subdivisões (HARBAUGH et al., 2000). De acordo com Harbaugh (2005), “períodos de estresse” são tempos nos quais os dados de entrada são constantes e subdividem o tempo de simulação, e estes períodos, por sua vez, são divididos em intervalos de tempo (“*time steps*”). Harbaugh (2005) exemplifica que ao se desejar simular um período de 90 dias, e se conhecendo que as características

de um rio de interesse ou de bombeamento, por exemplo, variam a cada 30 dias, serão necessários de três “períodos de estresse”.

Assim, decidiu-se trabalhar com três períodos de estresse, sem divisão de intervalos em cada um, sendo eles de 0 a 86400 segundos, de 86400 segundos a 4320000 segundos, período equivalente a 49 dias, e de 4320000 a 157680000 segundos (5 anos). Essa subdivisão foi apenas devido aos tempos requeridos de trabalho; porém, o sistema foi simulado em sistema estacionário, sendo o primeiro período de estresse definido aqui relevante para a etapa de calibração, como será visto posteriormente.

De acordo com Langevin et al. (2017) em simulações estacionárias no MODFLOW, não é necessário, diretamente, a indicação de valores de cargas hidráulicas iniciais, uma vez que a derivação do tempo é retirada da equação 15; porém, o sistema realiza uma iteração que visa estimar as cargas, sendo necessário, na prática, uma estimativa inicial para o processo de iteração começar. O MODFLOW, a partir de um valor de carga pré-definido, calcula novas cargas para cada tempo trabalhado, sendo essas cargas calculadas sucessivamente; por exemplo, a carga calculada para o período 2, se tornará a carga inicial para o cálculo da nova carga estimada para o tempo 3, e assim sucessivamente, até atingir uma carga final que satisfaça as equações do modelo (LANGEVIN et al., 2017).

Assim, estimou-se a carga inicial (para o tempo zero) como a potenciometria presente no banco de dados. Consoante com Anderson, Woessner e Hunt (2015), as iterações que buscam a carga final serão poucas caso a diferença entre a carga inicial e a solução final para carga seja pequena.

O coeficiente de armazenamento inicial foi de 0,001, valor usado por Iritani (1998).

As entradas das cargas hidráulicas iniciais e da condutividade hidráulica foram realizadas a partir da interpolação de valores que o próprio *software MODFLOW* oferece, utilizando o método “Inverse Distance Squared” (Inverso da Distância ao Quadrado), onde os resultados interpolados se tratam de uma média ponderada dos valores, onde os pesos de ponderação são obtidos por meio do inverso da distância ao quadrado dos valores avaliados (WINSTON, 2018). Esse método foi escolhido devido à indicação de Hernandez, Athayde e Athayde (2018) em seu trabalho nos aquíferos do Paraná.

### 5.6.5 Recarga

O Modflow apresenta o pacote “Recarga”, que permite simular a distribuição, em área, da recarga no sistema do aquífero, sendo que a recarga do aquífero geralmente se dá pela entrada da precipitação no sistema de fluxo da água subterrânea; e no *software*, esta variável é representada em unidade de volume em relação ao tempo (MCDONALD; HARBAUGH, 1988). Porém, Winston (2018) explica que no Modflow, a recarga deve ser inserida em comprimento/tempo, uma vez que o *software* calculará a taxa volumétrica de acordo com a área horizontal de cada célula, entendendo-se assim, que para entrada, a recarga pode ser considerada como uma taxa volumétrica para cada 1 m<sup>2</sup>.

Healy e Scanlon (2010) definem recarga como a água que atinge o lençol freático e assim é somada ao armazenamento de água subterrânea do sistema. Os autores também comentam sobre a suposição de que o aumento do nível d’água em um aquífero confinado se dá devido à ida direta da recarga para o lençol freático, e que essa premissa é aplicada no método de estimativa de recarga denominado de flutuação do nível d’água (*Water Table Fluctuation – WTF*).

De acordo com Healy e Scanlon (2010) o método WTF tem sido usado com sucesso para períodos longos, como anos e décadas, e seu uso é fácil e simples.

Assim, a recarga avaliada por meio da flutuação do nível de água observado é dada pela equação (HEALY; SCANLON, 2010):

$$R = S_y \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (16)$$

onde  $S_y$  se trata da armazenamento específico (“*specific yield*”), e  $\Delta H$  é a diferença entre o pico mais alto de nível de água, após uma descida do nível, e o ponto mais baixo de uma curva de recessão projetada até o tempo referente ao pico mais alto do nível d’água (Figura 19).

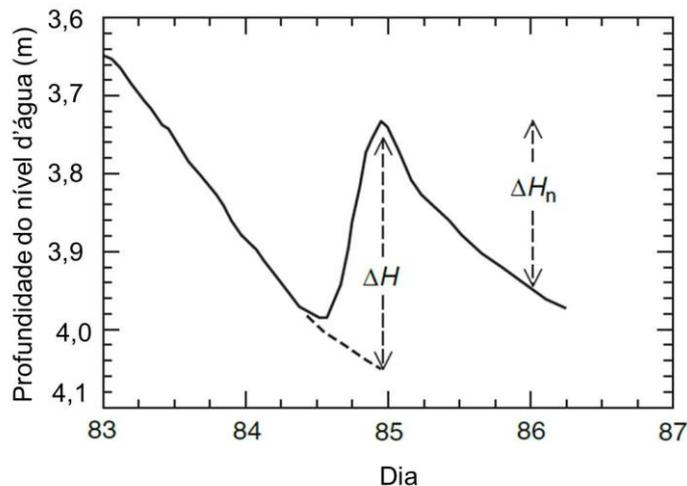


Figura 19 – Leitura de  $\Delta H$  no método WTF. Fonte: Healy e Scanlon (2010).

Segundo Healy e Scanlon (2010), a curva de recessão para a obtenção de  $\Delta H$  representa a curva que o nível de água seguiria, caso não houvesse a recarga no sistema; e essa curva pode ser elaborada manualmente, conforme “intuição hidrológica”.

Simon (2014), por exemplo, utilizou o método de flutuação do nível d’água para estimar a recarga no Sistema Aquífero Guarani na bacia do Rio Ibicuí, no Estado do Rio Grande do Sul. A autora realizou retas de ajuste para a definição das curvas de recessão projetadas para o nível d’água e utilizou apenas os picos acentuados e que estavam posteriores a diminuições do nível.

Simon (2014) trabalhou com várias medições de nível para mesmos poços; e assim, utilizou o somatório dos valores de  $\Delta H$  observados, dividindo-os pelo tempo de observação total:

$$R = S_y \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n}{\text{tempo de observação}} \quad (17)$$

Em relação a  $S_y$ , o armazenamento freático (em um aquífero livre) é denominado de armazenamento específico, e representado pelo símbolo  $S_y$ , e em um aquífero livre, quando a coluna hidroestática rebaixa, o nível do lençol freático também rebaixará (FITTS, 2015). Ainda conforme FITTS (2015), um aquífero não confinado permite que uma maior quantidade de água seja retirada de seu armazenamento do que um aquífero confinado, sendo o armazenamento específico de um aquífero livre maior em relação à armazenabilidade de um aquífero confinado.

Mais precisamente, o armazenamento específico ( $S_y$ ) se trata da diferença entre a porosidade e a retenção específica de uma amostra, representando o espaço poroso da rocha ou do solo que pode armazenar água e contribuir efetivamente para o fornecimento hídrico; logo, é frequentemente chamado de porosidade efetiva (MEINZER, 1923).

Essa metodologia explicada acima foi utilizada em 3 poços cadastrados na rede RIMAS da CPRM, os quais possuem dados de nível de água, data e hora de medição. O Estado do Paraná possui 16 poços da rede RIMAS, sendo a maioria deles inserida no aquífero Caiuá (CPRM, 2018b). Porém, trabalhou-se com os dados de apenas 3 poços (Tabela 4), os quais estão no entorno da área a ser modelada. Apenas um desses três poços está inserido na área a ser modelada (Figura 20), mas realizou-se a metodologia de flutuação do nível d'água em demais poços do entorno para avaliar a variação dos resultados de estimativa obtidos.

Para o valor de  $S_y$  foi utilizado o valor de porosidade efetiva de 0,15 (AGUASPARANÁ, 2010).

Tabela 4 – Poços da rede RIMAS utilizados para estimativa da recarga. Fonte dos dados: CPRM (2018b).

<b>Código do Poço</b>	<b>Coordenada X (mE)</b>	<b>Coordenada Y (mN)</b>	<b>Início da Medição</b>	<b>Final da Medição</b>	<b>Nº de Medições</b>
3500026830	269780	7363217	29/11/2010	26/06/2018	2769
3500026831	213886	7361244	06/12/2010	26/06/2018	2776
3500029469	256342	7408575	31/03/2012	25/06/2018	2215

Fonte dos dados: CPRM (2018b).

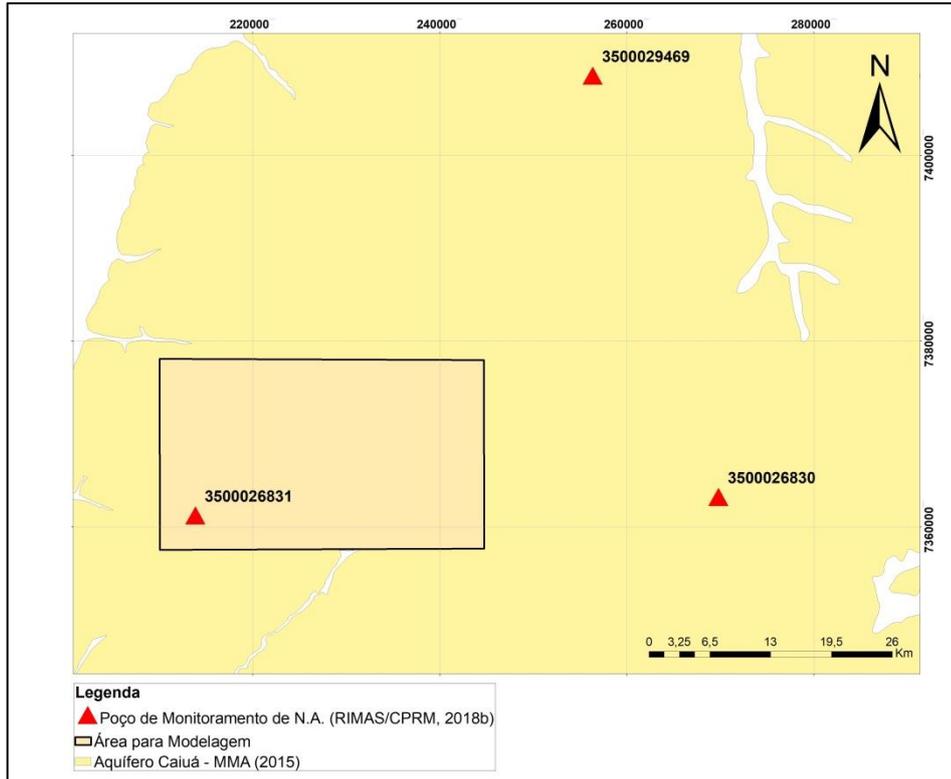


Figura 20 – Localização dos poços RIMAS observados aqui para a definição da recarga pelo método WTF. Fonte dos dados: CPRM (2018b).

As figuras 21, 22 e 23 mostram as flutuações do nível de água para os três poços tratados e mostram também as variações entre os picos e as curvas de recessão projetadas para cada poço.

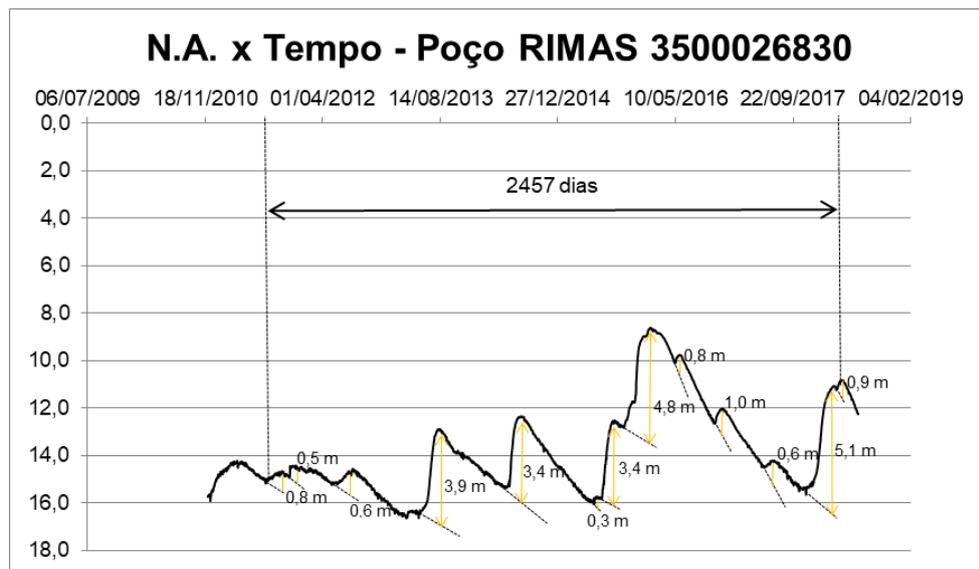


Figura 21 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500026830.

A recarga estimada para o poço RIMAS 3500026830, de acordo com a Figura 21, foi de 581,59 mm/ano.

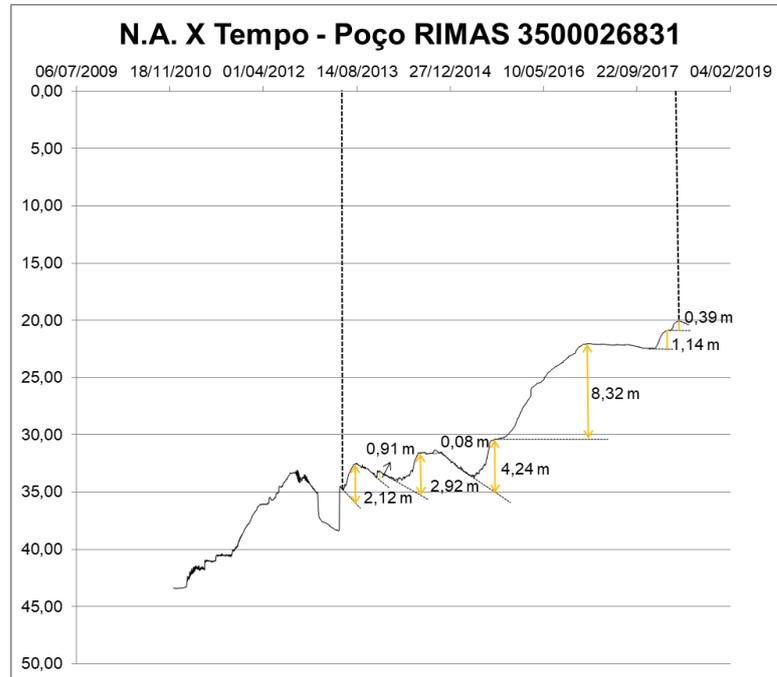


Figura 22 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500026831.

A recarga estimada para o poço RIMAS 3500026831 foi de 602,494 mm/ano.

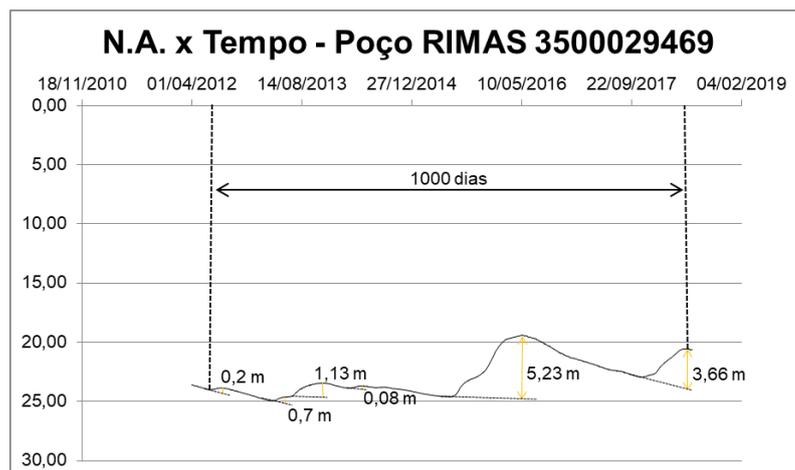


Figura 23 – Gráfico N.A. (m) versus o tempo, de acordo com CPRM (2018b); e as interpretações realizadas para o método WTF para o poço RIMAS 3500029469.

A recarga estimada para o poço de monitoramento da rede RIMAS de código 3500029469 foi de 271,26 mm/ano.

Devido à distância dos poços que estão fora da área estudada, mas que tiveram seu valor estimado de recarga calculada, decidiu-se iniciar a modelagem com um valor de recarga escolhido arbitrariamente, mas baseado nos valores obtidos acima e também na localização dos poços, sendo este valor de 585 mm/ano.

No Modflow, a recarga foi atribuída ao topo das células ativas, e de acordo com Winston (2018), essa escolha permite que a recarga varie conforme as células sequem. Mas como no caso está se trabalhando apenas com uma camada, este fator não deve influenciar a modelagem. A recarga também pode ser aplicada no topo da camada (WINSTON, 2018), e acredita-se que para o caso deste trabalho, qualquer uma dessas duas escolhas pode ser viável.

No Paraná, também no aquífero Caiuá, foi realizado um estudo anterior sobre a recarga do aquífero e sua relação à precipitação pluviométrica entre o período de 2015 e 2017 (SILVA JÚNIOR, 2017). Silva Júnior (2017) também utilizou o método WTF para a avaliação da recarga, assim como dados da rede RIMAS (para 11 poços), e o valor de  $S_y$  também de 0,15. O autor, avaliando um período basicamente entre o início de 2015 e o segundo semestre de 2016, avaliou valores de recarga total para as estações da rede RIMAS 3500026830, 3500026831 e 3500029469 próximos de 921,45 mm/ano, de 1348,90 mm/ano e de 676,14 mm/ano, respectivamente. Valores todos acima dos avaliados aqui para um período maior (Tabela 4); porém, o autor salientou um evento de alta recarga no seu período de estudo no aquífero Caiuá, que associou com a alta precipitação pluviométrica que ocorreu na região em 2015, indicando também que existem elevações do nível d'água mais instantâneas e outras que podem levar meses.

Silva Júnior (2017), entre os 11 poços estudados, avaliou que o poço localizado em Altônia (3500026831) foi o que mais registrou elevação de nível no período de alta recarga avaliado por ele. E esse poço está incluído na zona de modelagem deste trabalho.

Assim, o valor inicial de recarga a ser utilizado neste trabalho, abrange não somente um período de recargas menores, como também, esse período de elevada recarga verificado por Silva Júnior (2017).

### 5.6.6 Rios

Rios e cursos d'água podem contribuir para a entrada ou para a saída de água do sistema, e isto dependerá do gradiente hidráulico; logo, o Modflow possui um pacote cuja função é simular o fluxo entre os corpos aquáticos superficiais e o sistema de água subterrânea, que é denominado “*River Package*” (MCDONALD; HARBAUGH, 1988).

De acordo com Harbaugh et al. (2000) para o uso do pacote “*River*” é necessário informar a carga hidráulica do rio (“*river stage*”), a condutância hidráulica do leito do rio, e a cota da base do leito do rio (“*riverbed bottom*”).

Conforme Harbaugh (2005) a condutância hidráulica é um termo que combina condutividade hidráulica e as dimensões de uma malha. A condutância de um rio é expressa pela seguinte equação (MCDONALD; HARBAUGH, 1988):

$$\text{Condutância} = \frac{KLW}{M} \quad (18)$$

onde K é a condutividade hidráulica do material da base do rio, L é o comprimento do rio que cruza a célula, W é a espessura do rio e M é a espessura de material que compreende o leito do rio. A figura 24 auxilia a entender melhor essas variáveis de condutância. E Iritani (1998, p. 42) e Marcelino (1999, p. 91) enfatizam que L é o comprimento da célula onde está o rio.

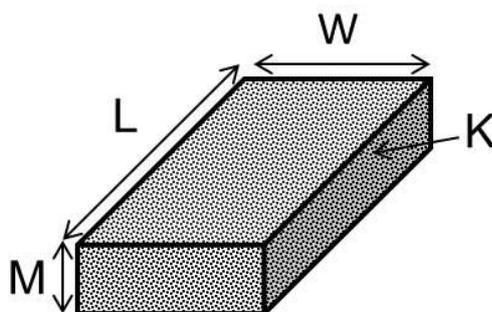
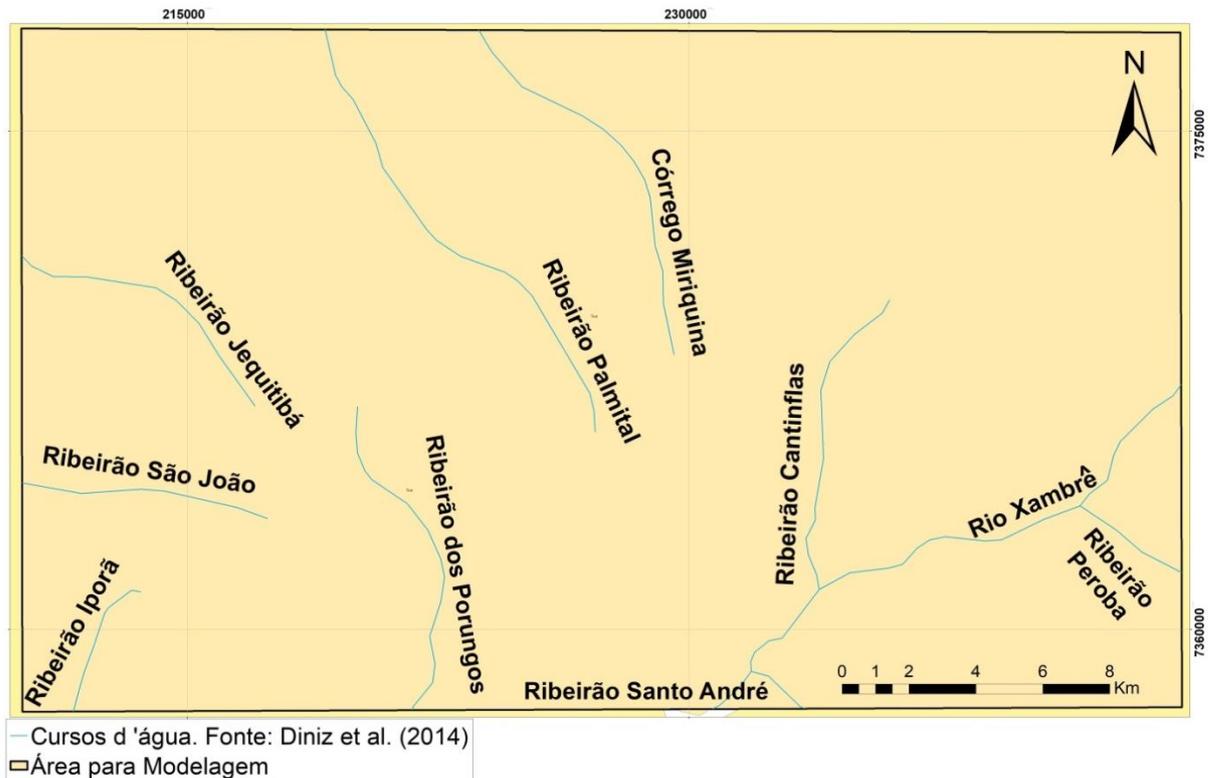


Figura 24 – Ilustração das variáveis da condutância hidráulica. Modificado de McDonald e Harbaugh (1988).

Após essas informações, é necessário saber quais serão os cursos de água colocados no sistema a ser modelado. Na área de interesse para modelagem existem 10 cursos d'água, sendo 9 denominados como Ribeirões ou Córrego e 1 como Rio, o Rio Xambrê (DINIZ et al., 2014) (Figura 25).

Inicialmente, foi colocado apenas o Rio Xambrê no modelo, um dos únicos dos dez que está registrado em Diniz et al. (2014) com fluxo permanente. Porém, no

processo de calibração, também foram atribuídos ao sistema o Córrego Miriquina, o Ribeirão Jequitibá, o Ribeirão Palmital, o Ribeirão Porungos, o Ribeirão Santo André, o Ribeirão Cantinflas, o Ribeirão Peroba e o Ribeirão São João.



Os cursos d'água foram obtidos por meio de um shapefile de hidrografia presente na base de dados hidrogeológicas do Brasil, datados de 2014, mas com alterações de 2009 indicadas na tabela de atributos. Assim como registro de fonte das informações dos cursos d'água referente a MPOG/IBGE/DGC/CCAR, MMA/ANA.

Figura 25 – Cursos d'água na região da modelagem numérica. Fonte do *shapefile* para construção: Diniz et al. (2014).

A condutância foi calculada como expressa em McDonald e Harbaugh (1988). Cionek, Beaumord e Benedito (2011) destacaram que a região do aquífero Caiuá no Paraná é representada por cursos d'água com fundos arenosos, havendo rara presença de outros tamanhos de grãos. E Fetter (1988, p. 85) indica valores de condutividade hidráulica para areias bem selecionadas entre  $10^{-3}$  e  $10^{-1}$  cm/s. Então, foi utilizado um valor de 0,001 cm/s para a condutividade necessária para a obtenção da condutância hidráulica.

O comprimento do rio em cada célula (L) foi considerado para a modelagem inicial utilizando uma malha de 200 x 200 m, valor utilizado para interpolações por Hernandez et al. (2019, no prelo). E para isto, foram consideradas regiões distintas do Rio Xambê, devido à posição do Rio em cada célula do modelo (Figura 26). E a espessura do Rio foi verificada no *software Google Earth Pro*, para cada trecho do Rio considerado na figura 26. Marcelino (1999) considerou que a espessura de

sedimentos no fundo (M) dos cursos d'água avaliados por ele não excederia 30% do valor da largura do curso d'água, sendo essa consideração do autor utilizada neste trabalho.

Para inserir os valores distintos de condutância no Rio Xambrê foi utilizada a ferramenta “*Vertex Value*” presente no ModelMuse, que permite associar valores a vértices distintos de um objeto (WINSTON, 2018).

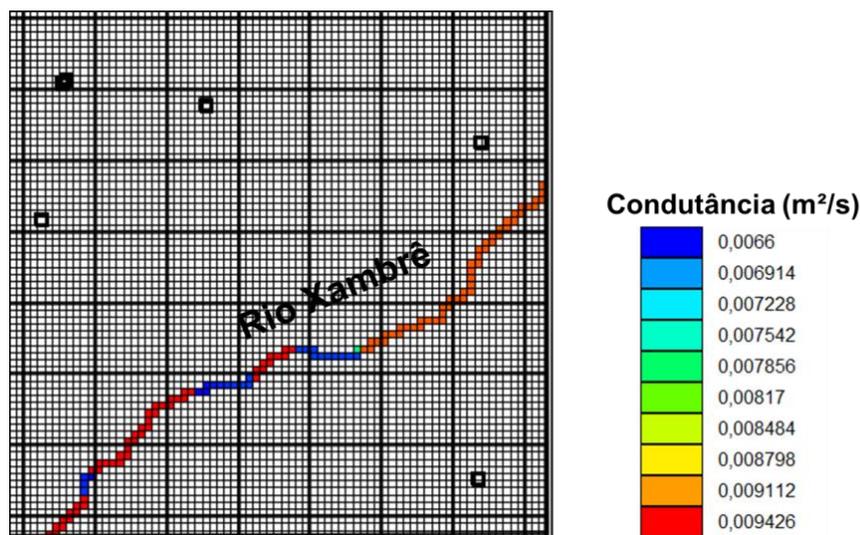


Figura 26 - Valores de condutância atribuídos ao Rio Xambrê na área a ser modelada.

