

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**ESTIMATIVAS DE RECARGA EM ÁREAS DE AFLORAMENTO DO SISTEMA
AQUÍFERO GUARANI NO ESTADO DE SÃO PAULO**

Tatiana Penteadó Sitolini

Prof(a).Dr(a). Didier Gastmans

Rio Claro (SP)

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

TATIANA PENTEADO SITOLINI

ESTIMATIVAS DE RECARGA EM ÁREAS DE
AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO
ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP
2017

551.49 Sitolini, Tatiana Penteado
S623e Estimativas de recarga em áreas de afloramento do Sistema Aquífero
Guarani no estado de São Paulo / Tatiana Penteado Sitolini. - Rio Claro,
2017
71 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade Estadual
Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Didier Gastmans
Coorientador: George Luvizotto

1. Aquíferos. 2. Recarga. 3. Sistema Aquífero Guarani. 4. WTF. 5.
Flutuação do nível de água. 6. Separação do escoamento de base. I. Título.

TATIANA PENTEADO SITOLINI

ESTIMATIVAS DE RECARGA EM ÁREAS DE
AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO
ESTADO DE SÃO PAULO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Didier Gastmans (orientador)

Geol. Roberto Eduardo Kirchheim

M.e Lucas Vituri Santa Rosa

Rio Claro, 5 de dezembro de 2017.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

*Dedico este Trabalho à minha querida mãe, Regina,
por todo o apoio e dedicação à minha criação e formação.*

AGRADECIMENTOS

Sempre soube que essa seria a parte mais difícil do TCC, afinal seria impossível agradecer a todos que gostaria. Sendo que este é um dos principais símbolos da conclusão da graduação, gostaria de aproveitar para mencionar algumas das pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram com minha graduação, meu TCC ou meus aprendizados até aqui, de forma a agradecer cada um.

Agradeço imensamente ao Prof. Didier, que me orientou da melhor forma possível, no sentido exato da palavra. Agradeço também ao Roberto e ao Lucas por terem prontamente aceitado participar da banca, pelo auxílio durante a confecção do trabalho e excelentes comentários construtivos para a elaboração da versão final.

À minha querida família, que é minha base e sem esse apoio eu provavelmente não estaria aqui: Mãe, Pai, Betina, Bito, Isabel, Natália, Tia Betena, Ana Lia e Pietro. Às minhas queridas avós Yvonne e Lia (*in memoriam*), que muito me ensinaram e fazem tanta falta. Ao Pedro, Cissa e Patrícia, que sempre estão por perto também.

Aos amigos-irmãos que me apoiam incondicionalmente e que, apesar da distância física, sempre estarão por perto: Isabela, Lia, Rê, Kaka, Paola, Hugo e Bia.

A todos os amigos da minha querida turma, Geobilados, por todos os momentos, risadas, sofrências pré-provas, cantorias, fotos em frente ao ônibus (rs.), zoações, campos, atritos (rs) e etc. Vocês todos foram parte de um período muito importante para mim e, portanto, também o são. Agradeço, em especial, à: Taty, Xilique, Bruna, Lumbriga, Gina, Tupã, Bala, Mofo, Biscoito, Yasmim, Selma, Baby, Placenta e Ito.

Aos amigos da Geologia de Rio Claro, que, mesmo com diferentes níveis de convivência, considero de grande importância pois me ensinaram bastante nessa caminhada: Chorinho, Saul, Vandí, Ferrugem, Butão, Rapun, Ralo, Buda, Pantoja, Senta, Lara, Dion, Pri e Leitoa.

Aos amigos de antes do período da faculdade, os quais tenho certeza que serão mantidos no coração, em especial à Laila, Augusto, Camilla, Bruna, Caes, Thais, Fer e Dandi.

Às turmas 'Sexyboys' e 'Geová', que 'me acolheram' muito bem na segunda parte da minha graduação, em especial à: Gi, Doby, Varvito, Tais, Rafa, Cica, Rê, Thais, Débora, Bode e Ratinho.

Aos amigos que a Geologia me deu e às pessoas queridas que conheci nos enegéis e congressos e que me mostraram que essa ciência, além de linda, é repleta de pessoas maravilhosas, em especial ao pessoal da UERJ (Resiste!) e da USP: Jotapê, Ximbica, Lucas, Dana, Alice, Consti, Fabio, Passe, Goiás, Nemsei, Incesto, Nati, Iuri, Mari, Valéria, Trilobita e tantos outros queridos.

Aos queridos amigos do intercâmbio: Su, Leidi, Huiner, Carol, Vick, Nick, Jonas, Cati, Maritta, Caio, Isa, Sam, Lily, Josh, Chris, Frankie, Alex, Rachel, Zena, Kiara, Annie, Isa, Martin, Anxo, Tess,

Sam, Raul, Sandra, Lucy, Steeven, Giorgio, Clarice, Dino, Mazo, Ani, Vanessa, Ruben, Marga, Bene, Noa e Brandon. Aos Profs. Anna e Mike por todo o apoio. Despite of the distance nowadays, you all were a very important part of my graduation period. Thank you guys!

Ao Prof. Braga, que me ajudou bastante com algumas escolhas nessa reta final. Aos Profs. Zaine e George, por me ajudarem principalmente quanto às questões referentes ao CAGEO e ao conselho de curso. Aos professores Norberto, Maria Rita, Gilda e Luis, que, apesar do pouco contato, me ensinaram muito- bem além da geologia.

Ao pessoal do CEA e aos Didiboy's, que sempre deixam o ambiente alegre e estiveram sempre dispostos a ajudar, em especial à Lud, Sebastian, Carol e Vinicius.

À galera da SEG por todos os cursos, reuniões, experiências, e etc que o grupo me proporcionou, principalmente à: Nelson, Simba, Pink, Dodo, Aline, Lara, Má e Su.

Ao pessoal da ANGEL, pela ajuda, compreensão e vários ensinamentos, principalmente à: Tati, Hilton, Jana, Renato, Bia, Igor, Má, Rafa, Nathi, Olívia, Sô, Lê e Thi.

Ao Centro Acadêmico da Geologia, e a todos os membros que fizeram e fazem parte dele, especialmente as gestões 2011 a 2014, as quais tive o prazer de participar e que tanto me ensinaram, principalmente nos períodos de dificuldades.

Ao Ciências sem Fronteiras, à Universidade de Hull e à cidade de Hull pela oportunidade incrível que me ensinou um tanto imensurável.

À CPRM, em especial à equipe do RIMAS (Guilherme, Eduardo e Maria Antonieta), à ANA e ao DAEE pela produção e disponibilização de excelentes dados, possibilitando o desenvolvimento da ciência, mesmo quando não há recursos financeiros disponíveis.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET) e ao Professor Washington, por todos os ensinamentos, especialmente no início do curso. Agradeço também a todas as pessoas que conheci nos encontros regionais do PET, que me abriram os olhos para muitas outras realidades do ensino superior no Brasil.

À Universidade Estadual Paulista (Unesp) por todos esses anos: mesmo com todas as ressalvas e problemas, agradeço à universidade por ter me proporcionando excelentes professores, infraestrutura, acesso à ciência, aprendizados e um ambiente riquíssimo, que me fez conviver com várias diferenças e crescer tanto. Agradeço também a todos os funcionários da Unesp que me ajudaram durante esse período, desde a manutenção até a biblioteca, passando pela seção de graduação, guarda, limpeza, secretarias e garagem, em especial à: Rebeca, Vânia, Márcia, André, Bala, Douglas, Nuggete, Susi, Breda, Shrek, Casagrande, Clébio, Geraldo, D. Fátima e Nei.

Não menos importante, gostaria também de agradecer à vida por todas as oportunidades que tive até agora.

Resumo- O Sistema Aquífero Guarani (SAG) é uma das maiores reservas de água subterrânea do mundo e a determinação de sua recarga é essencial para a gestão integrada sustentável de seus recursos. O presente estudo determinou suas taxas de recarga em quatro bacias hidrográficas em áreas de afloramento no estado de São Paulo, localizadas nos arredores dos municípios de Brotas, Boa Esperança do Sul, Bofete e São Simão. Foram utilizados os métodos de Flutuação do Nível d'Água e Separação do Escoamento de base pelo Filtro de Eckhardt, com dados de monitoramento diário do nível d'água disponíveis no banco *online* do RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas), além de dados de vazão e precipitação diárias do DAEE e HIDROWEB (ANA). Os resultados obtidos foram taxas de recarga de 8,2 a 20,7% (segundo o cálculo com WTF) e de 9,2 a 21,9% (segundo a separação de fluxo de base) em relação às precipitações do período observado (2011 a 2016), que concordam com a literatura consultada. Observou-se grande correlação da recarga com o arcabouço geológico local e uso do solo. Em locais com estratos mais argilosos e maior densidade de cobertura vegetal a recarga tende a ser menor. O trabalho também apresenta um comparativo dos métodos, selecionando o mais adequado para cada bacia.

Abstract- The Guarani Aquifer System (GAS) is one of the largest groundwater reservoirs in the world and the determination of its recharge parameters is essential for the sustainable integrated management of its resources. The present study has estimated recharge rates in four watersheds in the outcrop area in São Paulo State, located on the surroundings of the municipalities of Brotas, Boa Esperança do Sul, Bofete and São Simão. The methods which have been used in this paper were the Water-Table Fluctuation (WTF) and Hydrograph Separation of Baseflow by Eckhardt's Digital Filter, with daily water level data available on the online database of RIMAS (Integrated Network of Groundwater Monitoring), besides rainfall and river flow rate data from DAEE and HIDROWEB (ANA). The results obtained were recharge rates varying from 8,2 to 20,7% for WTF calculation and from 9,2 to 21,9 % with hydrograph separation, in relation to the same period rainfall (2011 a 2016). These results agree with the scientific literature for other GAS outcrop areas. A good correlation of recharge with local geology and land use could also be observed. In places with higher clay content and greater vegetal cover the recharge rates tend to be lower. The study also

presents a comparative overview between the two methods, whereas the most suitable for each watershed is identified.

Palavras Chave: Recarga, Sistema Aquífero Guarani, WTF, Flutuação do nível de água, Separação do escoamento de base.

Key Words: Recharge, Guarani Aquifer System, WTF, Water-table Fluctuation Method, Hydrograph Separation of Baseflow.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1. Mapa geológico simplificado do Sistema Aquífero Guarani.

Figura 2.1- Ciclo hidrológico

Figura 2.2. Diagrama Esquemático de uma seção vertical de uma bacia.

Figura 3.1. Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná.

Figura 3.2. Mapa Hidrogeológico esquemático com cotas piezométricas.

Figura 3.3. Modelo Hidrogeológico Conceitual do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

Figura 4.1. Mapas Hidrogeológicos das Bacias de interesse (1 a 4).

Figura 4.2. Sazonalidade da precipitação e temperatura nos municípios de interesse.