A tabela 5 indica a espessura e o valor de condutância avaliados para cada trecho (seção de cor diferente na figura acima, sendo o trecho 1 o de cor vermelha mais ao sul da Figura 26) considerado do Rio Xambrê.

Tabela 5 – Valores definidos para condutância do Rio Xambrê.

Trecho	Largura – W (m)	Condutância (m <sup>2</sup> /s)	Espessura Estimada de Sedimentos de Fundo (m)
1	15,6	0,009426	4,68
2	10,1	0,006666	3,03
3	16,3	0,009426	4,89
4	13,0	0,006666	3,9
5	14,1	0,009426	4,23
6	18,3	0,006666	5,49
7	10,0	0,009313	3,00

A espessura de sedimentos de fundo considerou a largura avaliada por meio do *Google Earth Pro* e a consideração de 30% relatada por Marcelino (1999) e comentada acima.

Para preenchimento inicial da cota do Rio Xambrê foram consultadas as informações de cota do nível da água na Estação 64833000 presente no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional das Águas (ANA, 2018), e a partir desses dados, foram observadas que a média e a mediana das cotas médias do Rio Xambrê estão em torno de 100 centímetros. Logo, considerou-se, simplificada, que o nível d'água no Rio Xambrê compreendia a cota topográfica avaliada em imagem SRTM (2019), com resolução espacial de 90 metros, nos locais por onde corre o Rio, somados de 1 metro.

E para a base do leito do rio, considerou-se a cota topográfica avaliada na mesma imagem SRTM (2019).

Essas suposições foram inseridas no modelo; e na fase de calibração, os demais cursos d'água foram inseridos. Para o cálculo de condutância desses, suas larguras foram avaliadas no *software Google Earth Pro*, sendo a condutância hidráulica média inserida para esses demais cursos de aproximadamente 0,0066 m<sup>2</sup>/s. Ainda, os valores do nível d'água desses cursos foram inseridos com o auxílio da ferramenta “*Vertex Value*” do ModelMuse, consistindo na cota topográfica somada de 0,5 metros. O efeito e a introdução dessas informações poderão ser avaliados na seção 6.3.1.

#### 5.6.7 Calibração e Sensibilidade

Para Fitts (2015) a calibração de um modelo conceitual nada mais é do que ajustar os parâmetros presentes nesse para obter valores simulados mais próximos dos observados (medidos). E de acordo com Hill (1998) dois fatores indicam erro em um modelo: 1) a não correspondência dos valores gerados com os observados e 2) a falta de realismo nos parâmetros otimizados. De acordo com a mesma autora, o valor que expressa a diferença entre um valor observado e um valor simulado é chamado de resíduo.

Iritani (1998) e Renken et al. (2001), por exemplo, utilizaram a “tentativa e erro” para calibrar seus modelos. De acordo com Fitts (2015) modelos simples podem ser calibrados com repetitivas tentativas, onde os resultados simulados são comparados aos observados. Assim, ao trabalhar com a observação de cargas hidráulicas, quando a diferença entre as cargas observadas e simuladas alcançar

um valor aceitável, denominado de “critério de calibração”, o modelo estará calibrado (IRITANI, 1998).

Renken et al. (2001) também utilizaram a observação de cargas hidráulicas para a calibração de seu modelo.

Anderson, Woessner e Hunt (2015) trazem o termo ajuste de histórico (“*history matching*”), que segundo eles, foi introduzido pela indústria de petróleo, e se refere ao ajuste de dados históricos com as saídas do modelo criado e executado. E os autores relatam que a primeira fase desse ajuste seria a tentativa e erro, da maneira expressa no fluxograma da figura 27, seguida da fase efetuada com o uso de *software*.

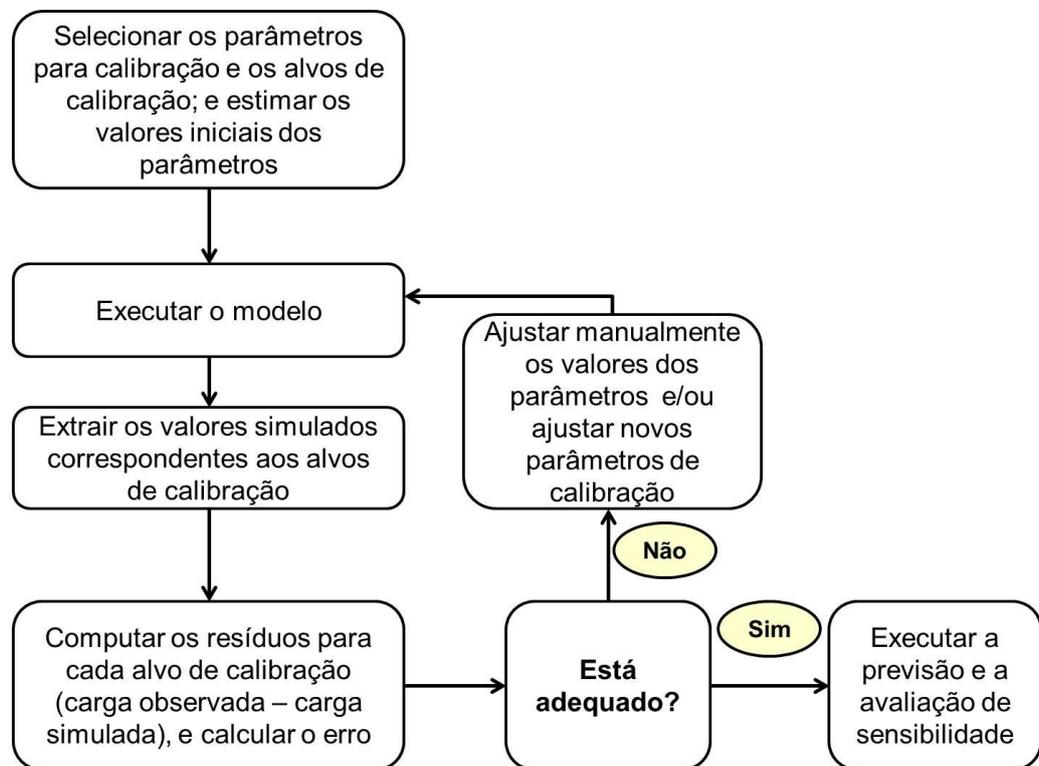


Figura 27 – Fluxograma para a realização da tentativa e erro para uma simulação numérica. Fonte: modificado de Anderson, Woessner e Hunt (2015).

Neste trabalho, a primeira fase foi realizada com base no fluxograma da figura 27, mesmo não havendo dados históricos das cargas hidráulicas, apenas os dados referentes ao banco de dados, ou seja, obtidos a partir do nível estático (carga inicial) e do nível dinâmico (onde foi suposto que se passou 1 dia de bombeamento). Porém, para o entendimento do fluxograma acima é importante entender os

conceitos de parâmetro para calibração e de alvo de calibração mencionados em Anderson, Woessner e Hunt (2015).

Os alvos de calibração são os valores observados em campo, em um determinado tempo, que serão comparados aos valores simulados de saída; em geral, são cargas hidráulicas e valores de fluxo; e a melhor concordância entre esses valores se dará pelo ajuste dos parâmetros de entrada (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015), entendidos aqui como os parâmetros para calibração. Neste trabalho, os alvos de calibração foram as cargas hidráulicas.

Para a calibração de um modelo, deve-se atentar para a utilização de parâmetros razoáveis hidrogeologicamente (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

A calibração foi realizada de acordo com o fluxograma acima, e a avaliação do erro foi por meio da equação da Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Squared Error* – RMSE), avaliação que de acordo com Anderson, Woessner e Hunt (2015) apresenta um valor maior que as demais avaliações para o erro (erro médio e erro médio absoluto). Iritani (1998) também utilizou essa equação para avaliação do erro durante a calibração de seu modelo:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(h_{observada} - h_{calculada})_i^2]^{0,5} \quad (19)$$

Como indica o fluxograma, após esse passo, é importante verificar se o erro obtido é admissível ou não. E para saber se o erro é aceitável, deve-se considerar o critério, para o valor de RMSE, de até 10% da diferença entre as cargas hidráulicas do sistema (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015; IRITANI, 1998).

Durante o processo de calibração, alguns parâmetros têm mais impactos que outros, e a avaliação da sensibilidade auxilia a perceber quais parâmetros têm maiores efeitos nos resultados, e essa avaliação de sensibilidade deve ser realizada para cada parâmetro separadamente, e para comparação, deve-se atentar para a diferença de unidades entre os parâmetros avaliados (FITTS, 2015). Segundo Hill (1998), uma das maneiras de avaliar a sensibilidade de um parâmetro é calcular a razão  $\Delta z/\Delta b_j$ , onde  $\Delta z$  é a variação da predição simulada, e  $\Delta b_j$  é a variação do j-

éssimo parâmetro estimado; sendo essa razão um indicador da relevância do parâmetro para a simulação.

Fitts (2015) comenta sobre as diferenças de unidades nas avaliações de sensibilidade para parâmetros variados; e de acordo com Hill (1998), os valores de sensibilidade de parâmetros podem ser dimensionados para posteriores comparações entre si de acordo com a equação abaixo:

$$pss_j = (\Delta z / \Delta b_j)(b_j / 100)(100 / z) \quad (20)$$

Como mencionado, os alvos de calibração foram as cargas hidráulicas, mais precisamente, para 25 locais com valores de carga hidráulica para aproximadamente 1 dia após o início do bombeamento (considerando o N.D. presente no banco de dados). O MODFLOW possui um pacote denominado como Observações de Cargas Hidráulicas (“*Hydraulic-Head Observations*” – HOB) que pode comparar as cargas em qualquer lugar, no espaço e no tempo; mesmo que sejam necessárias interpolações internas para a especificação de cargas simuladas para pontos onde há cargas observadas, pois o *software* calculará as cargas hidráulicas para os centros das células, e raramente o ponto de observação coincidirá com esta localização (HILL et al., 2000). Logo, essa ferramenta foi utilizada para a comparação entre as cargas simuladas e as consideradas como observadas.

#### 5.6.8 Traçado de Partículas

A primeira versão do MODPATH foi liberada em 1989 (POLLOCK, 1989). O MODPATH é um *software* de pós-processamento para o rastreamento de partículas, o qual deve ser utilizado após o uso do MODFLOW, pois uma vez existindo o fluxo simulado, seja ele em condição estacionária ou transiente, o MODPATH usará essa saída do MODFLOW para prever o caminho de partículas imaginárias (POLLOCK, 2012).

De acordo com Pollock (2012) o MODPATH permite o traçado de partículas no sentido contrário (“*backward tracking*”), ou seja, as partículas são direcionadas para a montante, e para isso, o algoritmo é rodado ao inverso, isto é, considerando os componentes de velocidade como negativos, e assim, executando os comandos

como se fosse um traçado de partículas à jusante (“*forward tracking*”). A equação utilizada pelo MODPATH, conforme Pollock (2012), é:

$$\frac{\partial}{\partial x} (nv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nv_y) + \frac{\partial}{\partial z} (nv_z) = W \quad (21)$$

Onde  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  correspondem aos componentes das velocidades lineares médias da água subterrânea e  $n$  é a porosidade.

Zonas de captura ou de transporte de poços são frequentemente obtidas a partir do traçado inverso de partículas (“*backward tracking*”), considerando que as partículas traçadas são inseridas diretamente nos poços de interesse, sendo o traçado finalizado de acordo com um tempo estipulado, ou quando a zona de captura for obtida (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Renken et al. (2001), para a definição de zonas de transporte e de captura, também realizaram o traçado de partículas inverso considerando as partículas a partir dos poços de abastecimento de seu interesse.

Neste trabalho, o MODPATH permitiu o traçado de zonas de captura; contudo, são almejadas as zonas de transporte. Logo, a partir da interface ModelMuse (WINSTON, 2009) para o MODFLOW, que permite, em sua ferramenta de visualização de dados, a observação do caminhamento de partículas por meio de cores categorizadas conforme limites de tempo desejados, foi possível traçar as zonas de transporte requeridas neste trabalho. Assim, as áreas foram traçadas na interface ModelMuse, seus vértices copiados, e inseridos como pontos no *software* ArcGIS, para a posterior vetorização dos polígonos, que foi seguida da suavização dos mesmos por meio da ferramenta de edição “*Smooth*” desse último *software* mencionado.

Conforme Anderson, Woessner e Hunt (2015) o resultado do traçado de partículas de maneira inversa pode ser sensível quando a partícula é colocada no poço; porém, os autores também recomendam que o traçado inverso seja verificado a partir do traçado em direção à jusante (“*forward tracking*”).

## 5.7 Comparação entre os Métodos

Para falar sobre as semelhanças e diferenças entre os métodos, e também para auxiliar na tomada de decisão, muitos autores apresentaram a comparação entre resultados obtidos por diferentes métodos de delimitação de PPPs, como Hirata (1994), Miller, Chudek e Babcock (2003), Expósito et al. (2010) e Carvalho e Hirata (2012).

Uma maneira de comparar os resultados obtidos por diferentes métodos de delimitação de PPPs entre si é escolher um dos métodos como o padrão e comparar as áreas de proteção, calculando o percentual de área com proteção mútua, o percentual de área sem a devida proteção e o percentual de área com proteção desnecessária (errônea) em relação ao método padrão (USEPA, 1987).

A figura 28 auxilia o entendimento do método de comparação utilizado, e as equações para os cálculos e as nomenclaturas dos percentuais previamente mencionados são (USEPA, 1987):

$$\text{Percentual de proteção mútua} = (A_m/A_{\text{padrão}}) \times 100\% \quad (20)$$

$$\text{Percentual sem proteção} = (A_u/A_{\text{padrão}}) \times 100\% \quad (21)$$

$$\text{Percentual de proteção errônea} = (A_e - A_m)/(A_{\text{padrão}}) \times 100\% \quad (22)$$

onde  $A_{\text{padrão}}$  é a área obtida a partir do método escolhido como padrão para a comparação,  $A_m$  é a área que ambos os métodos (escolhido como padrão e o avaliado) recobrem,  $A_u$  é a área que apenas o método padrão recobre e  $A_e$  é a área total que o método avaliado recobre.

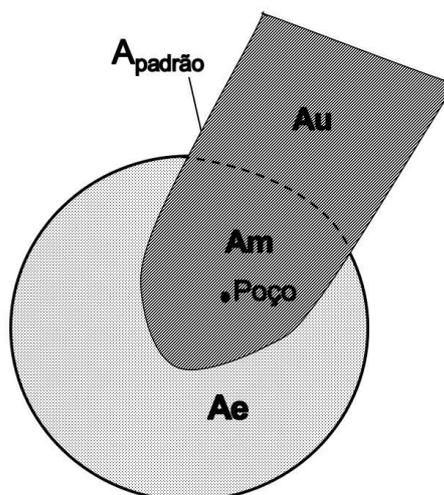


Figura 28 – Método para comparação entre PPPs definidos por técnicas distintas (USEPA, 1987).

Assim, todas as áreas foram definidas no *software ArcGIS*, sendo essas calculadas por meio da calculadora de geometria presente nesse *software*, e as ferramentas “*clip*” e “*erase*” foram utilizadas para a obtenção das áreas  $A_m$  e  $A_u$ , respectivamente, considerando-se as áreas obtidas por meio da modelagem numérica como as zonas padrões, como mencionado no início da seção 5.6.

Para indicar um método sobre o outro, foram consideradas as etapas para a definição de PPPs por cada um dos métodos, os resultados que cada um gerou, além da comparação entre eles. Essas informações serão abordadas ao decorrer das discussões.

Expósito et al. (2010), por exemplo, testando três métodos analíticos, mais o método de RFC, e utilizando um método de comparação entre os resultados, avaliou que os três métodos analíticos aplicados resultaram em PPPs semelhantes; porém, que um deles gerou um proteção intermediária entre os outros dois, sendo esse indicado pelos autores como o método mais adequado. Assim, isso mostra que a comparação entre métodos pode auxiliar na tomada de decisão.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo traz os resultados obtidos a partir da aplicação dos métodos de raio fixo calculado, de Wyssling (1979) e de modelagem numérica, assim como suas peculiaridades, e apresenta também as discussões desses resultados. Por fim, são apresentados os resultados da comparação entre os métodos, com o intuito de indicar o uso de um método em relação aos demais, o que é apresentado no final do capítulo.

### **6.1 Resultados para o Método de Raio Fixo Calculado**

Como discorrido anteriormente, foram realizados cálculos de RFC considerando a espessura saturada presente no banco de dados (BD) utilizado e também considerando apenas a seção filtrante, em busca de um melhor resultado de raio fixo calculado. Assim, foram calculados 365 raios tomando a espessura saturada da base de dados (MMA, 2015), entre esses 142 correspondentes a poços registrados como operantes e 223 como não operantes; e 42 raios considerando, para fins de cálculo, a seção filtrante como a espessura saturada, dos quais estão inclusos nos 142 poços cadastrados como operantes e também trabalhados com a espessura saturada total. A figura 29 mostra a distribuição dos poços trabalhados no Aquífero Caiuá.

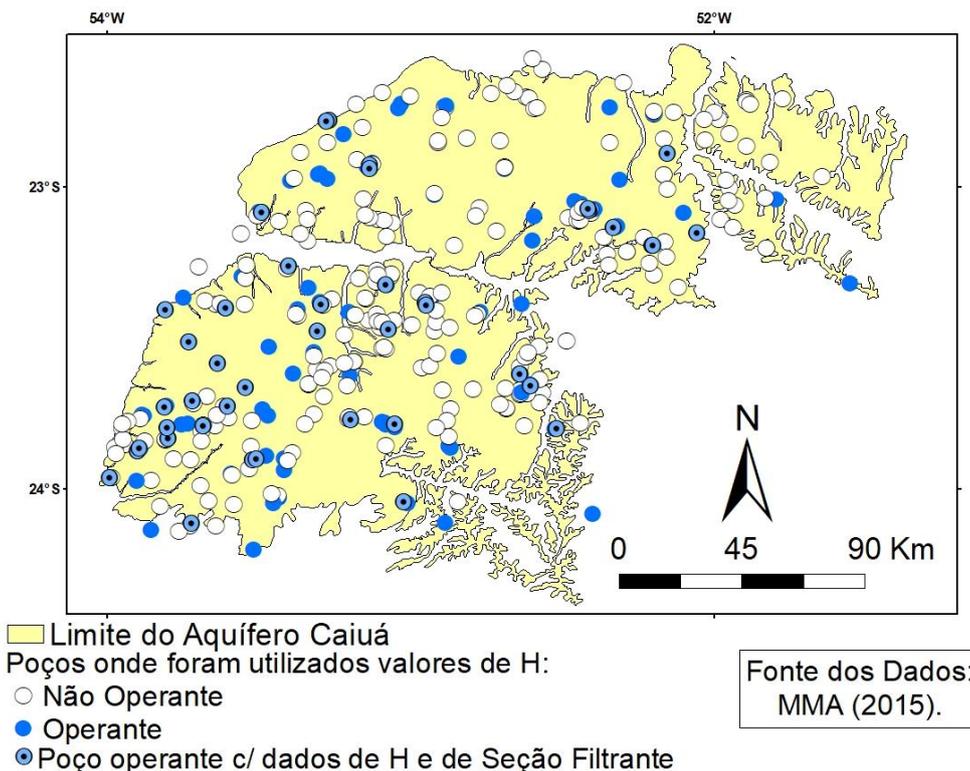


Figura 29 – Distribuição dos poços trabalhados no Aquífero Caiuá, no sistema de referência SIRGAS 2000. Fonte de dados: MMA (2015).

Para o tempo de trânsito de 50 dias, os raios calculados variaram entre 4,63 e 53,28 metros, isso para os poços de código de identificação 1228 e 1486, respectivamente, sendo ambos cadastrados como operantes. O poço 1228 possui uma vazão registrada de 0,4 m<sup>3</sup>/h e sua espessura saturada apresentada no BD é de 47,5 metros, enquanto que o poço 1486 apresenta uma vazão registrada de 100 m<sup>3</sup>/h e uma espessura saturada de 89,72 metros, valores que explicam esses resultados se avaliados juntamente com a equação volumétrica (USEPA, 1987) para RFC. Percebeu-se que entre o intervalo de raios calculados para 50 dias de 4,63 e 9 metros estão 12 poços dos 365 trabalhados, ocorrendo mais valores de raios obtidos para 50 dias entre o intervalo de 9 a 24 metros, como pode ser observado na Figura 30.

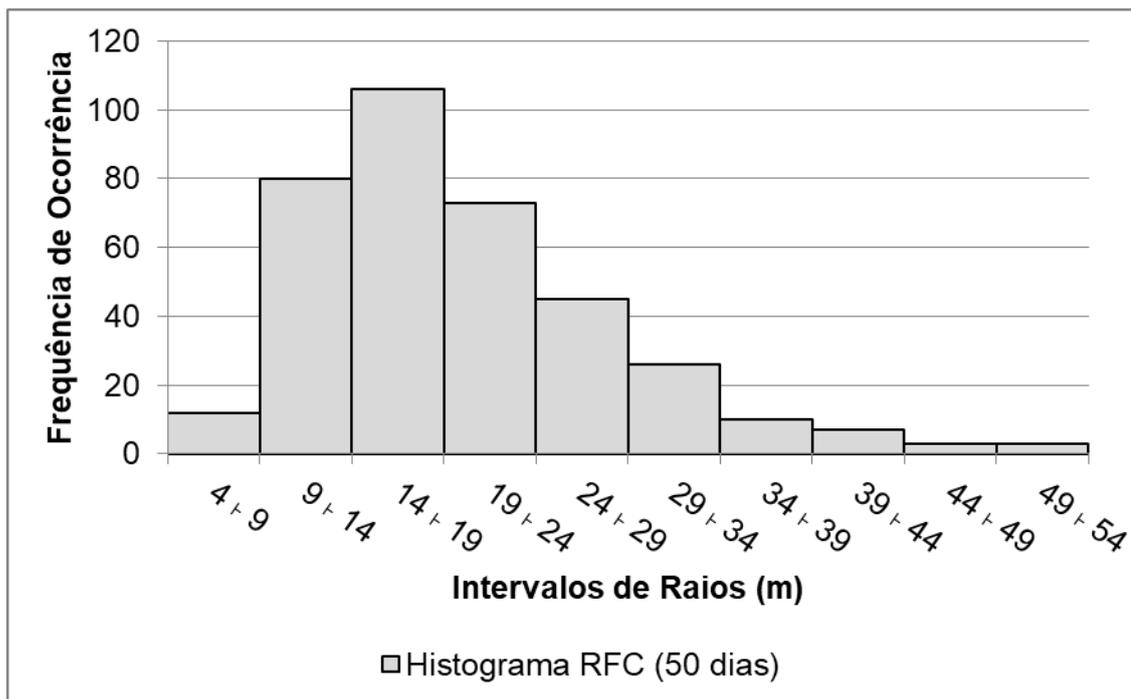


Figura 30 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 50 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015).

A média avaliada para os raios calculados para 50 dias foi de 19,91 metros, enquanto que a mediana, uma medida mais resistente do que a média, conforme Morettin e Bussab (2010), foi de 18,29 metros. Lembra-se que 18 dos 365 raios foram obtidos a partir de valores de porosidade efetiva distinta de 0,15 (ver seção 5.4). Quando considerando a porosidade efetiva de 15% para todos os 365 poços, os valores médio e mediano encontrados para os raios de 50 dias de trânsito foram de 20 e 18,34 metros, respectivamente, valores esses muito próximos aos valores resultantes quando usadas diferentes porosidades, uma vez que apenas uma pequena porção das observações possuiu valor de  $\eta_e$  distinto de 15%. Logo, para os 18 poços continuou-se utilizando os valores de  $\eta_e$  presentes em Celligoi (2000), na tentativa de um resultado mais condizente com os dados presentes na bibliografia.

Ao observar a condição exposta por Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), percebeu-se que nenhum dos raios obtidos a partir do método do RFC para o tempo de trânsito de 50 dias, e com a utilização da espessura saturada registrada no BD, foi adequado, sendo todos os raios menores que o dobro das respectivas espessuras saturadas.

Para o tempo de trânsito de 500 dias, os raios avaliados variaram entre 14,64 e 168,47 metros, também para os poços 1228 e 1486, respectivamente, uma vez que apenas foi alterado o tempo de trânsito utilizado na equação 4. Avaliando que o

tempo de 500 dias é 10 vezes maior que o valor de 50 dias, foi logicamente esperado que os raios fossem  $\sqrt{10}$  vezes maiores que os raios calculados para 50 dias, isso para os mesmos poços. A média aritmética para os 365 raios calculados foi de 62,95 metros e a mediana foi de 57,84 metros. Avaliou-se também que cerca de 69,3% dos raios calculados para 500 dias, ou seja 253 de 365 raios, estão entre 26 e 74 metros, com 110 valores ocorrendo no intervalo de raio entre 42 e 58 metros (Figura 31).

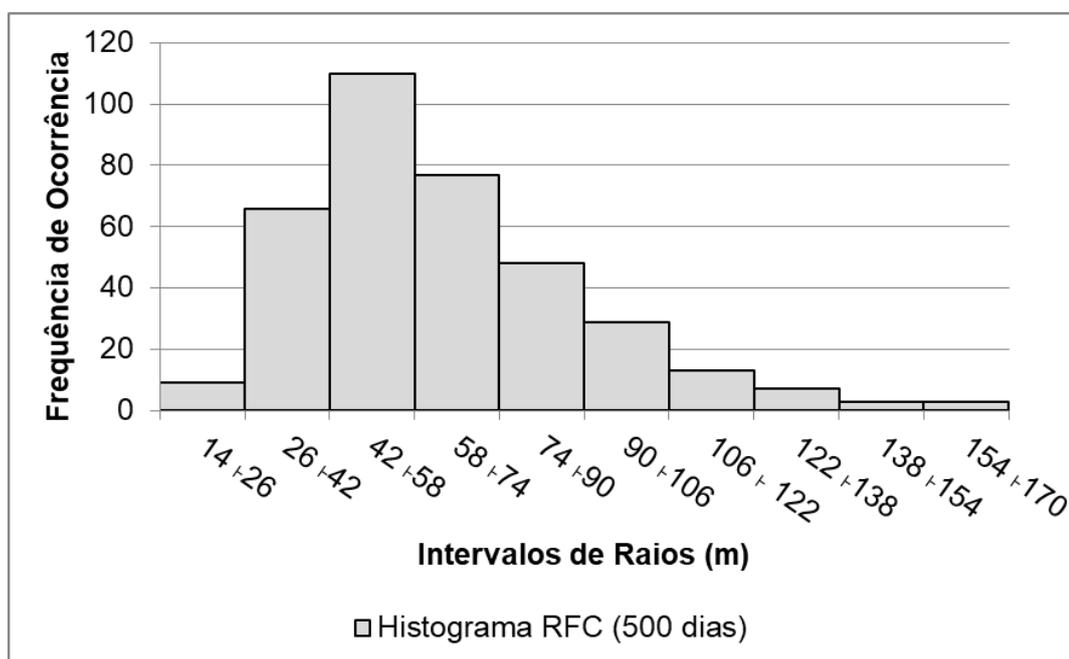


Figura 31 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 500 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015).

Porém, apenas 19 desses 365 raios calculados para 500 dias de trânsito são maiores que o dobro de suas respectivas espessuras saturadas, o que pode indicar um resultado subestimado para a grande maioria dos raios calculados, conforme a ideia de Kraemer, Haitjema e Kelson (2007).

Já para o tempo de 5 anos, o menor raio avaliado foi de 27,98 metros e o maior, de 321,86 metros, também para os poços 1228 e 1486, respectivamente. O valor médio avaliado para os 365 raios foi de 120,26 metros e a mediana, de 110,50 metros. E o maior número de dados, com um total de 260 ocorrências, está entre as classes que variam entre 57 e 147 metros (Figura 32), e observaram-se 95 valores de raios, calculados para 5 anos, maiores que o dobro da espessura saturada.

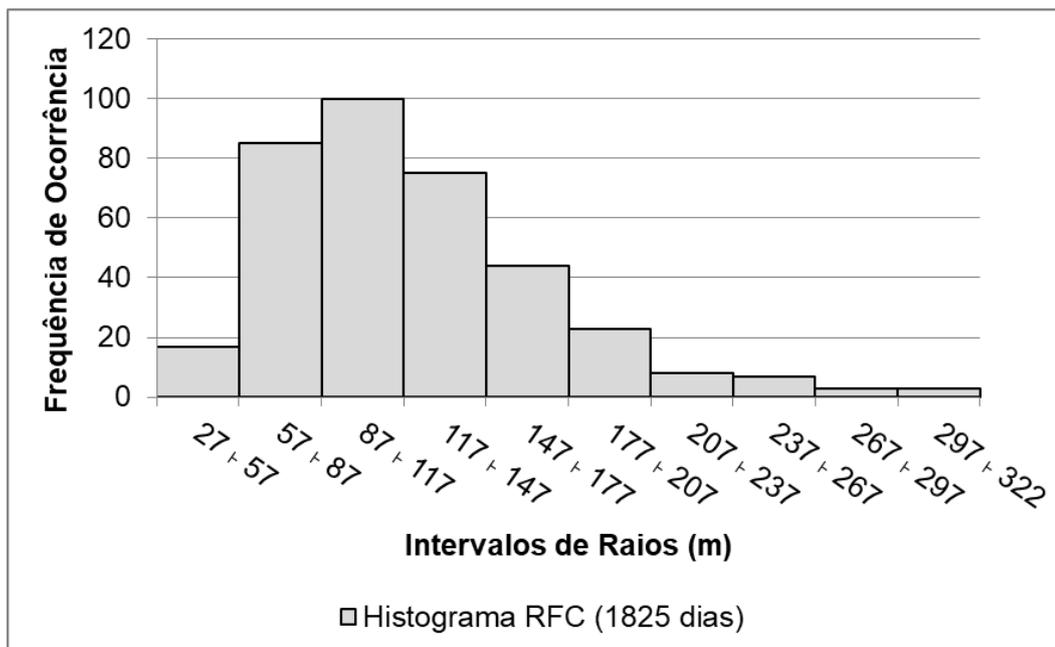


Figura 32 - Histograma representando os resultados de raios calculados para o tempo de 1825 dias, com o uso das espessuras saturadas expressas em MMA (2015).

Devido à mudança apenas do tempo de trânsito nos cálculos, foi perceptível o mesmo padrão nos histogramas referentes aos três tempos distintos, assim como o mesmo coeficiente de correlação entre vazão e RFC, com um valor de 0,8442. Segundo Morettin e Bussab (2010), o coeficiente de correlação quantifica a associação entre duas variáveis, variando seu valor entre -1 e 1, indicando um valor próximo de 1 uma boa correlação. Essa boa correlação entre vazão e raio fixo calculado pode ser vista na própria equação 4. Para o Sistema Aquífero Bauru, no Estado de São Paulo, Iritani e Ezaki (2012), sugerem um raio, para o Perímetro de Alerta, de 30 metros, para vazões até 20 m<sup>3</sup>/h e de 60 metros para vazões acima de 20 m<sup>3</sup>/h, assim, realizou-se o cálculo da média dos RFCs encontrados neste trabalho para 50 dias e para poços com vazões registradas até 20 m<sup>3</sup>/h e em seguida, para os poços com vazões acima de 20 m<sup>3</sup>/h, e foram encontrados valores médios de raios de aproximadamente 16,03 e 29,50 metros, respectivamente; valores próximos à metade dos indicados por Iritani e Ezaki (2012). E Carvalho e Hirata (2012) avaliaram para o Aquífero Caiuá, também no Estado de São Paulo, um valor de raio, a partir do método de RFC e do tempo de 50 dias, de aproximadamente 50 metros. Logo, essas comparações, em conjunto com a avaliação dos tamanhos dos raios definidos aqui e suas respectivas espessuras saturadas, indicaram uma subestimação elevada dos perímetros de proteção a partir do método do RFC; logo,

em busca de melhores resultados, a definição de PPPs a partir do uso de seções filtrantes foi realizada, como pode ser observado na seção que segue.

#### 6.1.1 Raio Fixo Calculado com Valores de Seção Filtrante

Como já explicado anteriormente (seção 5.4), decidiu-se calcular raios fixos usando a seção filtrante dos poços ao invés de sua espessura saturada registrada na base de dados. No entanto, conforme disponibilidade e avaliação dos dados, trabalhou-se apenas com 42 poços com dados de espessura de filtros. A tabela 6 apresenta os valores de vazão desses poços, os valores de seção filtrante, de porosidade efetiva e também os devidos raios calculados a partir dessas variáveis.

Tabela 6 – Extensões radiais calculadas por meio do método do RFC, utilizando valores de seção filtrante.

Identificação dos Poços SIA	Seção Filtrante Total (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	$\eta_e$	RFC – 50 dias (m)	RFC – 500 dias (m)	RFC - 1825 dias (m)
174	12	19,4	0,15	64	203	388
176	15	36	0,15	78	247	472
182	20	45	0,168	72	226	432
217	46	50	0,15	53	166	318
244	24	29	0,15	55	175	335
246	26	13	0,15	36	113	216
249	16	15	0,15	49	155	295
257	24	10	0,15	33	103	197
262	40	15	0,15	31	98	187
263	25	12	0,15	35	111	211
395	16	21,5	0,15	59	185	353
403	29	18	0,15	40	126	240
424	32	33	0,15	51	162	310
430	22	29	0,15	58	183	350
436	15	20	0,15	58	184	352
444	23	30	0,15	58	182	348
502	26	36,5	0,15	60	189	361
558	34	28	0,15	46	145	277
567	20	40	0,15	71	226	431
613	20	23,4	0,15	55	173	330
639	24	83,75	0,15	94	298	570
640	4	80	0,15	226	714	1363
682	13	15	0,15	54	171	327
808	29	28	0,15	50	157	300
970	54	60	0,15	53	168	321
1044	30	24	0,15	45	143	273
1061	32	25	0,15	45	141	269
1122	20	17	0,15	47	147	281
1215	26	13	0,15	36	113	216
1299	24	1	0,15	10	33	62
1411	40	3,25	0,15	14	45	87
1500	38	20	0,168	35	109	209
1693	59	24	0,15	32	102	194
1784	122	68	0,15	38	119	228
1800	24	58	0,15	78	248	474
1969	18	22	0,15	56	176	337
2065	20	10,03	0,15	36	113	216
3474	14	12	0,15	47	148	282
3731	40	24	0,15	39	124	236
4314	43	45	0,15	52	163	312
4805	24	10	0,15	33	103	197
5005	10	8	0,15	45	143	273

Fonte dos dados: 1) Identificação dos poços e vazão: MMA (2015); 2) seção filtrante: SANEPAR (2018); 3) porosidade efetiva de 0,15: baseada em AGUASPARANÁ (2010); e porosidade efetiva de 0,168 para poços de Nova Esperança/PR: Celligoi (2000).

O poço de identificação 640 possui uma vazão cadastrada de 80 m<sup>3</sup>/h, enquanto que a sua seção filtrante registrada é de apenas 4 metros, isto,

logicamente, resultou em um alto valor de raio de proteção. Para um raio de 50 dias, por exemplo, o valor encontrado para esse poço foi de 225,68 metros, enquanto que o segundo máximo valor encontrado foi de 94,27 metros, para o poço 639. Assim, por apresentar valores de raios muito elevados em relação aos demais poços (Figura 33), o poço 640 e seus resultados não foram inseridos nas avaliações seguintes dessa seção.

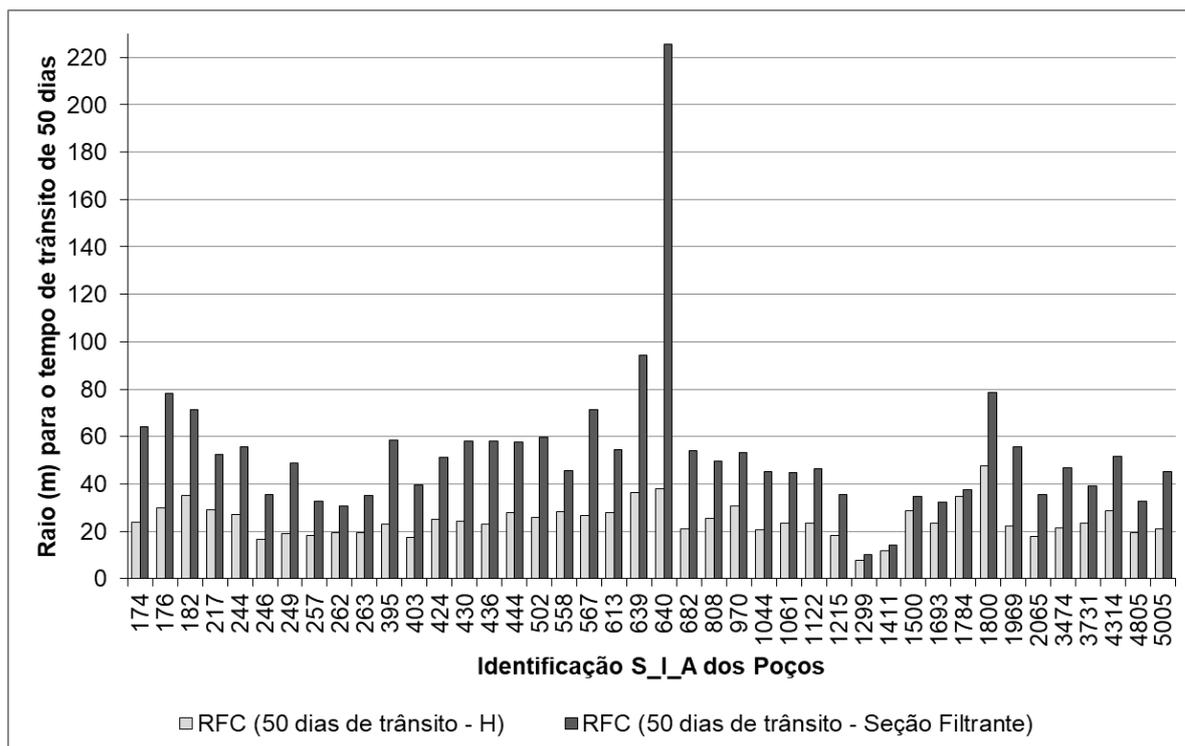


Figura 33 – Comparação entre os valores de raio definidos, para o tempo de 50 dias, para 42 poços do aquífero Caiuá, a partir do uso da espessura saturada registrada em MMA (2015) e da seção filtrante registrada em SANEPAR (2018).

Os valores encontrados para os raios de 50 dias com o uso das seções filtrantes, com exceção do poço 640, foram entre 10,30 e 94,27 metros, para os poços 1299 e 639, respectivamente. E observando o gráfico da Figura 33, foi perceptível um mínimo valor de raio também para o poço 1299 quando utilizada a sua espessura saturada e comparados apenas os 42 poços avaliados nesta seção. No entanto, o poço 639, quando teve sua espessura saturada utilizada, não apresentou o valor de raio máximo em relação aos demais raios calculados da mesma maneira; e isto pode ser explicado novamente pela equação 4 e suas variáveis, no caso, principalmente devido à elevada razão entre sua alta vazão e sua seção filtrante.

Os valores de raio calculados para 500 dias foram entre 32,57 e 298,10 metros, também para os poços 1299 e 639, respectivamente. Já os valores de raios calculados para 5 anos ficaram entre 62,23 e 569,51 metros, também para os mesmos respectivos poços.

As medianas para os raios de 50, 500 e 1825 dias foram, respectivamente, 48,86 metros, 154,51 e 295,19 metros. E a comparação entre as medianas dos raios para os mesmos 41 poços (retirando os valores do poço 640) utilizando a espessura saturada e a seção filtrante, estão na tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre as medianas dos raios fixos calculados obtidos a partir do uso dos valores de espessura saturada total (H) e de seção filtrante.

<b>Mediana (Cálculo com H)</b>		<b>Mediana (Cálculo com a Seção Filtrante)</b>	
Raio de 50 dias (m)	<b>23,52</b>	Raio de 50 dias (m)	<b>48,86</b>
Raio de 500 dias (m)	<b>74,37</b>	Raio de 500 dias (m)	<b>154,51</b>
Raio de 1825 dias (m)	<b>142,08</b>	Raio de 1825 dias (m)	<b>295,19</b>

A tabela acima mostra que o raio, quando considerada a seção filtrante como espessura de cálculo, tendeu a ser 2,077 vezes maior que quando a espessura saturada presente no BD foi considerada no cálculo. O valor de 2,077 se trata da razão entre as medianas dos raios considerando as diferentes espessuras, e isso ocorre repetidamente para os diferentes tempos de trânsito. O que também pode ser explicado pela equação 4 (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007; USEPA, 1987; USEPA, 1994), pois quando se divide os raios calculados obtidos por diferentes espessuras e para os mesmos tempos, a razão na verdade se resume a:

$$\frac{RFC_{SF}}{RFC_H} = \sqrt{\frac{Qt}{\pi(\text{Seção Filtrante})\eta_e}} \times \sqrt{\frac{\pi H \eta_e}{Qt}} = \sqrt{\frac{H}{\text{Seção Filtrante}}}$$

E ao realizar esta divisão expressa acima, para os poços presentes na tabela 6, com exceção do poço 640, percebeu-se uma mediana de 1,99. Assim, realizando-se uma média entre os valores 2,077 e 1,99, obteve-se que o raio obtido a partir da seção filtrante (SF) tende a ser o dobro do obtido com o uso da espessura saturada presente no banco de dados.

E ao avaliar a condição de adequabilidade de Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), dos 42 poços trabalhados usando-se seções filtrantes, avaliou-se que nenhum raio calculado para 50 dias é maior que o dobro da espessura saturada presente no BD; porém, 9 dos raios referentes a 500 dias e 33 referentes a 5 anos satisfazem essa condição. Enquanto que comparando os mesmos poços, quando usadas as espessuras saturadas nos cálculos, apenas 1 raio de 500 dias e 5 raios para 5 anos são maiores que o dobro de suas espessuras. Isso indica que quando se conhece as seções filtrantes dos poços do Aquífero Caiuá, no Paraná, é adequado o uso dessas nos cálculos de RFC.

Essas avaliações acima ajudaram a supor que quando utilizados os valores de espessura saturada no cálculo de RFC, que no BD para os poços operantes e não operantes do Caiuá possuem uma média de 83,45 metros e desvio padrão de 41,38, seja considerada a multiplicação desses raios por 2, com a finalidade de um resultado mais conservador.

Para verificar essa suposição, também foram comparados os valores indicados por Iritani e Ezaki (2012) e Carvalho e Hirata (2012), para o Estado de São Paulo, aos resultados obtidos para RFC neste trabalho (Tabela 8).

Com base nos resultados e discussões desta seção, resolveu-se inferir que quando utilizada a espessura saturada presente no banco de dados (MMA, 2015) para cálculos de raio fixo calculado, no Aquífero Caiuá, seja avaliada a possibilidade de multiplicar o valor de raio resultante por 2. Porém, quando existir dados de seção filtrante, esses devem ser utilizados nos cálculos de RFC, principalmente em poços de baixa a moderada vazão. Porém, deve-se lembrar que foi utilizada basicamente uma única porosidade efetiva para todo o aquífero, referente a 0,15. Iritani e Ezaki (2012) utilizaram o valor de 0,12 em sua proposta de acordo com a bibliografia consultada por elas, e Carvalho e Hirata (2012) utilizaram o valor de 0,15, valores semelhantes ao empregado neste trabalho.

Tabela 8 – Comparações entre os raios obtidos em Iritani e Ezaki (2012), Carvalho e Hirata (2012) e neste trabalho.

<b>Iritani e Ezaki (2012)</b>	
RFC para 50 dias para o Aquífero Bauru (SP) – vazões até 20 m <sup>3</sup> /h (m)	30
RFC para 50 dias para o Aquífero Bauru (SP) – vazões acima de 20 m <sup>3</sup> /h (m)	60
<b>Carvalho e Hirata (2012)</b>	
RFC para 50 dias para o Aquífero Caiuá (SP)	50,46
RFC para 1 ano para o Aquífero Caiuá (SP)	135,87
RFC para 5 anos para o Aquífero Caiuá (SP)	304,87
<b>Neste Trabalho</b>	
<b>Utilizando Espessura Saturada</b>	
Mediana de RFCs para 365 poços (operantes e não operantes) para 50 dias	18,29
Mediana de RFCs para 365 poços (operantes e não operantes) para 500 dias	57,84
Mediana de RFCs para 365 poços (operantes e não operantes) para 5 anos	110,50
Mediana de RFC para 50 dias para poços com vazões até 20 m <sup>3</sup> /h	15,83
Mediana de RFC para 50 dias para poços com vazões acima 20 m <sup>3</sup> /h	28,00
<b>Utilizando Seção Filtrante</b>	
Mediana de RFCs para 41 poços para 50 dias	48,86
Mediana de RFCs para 41 poços para 500 dias	154,51
Mediana de RFCs para 41 poços para 5 anos	295,19
Mediana de RFC para 50 dias obtida para 18 poços com vazões até 20 m <sup>3</sup> /h	35,71
Mediana de RFC para 50 dias obtida para 23 poços com vazões acima de 20 m <sup>3</sup> /h	54,58

### 6.1.2 Ilustração dos Resultados de RFC

Para a representação final dos raios, os 365 valores obtidos utilizando-se a espessura saturada foram multiplicados por 2, de acordo com as considerações da seção acima. Então, foi realizada a interpolação desses valores de acordo com o explícito no final da seção 5.4, no *software* ArcGIS, e o resultado disso pode ser observado na figura 34. As interpolações para os três tempos de trânsito resultaram em imagens idênticas, distinguindo-se apenas as legendas.

A explicação para o mesmo resultado visual expresso na figura 34 para os 3 diferentes tempos de trânsito pode novamente ser encontrada na equação

volumétrica de USEPA (1987). Uma vez que o único parâmetro alterado nas três situações foi o tempo de trânsito; assim, todos os valores calculados, para os 365 poços, tenderam a crescer com a mesma proporção, a cada situação testada. Assim, quando se deseja avaliar um resultado para 50 dias, a interpretação deve ser feita de acordo com a legenda específica, por exemplo.

A correlação linear entre os valores reais (calculados) e os interpolados para os raios fixos dos mesmos poços, calculada no *Excel*, após a extração dos valores da imagem interpolada *raster* pela ferramenta *Extract Mullti Values to Points* (Extração de Valores Múltiplos para Pontos), do ArcGIS, foi de 0,99826, para os três tempos utilizados. Logo, essa boa correlação pode corroborar com a indicação de metodologia feita por Hernandez (2019, no prelo).

A figura 34 apenas mostra a distribuição espacial dos valores obtidos para RFC. Reforça-se que devido aos extensos intervalos dos valores de raios apresentados nela, para futuros usos dos valores alcançados neste trabalho, recomenda-se a avaliação dos resultados que são apresentados no final deste trabalho, obtidos após a comparação entre os métodos testados e demais discussões.

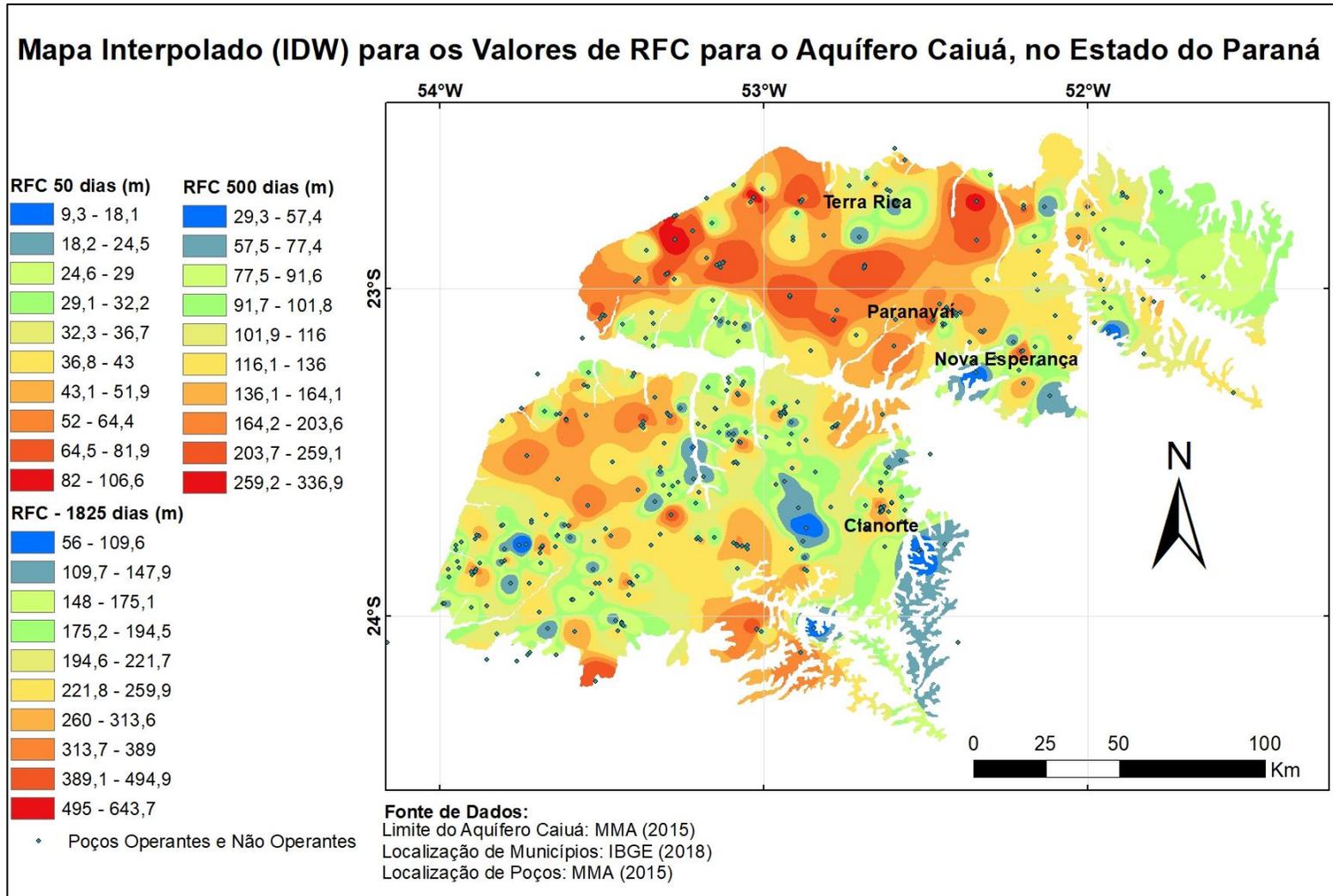


Figura 34 – Interpolação dos valores de raios obtidos por meio do RFC para o aquífero Caiuá, no Paraná, multiplicados por 2. É importante ressaltar que esses valores representam apenas a distribuição espacial simplificada dos raios fixos calculados para 365 poços do aquífero, **não devendo** esses valores serem aplicados diretamente no aquífero, devido aos largos intervalos associados a cada cor nas legendas, e devido às demais discussões e comparações que serão realizadas a seguir.

## 6.2 Resultados para o Método de Wyssling (1979)

Como discorrido acima, para o cálculo do método de Wyssling (1979), anterior à etapa de cálculos no *Excel*, foram utilizadas duas metodologias para avaliar os valores de gradiente hidráulico necessários, primeiramente, foi utilizada a ferramenta Darcy Flow do ArcGIS; e em seguida, foram traçadas linhas perpendiculares às equipotenciais com início em cada poço de interesse, utilizando três valores de equipotenciais distintos de cada vez, para comparação. Os resultados da aplicação dessas metodologias estão descritos a seguir.

### 6.2.1 Utilizando a Ferramenta Darcy Flow

Para a aplicação dessa metodologia específica foram utilizados 399 poços presentes no banco de dados; porém, 14 deles não apresentaram resultados para a direção de fluxo ou mesmo para a velocidade do fluxo, possivelmente devido às informações de entrada. Com o restante, conseguiu-se calcular gradientes hidráulicos referentes às zonas de cada poço, obtendo-se um valor mínimo de  $3,4 \times 10^{-11}$ , um valor máximo de 0,23, e um valor mediano de  $8,22 \times 10^{-5}$ , valores pequenos. Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), por exemplo, consideram um gradiente hidráulico de 0,00001 como muito pequeno, e Varnier e Hirata (2000), consideram gradientes hidráulicos entre 0,02 e 0,07 como baixos.

Em relação aos parâmetros de Wyssling (1979), os valores de B encontrados, em sua maioria, foram muito elevados, com um valor médio de 38.673.491 m; assim como b, com um valor médio de 19.336.745 m, valores claramente impossíveis, e isso pode ser explicado devido aos baixos gradientes hidráulicos encontrados, uma vez que esse é o denominador na equação 5. Os valores obtidos para os parâmetros  $S_o$  e  $S_u$  foram cabíveis, até mesmo próximos aos valores de raio encontrados no método de raio fixo calculado. Porém, as diferenças entre  $S_o$  e  $S_u$ , para os mesmos tempos de trânsito, foram predominantemente pequenas, indicando uma mesma proteção à montante e à jusante (Tabela 9), e acredita-se que isto também tenha sido devido aos baixos gradientes hidráulicos avaliados para a área.

Tabela 9 – Avaliação dos resultados para os parâmetros de Wyssling encontrados com o auxílio da ferramenta Darcy Flow do *software* ArcGIS, para 385 dos poços registrados em MMA (2015) para o aquífero Caiuá. Valores em metros.

	B (m)	b (m)	X <sub>o</sub> (m)	50 dias		500 dias		1825 dias	
				So	Su	So	Su	So	Su
<b>Mínimo</b>	25,8	12,9	4,1	4,6	4,1	14,7	4,1	28,1	4,1
<b>Máximo</b>	1,3E <sup>10</sup>	6,4E <sup>9</sup>	2E <sup>9</sup>	54,5	53,3	372,6	168,4	1320	321,6
<b>Mediana</b>	7,3E <sup>4</sup>	3,7E <sup>4</sup>	1,2E <sup>4</sup>	19,29	17,6	63,7	52,4	124,7	98,2
<b>Mediana da diferença So - Su</b>									
	<b>50 dias</b>			<b>500 dias</b>			<b>1825 dias</b>		
	0,02			0,17			0,62		

Também com o intuito de avaliar esses resultados, foi empregada a equação 14, utilizando-se os parâmetros So, Su e  $v_0$  encontrados para cada tempo de trânsito trabalhado, sendo o valor de Su sempre inferior a  $x_0$ , como indicado por Wyssling (1979). Para o tempo desejado de 50 dias de proteção, a resolução da equação indicou um tempo máximo estimado de 131 dias, um tempo mínimo de 34,7 dias, um tempo médio de 37,9 dias, e uma mediana de 34,70 dias. Para o tempo desejado de 500 dias, o tempo máximo encontrado foi de 2278 dias, o tempo mínimo encontrado foi de 346,6 dias, o tempo médio foi de 454,8 dias, e o tempo encontrado para a mediana foi de 347,30 dias. Já para o tempo pretendido de 1825 dias, os parâmetros So, Su e  $v_0$  apontaram valores médio e mediano de 1931 e 1270,09 dias, respectivamente. Ou seja, valores medianos sempre abaixo daqueles requeridos como tempo de proteção.

Então, para certificação sobre os resultados do método de Wyssling (1979) no Aquífero Caiuá, a metodologia avaliando as curvas equipotenciais mais próximas de cada poço foi utilizada, conforme os passos indicados na seção 5.5.2.2.