Figura 4.3. Uso do Solo nas Bacias de interesse (1 a 4).

Figura 5.1. Fluxograma esquemático da metodologia de trabalho.

Figura 5.1.1. Hidrógrafo hipotético de variação do NA.

Figura 6.1. Perfis litológicos dos Poços de Monitoramento na área de interesse.

Figura 6.1.1.1. Bacia 1: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Brotas e precipitação diária na Estação 02247197.

Figura 6.1.1.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5D-028 (DAEE), em Brotas, no período de 01/05/2011 a 15/10/2016.

Figura 6.1.2.1. Bacia 2: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Boa Esperança do Sul e precipitação diária na Estação C5-117.

Figura 6.1.2.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5C-027 (DAEE), em Boa Esperança do Sul, no período de 01/05/2011 a 15/10/2016.

Figura 6.1.3.1. Bacia 3: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Bofete e precipitação diária na Estação E5-096.

Figura 6.1.3.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5E-012 (DAEE), em Conchas, no período de 01/05/2011 a 17/10/2016.

Figura 6.1.4.1. Bacia 4: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de São Simão e precipitação diária na Estação C4-087.

Figura 6.1.4.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 4C-001 (DAEE), em Ribeirão Preto, no período de 01/05/2011 a 12/10/2016.

Figura 6.1.6.1. Níveis d'água nos 4 poços de monitoramento do RIMAS.

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Valores de porosidade efetiva (S_y) para diversos materiais geológicos.

Tabela 3.1. Quadro síntese da litoestratigrafia do SAG.

Tabela 5.1. Poços e estações utilizados para obtenção dos dados necessários exibidos por Bacia Hidrográfica de interesse.

Tabela 6.1. Métodos utilizados no preenchimento de lacunas de dados de vazões e respectivos valores de r .

Tabela 6.1.1.1. Bacia 1: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Brotas (3500027886).

Tabela 6.1.1.2. Bacia 1- Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5D-028 (DAEE).

Tabela 6.1.2.1. Bacia 2: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Boa Esperança do Sul (350027888).

Tabela 6.1.2.2. Bacia 2- Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5C-027 (DAEE).

Tabela 6.1.3.1. Bacia 3: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Bofete (3500027885).

Tabela 6.1.3.2. Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5E-012 (DAEE).

Tabela 6.1.4.1. Bacia 4: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de São Simão (350027884).

Tabela 6.1.4.2. Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 4C-001 (DAEE).

Tabela 6.1.5.1. Variabilidade das taxas de recarga calculadas para diferentes valores de S_y

Tabela 6.1.6.1. Valores de recarga absoluta e anual, por método, nas Bacia de 1 a 4, com destaque para o valor mais adequado e representativo, em azul.

Tabela 6.2.1. Resultados Analíticos por poço RIMAS e respectivos valores orientadores

Lista de Siglas

ANA - Agência Nacional de Águas

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

APRM - Área de Proteção e Recuperação de Mananciais

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CNNPA - Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Serviço Geológico do Brasil

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica

EPA - *Environmental Protection Agency*

HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas (ANA)

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MMA - Ministério do Meio Ambiente

N - Norte

NA - Nível d'água

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OEA - Organização dos Estados Americanos

ONU – Organização das Nações Unidas

PDPA - Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental

PEA - Programa Estratégico de Ação

PM - Poço de Monitoramento

RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (CPRM)

RLM - Regressão Linear Múltipla

RLS - Regressão Linear Simples

RSL - *Regional Screening Levels*

S - Sul

SAG - Sistema Aquífero Guarani

SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de SP

SP - Estado de São Paulo

WMS - *Web Map Service*

WTF - *Water-table Fluctuation Method*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	13
2. CICLO HIDROLÓGICO E PROPRIEDADES DOS AQUÍFEROS	17
2.1 Propriedades de Aquíferos	20
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS	22
3.1 Unidades Geológicas constituintes do SAG	24
3.2 Hidrogeologia Regional	25
4. CARACTERIZAÇÃO DA FAIXA DE AFLORAMENTO DO SAG NO ESTADO DE SÃO PAULO E DAS ÁREAS DE ESTUDO	28
5. METODOLOGIA	32
5.1 Método da Variação do Nível D'água- <i>Water-table Fluctuation Method</i> (WTF)	34
5.2 Separação do Escoamento de Base- Filtro de Eckhardt.....	37
5.3 Avaliação da Qualidade da água	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.1 Cálculos das taxas de recarga.....	45
6.1.1. Cálculos das taxas de recarga nos arredores de Brotas (Bacia 1)	45
6.1.2. Cálculos das taxas de recarga nos arredores de Boa Esperança do Sul (Bacia 2)	47
6.1.3. Cálculos das taxas de recarga nos arredores de Bofete (Bacia 3)	50
6.1.4. Cálculos das taxas de recarga nos arredores de São Simão (Bacia 4)	54
6.1.5. Variabilidade das taxas de recarga para diferentes valores de Sy	58
6.1.6. Síntese das estimativas	59
6.2 Panorama Geral Qualitativo	60
7. CONCLUSÕES	63
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A frequente escassez de água superficial destinada ao abastecimento público tem levado à ampla divulgação das vantagens de exploração das águas subterrâneas. De modo geral, os aquíferos constituem extensas reservas de águas de boa qualidade. No estado de São Paulo cerca de 51% dos municípios são abastecidos exclusivamente por mananciais subterrâneos e 20% de forma mista (ANA, 2010). Porém, estes recursos são limitados e devem, portanto, ser utilizados com conhecimento, parcimônia e responsabilidade, a fim de se evitar efeitos adversos decorrentes da excessiva extração de águas.

A superexploração das águas subterrâneas pode causar inúmeros problemas, como: rebaixamento excessivo dos níveis d'água (MONTEIRO, 2003), desaparecimento de nascentes (CAMPOS & SOUZA, 2017), interferências no fluxo de base de rios (CHEN & SHU, 2002), salinização das águas subterrâneas (COSTA, 2000), sismos (YAMABE et al., 2005) e até mesmo subsidência do terreno (CHEN, 2003). Estes efeitos podem afetar as populações de forma significativa; dessa forma, é indispensável o planejamento para o manejo adequado dos mananciais.

Tendo esses riscos e essa importância em vista, um dos 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável, elaborados pela ONU em 2015, merece destaque no presente trabalho: 'Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos'. O subitem 6.5 propõe implementar a gestão integrada dos recursos hídricos em todos os níveis, inclusive via cooperação transfronteiriça, até 2030. A frequente distinção entre águas superficiais e águas subterrâneas, tanto no meio técnico-científico como no âmbito das políticas públicas, é um aspecto perceptível e exige análise cautelosa. Observando-se o ciclo hidrológico completo, é notável que ambas são interdependentes e, portanto, é essencial que os órgãos gestores sigam a orientação da ONU e se atentem a essa relação.

Neste cenário, o conhecimento científico a respeito das reservas aquíferas, suas taxas de recarga e a interação com as águas superficiais é fundamental para a elaboração de diretrizes que visam a gestão integrada sustentável dos recursos hídricos. A compreensão das características e taxas de reabastecimento dos aquíferos é essencial para a limitação adequada da exploração de água na área, seja por meio da

concessão de outorgas, da cobrança pelo seu uso ou da criação de Unidades de conservação nas regiões de maior vulnerabilidade.

As taxas de recarga de aquíferos podem ser determinadas por meio de diversos métodos, sendo os principais: o balanço hídrico (THORNTHWAITE & MATHER, 1955), a aplicação de traçadores hidroquímicos (SOLOMON et al., 1992), o de flutuação do nível d'água (HEALY & COOK, 2002) e o da separação do escoamento de base, por meio da análise de hidrogramas (ECKHARDT, 2005). Como forma de se minimizar as incertezas inerentes de cada um dos métodos, a determinação das taxas de recarga a partir da aplicação de diversos métodos garante uma maior confiabilidade nas estimativas das taxas de recarga.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma das maiores reservas de água subterrânea do mundo e ocupa uma área de aproximadamente 1,1 milhão de km², dos quais cerca de 70% estão no Brasil e o restante está dividido entre Argentina, Paraguai e Uruguai (Figura 1.1). O reservatório possui elevadas capacidades de armazenamento e fornecimento de água, o que reflete em uma ótima produtividade do aquífero (IRITANI & EZAKI, 2009), especialmente no estado de São Paulo, onde o mesmo é responsável pelo abastecimento público de importantes cidades e onde a vazão explorada representa cerca de 64% da vazão extraída do aquífero (OEA, 2009). São Carlos, Araraquara, São José do Rio Preto e Ribeirão Preto são exemplos de municípios com fornecimento de água total ou parcialmente proveniente do SAG.

As áreas de recarga do SAG são regiões onde ocorre a reposição das águas e onde a interação com as águas superficiais é mais intensa, além disso é nessas áreas em que o aquífero se encontra mais vulnerável à contaminação; desta forma, a ocupação inadequada do solo pode comprometer a qualidade da água subterrânea e afetar significativamente os municípios que utilizam o aquífero para abastecimento.

Com o intuito de desenvolver mecanismos de proteção, o IPT (2011) elaborou o Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental (PDPA), a fim de subsidiar a criação de uma Área de Proteção e Recuperação de Mananciais (APRM) na região, objetivando a gestão adequada, a recuperação e preservação do aquífero no estado de São Paulo. A APRM-SAG compreende a região de afloramento do SAG, além de uma faixa de segurança de 2 km de largura ao longo de seu perímetro, totalizando assim 26.100 km². Esta proposta está inserida no contexto regional do Projeto de Proteção

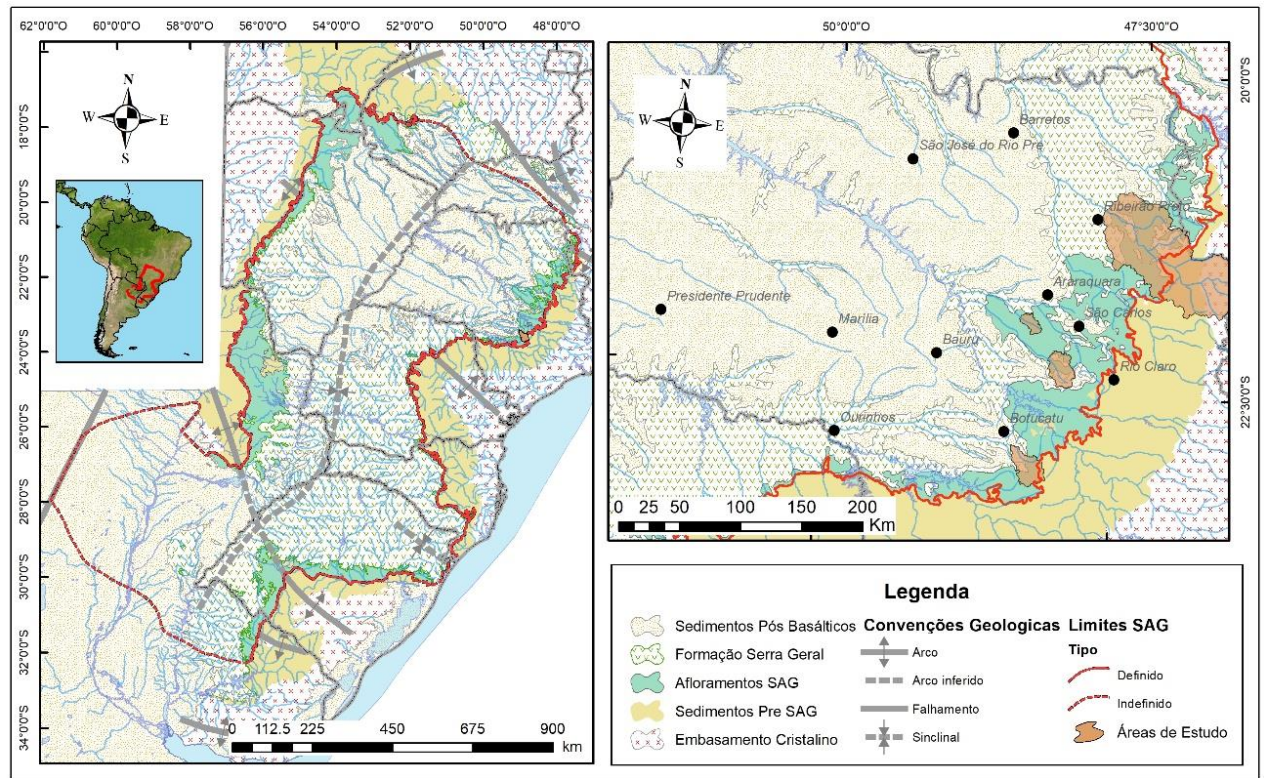
Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do SAG, sugerido no PEA (OEA, 2009) e demonstra a importância da preservação da área de recarga do aquífero e do conhecimento de suas reservas renováveis.

O estudo da OEA (2009) também recomenda que haja monitoramento frequente do SAG. Desta forma, a CPRM opera alguns poços de monitoramento em áreas de afloramento do SAG, através do RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas). A Rede tem como objetivo possibilitar a avaliação da quantidade e da qualidade das águas subterrâneas em território brasileiro. O projeto atua de forma a auxiliar no conhecimento a respeito do armazenamento e fluxo das águas subterrâneas, da recarga de aquíferos, dos impactos em decorrência do seu uso, das características químicas da água, dentre outros (CPRM, sem data). Para a perfuração dos poços áreas com pouca influência antrópica são selecionadas.

Nesse sentido, o principal objetivo do presente estudo é estimar a recarga em regiões representativas das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, por meio da aplicação dos métodos WTF (*Water-Table Fluctuation Method*), desenvolvido por Healy & Cook (2002) e de decomposição de hidrogramas, com a aplicação do filtro de Eckhardt (2005) utilizando parâmetros definidos por Collinschonn & Fann (2012). Deste modo, espera-se um resultado confiável e uma análise completa quanto às estimativas das recargas do SAG no estado de São Paulo. As áreas selecionadas para a realização do presente estudo estão localizadas próximas aos municípios de Brotas, São Simão, Bofete e Boa Esperança do Sul (Figura 1.1), de acordo com disponibilidade de dados diários de nível d'água.

Uma vez que também existem dados de análises químicas disponíveis para os poços do RIMAS, os objetivos secundários do trabalho também incluem a apresentação destes dados e breve comentário a respeito dos resultados, a fim de fornecer um panorama geral qualitativo.

Figura 1.3. Mapa geológico simplificado do Sistema Aquífero Guarani. No mapa da direita é apresentado um detalhe das áreas de afloramento no estado de São Paulo.



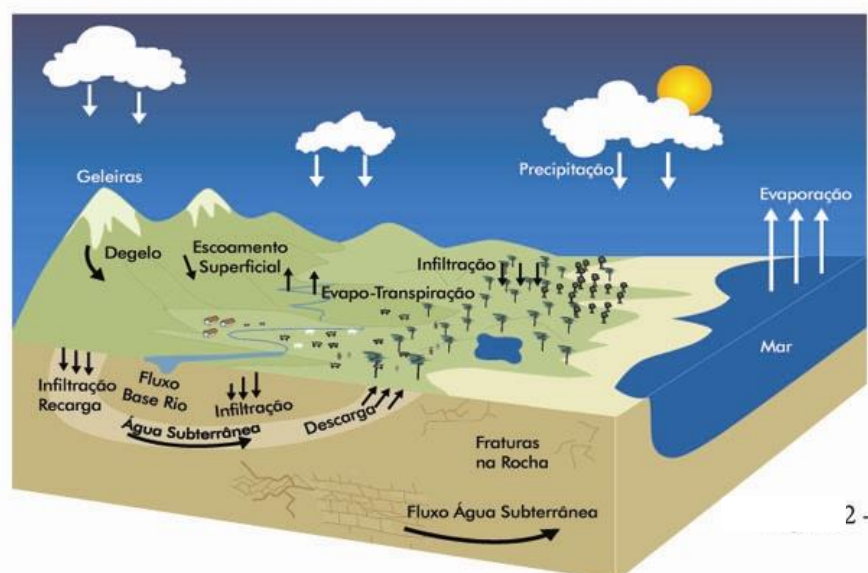
2. CICLO HIDROLÓGICO E PROPRIEDADES DOS AQUÍFEROS

A água representa um recurso natural essencial à vida, às atividades econômicas, agrícolas e sociais e à manutenção de funções ecológicas; portanto, o entendimento integrado dos processos associados ao ciclo hidrológico é fundamental para o planejamento da utilização dos recursos hídricos.

O abastecimento público é feito a partir de águas superficiais, provenientes dos rios e represas, e/ou provenientes dos aquíferos. Estes últimos são reservatórios subterrâneos de águas, caracterizados por unidades geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir águas em quantidades que permitam o aproveitamento como fontes de abastecimento para diversos fins (IRATANI & EZAKI, 2009).

Contudo, é necessário entender que esta separação entre 'superficial' e 'subterrânea' é utilizada para fins didáticos pois a água, como um todo, é protagonista de um ciclo integrado (Figura 2.1), que envolve ambos os fluxos- superficiais e subterrâneos.

Figura 2.1- Ciclo hidrológico



Fonte: MMA. (retirado de <http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>; acessado em 10 nov. 17)

Os maiores reservatórios de água existentes na superfície da Terra são os oceanos, que concentram cerca de 90% de toda a água existente na superfície, onde ocorre a evaporação. As águas ascendem e formam nuvens, que posteriormente serão precipitadas na forma de chuva.

Parte da chuva que cai na superfície da Terra escoam superficialmente para porções de mais baixas cotas topográficas (drenagens e rios, até o desague no mar) e outra parte infiltra-se pelo subsolo. Esta parte infiltrada pelo solo, caso não sofra evaporação e evapotranspiração (retornando de volta à atmosfera), tem como destino o nível freático, contribuindo assim para a recarga dos aquíferos (tópico abordado com mais detalhamento na próxima seção). Ao chegar ao aquífero, grande parte desta água flui para os rios, fornecendo-os escoamento de base. Uma menor parte desta água atravessa o aquífero livre e a camada confinante até atingir o aquífero confinado. Dessa forma, estas unidades confinadas são consideradas recursos não renováveis, uma vez que suas taxas de recarga são muito mais lentas que do aquífero livre.

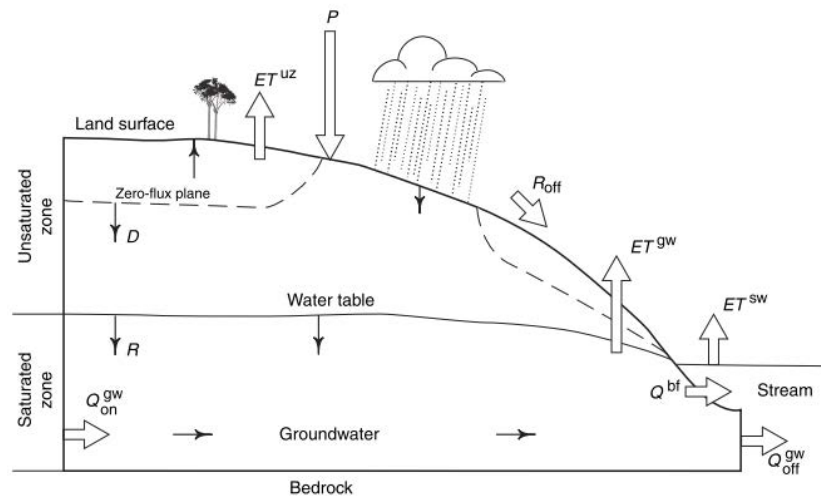
A água no estado líquido pode sofrer processos de evaporação, principalmente nos rios, lagos e oceanos, e evapotranspiração, durante a troca gasosa e fotossíntese das plantas. Essas águas, no estado gasoso, retornam à atmosfera, iniciando o ciclo novamente.

É importante salientar que as nuvens tendem a ser transportadas, não sendo precipitadas necessariamente onde ocorreu a evaporação, sendo o ciclo hidrológico fechado apenas em nível global (TUCCI, 2009).

- **Recarga e Reservas de Aquíferos**

A recarga de um aquífero é definida por Healy (2010) como o fluxo de água descendente que chega à zona saturada, aumentando assim seu armazenamento. A Figura 2.2 (retirada de Healy, 2010) ilustra os componentes da movimentação da água após a chegada desta à superfície. A recarga é representada na imagem pela letra R. As águas que infiltram na superfície são consideradas como 'potencial de recarga', uma vez que podem não chegar à zona saturada efetivamente.

Figura 4.2. Diagrama Esquemático de uma seção vertical de uma bacia, ilustrando componentes do balanço hídrico (setas grandes) e direção do fluxo de água (setas menores).



Legenda: R: Recarga; D: Drenagem. Fonte: Healy (2010)

A recarga pode ocorrer de forma difusa ou concentrada/focada. A recarga difusa é distribuída em vastas áreas e ocorre quando a água da chuva atravessa a zona não saturada e chega ao nível freático. Já a recarga focada é a infiltração da água para o aquífero, proveniente de rios, drenagens e lagos

As áreas por onde ocorrem o abastecimento do aquífero são chamadas de zonas de recarga e suas taxas representam a quantidade de água reposta no aquífero por meio da infiltração efetiva das águas da chuva.

A recarga de um aquífero pode, ainda, ocorrer de maneira direta ou indireta. Nos aquíferos livres a recarga é sempre direta, pela infiltração imediata das águas da chuva. Já nos aquíferos confinados o reabastecimento pode ocorrer de forma direta ou, em menores proporções, indireta, quando a água percorre toda a camada confinante até alcançar o aquífero em questão.