### 6.2.2 Resultados Usando os Códigos Criados em Python para Obtenção do Sentido de Fluxo e do Gradiente Hidráulico

Como já mencionado, foram criadas equipotenciais espaçadas a cada 20, 40 e 60 metros e o gradiente hidráulico foi obtido para cada uma dessas considerações. Utilizando as curvas de potenciometria espaçadas a cada 20 metros, o gradiente hidráulico mediano observado foi de 0,007; e os resultados seguidos da solução da equação de verificação de Wyssling (1979), equação 14, indicaram tempos

medianos de proteção de 37,07, 426,38 e 1849,51 dias, quando eram esperados tempos de 50, 500 e 1825 dias, respectivamente. Os resultados gerados pelas equipotenciais espaçadas a cada 40 metros mostraram um gradiente hidráulico mediano de 0,0077, uma diferença entre  $S_o$  e  $S_u$  mediana, para o tempo de 50 dias, de 2 metros e um tempo mediano, obtido também pela equação 14 de 37,63 dias, quando se desejavam tempos de 50 dias. E para as curvas geradas para cargas hidráulicas espaçadas a cada 60 metros, obteve-se a mediana de 0,0087 para o parâmetro de gradiente hidráulico; e para o tempo de 50 dias, uma diferença mediana entre  $S_o$  e  $S_u$  de 2,14 metros e um tempo, obtido pela equação 14, de mediana de 37,51 dias. As observações comentadas acima foram todas semelhantes, e dessa forma, decidiu-se por progredir o trabalho considerando como resultados aqueles obtidos por meio das equipotenciais espaçadas a cada 20 metros, uma vez que são mais próximas umas das outras, e assim acredita-se que podem levar a resultados mais significativos do entorno imediato dos poços.

Assim, o uso das curvas equipotenciais com espaçamento altimétrico de 20 metros indicou valores de gradientes hidráulicos, no geral, mais elevados em relação aos obtidos por meio do uso da ferramenta Darcy Flow do ArcGIS. Nesse caso, foram utilizados 365 poços (registrados no banco de dados como operantes e não operantes) e o valor mínimo obtido para o gradiente hidráulico foi de  $4,3 \times 10^{-5}$ , o valor máximo foi de 1,56 e o valor mediano, como já dito, de 0,007; embora mais elevados do que os avaliados anteriormente, ainda baixos.

Ao comparar com os resultados utilizando a ferramenta Darcy Flow, percebeu-se também certa diminuição nos valores de  $B$  e respectivamente, de  $b$ ; além de maiores diferenças entre  $S_o$  e  $S_u$ . No entanto, ainda houve um alto número de poços que demonstraram valores impossíveis de aplicação (Figura 35). A tabela 10 ainda identifica um resumo dos valores obtidos para os parâmetros de Wyssling (1979) a partir do método expresso na seção 5.5.2.2.

Tabela 10 - Avaliação dos resultados para os parâmetros de Wyssling encontrados com o auxílio da metodologia expressa na seção 5.5.2.2 para 365 dos poços registrados em MMA (2015) para o aquífero Caiuá. Valores em metros.

	B (m)	b (m)	X <sub>o</sub> (m)	50 dias		500 dias		1825 dias	
				So (m)	Su (m)	So (m)	Su (m)	So (m)	Su (m)
<b>Mínimo</b>	2,78	1,39	0,44	5,2	0,44	18,1	0,44	39,3	0,44
<b>Máximo</b>	328630	164315	52303	439	50,7	4389	159	16019	299
<b>Mediana</b>	570,4	285,2	90,8	20,7	16,6	76,1	42,8	172	68,3

Mediana da diferença So - Su		
50 dias	500 dias	1825 dias
1,71	17,07	63,4

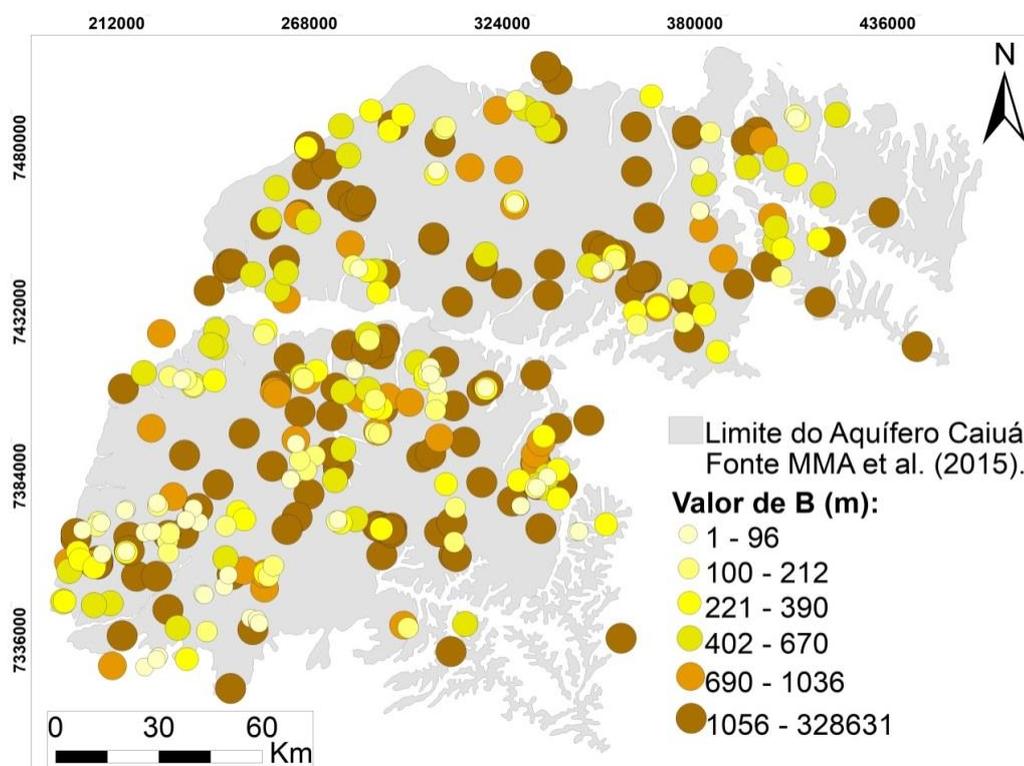


Figura 35 – Valores, em metros, do parâmetro B de Wyssling (1979) encontrados para os 365 poços do aquífero Caiuá trabalhados. Fonte do limite do aquífero Caiuá: MMA (2015).

### 6.2.2.1 Os scripts realmente funcionaram?

Uma amostra dos resultados que foram obtidos com o uso dos códigos em Python (explicados nas seções 5.5.2.2 a 5.5.3), foi verificada para avaliar a adequação de cada código utilizado. Contudo, esta seção expressa brevemente alguns dos resultados obtidos pela execução dos *scripts* criados em Python e

explicados anteriormente, com o intuito de comprovar para o leitor a eficiência dos mesmos.

A figura 36, por exemplo, ilustra o resultado da execução do *script* utilizado para criar linhas vetoriais que conectam cada poço trabalhado a uma linha equipotencial, de maneira perpendicular, a partir da ferramenta Near do ArcGIS.

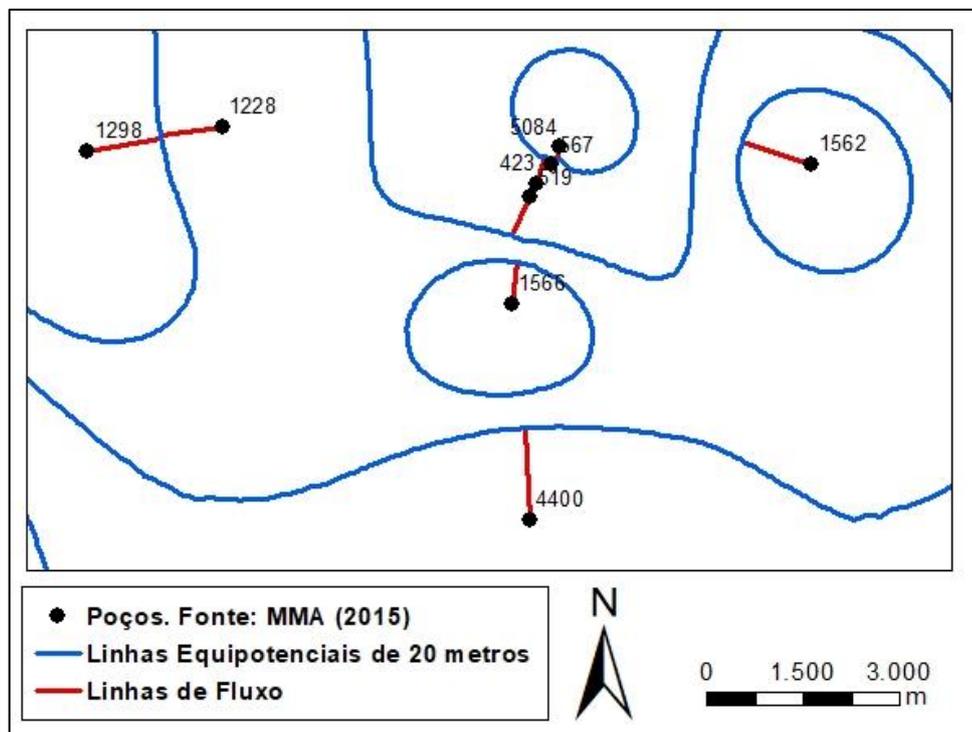


Figura 36 – Porção dos resultados do traçado de linhas de fluxo a partir do *script* em Python representado no Apêndice A.

Após as linhas traçadas e a obtenção das informações geradas a partir da ferramenta Near do ArcGIS, o gradiente hidráulico e as variáveis de Wyssling (1979) foram calculadas, utilizando-se também das variáveis presentes no banco de dados utilizado, de MMA (2015). Essas etapas estão melhores explicadas na seção 5.5.2.2. Porém, para a ilustração dos PPPs definidos a partir do método de Wyssling (1979), também foi necessário conhecer o sentido de fluxo da água subterrânea relacionado a cada poço, que conforme Heath (1982), dá-se no sentido de decréscimo da carga hidráulica. Assim, esse parâmetro foi conhecido com o auxílio do *script* presente no Apêndice C, sendo os ângulos obtidos a partir desse código, verificados, conforme as informações presentes no banco de dados, para no mínimo 15 poços trabalhados. Com essas informações, e o código do Apêndice D, além do uso de demais ferramentas do ArcGIS, como expressas na metodologia, foi possível

desenhar os PPPs definidos para o método de Wyssling (1979), de forma adequada (Figura 37).

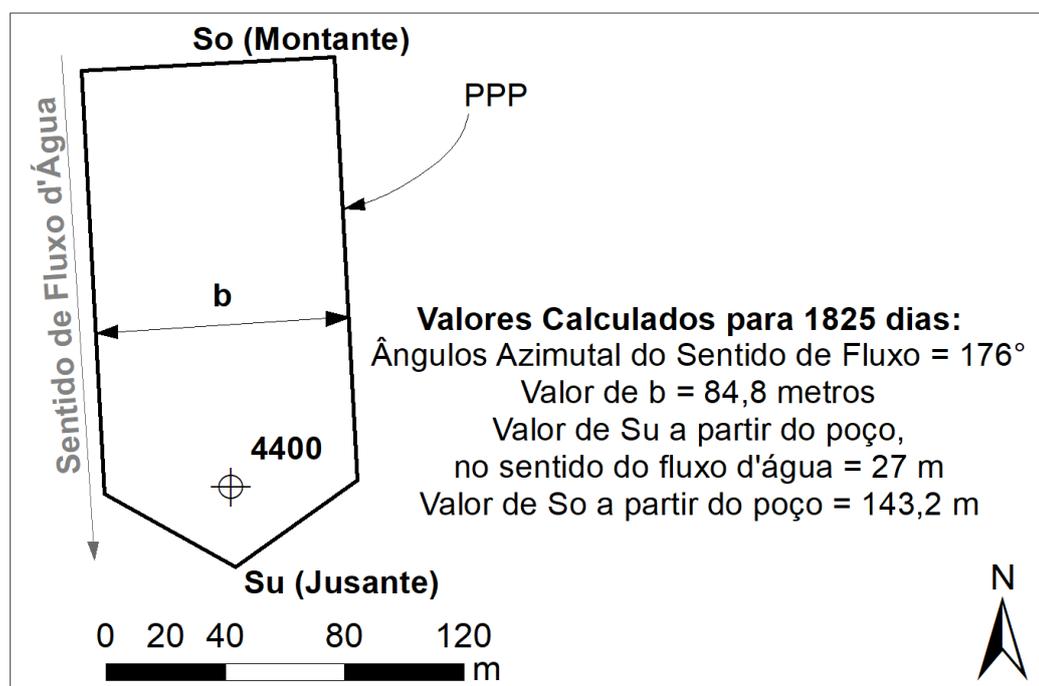


Figura 37 – Ilustração de um dos PPPs gerados, para o método de Wyssling, com o auxílio do código presente no Apêndice D.

### 6.2.3 Resultados, no geral, para o Método de Wyssling (1979)

Conforme as observações acima, o método de Wyssling, no geral, demonstrou uma aplicação não satisfatória para a maioria dos poços trabalhados para o aquífero Caiuá, sendo que muitos valores de  $B$  foram impraticáveis; assim como, muitas vezes, não atendeu os tempos desejados de acordo com a equação de verificação 14. Wyssling (1979) recomendou ajustar os valores de  $S_o$  e/ou  $S_u$  de acordo com a equação 14, mas devido à ocorrência de vários altos valores de  $B$  e, conseqüentemente de  $b$ , isso não foi realizado neste trabalho.

No geral, o cálculo do gradiente hidráulico a partir do uso de isolinhas de potenciometria gerou melhores resultados para os parâmetros de Wyssling em relação ao uso da ferramenta Darcy Flow, mas se salienta que esse foi um resultado apenas para o caso trabalhado, onde os dados utilizados para a construção de imagens *raster* foram, de certa forma, escassos para o tamanho da área trabalhada. Ainda, acredita-se que o tamanho das células pode influenciar nos resultados, uma

vez que a ferramenta Darcy Flow, de acordo com ESRI (2018a), calcula as informações de velocidade média e de direção de fluxo para o centro de cada célula. Porém, como os resultados, independentemente da maneira de obtenção do gradiente hidráulico, mostraram-se problemáticos, demais testes com menores tamanhos de célula não foram realizados.

### **6.3 Resultados da Modelagem Numérica**

#### **6.3.1 Processos de Calibração e de Avaliação de Sensibilidade**

Ao se executar o modelo com as condições iniciais para o modelo conceitual, discutidas anteriormente, as cargas simuladas foram muitíssimo elevadas, assim como o erro RMSE. Os valores dessas cargas hidráulicas simuladas preliminarmente e os valores das cargas consideradas como observadas, para o mesmo local e tempo, podem ser vistos na tabela abaixo (Tabela 11).

Tabela 11 – Valores de cargas hidráulicas simuladas para as condições iniciais de entrada e referentes ao tempo de 86.400 segundos, comparados aos valores considerados como observados.

HOB	Código SIA	Valor Observado (m)	Valor Simulado (m)	Resíduo (m)	HOB	Código SIA	Valor Observado (m)	Valor Simulado (m)	Resíduo (m)
1	263	326	5486,90	-5E+03	14	5084	269	3719,37	-3E+03
2	4491	351	5477,24	-5E+03	15	1562	352	2755,70	-2E+03
3	1494	310	4851,17	-5E+03	16	3536	356	3286,63	-3E+03
4	246	259	4885,63	-5E+03	17	247	349	3278,79	-3E+03
5	48	306	4388,02	-4E+03	18	2204	268	2340,31	-2E+03
6	2207	340	3247,22	-3E+03	19	2198	321	1075,59	-8E+02
7	244	364	2994,43	-3E+03	20	1923	352	5642,72	-5E+03
8	1411	350	5569,33	-5E+03	21	2166	363	5657,60	-5E+03
9	1298	413	5003,79	-5E+03	22	502	281	5508,33	-5E+03
10	1228	374	4686,98	-4E+03	23	1566	357	3593,38	-3E+03
11	519	329	3720,10	-3E+03	24	4400	368	3140,59	-3E+03
12	423	331	3722,07	-3E+03	25	2532	328	449,10	-1E+02
13	567	316	3708,42	-3E+03					

Valor observado: foi considerado como o nível dinâmico subtraído da cota altimétrica do poço, ambos dados presentes em MMA (2015), representando o tempo de 1 dia.

Percebeu-se que esses altíssimos valores de cargas simuladas expressam a elevada entrada de água inferida para o modelo conceitual em relação à saída. Assim, os demais cursos d'água existentes na área de interesse foram inseridos no modelo conceitual. Vale ressaltar, que os cursos d'água, como inseridos no modelo, consistiam em zonas de menores cargas hidráulicas ("*river stage*") em relação aos seus entornos. A inserção de alguns cursos apresentaram maiores modificações no modelo que outros (Tabela 12); e todos os cursos d'água que representaram mudanças; e assim, redução das elevadas cargas hidráulicas simuladas, foram mantidos no sistema.

Tabela 12 – Efeitos da inserção dos demais cursos, após o Rio Xambrê, no erro RMSE do modelo numérico.

<b>Nomenclatura do Curso d'Água de acordo com Diniz et al. (2014)</b>	<b>Redução (m) do valor de RMSE após a inserção desse curso no modelo</b>
Ribeirão São João	2335,92
Ribeirão Peroba	0,11
Ribeirão Cantinflas	364,43
Ribeirão Santo André	0,01
Ribeirão Porungos	376,31
Ribeirão Jequitibá	329,02
Córrego Miriquina	240,28
Ribeirão Palmital	29,93
Ribeirão Iporã	0,00

Após a inserção dos demais cursos, o valor de RMSE foi reduzido de 3845,23 m para 171,22 metros; porém, as cargas simuladas ainda estavam muito elevadas em relação às cargas consideradas como observadas (Figura 38).

O MMA (2015), a partir de dados de 2014 do Instituto AGUASPARANÁ, percebeu que 29,4% dos poços outorgados no Estado do Paraná atendiam a agropecuária, enquanto apenas 19,2% dos poços outorgados no Estado eram voltados ao saneamento, embora as atividades de saneamento fossem responsáveis por extrações de maiores vazões médias dos aquíferos em geral.

Logo, a próxima etapa para a tentativa de redução do erro do modelo, envolveu acrescentar mais poços tubulares de captação de água no sistema. E conforme dados do AGUASPARANÁ (2018) e da CPRM (2018), foram inseridos novos poços no modelo conceitual. Os poços registrados em AGUASPARANÁ (2018) para a finalidade de irrigação, além de outras finalidades, como administração pública, com um parecer favorável para exploração, enquadrados com a condição de dispensa de outorga e com vazão outorgada entre 1 e 1,8 m<sup>3</sup>/h foram inseridos no modelo, como poços de saída de água, totalizando 13 poços.

Também, estavam registrados no Sistema de Águas Subterrâneas (CPRM, 2018) 18 poços com a finalidade de irrigação dentro da extensão da área modelada, e embora não houvesse informações sobre as situações desses poços, resolveu-se inseri-los no modelo com a vazão de 3,6 m<sup>3</sup>/h, o dobro da vazão outorgada para essa finalidade e registrada para alguns poços em AGUASPARANÁ (2018).

Como não existiam informações do tempo de operação desses poços, supôs-se um valor exagerado de 24 horas, uma vez que não se conhece a real situação desses poços; porém, acredita-se que possam haver inúmeros outros poços na região de que não se tenha registro de existência, mas que contribuam para a

retirada de água do sistema. Essa última sentença pôde ser pensada devido à afirmação da ANA (2018b), que relata que no Brasil, em julho de 2018, haviam cadastrados mais de 302 mil poços; embora tenham sido estimados para esse mesmo ano, aproximadamente 1,2 milhão de poços no País.

A figura 39 indica a posição dos demais poços inseridos na área modelada.

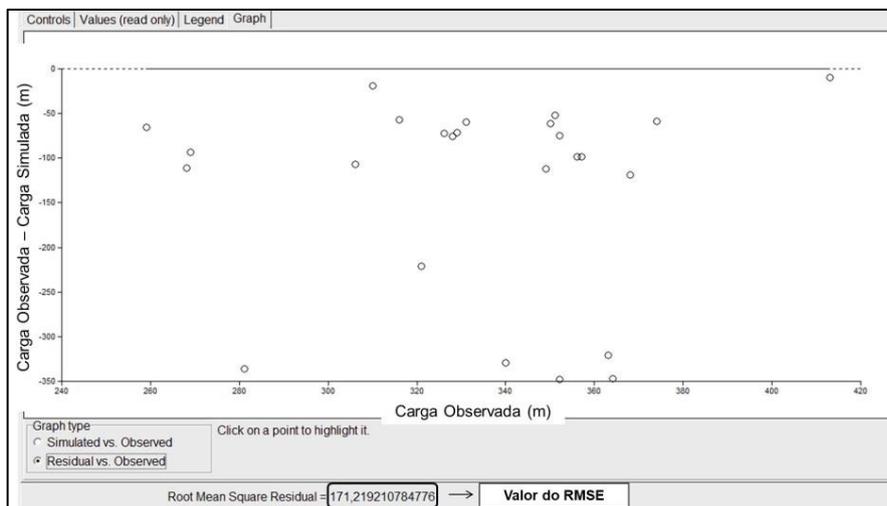


Figura 38 – Imagem extraída do *software ModelMuse* que indica os altos resíduos negativos mesmo após a inserção dos demais cursos d'água no modelo.

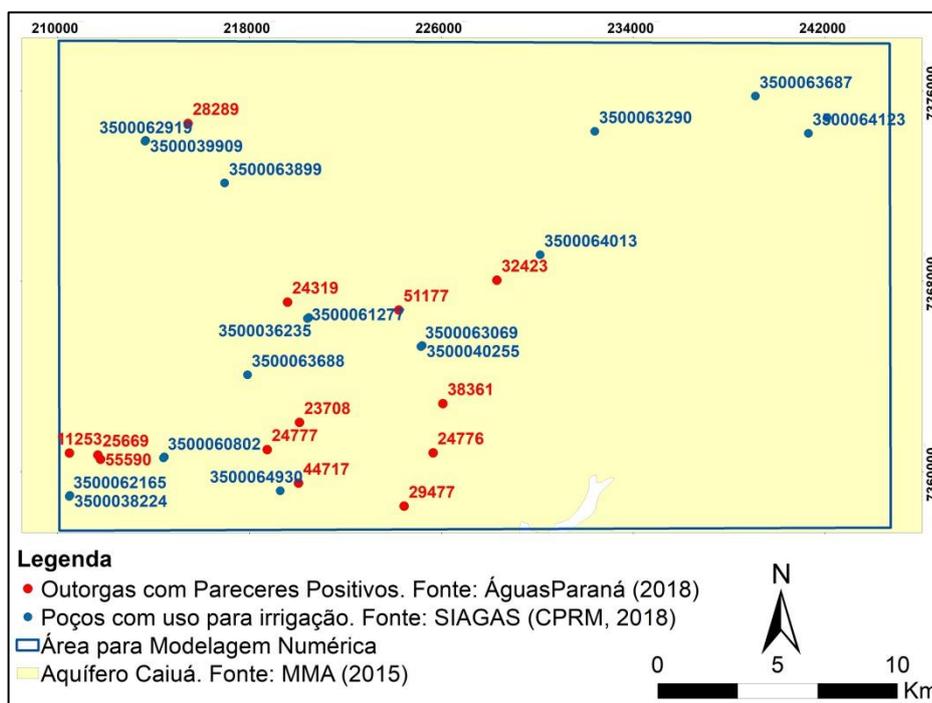


Figura 39 – Poços inseridos no modelo, com exceção dos poços a terem seus PPPs definidos.

Após a inserção desses poços, o valor de RMSE foi reduzido de 171,22 para 170 metros; uma diferença baixíssima. Assim, esses poços foram mantidos, mas

suas vazões não foram modificadas devido a pouca variação causada no resultado do modelo.

Fitts (2015) indica que para uma boa calibração a teoria deve ser considerada, e exemplifica que, considerando a Equação de Darcy, deve-se diminuir a condutividade hidráulica quando também se pretende diminuir uma carga hidráulica simulada, sendo essa premissa utilizada no processo de calibração. Assim como, as alterações da recarga obedeceram à teoria trazida pela equação 15.

Como ainda existiam cargas simuladas elevadas, a recarga do sistema foi reduzida. Anteriormente, considerou-se o valor de 585 mm/ano, o que para cada célula da malha resultaria em  $1,85 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/s em relação a cada 1 m<sup>2</sup>, ou apenas  $1,85 \times 10^{-8}$  m/s, recarga a ser multiplicada pela área de cada célula. Logo, para teste, atribuiu-se o valor de 260 mm/ano (valor próximo à taxa de recarga encontrada para o poço da rede RIMAS mais a nordeste da área modelada), ou seja, um valor de  $8,24 \times 10^{-9}$  m/s, nos entornos de onde foram simuladas cargas hidráulicas muito elevadas, e isso resultou em uma mudança drástica dos valores simulados, decrescendo o valor de RMSE para 81,51 metros. Essa avaliação permitiu atribuir à recarga uma sensibilidade de 0,35, valor a ser comparado com os demais parâmetros de calibração.

Quase que de imediato, percebeu-se que as variações de recarga deveriam ser locais, onde diferentes valores foram testados para distintas zonas, uma vez que ao se modificar a recarga de uma grande área, alguns pontos apresentavam melhorias em relação aos resíduos, e outros, piora.

Desta maneira, inúmeras modificações locais nos valores de recarga foram realizadas, até serem definidos valores de recarga, após a calibração, entre  $9 \times 10^{-13}$  m/s e  $4 \times 10^{-8}$  m/s, isto é, entre 0,03 mm/ano e 1261,44 mm/ano (Figura 40).

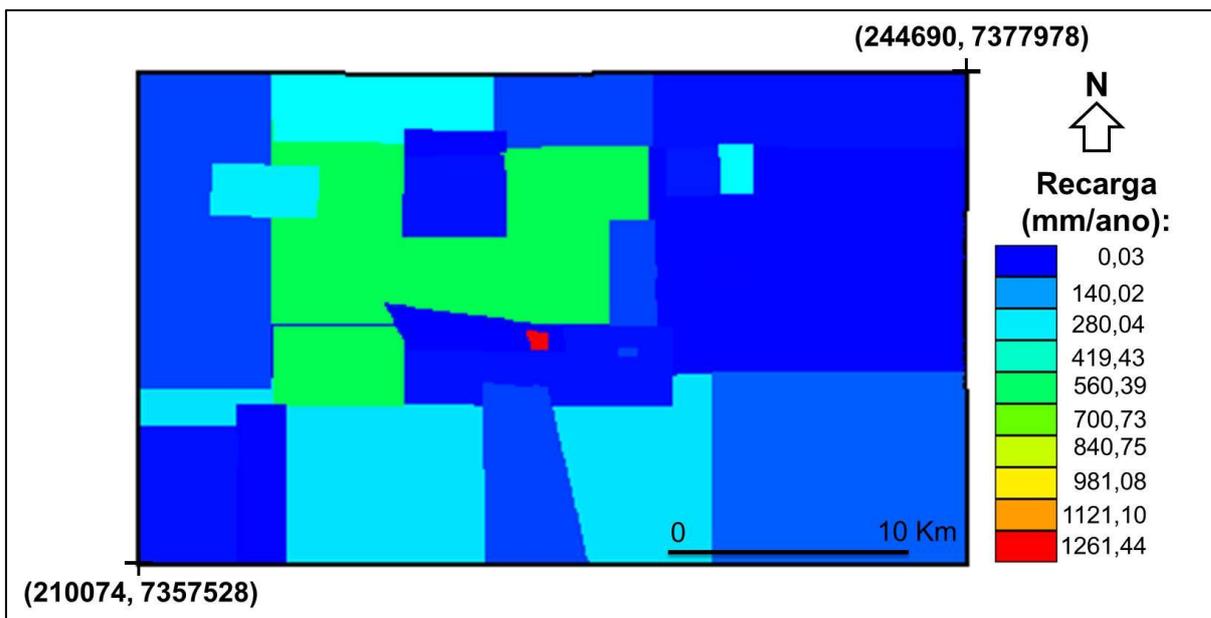


Figura 40 – Valores ajustados de recarga após a calibração do modelo conceitual.