As regiões planas tendem a favorecer a recarga dos aquíferos; enquanto que, nas regiões de relevo acidentado, impermeabilizadas e/ou sujeitas a práticas inadequadas de uso e ocupação de solo (ex. compactação devido à mecanização agrícola), a recarga tende a se processar de maneira mais lenta. Além disso, essas áreas também podem representar zonas de maior vulnerabilidade, uma vez que, caso haja a infiltração de uma eventual pluma de contaminação para as porções profundas do aquífero, a remediação tende a ser impraticável (FRANCISCO, 2013). Estes fatores explicam a crescente preocupação dos órgãos gestores e do meio científico com a

preservação ambiental das áreas de recarga, além da recente atenção dada à gestão sustentável das águas.

As reservas renováveis ou reguladoras foram definidas por Costa (1998) como o volume hídrico acumulado no aquífero, em função da porosidade eficaz ou do coeficiente de armazenamento, variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exutórios.

Já as reservas explotáveis são constituídas pelo volume de água que pode ser extraído mantendo a sustentabilidade do sistema, ou seja, uma parte das reservas renováveis. Rocha (1997) recomendou que o índice de referência para a exploração do SAG seja de 25% das reservas reguladoras. Contudo, é importante frisar que a quantidade que se pretende extrair de um aquífero é uma decisão política (PRANDI, 2010), a ser definida de acordo com os objetivos propostos pela população local. É comum encontrar a recomendação, porém, de que a somatória das extrações de águas através de poços com as descargas naturais do aquífero para os corpos d'água não seja superior à sua recarga natural (ABAS, 201-).

Da compreensão desses conceitos e processo é possível entender a importância dos conhecimentos sobre as reservas do aquífero para o planejamento e gestão integrada e sustentável destes reservatórios para a manutenção do fluxo das drenagens superficiais e corpos hídricos em geral.

2.1. Propriedades de Aquíferos

A circulação das águas subterrâneas nos aquíferos está relacionada a uma série de propriedades desses reservatórios, e sua conceituação é essencial para o entendimento dos processos de recarga de aquíferos e das metodologias para sua quantificação. Seguem algumas das definições consideradas de grande importância para o entendimento do presente trabalho:

→ Porosidade (μ): Relação entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra. Em geral, quanto mais porosa a rocha, maior sua capacidade de armazenar água. A porosidade depende da forma, distribuição e tamanho das partículas, além do grau de compactação delas. A porosidade pode ser primária, quando é originada concomitantemente à rocha, sendo chamada de granular (ocorre em rochas

sedimentares); ou secundária, quando é desenvolvida após a formação da rocha, por meio de fraturas (rochas cristalinas) ou passagem de soluções (carbonáticas).

→ Porosidade Efetiva (S_y): Relação entre o volume drenável (sob influência da gravidade) e o volume total de uma amostra. Pode também ser chamada de capacidade específica (Specific yield), rendimento específico ou ainda produção específica. A Tabela 2.1.1 mostra valores de S_y para alguns materiais, segundo Johnson (1967).

Tabela 2.2.1. Valores de porosidade efetiva (S_y) para diversos materiais geológicos.

Material	S_y mínimo	S_y máximo	Média
Argila	0	5	2
Argila arenosa	3	12	7
Silte	3	19	18
Areia fina	10	28	21
Areia média	15	32	26
Areia grossa	20	35	27
Areia de cascalho	20	35	25
Cascalho fino	21	35	25
Cascalho médio	13	26	23
Cascalho grosso	12	26	22

Fonte: Johnson (1967).

→ Condutividade Hidráulica (K): De acordo com Feitosa et al. (2008) a condutividade em um meio isotrópico pode ser entendida como sendo numericamente igual à vazão que atravessa uma área unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. A propriedade refere-se, portanto, à facilidade de uma unidade aquífera exercer a função de um condutor hidráulico.

→ Transmissividade (T): Indica a capacidade do aquífero em transmitir água em toda sua espessura. É a vazão do aquífero por unidade de largura, perpendicular ao fluxo, em função de um gradiente hidráulico unitário numa área unitária. É expressa em $[m^2/dia]$. $T = K \times b$ (b =espessura do aquífero).

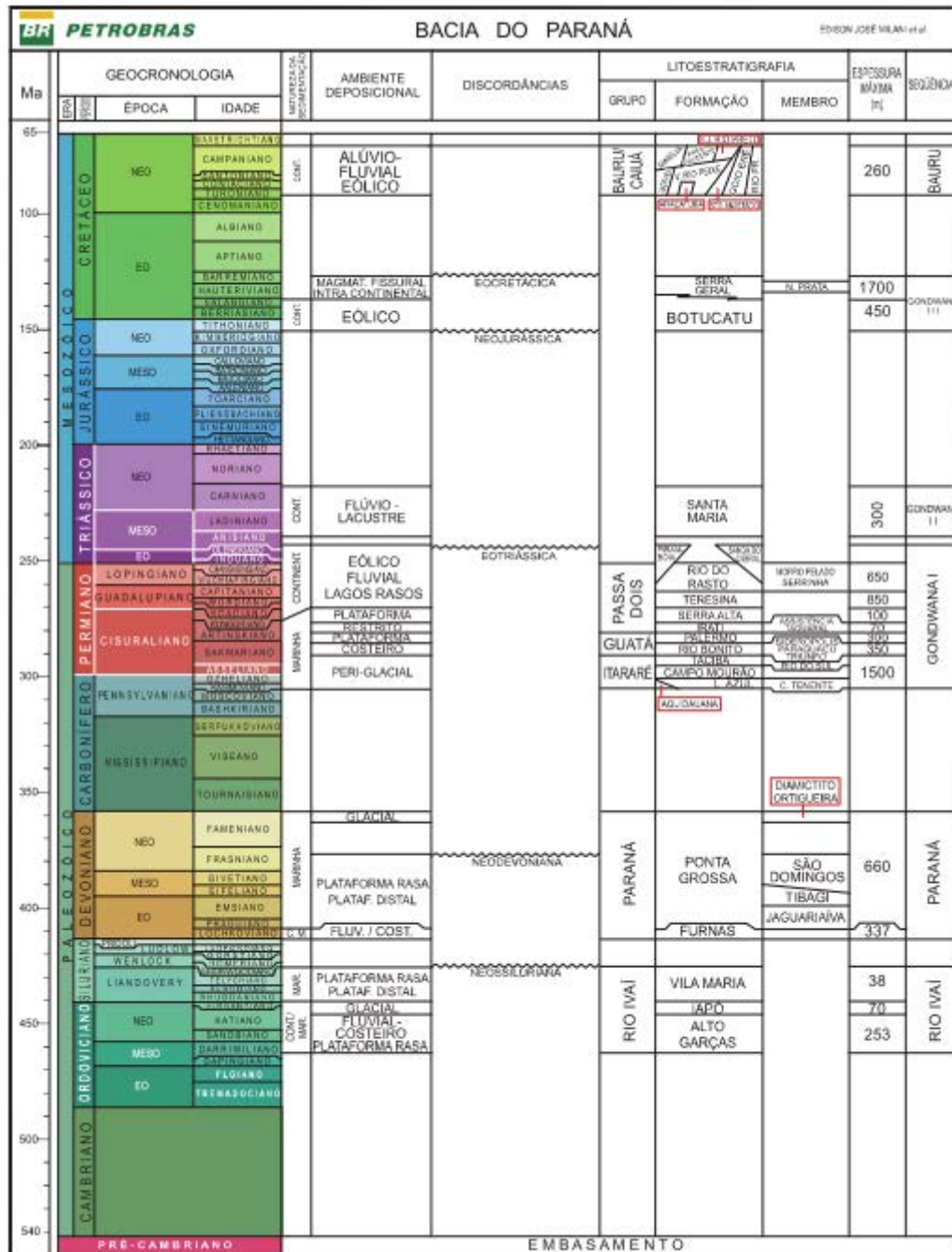
3. ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS REGIONAIS

A região do estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, que representa uma bacia intracontinental do tipo sinéclise, que abrange a porção sul do Brasil, o leste do Paraguai, o nordeste da Argentina e o norte do Uruguai, totalizando quase 1,5 milhão km², dos quais cerca de 1 milhão está em território brasileiro (SCHNEIDER et al., 1974; MILANI et al., 2007). A Bacia, que teve o início de sua formação na Era Paleozóica, apresenta uma forma aproximadamente ovalada, com um eixo maior N-S, e é limitada por limites erosivos. O embasamento é formado por rochas cristalinas pré-Cambrianas do Cráton Paranapanema, totalmente coberto pelas unidades sedimentares e magmáticas, que alcançam mais de 7.000 metros de registro sedimentar em algumas porções do território brasileiro.

A evolução geotectônica da Bacia do Paraná durante o processo de *breakout* do Gondwana, associado à formação do rifte do Atlântico Sul, apresentou um soerguimento de sua borda leste, que possibilitou expressiva erosão das rochas nesta parte da Bacia, com estimativa de remoção de até 2500 metros de seção sedimentar (ZANOTTO, 1993). Do ponto de vista hidrogeológico, esse processo representou a formação de zonas de recargas de diversas unidades aquíferas, anteriormente confinadas.

A evolução do pacote sedimentar-magmático da Bacia do Paraná foi dividido por Milani et al. (2007) em 6 supersequências, da seguinte maneira: Supersequência Rio Ivaí (Grupo Rio Ivaí), Supersequência Paraná (Grupo Paraná), Supersequência Gondwana I (Formação Aquidauana, Grupos Itararé, Guatá, Passa Dois e Formações Pirambóia e Sanga do Cabral), Supersequência Gondwana II (Formação Santa Maria), Supersequência Gondwana III (Formações Botucatu e Serra Geral) e Supersequência Bauru (Grupo Bauru Caiuá) (Figura 3.1).

Figura 3.1. Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná.



Fonte: Milani et al (2007)

As unidades geológicas supramencionadas no texto armazenam água em seus poros e podem constituir aquíferos. Segundo o Caderno da Região Hidrográfica do Paraná (MMA, 2006) esta bacia é a mais importante província hidrogeológica do Brasil, contendo aproximadamente 45% das reservas de águas subterrâneas do país, o que representa uma reserva estimada de 50.400 km³ de água.

3.1. Unidades Geológicas constituintes do SAG

As unidades geológicas de interesse para o presente estudo são as formações Botucatu e Pirambóia, pois estas constituem o SAG no Estado de São Paulo e serão descritas a seguir. Soares (1972) classificou contato transicional entre estas formações, porém, segundo Zalán et al. (1987), o contato é marcado por uma discordância regional, indicada por mudanças na coloração, características litológicas e dimensão das estratificações.

- **Formação Pirambóia**

A Formação Pirambóia foi depositada sob condições continentais de climas áridos e semi-áridos durante o período Triássico (CAETANO-CHANG & WU, 1992). É composta principalmente por arenitos finos a médios, localmente grossos e conglomeráticos, com algumas facies siltosas e argilosas, de coloração amarelada a avermelhada, depositados em ambiente flúvio-lacustrino com influência eólica que cresce em direção ao topo da unidade. Apresenta estruturas de estratificação cruzada planar, acanalada e plano-paralela (CAETANO-CHANG & WU, 1992). De acordo com Soares (1975) as espessuras da formação chegam aos 300 metros na Bacia do Rio Tietê.

- **Formação Botucatu**

A Formação Botucatu foi depositada no Jurássico sob condições continentais desérticas. É composta majoritariamente por arenitos avermelhados bem selecionados de granulometria fina a média e grãos dotados de alta esfericidade. A Formação apresenta estratificações cruzadas de grande porte, formadas pelas dunas. De acordo com Monteiro (2003), as espessuras da unidade variam de 40 a 100 metros, porém, segundo Soares (1975), a espessura atinge 150 metros.

3.2. Hidrogeologia Regional

O SAG constitui uma das maiores reservas de água subterrânea do mundo e, segundo o Programa Estratégico de Ação (PEA) do Aquífero Guarani (OEA, 2009), abrange uma área de 1.087.879 km², dos quais cerca de 68% estão em território brasileiro, divididos em 8 estados: I. Goiás, II. Mato Grosso, III. Mato Grosso do Sul, IV. São Paulo, V. Minas Gerais, VI. Paraná, VII. Santa Catarina e VIII. Rio Grande do Sul. A Argentina detém a segunda maior porção do aquífero, com aproximadamente 21% da área, seguida por Paraguai (8%) e Uruguai (3%) (Figura 1.1).

As unidades geológicas que constituem o SAG estão associadas ao pacote mesozoico de rochas sedimentares siliciclásticas continentais da Bacia do Paraná (Brasil e Paraguai), Chacoparanense (Argentina) e Bacia do Norte (Uruguai). Este pacote é limitado em sua base por uma discordância regional permo-eotriássica, representada no estado de São Paulo pela Formação Corumbataí, e no topo pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (GASTMANS et al., 2012).

Em todas essas Bacias, o cenário deposicional e estratigráfico é semelhante. O substrato do SAG é constituído por rochas de idade Permiana, denominadas de Pré-SAG (Figura 3.2). Em territórios argentino e uruguaio o substrato do aquífero é constituído pelos sedimentos da Formação Buena Vista, no Paraguai pela Formação Tacuary e no Brasil, ao sul, pela Formação Sanga do Cabral, na região central, pela Formação Rio do Rasto e na porção Norte, pela Formação Corumbataí e Grupo Estrada Nova.

As unidades mais antigas que constituem o SAG, depositadas sobre essa discordância regional, são as Formações Caturrita e Santa Maria na porção sul da bacia e Formação Pirambóia, a norte. As rochas Juro-Cretáceas estão presentes em todas as bacias citadas e também fazem parte do SAG. Tais rochas são denominadas Formação Tacuarembó no Uruguai, Formação Guará (sul) e Botucatu (norte) no Brasil e Formação Misiones na Argentina e Paraguai (Tabela 3.2.1) (GASTMANS et al., 2012).

O aquífero é, em grande parte, confinado por basaltos de baixos valores de permeabilidade das Formações Serra Geral, Alto Paraná, Posadas e/ou Arapey e por

unidades sedimentares, como os Grupos Solari (Argentina) e Bauru (São Paulo). O confinamento proporciona, em certas porções do SAG, um artesianismo aos poços de captação.

Tabela 3.2.1. Quadro síntese da litoestratigrafia do SAG.

Paraguai	Argentina	Uruguai	Brasil (Sul)	Brasil (C – N)	Unidades Aqüíferas
Formação Alto Paraná	Formação Serra Geral (Curuzu Cuatia) Formação Posadas/Solari	Formação Arapey	Formação Serra Geral	Grupo Bauru Formação Serra Geral	PÓS-SAG
Formação Misiones	Formação Misiones (Formação Tacuarembó)	Formação Tacuarembó (Formação Itacumbu)	Formações Botucatu/Guará Formação Caturrita Formação Santa Maria	Formação Botucatu Formação Pirambóia	SAG
Formação Tacuary Gr. Independência	Formação Buena Vista	Formação Buena Vista	Formação Sanga do Cabral	Grupo Estrada Nova Formação Rio do Rasto	PRÉ-SAG

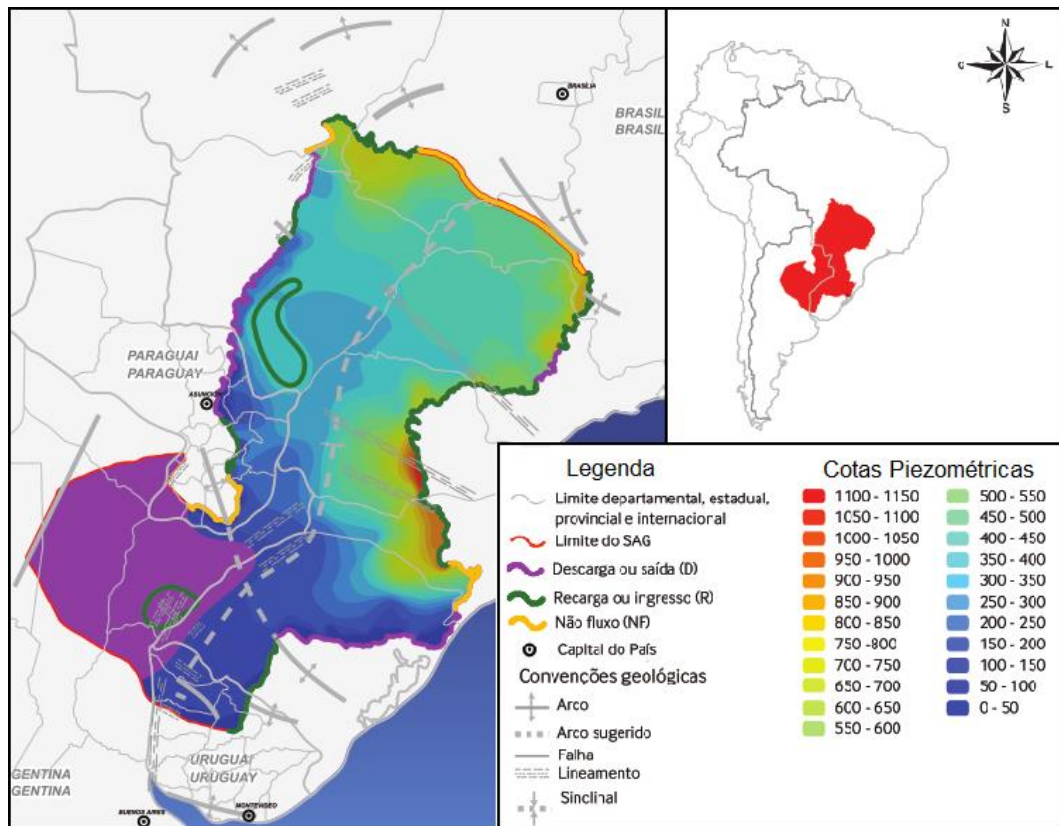
Fonte: Modificado de Gastmans et al. (2012)

Somando-se ao confinamento, o SAG possui altas taxas de porosidade e permeabilidade, o que lhe confere elevada capacidade de armazenamento e fornecimento de água, refletindo assim em uma ótima produtividade do sistema.

Regionalmente, a partir das zonas de recarga até as áreas de descarga, o fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta uma tendência regional que direciona o fluxo de norte para sul (Figura 3.2.1), acompanhando o eixo da Bacia do Paraná.

O atual modelo conceitual regional do SAG estabelece 4 domínios hidrodinâmicos para o sistema aquífero, que apresentam relações diretas com as grandes feições estruturais da bacia. De acordo com a classificação do PEA (OEA, 2009), a área de recarga do SAG no estado de São Paulo faz parte do Domínio I- Nordeste do aquífero e apresenta fluxo de água subterrânea para Oeste. Segundo a publicação, os gradientes hidráulicos variam entre 3 a 5 m/km próximos às zonas de afloramento; e 0,1m/km na zona confinada. Este domínio é separado do Domínio II (Leste) pelo Arco de Ponta Grossa, que exerce a função de barreira hidráulica do fluxo subterrâneo, redirecionando-o para o Rio Paraná.

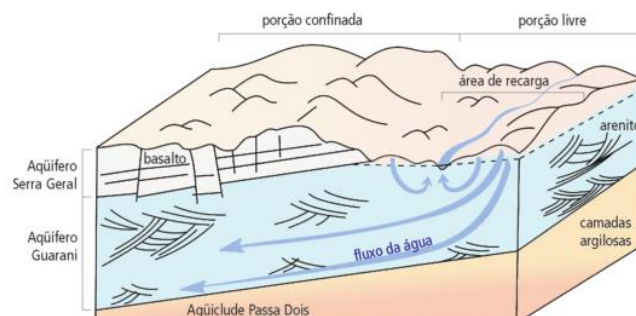
Figura 3.2.1. Mapa Hidrogeológico esquemático com cotas piezométricas e identificação de áreas de recarga e descarga.



Fonte: Modificado de OAE (2009)

No estado de São Paulo as zonas de recarga do SAG ocupam uma faixa de sentido aproximadamente N-S na região central do estado, com fluxo direcionado para o eixo central da Bacia do Paraná (IRITANI & EZAKI, 2009) (Figura 3.2.2).

Figura 3.2.2. Modelo Hidrogeológico Conceitual do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.