As alterações dos valores de condutividade hidráulica  $K_x$  e  $K_y$  também foram distintas a depender do local a ser trabalhado em cada etapa de calibração, sempre em busca de um erro RMSE aceitável. Na maioria dos locais os valores de  $K_x$  foram diminuídos em relação ao seu valor inicial, aquele considerado a partir da interpolação dos valores registrados no BD. Assim, como na maioria dos locais, o valor de  $K_y$  foi menor que o valor considerado para  $K_x$ , sendo consideradas algumas zonas como anisotrópicas devido apenas à calibração do modelo. Os valores de  $K_x$ , após calibração, variaram entre  $1 \times 10^{-6}$  e  $1,1 \times 10^{-4}$  m/s; enquanto que os valores de  $K_y$  foram considerados como  $1,43 \times 10^{-7}$  e  $3,15 \times 10^{-4}$  m/s. As tentativas de alteração de condutividade hidráulica  $K_z$  mostraram que o modelo não era sensível a essa variável, sendo as sensibilidades para  $K_x$  e  $K_z$ , em média, de 0,028 e de 0,017; respectivamente, ocorrendo algumas zonas que demonstraram maiores sensibilidades para determinado parâmetro que outras.

Em relação à anisotropia, valores de  $K_y$  menores em relação a  $K_x$  definiram erros menores; porém, ao executar o traçado de partículas, os resultados visuais mostraram caminhos tendenciosos em relação ao eixo x; assim, ainda mantendo-se abaixo do limite de erro aceitável, os valores de  $K_y$  foram readequados (Figura 41), se aproximando mais de  $K_x$  para evitar resultados muito tendenciosos em alguns pontos onde  $K_y$ , com base apenas na redução do valor de RMSE durante a calibração, tinha sido ajustado como até 12 vezes menor que  $K_x$ .

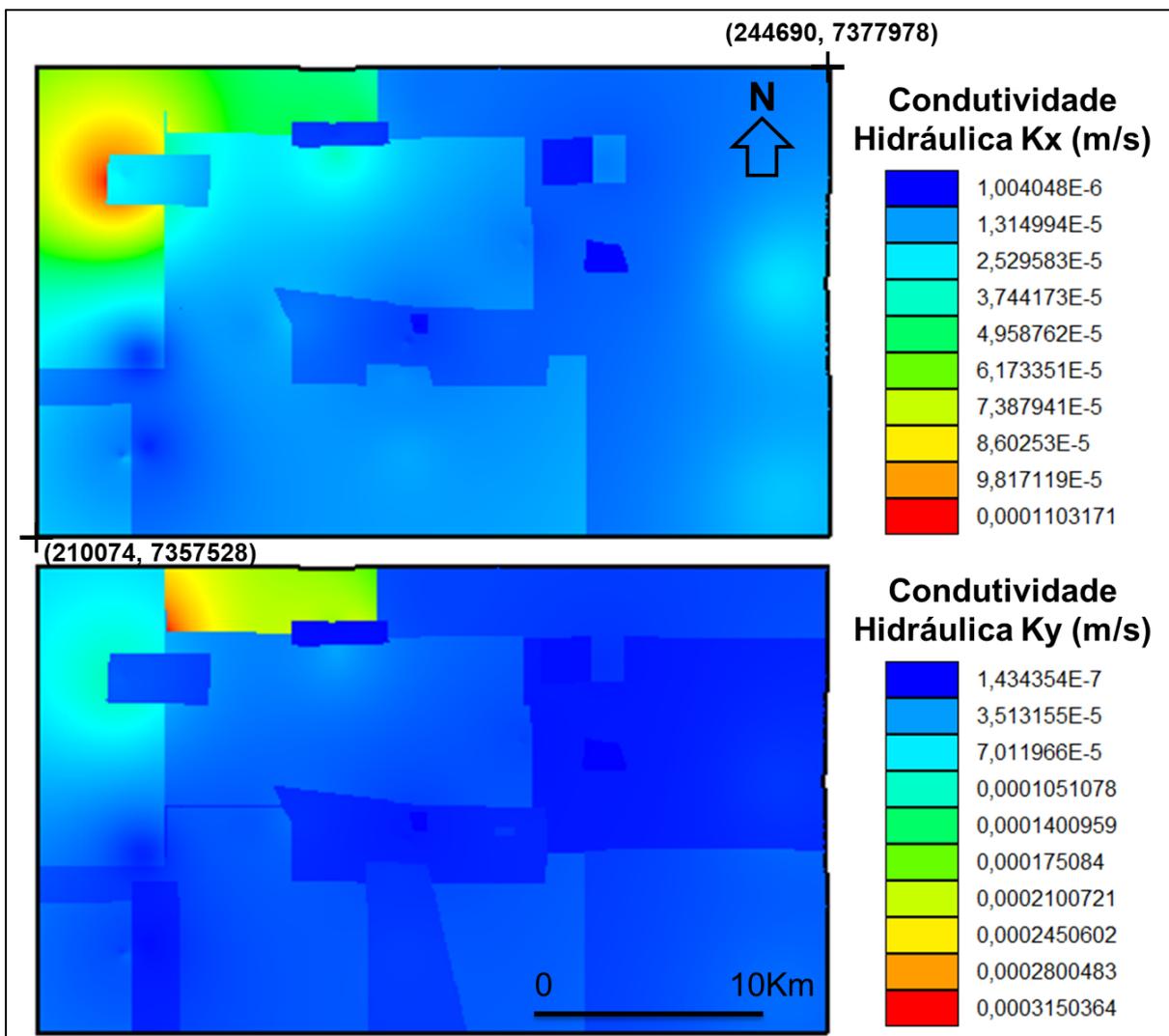


Figura 41 – Valores de condutividades finais ajustados durante a calibração do modelo conceitual.

Conforme a metodologia de Iritani (1998) e de Anderson, Woessner e Hunt (2015), para o erro aceitável de 10% em relação à variação de cargas, o valor de RMSE para o caso deste trabalho deve ser de no máximo 15,4 metros, valor referente à diferença entre as cargas hidráulicas consideradas como observadas; e o valor final avaliado para o RMSE foi de 14,97 metros.

E para a avaliação do erro, o próprio ModelMuse apresenta, em sua ferramenta de visualização do pacote “HOB” do Modflow, o valor do erro e um gráfico com os valores dos resíduos em relação a zero (Figura 42). Por meio dessa ferramenta o erro foi verificado, o qual foi considerado como aceitável devido às especificações acima.

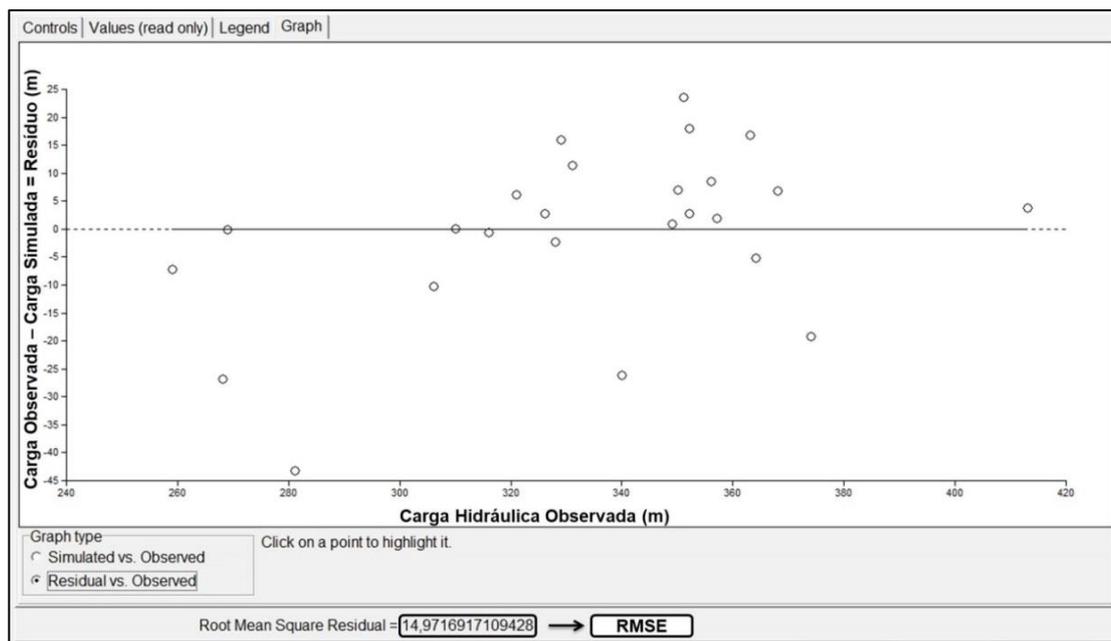


Figura 42 – Valor de RMSE e valores dos resíduos em relação a zero apresentados pelo *software ModelMuse* ao final da etapa de calibração.

A porosidade efetiva é tida como um fator muito importante para a delimitação de PPPs (WOTTRICH, 2012), e de acordo com Foster et al. (2006), esse parâmetro, assim como a recarga do aquífero e a condutividade hidráulica, afeta muito a geometria de zonas de captura. Porém, como o termo de armazenamento na equação diferencial parcial de fluxo (15) é considerado como zero na condição estacionária (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015; HARBAUGH et al., 2000), essa propriedade apresentou sensibilidade nula. Embora, seja fundamental para o traçado de partículas no *software Modpath* (POLLOCK, 2012).

Em relação à sensibilidade, foi perceptível que o fator que mais influenciou o sistema foi a recarga do aquífero, com uma sensibilidade dimensionada de em média 0,1; além de gerar mudanças significativas nos valores de RMSE. Seguindo a recarga, a condutividade hidráulica horizontal foi a variável que mais afetou o sistema conforme a sua modificação, com valor médio dimensionado de sensibilidade de 0,02; e a condutância hidráulica foi um fator que pouco afetou o sistema, ocorrendo variações apenas quando essa foi reduzida, sendo a sensibilidade dimensionada verificada muito baixa em relação às demais, de apenas 0,0006.

Marcelino (1999) verificou que os parâmetros que mais afetaram os resultados de sua modelagem foram condutividade hidráulica, evapotranspiração e recarga; e o autor avalia ainda que seu modelo é mais sensível às variáveis de

entrada e de saída de água do que às de armazenamento, e relaciona isto ao fato de o modelo ser em regime estacionário. E neste trabalho, esta verificação de Marcelino (1999) é aplicável, uma vez que as variações ocorreram em concordância com as alterações de recarga, de condutividade hidráulica horizontal e, por último e em menor proporção, de condutância hidráulica.

Semelhantemente, Iritani (1998), para a análise de sensibilidade presente em seu trabalho, variou os parâmetros de recarga, de condutividade hidráulica e de condutância, e observou que a recarga era a variável que mais afetou o seu modelo; enquanto que a condutividade e a condutância hidráulica também alteraram seus resultados, mas em um menor grau; porém, a autora indicou que a estimativa dos valores de condutância não gerou grandes erros nas predições do modelo, salientando a importância de estudos detalhados de recarga e de condutividade hidráulica, para a melhoria de modelos no local. Portanto, essa sugestão da autora para a sua zona de trabalho, pode ser mantida para o aquífero Caiuá, no Paraná, uma vez que as mesmas variáveis apresentaram alta sensibilidade quando focado esse aquífero.

A tabela 13 mostra um comparativo entre os valores iniciais e os finais dos parâmetros, seguida da sensibilidade adimensional avaliada. Além disso, o Apêndice E resume as tentativas efetuadas durante o processo de calibração.

Tabela 13 – Valores iniciais, finais e de sensibilidade para as variáveis utilizadas durante a calibração do modelo conceitual.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Inicial</b>	<b>Valor Final</b>	<b>Sensibilidade (pss<sub>i</sub>)</b>
<b>Recarga</b>	583,4 mm/ano	Valores entre 0,03 e 1261,44 mm/ano	Valores entre 0,004 e 0,35
<b>Condutividade Kx</b>	Valores entre $1,66 \times 10^{-6}$ e $5,9 \times 10^{-5}$ m/s	Valores entre $1 \times 10^{-6}$ e 0,00011 m/s	0,001 e 0,043
<b>Condutividade Ky</b>	Valores entre $1,66 \times 10^{-6}$ e $5,9 \times 10^{-5}$ m/s	Valores entre $1,43 \times 10^{-7}$ e 0,00031 m/s	0,002 e 0,026
<b>Condutividade Kz</b>	Valores entre $1,66 \times 10^{-6}$ e $5,9 \times 10^{-5}$ m/s	Valores entre $1 \times 10^{-6}$ e 0,00011 m/s	0
<b>Porosidade Efetiva</b>	0,15	0,15	0
<b>Coefficiente de armazenamento</b>	0,001	0,001	0
<b>Condutância do Rio Xambrê</b>	Em média 0,008 m <sup>2</sup> /s	Em média 0,008 m <sup>2</sup> /s	0,0006
<b>Condutância de outros cursos d'água</b>	0,0066 m <sup>2</sup> /s	0,0066 m <sup>2</sup> /s	0,0006

Os valores iniciais de condutividade hidráulica foram baseados nos valores presentes em MMA (2015); os de porosidade, em AGUASPARANÁ (2010) e os de coeficiente de armazenamento, em Iritani (1998) e Winston (2009).

### 6.3.2 Resultados Obtidos

A solução do modelo conceitual definido e calibrado como mostrado acima permitiu a definição de zonas de captura para os 25 poços registrados em MMA (2015) e inseridos na área de interesse para a modelagem numérica. E com isso, foi possível traçar as zonas de transporte requeridas neste trabalho, ou seja, para 50, 500 e 1825 dias.

Uma das maneiras de verificar o traçado inverso das partículas é também realizar o traçado em direção à jusante das partículas e verificar a correspondência desses caminhamentos (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Assim, o traçado “*forward*” foi realizado para alguns poços, com o intuito de verificar se uma partícula situada na zona de captura definida a partir do traçado inverso chegaria ao poço. E para todas as zonas testadas, houve a correspondência entre esses traçados (Figura 43), indicando um caminhamento adequado em relação ao gradiente hidráulico simulado para o modelo conceitual final; porém, o poço de identificação 4491 apresentou linhas de fluxo que passavam por ele e depois seguiam para o Ribeirão Jequitibá. Esse poço apresentou zona de captura estreita, vazão registrada no BD de 6 m<sup>3</sup>/h e um resíduo de 23,58 m, indicando uma carga simulada abaixo da carga observada, o que pode sugerir uma dominância do fluxo para o Ribeirão Jequitibá, conforme a maneira em que o modelo foi ajustado. Em relação aos cursos d’água inseridos no modelo, o traçado “*forward*” também mostrou que partículas presentes na água subterrânea, quando próximas a essas drenagens, tendem a fluir em direção às mesmas.

Para uma melhor verificação dos resultados obtidos, também foram comparadas as zonas de captura à potenciometria quando considerada o nível estático dos poços (Figura 43), e notou-se que no geral, as zonas de contribuição tendem a convergir para as zonas de maior potencial hidráulico a partir dos poços, e que as mesmas possuem uma longa extensão, ou seja, correspondem a longos tempos de trânsito.

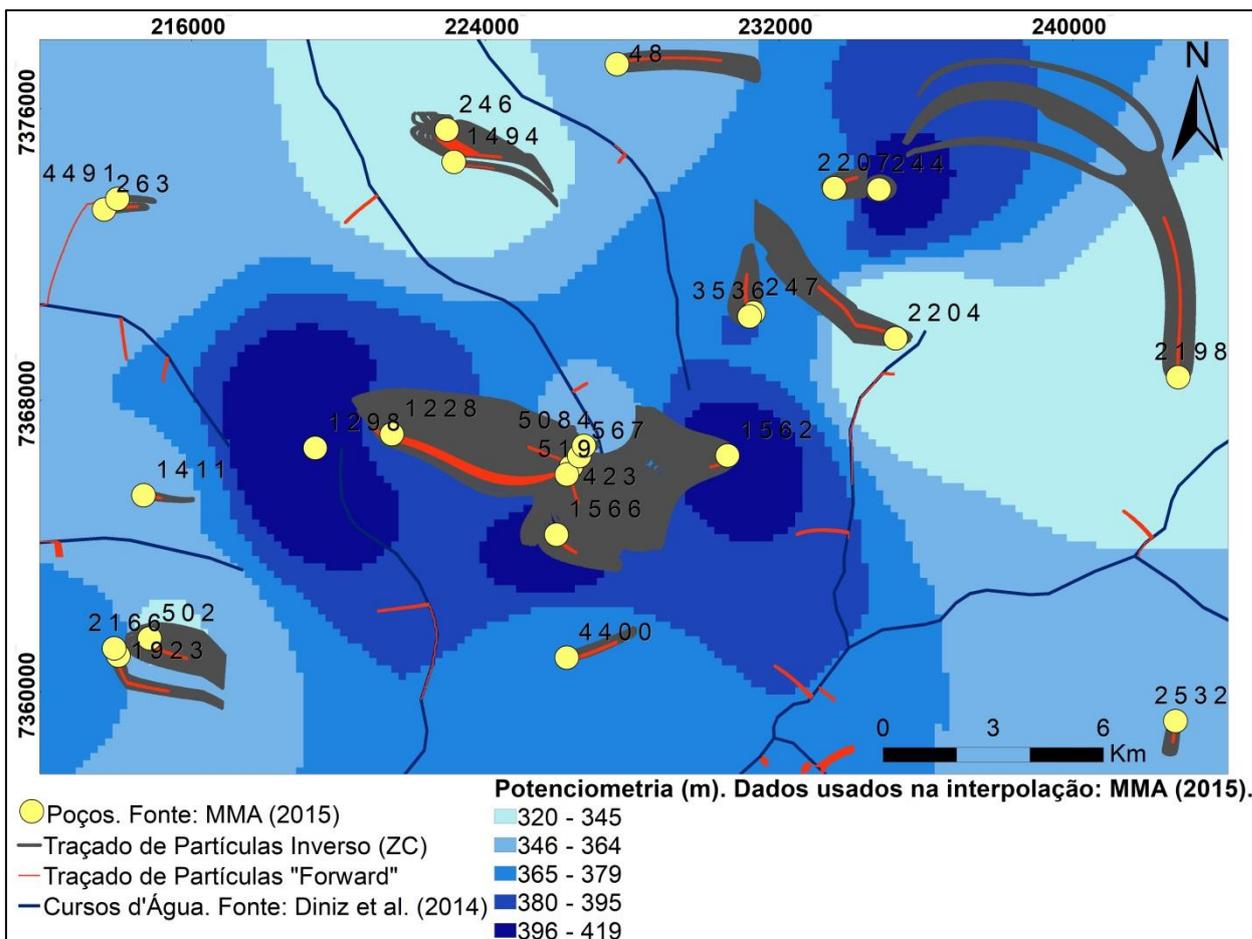


Figura 43 – Visualização das zonas de contribuição geradas a partir do modelo numérico sobre mapa interpolado de potenciometria, assim como as verificações do traçado em sentido à jusante a partir de um ponto inserido na ZC de cada poço.

A figura 44 mostra os PPPs definidos para os três tempos de trânsito trabalhados. É possível avaliar que suas formas variam de poço para poço, sendo algumas mais alongadas e outras mais circulares. Os tamanhos das zonas de proteção também variaram bastante (Tabela 14). As zonas de proteção de 50 dias variaram entre 3.144,21 e 10.064,90 m<sup>2</sup>, para os poços de códigos 2207 e 519, respectivamente. Já as áreas de proteção de 500 dias variaram entre 5.016,32 e 45.533,42 m<sup>2</sup>, para os poços 2207 e 519, respectivamente; enquanto que as zonas de proteção para 5 anos variaram entre 11.016,05 e 139.271,44 m<sup>2</sup>, também para os poços 2207 e 519, respectivamente. Ao avaliar as vazões de estabilização registradas para esses poços (MMA, 2015) e que foram usadas para a modelagem, percebeu-se uma certa relação entre o tamanho das áreas e as vazões (Figura 45), o poço 2207 possui uma vazão de 3 m<sup>3</sup>/h; enquanto que o poço 519 possui vazão registrada no BD equivalente a 41,78 m<sup>3</sup>/h. Porém, devido ao fato de outros poços também terem vazões registradas elevadas tão quanto ou maiores que o poço 519

ou então menores que a vazão cadastrada para o poço SIA 2207, como os poços de identificações SIA 5084 e 1923, respectivamente, acredita-se que não somente a vazão foi responsável por essas variações de tamanho das zonas. A própria equação de fluxo (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), equação 15, ajuda a entender que os fatores de entrada e saída de água interferem no processo de movimentação da água no sistema. O poço SIA 1562, por exemplo, possui elevadas áreas simuladas para proteção, enquanto que o valor de vazão utilizado nesse poço tendeu a ser menor em relação a outros com grandes áreas de proteção estimadas, e ao avaliar os parâmetros de calibração no entorno desse poço, foi verificada uma taxa de recarga estimada ligeiramente maior ao redor do poço que o restante de suas proximidades, e também foi verificado um valor de condutividade hidráulica no eixo y um pouco mais elevado que os valores do entorno mais distante.

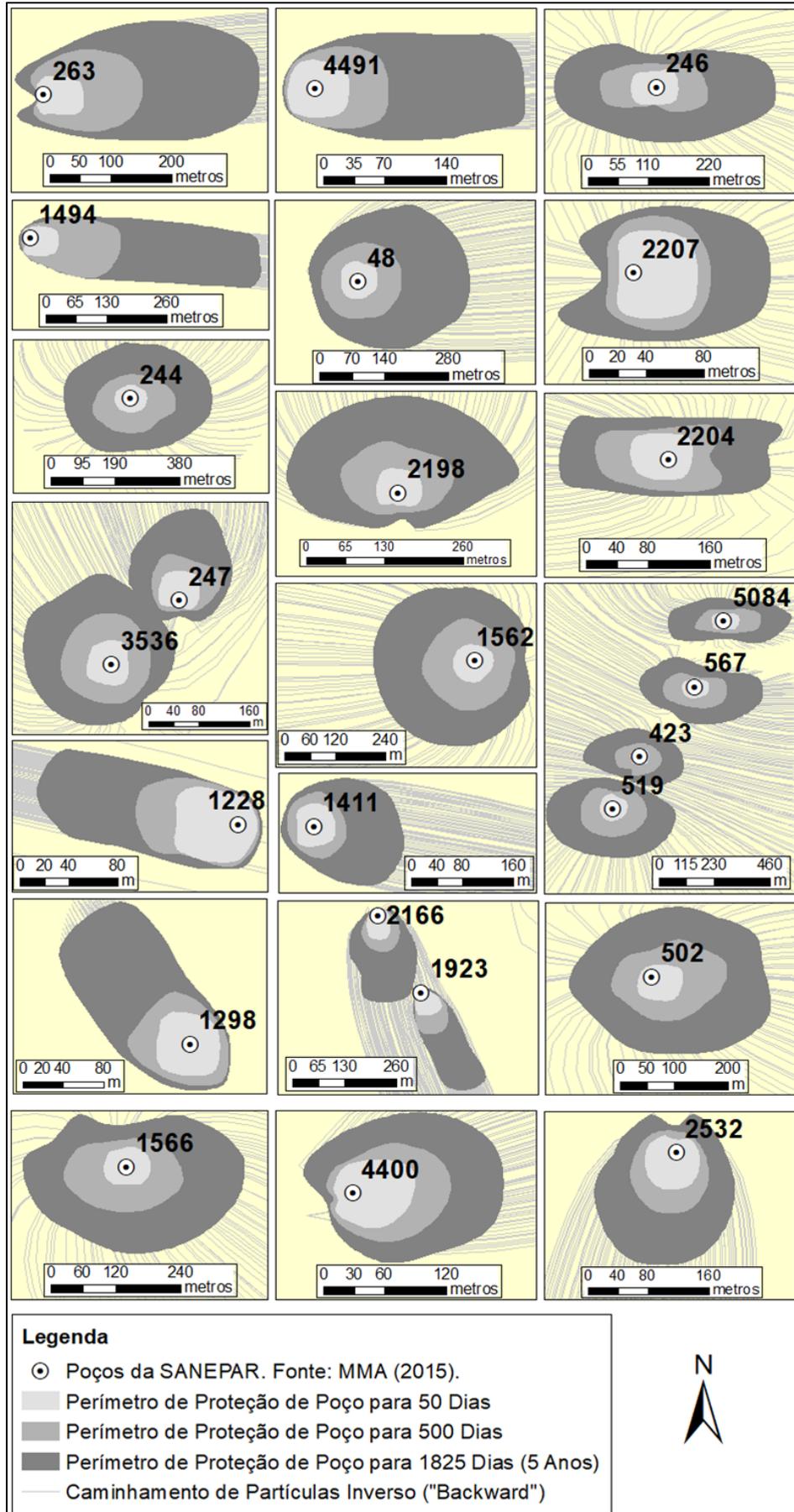


Figura 44 – PPPs definidos a partir da modelagem numérica.

Tabela 14 – Áreas dos PPPs obtidas por meio da modelagem numérica.

<b>Código SIA</b>	<b>Área de Proteção para 50 dias (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área de Proteção para 500 dias (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área de Proteção para 1825 dias (m<sup>2</sup>)</b>
<b>48</b>	5347,71	23161,46	85969,80
<b>244</b>	6328,13	32546,82	113048,19
<b>246</b>	4897,65	14622,68	57767,70
<b>247</b>	3443,69	8069,28	23326,63
<b>263</b>	4442,72	20315,74	64190,16
<b>423</b>	3980,10	19635,51	71674,59
<b>502</b>	4873,79	23339,64	79498,48
<b>519</b>	10064,90	45533,14	139271,44
<b>567</b>	7517,77	30380,21	101073,38
<b>1228</b>	3539,42	5816,86	12649,01
<b>1298</b>	3502,15	6869,62	19366,37
<b>1411</b>	3646,00	7621,29	25707,38
<b>1494</b>	4333,48	22083,05	63536,19
<b>1562</b>	6892,06	36304,46	115884,19
<b>1566</b>	5197,00	23874,39	80484,17
<b>1923</b>	3586,95	7968,89	26279,80
<b>2166</b>	3832,42	8122,45	31877,24
<b>2198</b>	4194,28	17404,27	63224,73
<b>2204</b>	4269,41	11720,23	26367,47
<b>2207</b>	3144,21	5016,32	11016,05
<b>2532</b>	4300,86	9205,12	29140,96
<b>3536</b>	4103,75	16485,97	43194,46
<b>4400</b>	4369,58	9044,50	21940,98
<b>4491</b>	4002,84	9352,07	29307,70
<b>5084</b>	6809,79	23299,75	77516,38

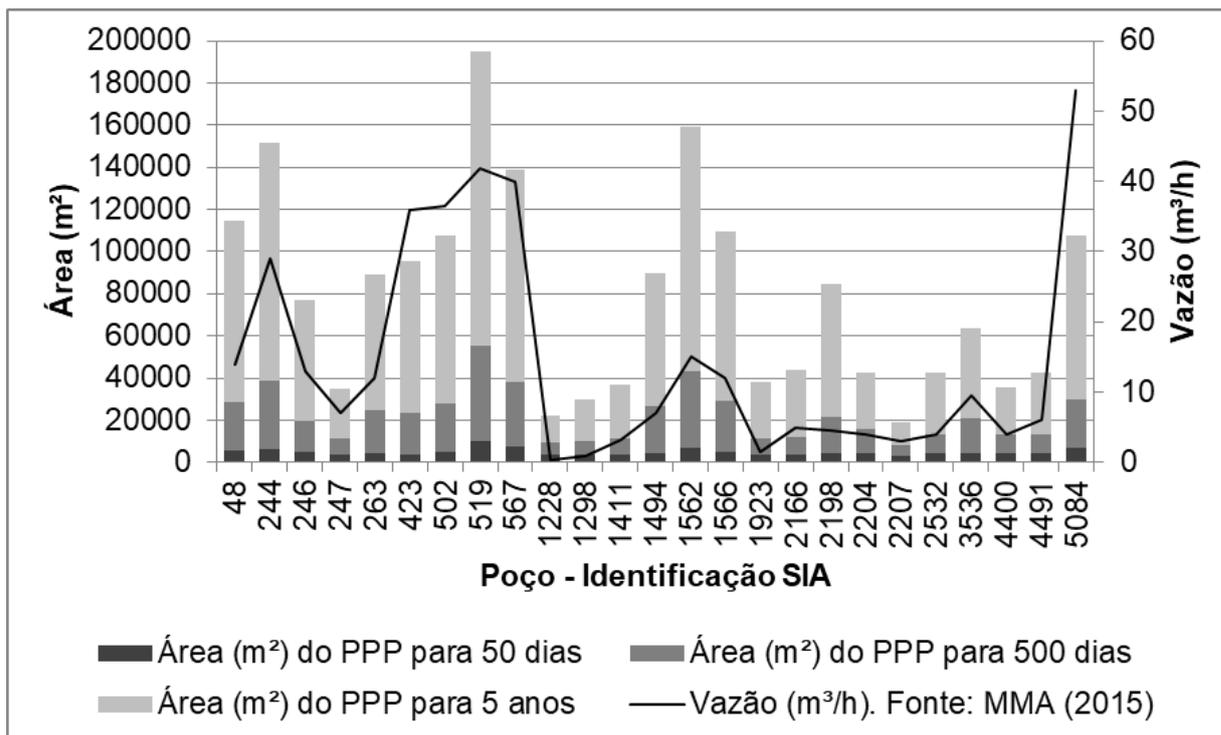


Figura 45 – Relação entre vazão e áreas obtidas por meio da modelagem numérica.