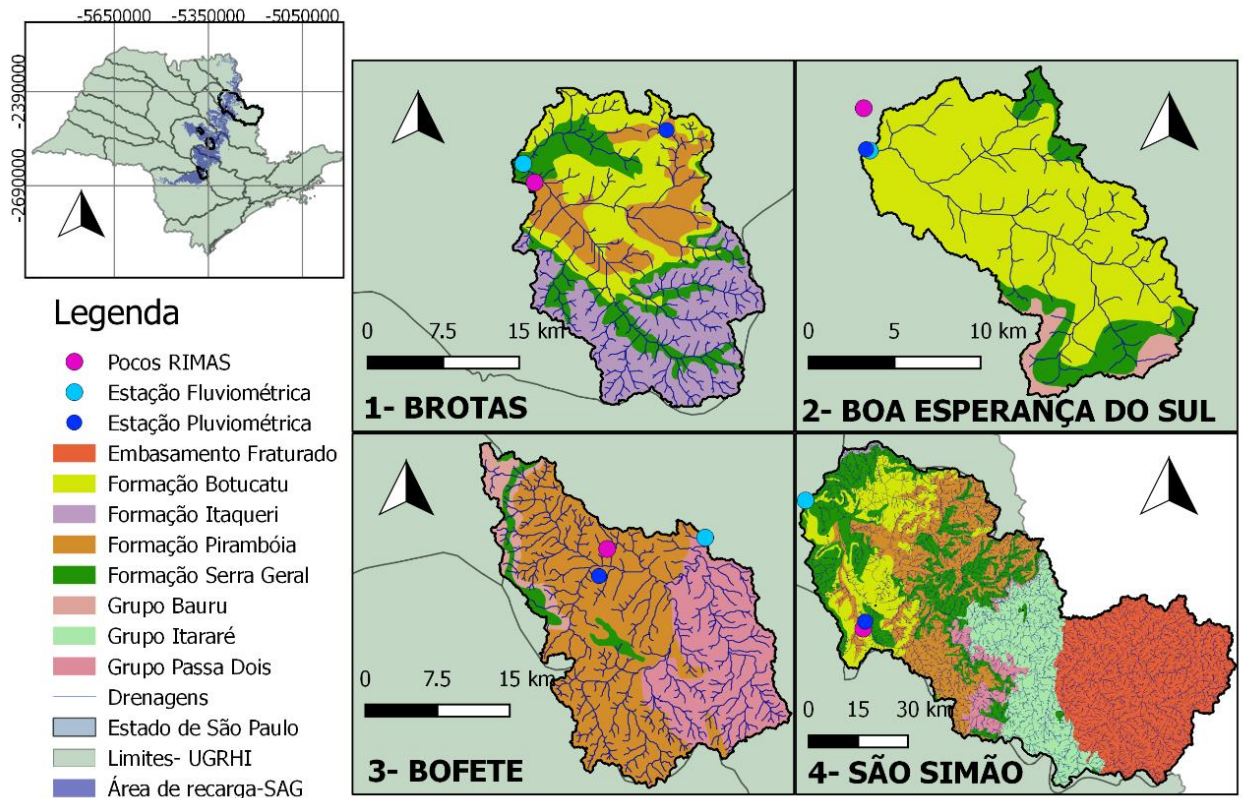
Fonte: Iritani & Ezaki (2009).

4. CARACTERIZAÇÃO DA FAIXA DE AFLORAMENTO DO SAG NO ESTADO DE SÃO PAULO E DAS ÁREAS DE ESTUDO

Apesar da quantidade de unidades litoestratigráficas associadas ao SAG, como discutido anteriormente, no estado de São Paulo o arcabouço geológico do aquífero é representado por um quadro estratigráfico simples, constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia. Estas unidades se assentam de maneira discordante sobre a Formação Corumbatai e são recobertas pelos basaltos da Formação Serra Geral. A área de recarga do SAG no estado de São Paulo, onde o aquífero tem cerca de 100 metros de espessura, está localizada na porção central do estado, constituindo uma faixa de direção norte-sul, ocupando uma área de 17.700 km² (IRITANI & EZAKI, 2009).

Nessa faixa de afloramentos foram selecionadas as quatro áreas de estudo, representadas por quatro bacias hidrográficas localizadas nas imediações dos municípios de Brotas, Boa Esperança do Sul, Bofete e São Simão. Nestes municípios existem poços de monitoramento do RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas), além de estações fluviométricas e estações pluviométricas, que serão apresentadas formalmente no Capítulo 5. A Figura 4.1. mostra os mapas hidrogeológicos para cada uma das quatro bacias, retirados das Cartas Hidrogeológicas das Folhas SF.23 e SF.22 (CPRM, 2015 e 2016), com as respectivas localizações dos poços e estações utilizadas.

Figura 4.1. Mapas Hidrogeológicos das Bacias de interesse (1 a 4) com localizações dos Poços de Monitoramento do RIMAS, Estações Pluviométricas e Fluviométricas.



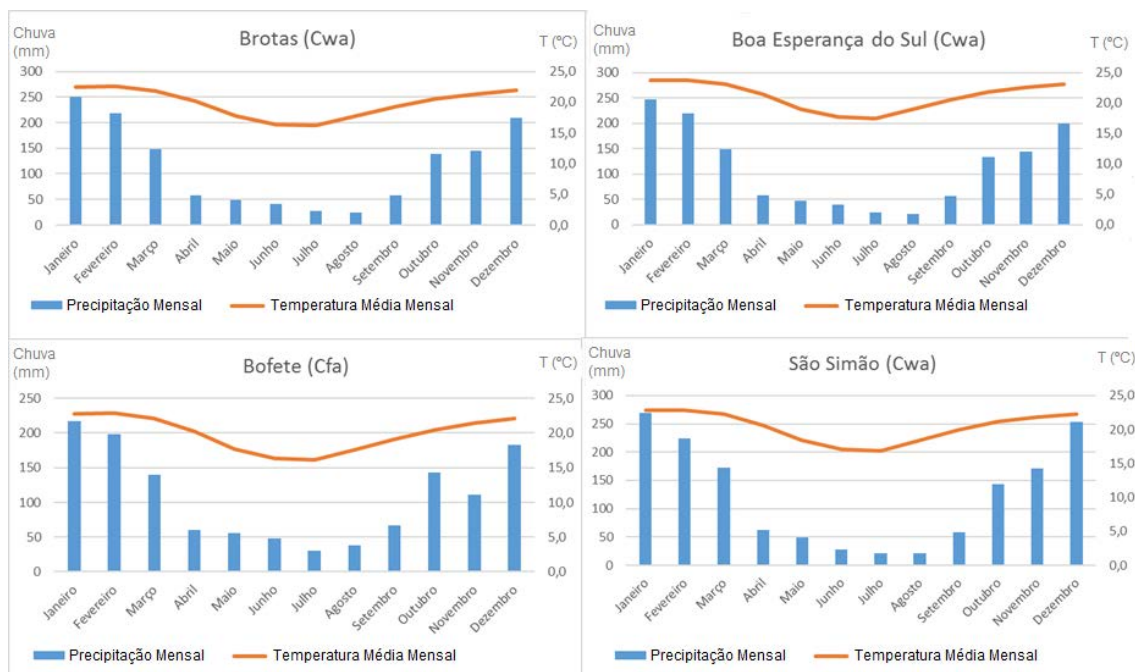
Fonte: Cartas Hidrogeológicas das Folhas SF.23 e SF.22- 1: 1.000.000 (CPRM, 2015 e 2016).

Do ponto de vista geomorfológico, a região de afloramento do SAG no Estado de São Paulo encontra-se inserida na Depressão Periférica Paulista, região caracterizada como unidade de transição entre a Bacia do Paraná e o Planalto Atlântico, rebaixada por consequência da erosão (AB'SABER, 1949). Suas altitudes variam, em média, de 500 a 700 metros. O compartimento é limitado a oeste pela região das cuestas, onde ocorre abrupta elevação do relevo por conta das espessas camadas de basalto (STEFANUTO & LUPINACCI, 2016).

De acordo com o Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2011) a precipitação média anual da região varia entre 1350 e 1500mm. O clima nos municípios de Brotas, Boa Esperança do Sul e São Simão é do tipo 'Cwa', o que configura uma zona de clima subtropical úmido com inverno seco e verão chuvoso. Já o município de Bofete é classificado como clima 'Cfa', que abrange clima subtropical úmido com verão quente,

sem estação seca (ALVARES et al., 2013). De maneira geral essas localidades são marcadas por verões chuvosos e invernos frios e secos (Figura 4.2)

Figura 4.2. Sazonalidade da precipitação e temperatura nos municípios de interesse.



Fonte: Köppen's climate classification map for Brazil (Alvares et al., 2013)

As atividades econômicas predominantes nos municípios da APRM-SAG são agropecuárias (destaque para Bofete, Brotas e Boa esperança), agroterciárias (destaque para São Simão), agroindustriais, indústrias simples, terciários simples, indústria complexa, multissetorial e terciários simples (IPT, 2009).

O uso do solo da APRM-SAG se dispõe da seguinte maneira:

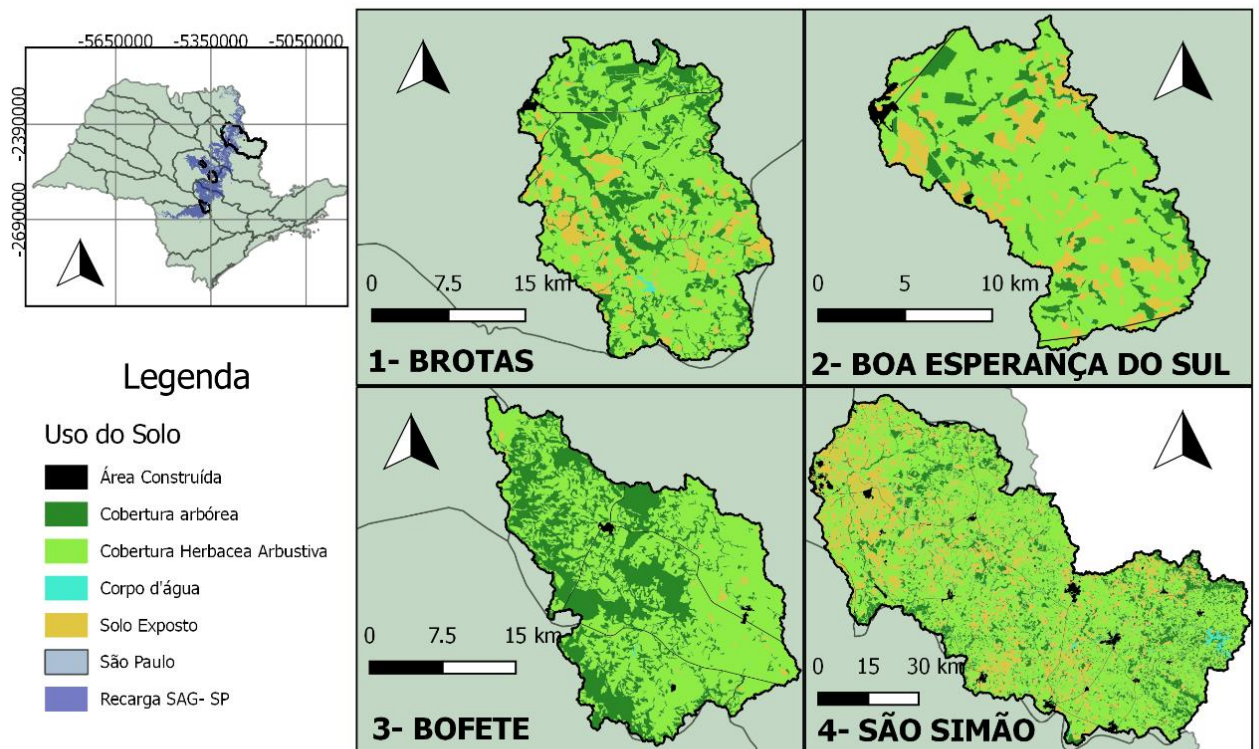
- Uso agrícola: 75,07%;
- Cobertura vegetal natural/Cursos d'água: 23,91%;
- Uso urbano: 0,91%;
- Outros usos: 0,06%;
- Uso industrial: 0,03%; e
- Mineração: 0,02%.

Essas proporções são representativas para todas as bacias de interesse, exceto na região da Bacia 3 (Bofete), onde há uma clara porcentagem maior de cobertura vegetal, representando aproximadamente 40% da área (Figura 4.3).

Apesar das diferenças de cobertura do solo, a utilização para agricultura é expressivamente predominante na região, seguida pelas áreas de cobertura vegetal

e corpos d'água. É comum que as atividades agrícolas utilizem fertilizantes e agrotóxicos, que podem infiltrar para os solos e águas subterrâneas. Neste cenário, a fiscalização e o controle da área são muito importantes a fim de evitar a contaminação do SAG, bem como preservar a qualidade de seus recursos e do meio ambiente como um todo.

Figura 4.3. Uso do Solo nas Bacias de interesse (1 a 4).



Fonte: Mapa de Cobertura da Terra do Estado de São Paulo- 2010- 1: 100.000 (SMA, 2013)

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo é constituída por etapas clássicas em hidrogeologia, especialmente aquelas voltadas à avaliação de recarga de aquíferos, envolvendo o levantamento de dados hidrogeológicos e hidrológicos (aquisição de dados) e o emprego das metodologias científicas para o cálculo da recarga do SAG.

Após a escolha do escopo do trabalho, iniciou-se o processo de revisão bibliográfica de estudos a respeito das metodologias científicas e das características físicas das áreas de estudo e do SAG.

A próxima etapa foi a aquisição dos dados de monitoramento diário do nível d'água em poços perfurados na área de afloramento do SAG no estado de São Paulo. Esses dados foram levantados no cadastro *online* do RIMAS (CPRM), e cobriram o espaço temporal de aproximadamente cinco anos, de julho de 2011 a dezembro de 2016.

Foram selecionados dados fluviométricos de estações cujas áreas de captação englobavam os poços selecionados na etapa anterior. Dessa forma, as bacias foram delimitadas de forma que houvesse, em cada uma, um poço de monitoramento do RIMAS e uma estação fluviométrica que configurasse o exutório da mesma, ou estivesse próximo a ele. Esses dados foram selecionados do Banco de dados hidrológicos (DAEE) (disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>) e aplicação Hidroweb (ANA) (disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>).

Para a seleção dos dados de precipitação, estações pluviométricas foram selecionadas usando critérios de menor distância dos poços do RIMAS e disponibilidade de dados diários de precipitação de 2011 a 2016, nos bancos de dados hidrológicos do DAEE e na aplicação Hidroweb da ANA.

Também foram adquiridos mapas da região em formato de *shapefile* e *WMS* (*Web Map Service*), junto ao DATAGEO (SMA-SP) e à CPRM. Os códigos de registro dos poços de monitoramento do RIMAS e das estações pluviométricas e fluviométricas constam na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Poços e estações utilizados para obtenção dos dados necessários, com indicação dos municípios os quais estão inseridos, exibidos por Bacia Hidrográfica de interesse.

Bacia Informações	1	2	3	4
Área (km ²)	442	190	584	10.679
Curso d'água Principal	Rio Jacaré Pepira/ Rio Grande	Rio Boa Esperança	Rio do Peixe	Rio Pardo
Subbacia	Rio Jacaré Pepira	Rio Jacaré-Guaçu	Médio Tietê	Rib. da Prata/ Rib. Tamanduá
UGRHI	Tietê-Jacaré (13)	Tietê-Jacaré (13)	Tietê-Sorocaba (10)	Rio Pardo (4)
Poço de Monitoramento	3500027886 ¹ Brotas	3500027888 ¹ Boa Esperança do Sul	3500027885 ¹ Bofete	3500027884 ¹ São Simão
Estação pluviométrica	02247197 ² Brotas	C5-117 ³ Boa Esperança do Sul	E5-096 ³ Bofete	C4-087 ³ São Simão
Estação fluviométrica	5D-028 ³ Brotas	5C-027 ³ Conchas	5E-012 ³ Conchas	4C-001 ³ Ribeirão Preto

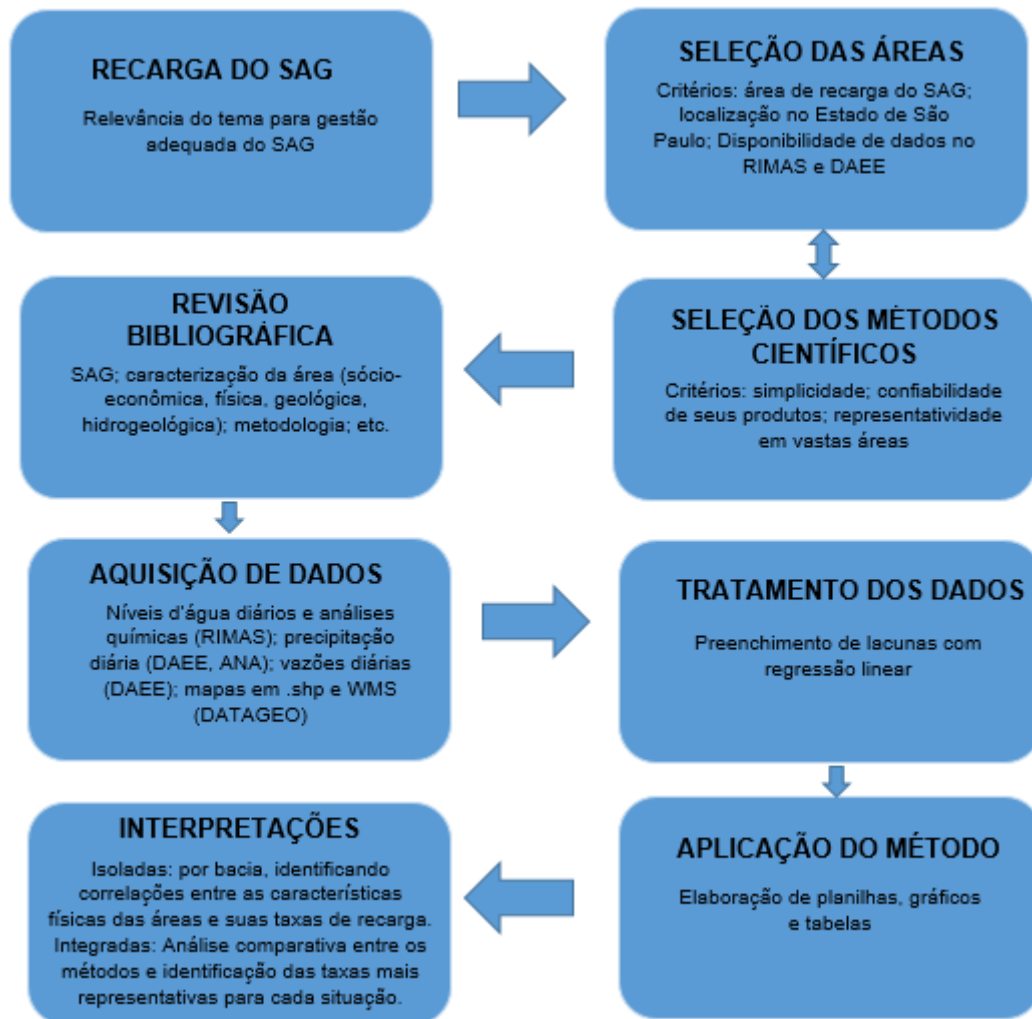
Fontes: (1) RIMAS Web; (2) Hidroweb (ANA), (3) Banco de dados Hidrológicos- DAEE

Em algumas estações fluviométricas os dados apresentados estavam incompletos. Para o preenchimento dessas lacunas, o Sistema de Reconstituição de Séries de Vazões Naturais- Sisvaznat (HORA et al.- 2010) sugere que sejam feitas regressões lineares, correlacionando os dados existentes da estação de interesse a dados de outras estações, na mesma bacia, a fim de se obter um padrão, representado por uma equação do tipo $y = ax+b$, onde y é vazão na estação de interesse e x é a vazão na estação consultada. Posteriormente, aplica-se a equação nos dias sem dados a fim de preencher as lacunas. A recomendação dada é que a correlação seja representada por um r mínimo de 0,90 (90%). Essa reconstituição foi feita com dados de estações fluviométricas de outras estações situadas nos mesmos corpos d'água.

Após a obtenção de todas as informações necessárias foram aplicados dois métodos de estimativa de recarga: o método de variação do nível d'água (*Water Table Fluctuation Method*) (HEALY & COOK, 2002) e a separação do hidrograma utilizando o Filtro de Ekhardt utilizando a equação proposta por Collischonn & Fan (2012). A descrição teórica dos métodos é apresentada no próximo item.

O fluxograma da Figura 5.1 apresenta uma síntese das etapas de desenvolvimento do trabalho.

Figura 5.1. Fluxograma esquemático da metodologia de trabalho.



5.1. Método da Variação do Nível D'Água- Water-Table Fluctuation Method (WTF)

O método da variação do nível d'água, ou WTF, foi desenvolvido por Healy e Cook (2002) e utiliza como premissa que as variações do nível freático são causadas devido à recarga do aquífero livre.

De acordo com Schicht and Walton (1961), a variação de armazenamento de água na zona saturada de uma bacia é dada pela somatória de recarga e entrada de água em subsuperfície (proveniente de outra bacia), subtraindo as perdas por escoamento de

base, perdas em subsuperfície para outras bacias e evapotranspiração, de acordo com a Equação 1.

$$\Delta S_{gw} = R - Q_{bf} - ET_{gw} - Q_{gwoff} + Q_{gwon} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ΔS_{gw} = Variação de armazenamento de água na zona saturada

R= Recarga

Q_{bf} = Escoamento de base

ET_{gw} = Evapotranspiração

Q_{gwoff} = Saída de água em subsuperfície (proveniente de outra bacia)

Q_{gwon} = Entrada de água em subsuperfície (proveniente de outra bacia)

Pelo método do WTF, a recarga é calculada durante o espaço de tempo entre a chegada e redistribuição da água entre os outros componentes do sistema, sendo que, para o período considerado, os parâmetros de evapotranspiração, escoamento de base e vazão de ganho e perda (em relação a outras bacias) são considerados iguais a zero. A recarga, portanto, é dada pela Equação 2:

$$R = S_y Dh/Dt \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

R= recarga (mm);

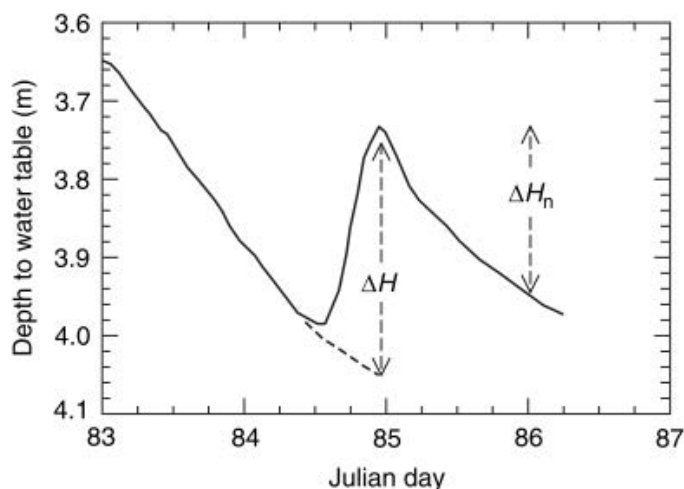
S_y = porosidade efetiva (%);

h = altura do nível d'água (mm); e

t = tempo (meses).