#### 6.4 Comparação entre os Métodos

A escolha de um método para a definição de PPPs sobre outros deve avaliar a hidrogeologia do local, a acurácia desejável e também os custos e recursos para a aplicação dos métodos considerados (USEPA, 1987).

USEPA (1987) em um de seus exemplos, ao comparar áreas definidas a partir do MN e do RFC para um poço, avaliaram que a área obtida pelo RFC cobre toda a zona gerada por modelagem; porém, ainda recobre uma grande área que de acordo como o modelo numérico, não necessita de proteção. Os autores associaram isso a barreiras de fluxo existentes no local e também ao alto gradiente hidráulico da região, que afeta a acurácia do RFC, e algo semelhante também ocorre para o método analítico (que considera o gradiente hidráulico). Já para um poço no estado americano da Flórida, os mesmos autores verificaram uma correspondência maior entre os métodos, o que relacionaram a gradientes hidráulicos mais baixos e à ausência de barreiras hidráulicas.

USEPA (1987), por exemplo, consideraram um método que garante 79% de cobertura mútua e que não cobre 21% da área protegida pelo MN como adequado; porém, enfatizam que o valor de proteção desnecessária trazida pelo método avaliado também deve ser observado.

A comparação entre os três métodos testados foi efetuada para os poços da área onde a modelagem numérica foi realizada (Figura 46). A modelagem numérica foi considerada como o método padrão para a comparação geométrica em alguns estudos mostrados em USEPA (1987), e seu uso neste trabalho foi definido de acordo com o erro RMSE obtido durante a calibração do modelo numérico, assim como devido à observação de alguns resíduos abaixo de 10% do valor da espessura saturada considerada para o aquífero, com base na premissa utilizada por Badv e Deriszadeh (2005).

Badv e Deriszadeh (2005), apesar de terem utilizado um modelo analítico, consideraram para avaliação da adequação do método, que os resíduos obtidos fossem menores que 10% do valor da espessura saturada do aquífero em que trabalharam. Assim, para o enriquecimento da avaliação dos resultados da modelagem numérica, essa análise também foi realizada aqui, onde foi observado que a maioria dos resíduos obtidos atendem essa proposição, de acordo com o valor de espessura saturada indicada em MMA (2015)(Tabela 15).

Porém, é importante ressaltar que até mesmo o método numérico, embora o valor de RMSE obtido, possui incertezas, uma vez que alguns resíduos altos ocorreram para algumas cargas hidráulicas simuladas para o modelo. Outra importante característica de um bom modelo é o uso de valores adequados de porosidade efetiva (FOSTER et al., 2006; WOTTRICH, 2012); porém, aqui, devido a disponibilidade de dados, apenas um valor foi utilizado.

Tabela 15 – Valores de resíduos da modelagem numérica para os pontos de observação, comparados de acordo com a condição de Badv e Deriszadeh (2005).

HOB	RESÍDUO (m)	SIA	Espessura Saturada (m) (MMA, 2015)	Valor de 10% da Espessura Saturada (m)	O módulo do resíduo é $\leq 10\% \times H$ ? (BADV; DERISZADEH, 2005)
1	2,894287	263	79,27	7,92	Sim
2	23,58414	4491	100,4	10,04	Não
3	0,088379	1494	67,83	6,78	Sim
4	-7,08878	246	118,6	11,86	Sim
5	-10,1238	48	81,5	8,15	Não
6	-25,9829	2207	77,71	7,77	Não
7	-5,12332	244	100	10	Sim
8	7,01532	1411	58,71	5,87	Não
9	3,850403	1298	38,87	3,89	Sim
10	-19,1794	1228	47,5	4,75	Não
11	16,10855	519	112,38	11,24	Não
12	11,43015	423	216	21,60	Sim
13	-0,48837	567	143,53	14,35	Sim
14	-0,07513	5084	195,96	19,59	Sim
15	18,11838	1562	99,0	9,90	Não
16	8,604889	3536	90,82	9,082	Sim
17	1,029205	247	128,61	12,86	Sim
18	-26,7767	2204	78	7,80	Não
19	6,30484	2198	38	3,80	Não
20	2,807373	1923	38,07	3,80	Sim
21	16,81827	2166	97,85	9,78	Não
22	-43,0783	502	140,15	14,01	Não
23	2,063507	1566	88,20	8,82	Sim
24	6,853088	4400	66,19	6,62	Próximo
25	-2,23636	2532	72,5	7,25	Sim

Fonte dos valores de espessura saturada: MMA (2015).

A tabela 16 mostra as porcentagens de comparação entre os métodos, definidas por USEPA (1987) e aplicadas a este trabalho.

No geral, os resultados da contraposição para o tempo de 50 dias de trânsito da água subterrânea mostraram que o método do raio fixo calculado foi o mais compatível com o modelo numérico; enquanto que os PPPs obtidos a partir do

método de Wyssling (1979) raramente foram semelhantes aos obtidos por meio do MN, ocorrendo apenas um resultado, dentre aqueles com porcentagens consideradas como adequadas, que apresentou melhor comparação em relação à aferição entre RFC e MN, embora as porcentagens de cobertura mútua tenham sido as mesmas, e isso ocorreu para o poço de identificação 2198.

O RFC, para o tempo de 50 dias, resultou basicamente em 3 tipos de perímetros, quando comparados aos definidos pelo modelo numérico: 1) aqueles que superprotegeram as áreas; 2) aqueles que não cobriram porções de zonas definidas como de proteção pelo MN; e 3) aqueles que tiveram uma excelente correspondência às zonas de proteção delimitadas por meio do MN.

Para os resultados de 50 dias, foi observado que a maioria dos PPPs definidos por meio do RFC cobriria uma área muito semelhante ao MN, embora com algumas porções de proteção errônea (ou ao menos não coincidente com o MN), caso o fator de multiplicação utilizado anteriormente, ou seja, de 2 vezes o raio obtido a partir da espessura saturada registrada no banco de dados, fosse maior.

Porém, houve alguns perímetros de alerta definidos pelo RFC que foram maiores em relação aos delimitados pelo MN; e no geral, as vazões registradas no banco de dados para esses poços são maiores em relação aos demais, com valores entre 29 e 40 m<sup>3</sup>/h. E os poços, para os quais foi suposto que o raio obtido pelo RFC deveria ser maior para o resultado se aproximar do MN, possuem vazões registradas mais baixas, entre 1 e 15 m<sup>3</sup>/h, resultados que são suportados pelo entendimento da equação utilizada para a definição dos raios fixos calculados.

Para alguns poços, como os de identificação SIA 1228, 1494, 1923 e 2166, aparentemente e avaliando os valores de porcentagens de comparação, ambos os métodos avaliados não foram compatíveis com as áreas definidas pelo MN para 50 dias. Os PPPs gerados pelo MN para esses poços tenderam a ser alongados e estreitos, embora menores quando comparados aos demais. As vazões registradas no banco de dados (MMA, 2015) e utilizadas para esses poços tendem a ser baixas, valores de 0,4, 7, 1,5 e 4,92 m/h, respectivamente; contudo, os resíduos obtidos para as cargas simuladas para esses poços foram altos apenas para os poços 1228 e 2166, com valores respectivos de -19,17 e 16,81 m. Além disso, os gradientes hidráulicos, calculados para esses poços a partir da metodologia expressa na seção 5.5.2.2 - baseada em Heath (1982) e utilizando códigos em Python -, foram muito pequenos, entre 0,0056 e 0,045. A partir dessas premissas, e considerando as

possíveis incertezas do modelo numérico; o fato de que o método de RFC é mais indicado para poços que possuem dominância de bombeamento (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007); e também o fato de que o método de Wyssling é melhor aplicado em zonas com gradientes mais inclinados, ou seja, elevados (MOINANTE; LOBO-FERREIRA, 2007; KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007; WYSSLING, 1979), percebeu-se que para zonas do aquífero de baixo gradiente hidráulico, com baixas vazões, e para quando existe a falta de correspondência entre os métodos, e incertezas ou erros mais elevados associados ao modelo numérico, é passível a avaliação conjunta das áreas de proteção e talvez, a criação de um PPP que considere os três perímetros definidos separadamente.

Essa ideia de combinação dos métodos partiu da sugestão de método híbrido comentado em Paradis et al. (2007), cujos autores falaram que trata-se de uma combinação de métodos analíticos para a delimitação de PPPs. Paradis (2000) definiu esse método onde 1) a definição do limite de proteção à jusante é dada considerando um método de fluxo uniforme, ou seja, analiticamente; 2) o limite à montante é dado por uma equação de tempo de trânsito, também analiticamente; 3) a área do PPP é calculada pela equação volumétrica e atribuída à técnica; 4) a direção do fluxo da água subterrânea em relação ao poço é definida; e 5) uma elipse de proteção é gerada a partir das informações obtidas nos passos anteriores.

Assim, apesar da concepção da avaliação em conjunto dos métodos testados aqui se tratar de uma metodologia distinta da definida a partir de cálculos em Paradis (2000), a técnica desse autor mostra que o uso simultâneo de mais de um método pode ser viável. Sendo essa avaliação em conjunto indicada aqui apenas para casos onde realmente não se conseguiu escolher um método de delimitação de PPP, devendo as teorias hidrogeológicas serem consideradas na tomada de decisão.

Por exemplo, para o caso do poço 1228, considerando-se o tempo de 50 dias, a área definida a partir do MN recobre as áreas definidas pelos outros métodos, tendo uma maior extensão; assim, para evitar que áreas com exigência de proteção sejam negligenciadas, avaliou-se o uso do MN como uma melhor alternativa. Para o caso do poço 2166, tanto o RFC quanto o método de Wyssling protegeram uma área mais voltada para o norte que o modelo numérico, que protege mais a sul do poço; assim, nesse caso, indica-se uma zona de proteção que, embora a possibilidade de superproteção, una os resultados desses métodos.

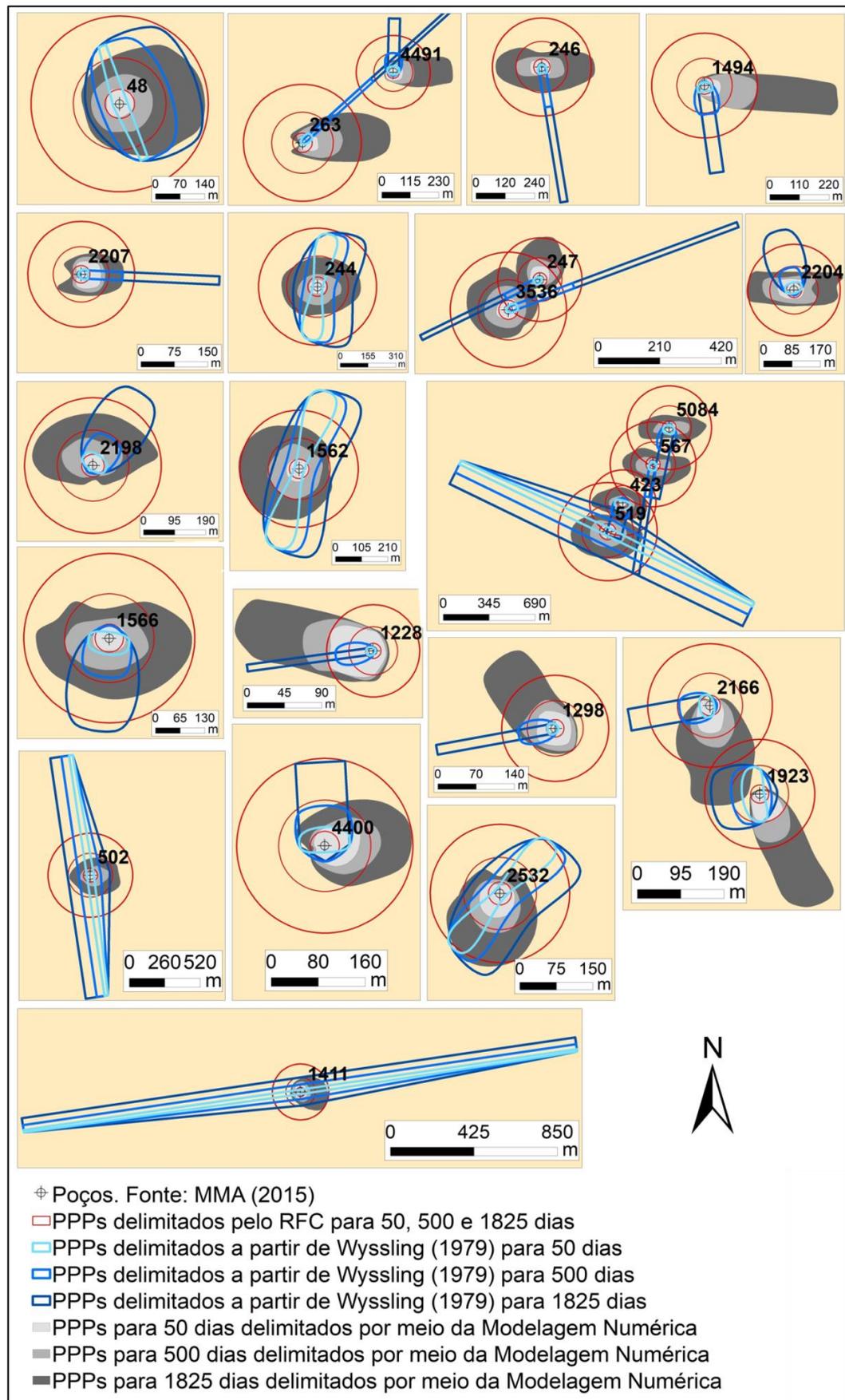


Figura 46 – Comparação visual dos resultados obtidos para os três métodos aplicados.

Para o tempo de 500 dias, o método do RFC também resultou em PPPs mais semelhantes aos obtidos por meio do MN. Porém, no geral, as zonas definidas pelo RFC tenderam a ser maiores do que aquelas delimitadas a partir do modelo numérico, acreditando-se que talvez a diminuição dos raios de proteção definidos preliminarmente para o RFC possa ser realizada em alguns casos, mas não seguindo um mesmo padrão. Quando comparados esses dois métodos mencionados, foram observadas algumas zonas definidas pelo MN mais alongadas em direções específicas, tendendo assim a existirem áreas protegidas somente pelo RFC em direções perpendiculares a essas zonas definidas pelo MN; contudo, também existem PPPs definidos pelo MN que possuem tendências circulares, mais coincidentes logicamente com o RFC.

Já os PPPs definidos a partir do método de Wyssling (1979) tenderam a uma baixíssima semelhança em relação aos resultados da modelagem numérica; contudo, os poços de identificação SIA 48, 244 e 2532 apresentaram melhores porcentagens de comparação, embora as semelhanças entre RFC e MN, para esses mesmos poços, tenham sido melhores.

Quando avaliados os resultados de 500 dias, também se perceberam PPPs definidos pelo RFC que englobaram boa parte dos PPPs definidos pelo MN; e que também indicaram proteção a outras áreas excedentes ao MN. Porém, foi notado que caso esses PPPs circulares fossem diminuídos, a porcentagem de área definida pelo MN que não receberia proteção pelo RFC aumentaria significativamente; assim, nesses casos, entendeu-se que a possível superproteção pelo RFC é mais adequada do que os efeitos da diminuição desses raios fixos, e isso ocorreu para os poços de identificação SIA 247, 263 e 4400. Esses poços têm vazões registradas no banco de dados (MMA, 2015) entre 4 e 12 m<sup>3</sup>/h, e os gradientes hidráulicos definidos de acordo com a seção 5.5.2.2 são baixos para esses três poços. Ainda, nesses três poços, observou-se que tanto o RFC quanto o método de Wyssling definiram zonas que protegem em direções distintas ao MN.

As comparações entre os resultados para os poços SIA 1228, 1494 e 1923; assim como para o tempo de 50 dias, não mostraram boas semelhanças entre os métodos, onde não pôde ser indicado um método mais adequado a partir do critério de comparação utilizado.

O método do RFC, para os poços SIA 1298, 1562 e 2204, apresentou boa relação ao MN; onde apesar de existirem pequenas porcentagens de zonas

definidas pelo modelo numérico sem a proteção do raio fixo calculado, não se percebeu a necessidade clara de mudança do valor de raio. Poços de vazões registradas de 1, 15 e 4 m<sup>3</sup>/h, respectivamente, e de potenciometrias distintas, porém, tendo os poços 1298 e 1562 valores de potenciometria acentuados, de 418,87 e 403 metros, respectivamente (MMA, 2015). Ambos esses poços apresentaram uma semelhança grande entre os resultados de RFC e para o MN, o que indica que talvez os seus picos de potenciometria corroborem para isso, garantindo uma tendência mais circular aos PPPs. Esses três poços também apresentaram uma condutividade interpolada comum de 0,000012 m/s.

Em relação às zonas de proteção para 5 anos, o método do raio fixo calculado também mostrou mais semelhanças em relação ao modelo numérico. Ao comparar os resultados de ambos os métodos, foi verificado que os resultados do RFC demonstrariam formas mais semelhantes às respostas do MN caso os raios definidos pelo RFC e multiplicados por 2 fossem diminuídos, e isso foi observado para poços geralmente com vazões maiores, onde a média calculada foi de 26,98 m<sup>3</sup>/h.

Para alguns poços, as áreas definidas pelo RFC cobriram boa parte dos PPPs de 5 anos delimitados pelo MN; contudo, apesar de uma boa porcentagem de proteção mútua, a porcentagem de área cuja proteção é oferecida somente pelo RFC foi elevada, tendendo talvez a uma proteção desnecessária; sendo que a diminuição do raio de proteção ofereceria uma diminuição significativa da proteção mútua entre esses métodos. Isso ocorreu geralmente para poços de vazões mais baixas registradas no banco de dados, cuja média foi de 7,47 m<sup>3</sup>/h, e em zonas de gradientes hidráulicos, definidos a partir da metodologia explicada na seção 5.5.2.2, pequenos (entre 0,001 e 0,02).

Houve resultados que indicaram que tanto o RFC quanto o método de Wyssling (1979) não geraram resultados bem comparáveis ao MN, e isso ocorreu para poços de baixas vazões registradas no banco de dados (valores entre 0,4 e 12 m<sup>3</sup>/h, e com média de 4,68 m<sup>3</sup>/h) e em baixos gradientes hidráulicos observados a partir da metodologia apresentada na seção 5.5.2.2. Porém, para o tempo de 5 anos, foram observados alguns poços (SIA 48, 244 e 2532) que, apesar de terem resultados semelhantes entre o modelo numérico e o RFC, mesmo que esse último necessitasse de ajustes, apresentaram também uma correspondência razoável entre o modelo numérico e o método de Wyssling.

Tabela 16 – Resultados para a comparação entre as geometrias de PPPs obtidas para os três métodos utilizados, conforme a técnica de comparação apresentada em USEPA (1987).

SIA	RFC			WYSSLING			RFC			WYSSLING			RFC			WYSSLING		
	50 dias						500 dias						1825 dias					
	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE
<b>48</b>	94	6	7	58	42	146	100	0	135	91	9	173	100	0	131	95	5	19
<b>244</b>	100	0	46	69	31	783	100	0	185	84	16	251	100	0	200	85	15	86
<b>246</b>	70	30	2	22	78	0	100	0	140	9	91	26	98	2	123	6	94	23
<b>247</b>	41	59	10	12	88	3	99	1	120	8	92	23	99	1	178	4	96	31
<b>263</b>	63	37	46	28	72	3	81	19	157	9	91	22	69	31	206	4	96	28
<b>423</b>	100	0	34	86	14	75	100	0	171	60	40	28	100	0	171	20	80	26
<b>502</b>	91	9	80	64	36	1370	100	0	257	77	23	878	100	0	282	81	19	461
<b>519</b>	99	1	19	64	36	1064	100	0	161	92	8	702	100	0	212	97	3	404
<b>567</b>	95	5	23	41	59	0	100	0	193	15	85	27	100	0	222	8	93	34
<b>1228</b>	8	92	0	2	98	0	35	65	11	17	83	0	37	63	41	8	92	2
<b>1298</b>	23	77	0	9	91	0	93	7	27	32	68	5	65	35	90	7	93	14
<b>1411</b>	48	52	0	39	61	1353	100	0	132	82	18	2029	99	1	152	86	14	1114
<b>1494</b>	52	48	24	29	71	8	51	49	99	18	82	23	39	61	151	5	95	22
<b>1562</b>	69	31	1	54	46	753	99	1	34	70	30	200	99	1	54	66	34	72
<b>1566</b>	82	18	2	73	27	32	100	0	82	51	49	9	100	0	97	34	66	19
<b>1923</b>	21	79	14	52	48	92	52	48	106	35	65	82	41	59	134	14	86	50
<b>2166</b>	33	67	9	27	73	8	81	19	117	25	75	30	63	37	121	7	93	21
<b>2198</b>	77	23	13	77	23	4	100	0	117	52	48	10	100	0	119	41	59	24
<b>2204</b>	38	62	0	32	68	0	88	12	52	26	74	12	98	2	129	20	80	51
<b>2207</b>	33	67	6	13	87	0	100	0	146	21	79	15	100	0	309	17	83	37
<b>2532</b>	38	62	3	46	54	245	94	6	97	83	17	181	96	4	125	87	13	57
<b>3536</b>	77	23	5	19	81	3	100	0	104	8	92	20	100	0	185	5	95	32
<b>4400</b>	39	61	5	50	50	23	89	11	125	43	57	40	100	0	221	28	72	33

SIA	RFC			WYSSLING			RFC			WYSSLING			RFC			WYSSLING		
	50 dias						500 dias						1825 dias					
	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE
<b>4491</b>	48	52	0	33	67	0	95	5	109	31	69	24	66	34	172	8	92	26
<b>5084</b>	91	9	35	62	38	9	100	0	271	30	70	70	100	0	307	10	90	47

%M – percentual de proteção mútua entre o método e o resultado para MN

%SP – percentual sem proteção oferecida pelo método em relação ao MN

%PE – percentual de proteção errônea (desnecessária)

As comparações entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos indicaram que o uso do raio fixo calculado pode ser realizado na maioria das vezes no Aquífero Caiuá no Estado do Paraná, principalmente quando as vazões dos poços são altas, como já era previsto de acordo com a bibliografia (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007); porém, muitas vezes percebeu-se que os valores de raios obtidos a partir da equação volumétrica podem ser diminuídos para que não protejam áreas que talvez não necessitem de manejo. Contudo, até aqui, essas comparações foram realizadas considerando as áreas de proteção definidas a partir do dobro do valor de raio calculado quando utilizada a espessura saturada presente no banco de dados. Assim, quando comparados os PPPs definidos pelo MN às áreas definidas pelo RFC a partir das seções filtrantes dos poços (Tabela 17), foi observado um comportamento semelhante à comparação do RFC quando utilizados os valores em dobro dos raios obtidos a partir das espessuras saturadas, uma vez que a tomada de decisão para esse fator de multiplicação considerou os resultados de RFC obtidos com o uso de seções filtrantes.

Foi percebido que, no geral, os poços de vazões mais elevadas (acima de 29 m<sup>3</sup>/h) apresentaram PPPs para o método do RFC (com os valores de seções filtrantes) que protegeram áreas consideradas como desnecessárias pelo MN, assim como ocorreu quando utilizadas as espessuras saturadas para cálculo de raio fixo. Contudo, o único poço que o uso da seção filtrante apresentou um resultado mais satisfatório para o RFC foi o de identificação 1411 e para o tempo de 500 dias, uma vez que o modelo numérico gerou para esse poço uma área de 500 dias proporcionalmente menor em relação às áreas definidas para os outros tempos.

Tabela 17 - Comparação entre as áreas definidas pelo RFC e pelo MN quando utilizados os valores de seções filtrantes no cálculo do raio fixo calculado.

SIA	RFC com o uso dos valores de seção filtrante* disponibilizados								
	50 dias			500 dias			1825 dias		
	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE	% M	% SP	% PE
<b>244</b>	100	0	52	100	0	197	100	0	212
<b>246</b>	77	23	4	100	0	173	100	0	153
<b>263</b>	55	45	31	71	29	118	61	39	157
<b>502</b>	100	0	130	100	0	381	100	0	415
<b>567</b>	100	0	112	100	0	426	100	0	478
<b>1411</b>	18	82	0	83	17	2	63	37	29

\*Os valores de seção filtrante utilizados nos cálculos de RFC foram disponibilizados em SANEPAR (2018).

%M – percentual de proteção mútua entre o método e o resultado para MN

%SP – percentual sem proteção oferecida pelo método em relação ao MN

%PE – percentual de proteção errônea (desnecessária)

#### 6.4.1 Qual Método é Indicado para o Aquífero Caiuá?

No geral, o método do Raio Fixo Calculado foi o que resultou mais proximamente aos perímetros de proteção definidos pelo modelo numérico. Contudo, o RFC é de fácil aplicação, enquanto que a MN exige bastante conhecimento técnico (USEPA, 1987); logo, o método do RFC foi o indicado para o aquífero Caiuá, no Paraná.

Conforme avaliado até aqui, quando o método do RFC for utilizado no aquífero, o raio obtido - quando utilizada a espessura saturada presente em MMA (2015) para cálculo - deve ser multiplicado por 2; ou então, como indicado em Kraemer, Haitjema e Kelson (2007), as seções filtrantes dos poços devem ser consideradas para o cálculo do RFC. Contudo, independentemente da maneira de obtenção do RFC a partir da equação volumétrica (USEPA, 1987), foram definidas, a partir dos resultados desta pesquisa, algumas considerações que devem ser realizadas no aquífero paranaense Caiuá para a definição de PPPs, e são elas:

1 – Para o tempo de 50 dias:

a) Quando se desejar delimitar PPPs para poços com vazões abaixo de 96 m<sup>3</sup>/dia o método do modelo numérico deve ser utilizado; caso esse gere um resíduo

alto para os poços de interesse, os resultados dos três métodos, de Raio Fixo Calculado, de Wyssling (1979) e de Modelo Numérico podem ser avaliados em conjunto, em busca de um melhor perímetro de proteção;

b) Quando se desejar definir PPPs para poços com vazões entre 96 e 360 m<sup>3</sup>/dia, o método do RFC pode ser utilizado, e caso seja usado o valor de espessura saturada presente em MMA (2015) e não o valor de seção filtrante, os raios encontrados devem ser multiplicados por 3,2 ao invés de 2; e caso a seção filtrante esteja disponível para uso, o raio obtido a partir dessa pode ser suavemente aumentado para precaução, ou seja; em busca de um raio mais conservador;

c) Quando se desejar definir PPPs para poços com vazões acima 360 m<sup>3</sup>/dia, o método do RFC também pode ser utilizado. Nesse caso, quando empregado o valor de espessura saturada ao invés do valor de seção filtrante, os raios encontrados devem ser multiplicados por 2; como definido anteriormente; e no cenário em que a seção filtrante esteja disponível para uso, o raio obtido a partir dela pode ser mantido para a definição dos PPPs, essa medida pode gerar uma maior porcentagem de proteção sem necessidade em relação ao MN; porém, essa decisão foi tomada visando a precaução contra a contaminação das águas captadas por poços que operam nessas vazões. Uma vez que a tabela 18 mostra que a diminuição do fator de multiplicação pode levar à diminuição das zonas de proteção mútua quando o MN é comparado ao RFC;

2) Para o tempo de trânsito de 500 dias:

a) Quando se desejar delimitar PPPs para poços com vazões abaixo de 96 m<sup>3</sup>/dia o método do modelo numérico deve ser utilizado; caso esse gere um resíduo alto para os poços de interesse, os resultados dos três métodos, de Raio Fixo Calculado, de Wyssling (1979) e do próprio Modelo Numérico podem ser avaliados em conjunto, em busca de um PPP mais seguro;

b) Porém, caso esses poços de baixa vazão estejam centrados em zonas de picos de potenciometria, isto é, cuja potenciometria no entorno adjacente seja maior do que a de seus entornos mais distantes, o método do RFC pode ser utilizado como definido aqui, ou seja, multiplicando por 2 o valor de raio obtido a partir da espessura saturada presente no banco de dados usado, de MMA (2015), ou então, calculado a partir do valor de seção filtrante disponível;

c) Ao se trabalhar com poços de vazões entre 96 e 288 m<sup>3</sup>/dia, indica-se o método do RFC como atribuído neste trabalho; e sem diminuições nos valores

obtidos de raio, seja a partir do uso do valor de seção filtrante, ou então, atribuindo a multiplicação por 2 do raio alcançado por meio do valor de espessura saturada. Essa decisão pode acarretar em extensas zonas de proteção que possivelmente não seriam cobertas pelo modelo numérico; mas assim, o risco de o RFC não proteger extensas áreas de atenção necessária será pequeno;

d) Na proteção de poços de vazões acima de 288 m<sup>3</sup>/dia o método do RFC pode ser empregado, desde que o raio obtido por meio da espessura saturada seja multiplicado apenas por 1,8; ou então, que o raio obtido a partir do uso da seção filtrante seja ligeiramente reduzido, não devendo esse último raio ser menor que o valor definido pela aplicação da primeira opção;

3 – Para o tempo de trânsito de 5 anos:

a) Para poços com vazões de até 120 m<sup>3</sup>/dia e em zonas de baixo gradiente hidráulico, recomenda-se a aplicação da modelagem numérica, e caso os resíduos sejam altos, a avaliação em conjunto dos três métodos trabalhados aqui é indicada para a tentativa de uma proteção mais segura;

b) Para poços com vazões entre 120 e 360 m<sup>3</sup>/dia indica-se o uso do método do RFC, seja a partir do uso de valores de seções filtrantes, ou então multiplicando o valor de raio obtido a partir da espessura saturada presente em MMA (2015) por 2;

c) Para poços com vazões acima de 360 m<sup>3</sup>/dia indica-se que os raios conferidos a partir do uso da espessura saturada sejam multiplicados por 1,7, ao invés de 2, como avaliado anteriormente, na seção 6.1.1.; ou que caso o valor de seção filtrante seja utilizado, o raio obtido seja levemente reduzido, não devendo esse raio ser inferior ao obtido pela multiplicação por 1,7 do raio referente à espessura saturada.

Esses requisitos e condições para o uso do método do RFC foram avaliados conforme os resultados de comparações entre os métodos, além da observação das semelhanças entre as propriedades dos poços que tenderam a ter resultados de comparações similares. Enquanto que a definição dos novos fatores de multiplicação para os valores de raios fixos calculados, por meio do uso das espessuras saturadas registradas no banco de dados, foi efetuada a partir da comparação entre o RFC e o MN, feita preliminarmente, avaliando o percentual de proteção errônea definido pelo RFC; e por meio de uma segunda comparação, onde os 25 poços trabalhados durante a modelagem numérica foram reagrupados, de acordo com as condições elencadas acima, e novas comparações entre RFC e MN foram realizadas (Tabelas

18 e 19), dessa vez, utilizando novos valores de fatores de multiplicação, diferentes de 2.

Tabela 18 – Comparação entre o MN e o RFC, utilizando-se, para esse último, a espessura saturada presente em MMA (2015), assim como novas multiplicações para os raios obtidos para o tempo de 50 dias.

50 dias									
Raio obtido a partir de H e multiplicado por 3,2					Raio obtido a partir de H e multiplicado por 1,8				
SIA	Vazão registrada em MMA (2015) (m <sup>3</sup> /dia)*	M%	SP %	PE%	SIA	Vazão registrada em MMA (2015) (m <sup>3</sup> /dia)*	M%	SP %	PE %
246	312	100	0	83	244	696	100	0	18
247	170,64	81	19	50	423	864	92	8	16
1411	78	100	0	24	502	876	82	18	56
1494	168	88	12	107	519	1002,72	91	9	5
1562	360	100	0	80	567	960	84	16	12
1566	288	100	0	114					
2198	108	100	0	131					
2204	96	81	19	17					
2207	72	69	31	31					
2532	96	76	24	29					
3536	229,68	100	0	110					
4400	96	71	29	42					
4491	144	99	1	23					

\*Vazão registrada em MMA (2015) em m<sup>3</sup>/h e multiplicada por 24 horas.

%M – percentual de proteção mútua entre o método e o resultado para MN

%SP – percentual sem proteção oferecida pelo método em relação ao MN

%PE – percentual de proteção errônea (desnecessária)

Tabela 19 – Comparação entre o MN e o RFC, utilizando-se, para esse último, a espessura saturada presente em MMA (2015), assim como novas multiplicações para os raios obtidos, para os tempos de 500 e 1825 dias.

500 DIAS					1825 DIAS (5 ANOS)				
Raio obtido a partir de H e multiplicado por 1,8					Raio obtido a partir de H e multiplicado por 1,7				
SIA	Vazão registrada em MMA (2015) (m <sup>3</sup> /dia)*	M%	SP %	PE%	SIA	Vazão registrada em MMA (2015) (m <sup>3</sup> /dia)*	M%	SP %	PE %
<b>48</b>	332,4	100	0	90	<b>247</b>	170,64	90	10	110
<b>244</b>	696	100	0	131	<b>3536</b>	229,68	100	0	106
<b>246</b>	312	97	3	97	<b>263</b>	288	58	42	141
<b>423</b>	864	100	0	120	<b>1566</b>	288	96	4	47
<b>502</b>	876	100	0	189	<b>246</b>	312	90	10	70
<b>519</b>	1002,72	100	0	111	<b>48</b>	332,4	93	7	73
<b>567</b>	960	100	0	138	<b>1562</b>	360	86	14	24
<b>1562</b>	360	92	8	16	<b>244</b>	696	100	0	116
<b>1566</b>	288	97	3	50	<b>423</b>	864	98	2	98
<b>5084</b>	1272	100	0	201	<b>502</b>	876	100	0	176
					<b>567</b>	960	99	1	133
					<b>519</b>	1002,72	100	0	125
					<b>5084</b>	1272	100	0	195

\*Vazão registrada em MMA (2015) em m<sup>3</sup>/h e multiplicada por 24 horas.

%M – percentual de proteção mútua entre o método e o resultado para MN

%SP – percentual sem proteção oferecida pelo método em relação ao MN

%PE – percentual de proteção errônea (desnecessária)

Conforme USEPA (1994), uma modelagem numérica requer mão de obra treinada e até mesmo com experiência para a sua implementação. Assim, para os casos de vazões pequenas, onde não foram sugeridos o método de RFC e nem mesmo o método de Wyssling (1979); mas não existem recursos para o emprego da modelagem numérica, indica-se em última instância o uso do método do RFC, onde se recomenda, para o tempo de trânsito de 50 dias, a multiplicação do raio obtido por 3,2, ou então, um leve aumento no valor de raio gerado por meio do uso da seção filtrante; e para os tempos de 500 ou de 1825 dias, sugere-se o valor 2 como

o fator de multiplicação – quando utilizado o valor de espessura saturada, lembrando que aqui foram usados valores de H presentes em MMA (2015) - ou então, que o valor de raio obtido por meio da seção filtrante seja mantido. No entanto, salienta-se que talvez esse método gere zonas de proteção de maiores incertezas. Destaca-se também, que a partir dos códigos criados aqui, ou até mesmo da ferramenta Darcy Flow do ArcGIS, a avaliação do método de Wyssling pode ser também considerada, até para casos onde se deseja testar o método híbrido de Paradis (2000).

#### 6.4.2 Novos Valores Resultantes para o Raio Fixo Calculado

Após as avaliações realizadas depois da acareação dos métodos, e com base nas recomendações descritas acima, os valores de raios fixos calculados para os 365 poços, operantes e não operantes do aquífero Caiuá, apurados na primeira etapa deste trabalho, foram multiplicados de acordo com os novos fatores de multiplicação definidos após a comparação entre os resultados da modelagem numérica e do RFC. E os valores mínimos, máximos, médias e medianas observadas para cada condição podem ser avaliados na tabela 20.

Tabela 20 – Resumo estatístico dos valores de raios fixos calculados a partir da espessura saturada e da equação volumétrica, para poços operantes e não operantes do aquífero paranaense Caiuá.

<b>Vazão (m<sup>3</sup>/dia):</b>		<b>Até 96</b>	<b>De 96 a 360</b>	<b>Acima de 360</b>
<b>RFC para 50 dias</b>	Mínimo (m)	14,82	32,98	30,10
	Máximo (m)	79,56	103,66	106,55
	Médio (m)	39,45	54,58	56,47
	Mediano (m)	39,70	52,97	54,35
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/dia):</b>		<b>Até 96</b>	<b>De 96 a 288</b>	<b>Acima de 288</b>
<b>RFC para 500 dias</b>	Mínimo (m)	29,29	65,18	60,07
	Máximo (m)	157,24	169,03	303,25
	Médio (m)	77,81	104,04	153,96
	Mediano (m)	78,05	102,37	146,59
<b>Vazão (m<sup>3</sup>/dia):</b>		<b>Até 120</b>	<b>De 120 a 360</b>	<b>Acima de 360</b>
<b>RFC para 1825 dias</b>	Mínimo (m)	55,95	126,66	154,57
	Máximo (m)	300,40	391,42	547,17
	Médio (m)	158,15	213,57	290,88
	Mediano (m)	157,99	211,07	279,26

## 7 CONCLUSÕES

O foco principal deste trabalho foi definir se existe algum método que pode ser melhor aplicado no aquífero Caiuá, no Paraná, e ao mesmo tempo, que pode trazer boas chances de uma proteção eficaz. No geral, concluiu-se que o método do Raio Fixo Calculado foi o mais indicado para aplicação no aquífero. Logicamente, existem técnicas de maior acurácia; porém, mais complexas para aplicação, como o modelo numérico (USEPA, 1987); técnica que também pode ser de demorada realização (FOSTER et al., 2006). Portanto, devido à complexidade do método de modelagem numérica, técnica que também foi testada nesta pesquisa, recomenda-se o uso do método do Raio Fixo Calculado para o aquífero paranaense Caiuá, o qual apresentou uma correlação geométrica (sobreposição de áreas) razoavelmente boa em relação aos resultados do modelo numérico. Miller, Chudek e Babcock (2003) concluem em sua pesquisa, em Whatcom County, que o RFC pode ser um bom primeiro passo para a proteção de poços da área quando não existem recursos; assim, aqui também se tira essa mesma conclusão.

Essa indicação do método de RFC para o aquífero Caiuá está associada ao fato de que, conforme USEPA (1987), a escolha dos métodos para a delimitação de PPPs, além dos objetivos de proteção e da acurácia dos resultados, também deve considerar questões técnicas, como a simplicidade dos dados, e questões políticas, como o entendimento do método por governantes, por exemplo; além de ponderar o custo com profissional, entre outros custos para a delimitação de PPPs. Assim, devido às semelhanças entre o RFC e o MN, o RFC foi o indicado para essa região. Porém, quando houver conhecimento técnico para a aplicação da modelagem numérica, logicamente, sugere-se que essa também seja avaliada, principalmente para poços de baixas vazões, no geral, inferiores a 96 m<sup>3</sup>/dia.

O método do raio fixo calculado foi considerado como adequado para o aquífero; porém, com certas condições de uso. A indicação de Kraemer, Haitjema e Kelson (2007) de utilizar os valores de seção filtrante dos poços ao invés da espessura saturada na equação volumétrica de raio; por exemplo, foi importantíssima para as tomadas de decisão realizadas, uma vez que os valores de espessura saturada presentes em MMA (2015), banco de dados utilizado, tendem a ser elevados, resultando em valores de raios fixos calculados pequenos. Ainda, é importante mencionar que MMA (2015) recomenda o uso cauteloso dos valores de

espessura saturada presentes em sua base de dados, o que também se aconselha aqui para futuras delimitações de PPPs, quando houver ferramentas para isso.

As condições para um uso possivelmente mais adequado do RFC no aquífero Caiuá, no Paraná, estão expressas detalhadamente na seção 6.4.1, e estão estritamente relacionadas com a vazão dos poços. Isso indica a forte correlação entre a vazão e os valores de raio fixo calculado, o que é explicado pela equação volumétrica (KRAEMER; HAITJEMA; KELSON, 2007; USEPA, 1987). O modelo numérico, como avaliado, também possui forte influência da vazão dos poços, além de demais parâmetros de entrada e de saída de água, o que também pode ser explicado pela equação utilizada, isto é, a equação diferencial parcial de fluxo expressa em McDonald e Harbaugh (1988) e utilizada pelo *software* MODFLOW.

Outro método testado neste trabalho foi o de Wyssling (1979), que tendeu a mostrar pouca eficiência de proteção, principalmente por gerar algumas extensões impraticáveis de proteção no sentido perpendicular ao fluxo estimado da água subterrânea. O que se acredita ser explicado pelas equações 5 e 6, que definem as larguras de proteção de um PPP, onde o parâmetro de gradiente hidráulico (cujos valores estimados tenderam a ser baixíssimos para o aquífero) se encontra como denominador.

Outro objetivo proposto nesta pesquisa foi a estimativa de valores de perímetros de proteção para poços do aquífero Caiuá; meta que foi atingida. Os valores observados para raios, a partir do método de RFC e após a comparação entre os métodos, a depender das vazões de exploração, foram, para o tempo de 50 dias, de 40 metros para vazões de até 96 m<sup>3</sup>/dia; de 53 metros para vazões entre 96 e 360 m<sup>3</sup>/dia; e de 54 metros para vazões acima de 360 m<sup>3</sup>/dia. Enquanto que para 500 dias, esses raios para a proteção circular foram de 78 metros para vazões até 96 m<sup>3</sup>/dia; de 102 metros para vazões entre 96 e 288 m<sup>3</sup>/dia; e de 147 metros para vazões acima disso. Já para o tempo de 5 anos, os raios avaliados para uma proteção circular foram de 158 metros para vazões até 120 m<sup>3</sup>/dia; de 211 metros para vazões entre 120 e 360 m<sup>3</sup>/dia; e de 279 metros para vazões acima de 360 m<sup>3</sup>/dia. Lembra-se também, que as estimativas e recomendações feitas aqui são válidas apenas para o aquífero Caiuá, no Paraná.

Com base nas comparações entre os PPPs gerados pelo RFC e pelo MN, concluiu-se que o método de RFC melhor se aplica para vazões elevadas, no geral acima de 96 m<sup>3</sup>/dia. Isso confere com a teoria expressa em Kraemer, Haitjema e

Kelson (2007), que falam sobre o método do RFC se adequar a poços com vazões dominantes. Acredita-se ainda, que o método do RFC obteve uma melhor correspondência ao modelo numérico, em relação ao método de Wyssling (1979), devido aos baixos gradientes hidráulicos encontrados para a região. Pois, Moinante e Lobo-Ferreira (2007), Kraemer, Haitjema e Kelson (2007) e até Wyssling (1979) falam da importância de gradientes inclinados para o método desse último autor. Assim, para poços com vazões baixas, abaixo de 96 m<sup>3</sup>/dia, indica-se que a modelagem numérica seja efetuada para análise.

Iritani (1998) indicou que as propriedades tidas por ela como as mais sensíveis em seu modelo numérico fossem melhores definidas para o aprimoramento de modelos futuros requeridos em sua área de trabalho; assim, aqui também se sugere que, quando utilizada a modelagem numérica para o aquífero paranaense Caiuá, os valores de recarga e de condutividade hidráulica ( $K_x$  e  $K_y$ ) sejam melhores detalhados para aplicação.

Hirata (1994) exemplifica que, quando já existem atividades em uma área de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, é preciso definir quais atividades que oferecem maiores riscos de contaminação à água subterrânea, necessitando essas áreas de uma maior atenção de cunho ambiental para a posterior tomada de medidas, como um programa de monitoramento adequado, por exemplo.

Assim, recomenda-se que a avaliação da ocupação do solo no interior dos PPPs definidos aqui seja realizada em um futuro próximo. Outra recomendação de trabalho futuro é a aferição desses PPPs delimitados aqui por meio de traçadores na água subterrânea, pois USEPA (1994) relata que esses traçadores podem auxiliar a definir direção, velocidade da água subterrânea e até mesmo a zona de recarga. E de acordo com Hirata (1994), isótopos ambientais possibilitam o teste dos tempos de trânsito da água subterrânea estimados por métodos indiretos, como o analítico e o numérico. Porém, lembra-se que aqui foi considerada a zona saturada somente, e não o solo ou as porções rochosas acima disso.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, B.; FOSTER, S. S. D. Land-Surface Zoning for Groundwater Protection. **Water and Environment Journal**, v. 6, n. 4, p. 312-319, 1992.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA, BRASIL). Sistema Nacional de Informações de Recursos Hídricos. Disponível em < <http://www.snirh.gov.br/> >. Acesso em dezembro de 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA, BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília: ANA, 2018b.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport**. 2ed. Academic Press, 2015.
- ANDRIOTTI, J. L. **Notas de geoestatística**. 2002. Disponível em: < [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/519/1/Art\\_Andriotti\\_notas\\_geoestatistica.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/519/1/Art_Andriotti_notas_geoestatistica.pdf)>.
- AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. Águas subterrâneas. In: **Geologia de Engenharia**. São Paulo, SP, Brasil: ABGE, p. 111-130, 1998.
- BABAK, O.; DEUTSCH, C. V. Statistical approach to inverse distance interpolation. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 5, p. 543-553, 2009.
- BADV, K.; DERISZADEH, M. Wellhead protection area delineation using the analytic element method. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 161, n. 1-4, p. 39-54, 2005.
- BARBOSA, L. K. L.. **Zoneamento de aquíferos através da delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público de água: o caso da cidade de João Pessoa**. 2007. 100f. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 2007.
- BETTÚ, D. F. et al. Compartimentação estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Caiuá e Serra Geral no Noroeste do Paraná - Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 393-409, 2006.
- BRITO, D. O. **Avaliação do Perigo de Contaminação da Água Subterrânea por Fontes Pontuais na Macrozona Cidade Radiocêntrica de Porto Alegre**,

- Rio Grande do Sul.** 2013. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- CARVALHO, A. M. de; HIRATA, R. C.. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. **Geologia USP. Série Científica**, v. 12, n. 1, p. 53-70, 2012.
- CELLIGOI, A. **Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná.** 2000. 150 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2000.
- CELLIGOI, A.; DUARTE, U.. Hidrogeoquímica do Aqüífero Caiua no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 51, 2002.
- CIONEK, Vivian de Mello; BEAUMORD, Antonio Carlos; BENEDITO, Evanilde. Protocolo de Avaliação Rápida do Ambiente para riachos inseridos na região do arenito Caiuá–Noroeste do Paraná. **Maringá: EDUEM**, 2011.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ – SANEPAR. Tabela com informações de espessuras de filtros de poços do Paraná. Disponibilizada em 2018.
- CPRM. GeoSGB – Visualizador de mapas GIS. Localização de drenagens principais do Paraná. Disponível em: < <http://geowebapp.cprm.gov.br/ViewerWEB/>>. Acesso em janeiro de 2019.
- CPRM. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS). Disponível em < <http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/apresentacao.php> >. Acesso em novembro de 2018b.
- CPRM. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Disponível em: < <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>>. Acesso em abril de 2018.
- DINIZ et al. CPRM. Dados Vetoriais: **Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo.** 2014. Disponível em < <http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Mapa-Hidrogeologico-do-Brasil-ao-Milionesimo-756.html>>. Acesso em setembro de 2017.
- DNPM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Portaria nº 231 de 1998. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnmp/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-231-em-31-07-1998-do-diretor-geral-do-dnmp/view>>. Acesso em dezembro de 2018.

- ESRI. ArcGIS Desktop. Disponível em: < <http://desktop.arcgis.com/en/> >. Acesso em agosto de 2018d.
- ESRI. GeoNet. The ESRI Community. Disponível em: < <https://community.esri.com/thread/20473> >. Acesso em agosto de 2018e.
- ESRI. How Darcy Flow and Darcy Velocity work. Disponível em: < <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-darcy-flow-and-darcy-velocity-work.htm>>. Acesso em agosto de 2018a.
- ESRI. How proximity tools calculate distance. Disponível em < <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/how-near-analysis-works.htm> >. Acesso em agosto de 2018c.
- ESRI. Near - Analysis. Disponível em: < <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/analysis/near.htm> > . Acesso em agosto de 2018b.
- ESRI. *Tool Reference - Points to Line*. Disponível em < <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/data-management/points-to-line.htm>>. Acesso em agosto de 2018f.
- ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL. Decreto nº 32.955. São Paulo, Brasil, 1991.
- EXPÓSITO, J. L. et al. Groundwater Protection Using Vulnerability Maps and Wellhead Protection Area (WHPA): A Case Study in Mexico. **Water Resour Manage. Springer**, v. 24, n. 4, p. 219–4236, 2010.
- FERON, G. L. **Avaliação da Vulnerabilidade e do Risco de Contaminação de Aquíferos por Postos de Combustível Localizados na Região Central de Canoas – RS**. 2013. 85f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- FETTER, C.W. **Aplied Hydrogeology**. 4 ed. Ohio, 1988.
- FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas**. Tradução Daniel Vieira. Rio de Janeiro: Elsevier, 2ª edição, 2015.
- FOSTER, S. et al. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea um Guia para Empresas de Abastecimento de Água, Órgãos Municipais e Agências Ambientais**. Tradução Silvana Vieira. Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial, 2006.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk assessment; a methodology using available data. In: **Groundwater pollution risk assessment; a methodology using available data**. CEPIS, 1988.

- FOSTER, S. S. D.; SKINNER, A. C. Groundwater protection: the science and practice of land surface zoning. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences**, v. 225, p. 471-482, 1995.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R.C.A.; ROCHA, G. A. Riscos de Poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. **Águas Subterrâneas**, 1988.
- FRITZSONS, E. et al. Análise da pluviometria para definição de zonas homogêneas no Estado do Paraná. Raega - **O Espaço Geográfico em Análise**, v. 23, 2011.
- HARBAUGH, A. W. et al. **MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - user guide to modularization concepts and the ground-water flow process**. Reston, Virgínia: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2000.
- HARBAUGH, A. W. **MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground-Water Flow Process**. Reston, Virgínia: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2005.
- HEALY, R.W.; SCANLON, B. R. **Estimating Groundwater Recharge**. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2010.
- HEATH, R. C. **Basic groundwater hydrology**. Carolina do Norte: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 1982. 81 p.
- HERNANDEZ, P. G. L.; ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. V. M. Técnicas de espacialização de parâmetros hidrogeológicos: estudo de caso em aquíferos sedimentares no Estado do Paraná. In: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, **Águas Subterrâneas**, 2018.
- HERNANDEZ, P. R. L. **Definição de áreas potenciais à captação de água subterrânea em aquíferos sedimentares no Estado do Paraná**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2019. No Prelo.
- HILL, M. C. **Methods and guidelines for effective model calibration**. Denver, Colorado: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 1998.
- HILL, M. C. **MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - user guide to the observation, sensitivity, and parameter-estimation processes and three post-processing programs**. Denver, Colorado: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2000.

- HIRATA, R. C. A. **Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas: estudo de casos no Estado de São Paulo**. 1994. 233 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1994.
- HIRATA, R. C. A. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais. **Revista do Instituto Geológico**, v. 14, n. 2, p. 39-61, 1993.
- IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico: 2008**. Rio de Janeiro, 2010.
- IDEM. **Indiana Wellhead Protection**. Disponível em < [http://in.gov/idem/cleanwater/files/wellhead\\_protection\\_guidance.pdf](http://in.gov/idem/cleanwater/files/wellhead_protection_guidance.pdf)>. Acessado em março de 2018.
- IEZZI, G. **Fundamentos de Matemática Elementar – Trigonometria**. 2ª ed., São Paulo: Atual Ed., 1977.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Índice de Organização Territorial, Malhas Territoriais. 2015. Disponível em < [ftp://geofp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/malhas\\_territoriais/malhas\\_municipais/municipio\\_2015/](ftp://geofp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2015/)>. Acesso em janeiro de 2018.
- INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ – AGUASPARANÁ. **Dados para Download**. Disponível em < <http://www.aguasparana.pr.gov.br/pagina-79.html> >. Acesso em novembro de 2018.
- INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ – AGUASPARANÁ. **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos: Parte B – Diagnóstico das Disponibilidades Hídricas Subterrâneas**. Paraná, 2010.
- IRITANI, M. A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. 1998. 210f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1998.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço**, 2. ed., São Paulo: Instituto Geológico, 2012.
- KLEIN, H.; HULL, J. E. **Biscayne aquifer, southeast Florida**. US Geological Survey,, 1978.
- KRAEMER, S. R.; HAITJEMA, H. M.; KELSON, V. A. **Working with WhAEM2000: capture zone delineation for a city wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer supporting wellhead protection**. Washington, DC, EPA/600/R-05/151, 2007.

- LANGEVIN, C. D. et al. **Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model. Chapter 55, Modeling Techniques.** Reston, Virgínia: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2017.
- MAACK, R. **Geografia física do Paraná.** Curitiba: Liv., 1968.
- MANOEL FILHO, J. Ocorrência das águas subterrâneas. In: FEITOSA, A.C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**, v. 2, p. 13-33, 2000.
- MARCELINO, M. **Delimitação de Perímetros de Proteção dos Poços Tubulares (PPP) Empregando a Técnica de Modelagem Numérica Tridimensional.** 1999. 137 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, 1999.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. **Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey – Chapter A1 – A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model.** Serviço Geológico dos Estados Unidos, 1988.
- MEINZER, O. E. **The occurrence of ground water in the United States with a discussion of principles.** University of Chicago, 1923.
- MENEZES, J. P. C. et al. Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 173-186, 2014.
- MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D. **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 265-279, 2004.
- MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **B. Geoci. Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.
- MILLER, C.; CHUDEK, P.; BABCOCK, S. A comparison of wellhead protection area delineation methods for Public Drinking Water Systems in Whatcom County, Washington. **Journal of Environmental Health**, 66, 2, Technology Collection, p. 17-24, 2003.
- MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ S.A. **Atlas Geológico do Estado do Paraná.** Curitiba: MINEROPAR, v. 1, 2001.
- MINEROPAR - MINERAIS DO PARANÁ; UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná - Escala 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000.** Curitiba, 2006. 63 p.

- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Águas Subterrâneas: um Recurso a Ser conhecido e protegido**. Brasília, 2007.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Carta das Águas Subterrâneas do Paraná. Resumo Executivo**. Brasília, DF, 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Carta das Águas Subterrâneas do Paraná**. Banco de Dados em SIG. Brasília, DF, 2015b.
- MOINANTE, M. J.; LOBO-FERREIRA, J. P. On wellhead protection assessment methods: a case study in Montemor-o-Novo, Portugal. **IAHS publication**, v. 310, p. 181, 2007.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6. ed. – São Paulo : Saraiva, 2010.
- MOTA, M. P.; PEREIRA, L. W. Kanashiro; FAVERO, E. L. Javatool: Uma ferramenta para o ensino de programação. In: **XXVIII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**. Belém, 2008. p. 127-136.
- PARADIS, Daniel et al. Comparative study of methods for WHPA delineation. **Groundwater**, v. 45, n. 2, p. 158-167, 2007.
- PARADIS, Daniel. **Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont Laurentien**. 2000. 262f. Tese de Doutorado. Universidade do Québec, Canadá, 2000.
- POLLOCK, D. W. **Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional finitedifference ground-water flow model**. Reston, Virgínia: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 1989. 188 p.
- POLLOCK, D. W. **User guide for MODPATH version 6 - A particle-tracking model for MODFLOW**. Reston, Virgínia: Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2012. 58 p.
- PYTHON. **Documentation, Mathematical Functions**. Disponível em <<https://docs.python.org/2/library/math.html>>. Acesso em março de 2019.
- RAYMOND, H. A. et al. Using Analytic Element Models to Delineate Drinking Water Source Protection Areas. **Ground Water**, v. 44, n. 1, p. 16–23, 2006.
- RENKEN, R. A. et al. **Approach for delineation of contributing areas and zones of transport to selected public-supply wells using a regional ground-water flow model, Palm Beach County, Florida**. USGS, 2001.

- ROSA FILHO, E. et al. **Aquíferos do Estado do Paraná**. Curitiba: Edição do Autor, 2011. 200 p.
- SCHOBENHAUS, C.; NEVES, B.B. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília, CPRM, p. 5-25, 2003.
- SELBORNE, L. **A ética do uso da água doce: um levantamento**. Brasília: UNESCO, 2001.
- SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM). USGS, 2004. In: MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em janeiro de 2019.
- SILVA JÚNIOR, A. C. **Estimativa da recarga do aquífero Caiuá no Estado do Paraná**. 2017. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- SIMON, F. W. **Estimativa de recarga do aquífero Guarani na Bacia do Rio Ibicuí (RS), com base na aplicação do método de variação dos níveis de água**. 2014. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.
- SOUZA FILHO, O.; FRANZINI, A. S. **Mapa Hidrogeológico do Estado do Paraná, Escala 1:6000.000**. CPRM, 2015.
- TODD, D. K. GroundWater Hydrology. John Wiley and Sons, Inc, New York, 1959.
- TOSCANO, Germana Leite Gonzalez; SILVA, Tarciso Cabral da. Uso do solo em zonas de proteção de poços para abastecimento público na cidade de João Pessoa (PB). **Eng. sanit. ambient**, v. 17, n. 4, p. 357-362, 2012.
- USEPA. **Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas**. 1987.
- USEPA. **Handbook: Ground Water and Wellhead Protection**. EPA/625/R-94/001. Estados Unidos, 1994.
- USEPA. **Safe Drinking Water Act, Amendments**. EPA/560/9-86/002. Estados Unidos, 1986.
- USEPA. Wellhead Analytic Element Model (WhAEM2000). Disponível em <<https://www.epa.gov/ceam/wellhead-analytic-element-model-whaem2000>>. Acesso em março de 2018.
- USEPA. **Wellhead protection in confined, semi-confined, fractured, and karst aquifer setting**. EPA/810-K-93-001. Estados Unidos, 1993.

- USGS. USGS Groundwater Software. Disponível em: < <https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/ModelMuse.html> >. Acesso em outubro de 2018.
- VARELLA, C. A.; SENA JÚNIOR, D. G. Estudo do Interpolador IDW do Arcview para Utilização em Agricultura de Precisão. UFRRJ, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: < [http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190\\_principios\\_em\\_agricultura\\_de\\_precisao/Aulas/Estudo%20do%20interpolador%20idw%20arcview.htm](http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190_principios_em_agricultura_de_precisao/Aulas/Estudo%20do%20interpolador%20idw%20arcview.htm)>. Acesso em janeiro de 2018.
- VARNIER, Claudia; HIRATA, Ricardo. Contaminação da água subterrânea por nitrato no parque ecológico do Tietê-São Paulo, Brasil. In: **1º Joint World Congress on Groundwater**, 2000.
- VOLTZ, M.; WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, v. 41, n. 3, p. 473-490, 1990.
- WANG, H.; ANDERSON, M. P. **Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods**. São Francisco: W. H. Freeman, 1982.
- WINSTON, R. B. ModelMuse Help. Disponível em < <https://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/ModelMuse/Help/index.html?file.htm> >. Acesso em setembro de 2018.
- WINSTON, R.B. **ModelMuse - A graphical user interface for MODFLOW–2005 and PHAST**. Serviço Geológico dos Estados Unidos, 2009, 52 p. Disponível em < <http://pubs.usgs.gov/tm/tm6A29> >.
- WOTTRICH, Ingo. **Uso de ferramentas computacionais na construção de modelos estocásticos de fluxo e delimitação de perímetro de proteção de poços**. 2012. 134 f. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- WREGGE, M. S. et al. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Brasília, DF: Embrapa, 2012. Disponível em < <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1045852>>. Acessado em janeiro de 2018.

- WREGGE, M. Termos Hidrogeológicos Básicos. CPRM, 1995. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/Termos-Hidrogeologicos-Basicos-631.html>>. Acessado em fevereiro de 2018.
- WYSSLING, L. Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. **Eclogae geol. Helv**, v. 72, n. 2, p. 401-406, 1979.
- ZALÁN, P. V. et al. A divisão tripartite do Siluriano da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, n. 3, p. 242-252, 1987.

APÊNDICE A – Código escrito em *Python* para a criação de linhas de fluxo de águas subterrânea, que ligam pontos de interesse (poços) a linhas equipotenciais mais próximas, de forma perpendicular a essas

O código tem início abaixo; porém, é importante salientar que as definições dos caminhos dos arquivos e das colunas referentes às tabelas de atributos utilizadas, em caso de reprodução desse código, deverão ser reorganizadas de acordo com as informações do usuário.

```
import arcpy
arcpy.env.workspace = 'C:\Users\Talita\Desktop\Tentativa_60\Tentativa60.gdb'
feat = 'C:\Users\Talita\Desktop\Tentativa_60\Tentativa60.gdb\Lines'
fc = 'C:\Users\Talita\Desktop\Tentativa_60\Tentativa60.gdb\PocosT'
equip = 'C:\Users\Talita\Desktop\Tentativa_60\Tentativa60.gdb\Equip60'

edit = arcpy.da.Editor(arcpy.env.workspace)

tables = arcpy.ListFeatureClasses()
for table in tables:
    print(table) #teste

arcpy.Near_analysis(fc, equip, "40000", "LOCATION", "ANGLE", "PLANAR")

edit.startEditing(True, True)

cursor = arcpy.SearchCursor(fc, fields="SHAPE; COORD_X; COORD_Y; NEAR_X;
NEAR_Y")
shapes = arcpy.SearchCursor(feat, fields="SHAPE")

for row in cursor:
    firstPoint = arcpy.Point(row.COORD_X, row.COORD_Y)
    lastPoint = arcpy.Point(row.NEAR_X, row.NEAR_Y)

    edit.startOperation()
    lines = arcpy.Array([firstPoint, lastPoint])
    polyline = arcpy.Polyline(lines, 31982)
    icur = arcpy.da.InsertCursor(feat, ("SHAPE@"))
    icur.insertRow([polyline])
    edit.stopOperation()

edit.stopEditing(True)
```

APÊNDICE B – Código escrito em *Python* para a obtenção da carga hidráulica referente à equipotencial mais próxima a cada poço, a qual esse está ligado

O código tem início abaixo; porém, é importante salientar que as definições dos caminhos dos arquivos e das colunas referentes às tabelas de atributos utilizadas, em caso de reprodução deste código, deverão ser reorganizadas de acordo com as informações do usuário.

```
import arcpy

fc = 'C:/Users/Talita/Desktop/Testes/codigo_fluxo/Fluxo.gdb/pocos'
equip = 'C:/Users/Talita/Desktop/Testes/codigo_fluxo/Fluxo.gdb/equip20'

cursor = arcpy.SearchCursor(fc, fields="NEAR_FID")

for row in cursor:
    def GetContour(row):
        cursor_2 = arcpy.SearchCursor(equip, fields="ID; CONTOUR")
        for item in cursor_2:
            if row == item.ID:
                return item.CONTOUR
```

APÊNDICE C – Código escrito em *Python* para a obtenção do azimute referente ao sentido de fluxo da água subterrânea, para o poço de interesse, estimado conforme os códigos anteriores

O código tem início abaixo; porém, é importante salientar que as definições dos caminhos dos arquivos e das colunas referentes às tabelas de atributos utilizadas, em caso de reprodução deste código, deverão ser reorganizadas de acordo com as informações do usuário.

```
import math
def GetAzimuth(shape):
    azimuth = math.atan((shape.lastPoint.Y - shape.firstPoint.Y)/(shape.lastPoint.X -
shape.firstPoint.X))
    azimuth = math.degrees(azimuth)
    if shape.lastPoint.Y > shape.firstPoint.Y and shape.lastPoint.X < shape.firstPoint.X:
        azimuth = 90 - azimuth
    elif shape.lastPoint.Y > shape.firstPoint.Y and shape.lastPoint.X >
shape.firstPoint.X:
        azimuth = 270 - azimuth
    elif shape.lastPoint.Y < shape.firstPoint.Y and shape.lastPoint.X >
shape.firstPoint.X:
        azimuth = 270 - azimuth
    elif shape.lastPoint.Y < shape.firstPoint.Y and shape.lastPoint.X <
shape.firstPoint.X:
        azimuth = 90 - azimuth
    return azimuth
```

APÊNDICE D – Código escrito em *Python* para a obtenção e criação dos pontos (vetores) referentes às distâncias extremas de proteção geradas por meio do método de Wyssling (1979) para cada poço trabalhado

O código tem início abaixo; porém, é importante salientar que as definições dos caminhos dos arquivos e das colunas referentes às tabelas de atributos utilizadas, em caso de reprodução deste código, deverão ser reorganizadas de acordo com as informações do usuário.

```
import arcpy
import math

arcpy.env.workspace = "C:/Users/Talita/Desktop/Wyssling/20m/Desenho1825.gdb"
fc="C:/Users/Talita/Desktop/Wyssling/20m/Desenho1825.gdb/Pocos1825"
feat = "C:/Users/Talita/Desktop/Wyssling/20m/Desenho1825.gdb/Pontos1825"

edit = arcpy.da.Editor(arcpy.env.workspace)
edit.startEditing(True, True)

cursor = arcpy.SearchCursor(fc, fields="SHAPE; COORD_X; COORD_Y; So; Su; b1; azimuth")

shapes = arcpy.SearchCursor(feat, fields="SHAPE; OBJECTID")

edit.startOperation()

for row in cursor:
    su = 0
    so = 0
    b1 = 0
    b2 = 0
    bSo1 = 0
    bSo2 = 0
    if row.azimuth <= 90:
        teta = (180 - row.azimuth - 90)
        teta = math.radians(teta)
```

```

X_SO = row.COORD_X -
(math.sin(math.radians(row.azimuth))*row.So)
Y_SO = row.COORD_Y - (math.sin(teta)*row.So)
alpha = (90 - row.azimuth)
beta = (- alpha - 90 + 180)
alpha = math.radians(alpha)
beta = math.radians(beta)
X_SU = row.COORD_X + (math.sin(beta)*row.Su)
Y_SU = row.COORD_Y + (math.sin(alpha)*row.Su)
phi = (90 - row.azimuth)
psi = (180 - phi - 90)
phi = math.radians(phi)
psi = math.radians(psi)
X_b1 = row.COORD_X - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_b1 = row.COORD_Y + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
X_b2 = row.COORD_X + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_b2 = row.COORD_Y - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
X_bSo1 = X_SO - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_bSo1 = Y_SO + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
X_bSo2 = X_SO + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_bSo2 = Y_SO - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
so = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SO, Y_SO), 31982)
su = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SU, Y_SU), 31982)
b1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b1, Y_b1), 31982)
b2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b2, Y_b2), 31982)
bSo1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo1, Y_bSo1), 31982)
bSo2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo2, Y_bSo2), 31982)
icur = arcpy.da.InsertCursor(feats, ("SHAPE@"))
icur.insertRow([su])
icur.insertRow([b1])
icur.insertRow([bSo1])

```

```

icur.insertRow([so])
icur.insertRow([bSo2])
icur.insertRow([b2])

```

```
elif row.azimuth <= 180:
```

```

    teta = 180 - row.azimuth
    alpha = 180 - teta - 90
    teta = math.radians(teta)
    alpha = math.radians(alpha)
    X_SO = row.COORD_X - (math.sin(teta)*row.So)
    Y_SO = row.COORD_Y + (math.sin(alpha)*row.So)
    X_SU = row.COORD_X + (math.sin(teta)*row.Su)
    Y_SU = row.COORD_Y - (math.sin(alpha)*row.Su)
    psi = row.azimuth - 90
    phi = 180 - 90 - psi
    psi = math.radians(psi)
    phi = math.radians(phi)
    X_b1 = row.COORD_X + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    Y_b1 = row.COORD_Y + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    X_b2 = row.COORD_X - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    Y_b2 = row.COORD_Y - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    X_bSo1 = X_SO + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    Y_bSo1 = Y_SO + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    X_bSo2 = X_SO - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    Y_bSo2 = Y_SO - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    so = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SO, Y_SO), 31982)
    su = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SU, Y_SU), 31982)
    b1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b1, Y_b1), 31982)
    b2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b2, Y_b2), 31982)
    bSo1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo1, Y_bSo1), 31982)
    bSo2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo2, Y_bSo2), 31982)

```

```

icur = arcpy.da.InsertCursor(feat, ("SHAPE@"))
icur.insertRow([su])
icur.insertRow([b1])
icur.insertRow([bSo1])
icur.insertRow([so])
icur.insertRow([bSo2])
icur.insertRow([b2])

```

```
elif row.azimuth <= 270:
```

```

    teta = row.azimuth - 180
    alpha = 180 - 90 - teta
    alpha = math.radians(alpha)
    teta = math.radians(teta)
    X_SO = row.COORD_X + (math.sin(teta)*row.So)
    Y_SO = row.COORD_Y + (math.sin(alpha)*row.So)
    X_SU = row.COORD_X - (math.sin(teta)*row.Su)
    Y_SU = row.COORD_Y - (math.sin(alpha)*row.Su)
    phi = 90 - math.degrees(teta)
    psi = 180 - 90 - phi
    phi = math.radians(phi)
    psi = math.radians(psi)
    X_b1 = row.COORD_X - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    Y_b1 = row.COORD_Y + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    X_b2 = row.COORD_X + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    Y_b2 = row.COORD_Y - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    X_bSo1 = X_SO - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    Y_bSo1 = Y_SO + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    X_bSo2 = X_SO + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
    Y_bSo2 = Y_SO - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
    so = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SO, Y_SO), 31982)

```

```

su = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SU, Y_SU), 31982)
b1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b1, Y_b1), 31982)
b2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b2, Y_b2), 31982)
bSo1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo1, Y_bSo1), 31982)
bSo2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo2, Y_bSo2), 31982)

icur = arcpy.da.InsertCursor(feats, ("SHAPE@"))
icur.insertRow([su])
icur.insertRow([b1])
icur.insertRow([bSo1])
icur.insertRow([so])
icur.insertRow([bSo2])
icur.insertRow([b2])

```

```
elif row.azimuth <= 360:
```

```

teta = 360 - row.azimuth
alpha = 180 - 90 - teta
teta = math.radians(teta)
alpha = math.radians(alpha)
X_SO = row.COORD_X + (math.sin(teta)*row.So)
Y_SO = row.COORD_Y - (math.sin(alpha)*row.So)
X_SU = row.COORD_X - (math.sin(teta)*row.Su)
Y_SU = row.COORD_Y + (math.sin(alpha)*row.Su)
phi = 90 - math.degrees(teta)
psi = 180 - 90 - phi
phi = math.radians(phi)
psi = math.radians(psi)
X_b1 = row.COORD_X + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_b1 = row.COORD_Y + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
X_b2 = row.COORD_X - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_b2 = row.COORD_Y - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))

```

```
X_bSo1 = X_SO + (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_bSo1 = Y_SO + (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
X_bSo2 = X_SO - (math.sin(phi)*((row.b1)/2))
Y_bSo2 = Y_SO - (math.sin(psi)*((row.b1)/2))
so = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SO, Y_SO), 31982)
su = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_SU, Y_SU), 31982)
b1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b1, Y_b1), 31982)
b2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_b2, Y_b2), 31982)
bSo1 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo1, Y_bSo1), 31982)
bSo2 = arcpy.PointGeometry(arcpy.Point(X_bSo2, Y_bSo2), 31982)

icur = arcpy.da.InsertCursor(feats, ("SHAPE@"))
icur.insertRow([su])
icur.insertRow([b1])
icur.insertRow([bSo1])
icur.insertRow([so])
icur.insertRow([bSo2])
icur.insertRow([b2])
```

```
edit.stopOperation()
```

```
edit.stopEditing(True)
```

APÊNDICE E – Principais alterações realizadas durante a calibração do modelo conceitual por meio de tentativa e erro

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
01	Recarga	A partir da inserção dos cursos d'água e de demais poços, a recarga foi alterada, nas porções sudoeste e nordeste, de $1,85 \times 10^{-8}$ para $8,24 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s	As cargas hidráulicas simuladas foram reduzidas, assim como o RMSE	81,51	HOB21: $[(680,11 - 478,1)/1E^{-8}] = 2,02E^{10}$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,35</b>
02	Recarga	Redução da recarga no sudoeste e no nordeste para $1 \times 10^{-10}$ m <sup>3</sup> /s	Redução do erro e das cargas simuladas	44,58	HOB22: $[(441,57 - 338,68)/8,1 E^{-9}] = 1,3E^{10}$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,004</b>
03	Recarga	Redução da recarga no sudeste de $1,85 \times 10^{-8}$ para $1,85 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s	Redução do erro e de cargas simuladas	42,12	HOB25: $[(403,59 - 315,95)/1,6 E^{-8}] = 5,3E^9$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,03</b>
04	Recarga	Redução do valor de recarga no noroeste para $1 \times 10^{-10}$ m <sup>3</sup> /s	Houveram cargas simuladas com valores negativos muito elevados, indicando poços secos	Acima de 10000	-
05	Recarga	No mesmo local da variação acima, a recarga foi definida como $9 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s	Aumento do erro em relação a variação 03	61,75	-

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
06	Recarga	O noroeste teve o valor de $1,85 \times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /s retomado; porém o valor de $1 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s foi atribuído à uma área menor na margem noroeste da zona	O valor de RMSE foi reduzido	37,62	-
07	Recarga	Em uma pequena área no centro da zona modelada a recarga foi reduzida de $1,85 \times 10^{-8}$ para $1 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s	Houve diminuição no valor de RMSE	31,06	HOB23: $[(400,96 - 375,28)/1,7 \times 10^{-8}] = 1,5 \times 10^{-9}$ <b>pss<sub>j</sub></b> = 0,004
08	Recarga	Em uma estreita faixa no extremo norte da área a recarga foi reduzida de $1,85 \times 10^{-8}$ para $1 \times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /s	O erro foi reduzido	29,45	-
09	Recarga	No entorno do poço 502 (HOB22) a recarga foi reduzida para $9 \times 10^{-11}$ m <sup>3</sup> /s	O erro foi levemente reduzido	28,65	-
10	Condutância Hidráulica do Rio Xambrê	Foi assumido um único valor de condutância, equivalente a 0,008 m <sup>2</sup> /s	Não houve mudanças	-	-
11	Condutância hidráulica de todos os cursos d'água	Foram alteradas para 0,01 m <sup>2</sup> /s	Não houve alteração no valor de RMSE	-	-
12	Condutância hidráulica de todos os cursos d'água	Foi reduzida para 0,005 m <sup>2</sup> /s	O valor de RMSE aumentou alguns décimos	28,97	HOB04: $[(316,74 - 316,68)/1,6 \times 10^{-3}] = 37,5$ <b>pss<sub>j</sub></b> = 0,0006

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
13	Condutividade Hidráulica Kx	Em uma pequena zona no centro da área, onde as cargas simuladas tendiam a ser altas, o valor de Kx foi dividido pela metade	O valor de RMSE foi reduzido, assim como as cargas simuladas para o interior dessa área	27,55	HOB13: $[(345,18 - 333,33)/3,75E^{-6}] = 3,2E^6$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,04</b>
14	Condutividade Hidráulica Kx	No centro-sul da área modelada, a condutividade Kx inicial também foi dividida pela metade	Aumento do valor de RMSE	29,56	-
15	Condutividade Hidráulica Ky	Após algumas mudanças locais sem sucesso no valor de Kx, o valor da condutividade no eixo y foi alterada no entorno do poço SIA 502, correspondendo a $Ky = Kx/2$	Decréscimo no valor de carga hidráulica estimado para esse poços após 1 dia e no geral, decréscimo do valor de RMSE	27,11	HOB22: $[(336,63 - 329)/1,145E^{-6}] = 6,6E^6$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,023</b>
16	Condutividade Hidráulica Kx	Após considerações da metade de Kx inicial para alguns locais, o que aumentou o erro, no sudeste foi considerado: $Kx = Kx_{inicial}/2$	O valor de RMSE diminuiu e a carga simulada, para 1 dia, para o poço 2532, aumentou, gerando redução do resíduo	26,52	HOB25: $[(315,95 - 330,24)/1,86E^{-5}] = -7,7E^5$ <b>pss<sub>j</sub> = 0,043</b>

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
17	Condutividades Hidráulicas Kx e Ky	No nordeste, onde haviam alguns resíduos positivos, a carga hidráulica Kx inicial foi multiplicada por 2; e em seguida foi atribuído, nesse local: $Ky = Kx/2$	O valor de RMSE foi ligeiramente reduzido	25,94	-
18	Condutividades Hidráulicas Kx e Ky	Em uma faixa no norte da área foram atribuídos os valores: $Kx = Kx_{inicial} * 2$ e $Ky = Kx * 4$	O valor de RMSE decresceu	24,04	-
19	Conductividade Hidráulica Kz	Foram testados valores como $Kz = Kx/2$ , $Kz = Kx/10$ e $Kz = Kx * 4$	Nenhuma alteração ocorreu	24,04	$pss_j = 0$
20	Recarga	Foi reduzida para base $10^{-15}$ no entorno do poço SIA 5084, onde o resíduo era muito negativo	O valor de erro foi reduzido	23,59	-
21	Recarga	Foi aumentada no entorno dos poços SIA 263 e 4491 de $1 \times 10^{-9}$ para $1,85 \times 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /s	O erro foi minimamente reduzido	23,44	-
22	Recarga	No entorno do poço SIA 246 a recarga foi reduzida de $1 \times 10^{-8}$ para $1 \times 10^{-10}$ m <sup>3</sup> /s	O valor de RMSE e o resíduo referente ao poço 246 diminuíram	23,18	-
23	Recarga	Foi reduzida, em valores distintos, em alguns locais do nordeste da área	O valor de RMSE diminuiu	22,99	-

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
24	Recarga e Condutividades	Foram alteradas no entorno do poço SIA 5084, sendo a recarga aumentada para $4 \times 10^8$ m <sup>3</sup> /s, o valor de KX atribuído a $Kx_{inicial}/6$ e o valor de Ky a $Kx/6$	O valor de RMSE foi reduzido	19,82	-
25	Recarga e Condutividade Hidráulica Ky	Ambas propriedades tiveram seus valores reduzidos	O valor de RMSE desceu consideravelmente	17,91	-
26	Condutividade Hidráulica Ky	Na porção centro-sul o valor de condutividade no eixo y foi ajustado para $Kx/2$	O valor de RMSE aumentou	18,01	-
27	Condutividades Hidráulicas Kx e Ky	Foram reduzidas no entorno do poço SIA 2204, considerando, ali, o meio anisotrópico	O valor de RMSE foi reduzido significativamente	16,21	-
28	Condutividade Hidráulica Ky e Recarga	A condutividade foi reduzida ( $Ky = Kx/4$ ) no entorno dos poços SAI 1566 e 4400, assim como a recarga que passou de $8,24 \times 10^{-9}$ para $1 \times 10^{-9}$ m <sup>3</sup> /s	O valor de RMSE decresceu	14,44	-

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
29	Recarga e Condutividade Hidráulica $K_y$	No entorno do poço SIA 246, a recarga foi reduzida para $1 \times 10^{-12}$ e a condutividade hidráulica ( $K_y$ ) para $K_x/4$	O valor de RMSE decresceu	13,69	-
30	Condutividade Hidráulica $K_y$	No mesmo local da etapa acima foi considerado $K_y = K_x/6$	O valor de RMSE aumentou	16,50	-
31	Condutividade Hidráulica $K_x$	Foi reduzida no entorno do poço de identificação SIA 2207, passando a $K_{x \text{ inicial}}/8$	O erro diminuiu	12,60	HOB06: $[(370,12 - 367)/(1,5E^{-6} - 1,9E^{-7})] = 2,4E^6$ <b>pssj = 0,001</b>
32	Condutividade Hidráulica $K_y$	No mesmo local anterior, foi considerado $K_y = K_x/8$	O erro RMSE diminuiu	12,19	HOB06: $[(367 - 361,74)/1,3E^{-6}] = 4E^6$ <b>pssj = 0,002</b>
33	Recarga	Na entorno dos poços SIA 263 e 4491 a recarga foi reduzida de $1 \times 10^{-8}$ para $9 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{s}$	O erro RMSE diminuiu	12,09	HOB02: $[(326,96 - 329,72)/1E^{-9}] = 2,8E^9$ <b>pssj = 0,075</b>
34	Condutividades Hidráulicas $K_x$ e $K_y$	Foram reduzidas em locais do noroeste da área de interesse	Ocorreu uma leve descida do valor de RMSE	11,42	-

Alteração	Parâmetro alterado	Novo valor	Efeito da mudança	Valor do RMSE (m)	$\Delta z/\Delta b_j$ e $pss_j$
35	Coeficiente de Armazenamento	Foi aumentado para 0,01	Não gerou modificações nos resultados	-	-
36	Porosidade Efetiva	Foi trabalhada com o valor de 0,20	Não gerou modificações nos resultados	-	-
37	Condutividade Hidráulica $K_y$	Foi aumentada no entorno dos poços 263, 502, 2204, 2207 e 4400; uma vez esses valores de $K_y$ estavam ajustados como uma pequena porção de $K_x$	Aumento do RMSE; porém, nesta fase, o traçado de partículas foi testando, e visualmente, os valores de $K_y$ mais próximos de $K_x$ , nesses locais, resultaram em traçados menos tendenciosos	15,35	HOB22: $[(326,24 - 324,08)/1,9 E^{-7}] = 11,3E^6$ <b>pssj</b> = 0,026