O valor de h é a diferença entre um pico de aumento do NA e a extrapolação, naquele momento, da curva de rebaixamento anterior, como mostrado na Figura 5.1.1. O cálculo é feito para o intervalo de tempo entre o evento de recarga (chuva) e a sua distribuição para fluxo de base, evapotranspiração e outros componentes do ciclo hidrológico. Assim considera-se que toda a água que chega à zona saturada vai para armazenamento.

Figura 5.1.1. Hidrógrafo hipotético de variação do NA, demonstrando o cálculo do parâmetro h .



Fonte: Healy (2010).

Com a série do NA do gráfico foi possível extrapolar a curva de rebaixamento para estimar a variação em cada um dos eventos de recarga.

Morgan & Stolt (2004) determinaram que medições semanais das variações do NA eram subestimadas em cerca de 33% em relação àquelas determinadas a cada meia hora de intervalo. Nos poços do RIMAS, as medições de níveis disponíveis são diárias, mensais e anuais. No presente trabalho os valores diários foram utilizados, fornecendo a maior precisão possível no cálculo.

Como este estudo não previu trabalhos de campo e ensaios geotécnicos, o valor de porosidade efetiva foi estimado de acordo com a literatura científica. Com base em Gomes (2008), que determinou em 12,2% o S_y médio do solo da Bacia do Ribeirão da Onça (Área piloto do SAG- inserida na Sub bacia do Rio Jacaré Guaçu) e no Relatório de Programa Estratégico de Ação do Aquífero Guarani (OEA, 2009), que determinou a faixa de valores variando de 12 a 17%, o valor de S_y selecionado para ser utilizado no presente estudo para o S_y foi de 15%. Estes valores são concordantes com Johnson (1967), que estimou a porosidade efetiva entre 10 e 28% em arenitos finos (de acordo com apresentado na Tabela 2.1.1).

Os dados de variação do NA foram separados em eventos de recarga e, para cada um deles, foi calculada a equação da curva de rebaixamento do NA anterior ($y=ax+b$, sendo ' a '=inclinação e b =intercepção, onde o y =NA e o x =data).

Geralmente as curvas de rebaixamento são estimadas manualmente (HEALY, 2010) ou calculadas com equações exponenciais (SINGH & STALL 1971; WENDLAND et al., 2015), porém observou-se que não haveria prejuízo para a estimativa com a aplicação da Regressão Linear.

A data do pico da próxima elevação do NA foi colocada na equação para o cálculo de um NA hipotético (extrapolado), que teria sido o NA resultante da curva de rebaixamento naquele instante, caso não tivesse ocorrido o evento de recarga (chuva). Desta forma, foi subtraído o valor do pico do NA do valor extrapolado e obteve-se a variação do NA no momento de recarga. Esses valores foram multiplicados por 1000 (para conversão de metros para milímetros) e posteriormente por 0,15 ($S_y=15\%$).

Em seguida, os valores de recarga obtidos, em milímetros, foram divididos pela precipitação total acumulada para obtenção das taxas em relação às chuvas.

É importante salientar que, no cálculo de recarga pelo WTF não são feitas considerações a respeito do movimento da água na zona não-saturada, portanto o método pode ser representativo para grandes áreas, o que explica sua utilização neste estudo para o cálculo da recarga em bacias.

As limitações do método são principalmente as dificuldades na estimativa do S_y , o fato de nem todas as variações do nível d'água indicarem recarga e a quantidade de poços necessários para um cálculo preciso.

5.2. Separação do escoamento de base- Filtro de Eckhardt

O método a ser descrito a seguir é baseado na premissa de que a recarga do aquífero pode ser estimada de acordo com sua descarga nos rios. No entanto, é importante frisar que essa concepção se trata de uma aproximação, uma vez que há outros componentes de entradas e saídas de águas que são desconsiderados na aplicação do método.

O Escoamento de base é definido como a descarga de água subterrânea para um rio ou outro corpo d'água (HEALY, 2010).

A separação do escoamento de base utiliza dados históricos de vazão para determinar as parcelas diretas (escoamento superficial na bacia) e indiretas (suprimento proveniente do aquífero) do escoamento. Collischonn & Fan (2012), com base no filtro numérico de Eckhardt (2005), elaboraram filtros digitais para executar o fracionamento e definir o Índice Máximo de Escoamento de Base (BFIMax).

Os filtros digitais são algoritmos utilizados para calcular o escoamento de base, assumindo que o fluxo de um curso d'água é dado pela soma deste componente ao do escoamento superficial direto, de acordo com a equação 3 (ECKHARDT, 2005):

$$y_i = f_i + b_i \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

y= vazão total do rio;

f= Escoamento superficial;

b=Escoamento de Base;

i= intervalo de tempo

O autor demonstrou que vários outros filtros digitais, como por exemplo o de Chapmam (1999), se aplicam na equação geral 4:

$$B_i = A \times b_{i-1} + B \times y_i \quad \text{Equação 4}$$

Para $b_i < y_i$, onde A e B são parâmetros de cálculo, que podem ser determinados em função de 2 parâmetros: a constante de recessão 'a' e o 'BFImax', a serem explicados a seguir.

Para o cálculo de 'a' devem ser escolhidos períodos de recessão representativos da série, quando não há precipitação e, portanto, o escoamento superficial é igual à zero.

Primeiramente, calcula-se a constante do período 'k', de acordo com Maillet (1905), que se baseia nos componentes de vazão do rio e vazão após um período de tempo t (em período de recessão), de acordo com Equação 5. A constante 'a' é baseada na constante k, no número de Euler e no período de tempo, de acordo com a Equação 6.

$$k = \frac{-\Delta t}{\ln\left(\frac{Q(t+\Delta t)}{Q(t)}\right)} \quad \text{Equação 5}$$

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}}$$

Equação 6

Onde:

k=Constante do período característico;

Q=Vazão;

t=tempo;

e= número de Euler.

O parâmetro BFI (Base Flow Index) é a razão, a longo prazo, entre o escoamento de base e a vazão total do rio (Equação 7).

$$BFI = \frac{\sum_{i=1}^N b_i}{\sum_{i=1}^N y_i}$$

Equação 7

Onde:

BFI= Índice de escoamento de base;

b= Escoamento de base;

y=Vazão do rio.

O BFI depende de aspectos geológicos e é utilizado para comparação de contribuição relativa de escoamento de base para o fluxo de um rio. De acordo com Stricker (1983) e Kuniansky (1989), os valores variam de 0,4 a 0,8. O valor máximo do índice, BFI_{max}, é utilizado para o cálculo do algoritmo.

De acordo com Eckhard (2005), os parâmetros da equação 4 podem ser definidos com base na constante 'a' e no parâmetro BFI_{max}, de acordo com as equações 8 e 9:

$$B = \frac{(1-a) \times BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}}$$

Equação 8

$$A = \left(\frac{1-BFI_{max}}{1-a \times BFI_{max}} \right) \times a$$

Equação 9

Assim, com base nas equações 4, 8 e 9, tem-se que:

$$b_i = \frac{(1-BFI_{max}) \times a \times b_{i-1} + (1-a) + BFI_{max} \times y_i}{1-a \times BFI_{max}} \quad \text{Equação 10}$$

Eckhardt (2005) sugeriu valores pré-definidos de BFI_{max} de acordo com o arcabouço geológico e hidrológico locais, sendo 0,8 para rios perenes em aquíferos porosos; 0,25 para rios perenes em aquíferos fraturados e 0,5 para rios efêmeros. Collischon & Fann (2012) propuseram outras formas para estimar o BFI_{max} baseadas nas vazões Q₉₀ e Q₅₀, chegando à Equação 11, válida para as regiões sul e central do Brasil.

$$BFI_{max} = 0,8344 \frac{Q_{90}}{Q_{50}} + 0,2146 \quad \text{Equação 11}$$

Posteriormente aos cálculos de vazão de base, de acordo com a equação 2, foi calculada uma média para o período. A média do fluxo de base foi aplicada à Equação 12 para o cálculo da recarga. A equação é simplesmente a divisão do fluxo de base pela área da bacia e conversão de grandezas, de metros para milímetros e de segundos para anos.

$$TR = \frac{b}{A} \times 1000 \times 31622400 \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

TR= Taxa de recarga efetiva (mm/ano);
b= média dos valores de vazão de base (m³/s);
A= Área da bacia (m²).

De forma sintética, as taxas de recarga foram estimadas seguindo alguns passos, com base no artigo de Collischonn & Fan (2012):

1. Seleção dos períodos de recessão representativos para determinar o 'a';
2. Obtenção do Q₉₀ e Q₅₀ e aplicação da equação 11 para cálculo do parâmetro BFI_{max},
3. Aplicação da equação 10 para cada série diária de dados e para cada um dos dois valores de BFI_{max};

4. Execução do cálculo da recarga, convertendo o fluxo de base médio (m^3/s) em mm/ano , com base na área de drenagem da bacia.

Como mencionado no início do capítulo, existem algumas limitações intrínsecas ao método e às premissas que ele adota, que são principalmente associadas ao fato de que, na verdade, o escoamento de base é apenas uma parcela da recarga, e não o todo. Observando a Equação 1 é possível concluir que existem também, no balanço hídrico, parâmetros como a variação na superfície do aquífero, a evaporação e evapotranspiração na zona saturada, além de trocas de águas com outras bacias. Além desses componentes, há o armazenamento de água no aquífero e a extração por poços, que também alteram a correlação entre recarga e descarga. Outro possível erro é relacionado à premissa de que, no período de recessão, a água vem exclusivamente da descarga do aquífero (HEALY, 2010). Há, ainda, a questão da divisão do fluxo de base na área da bacia, procedimento que assume que o contorno do aquífero coincide com os limites da bacia hidrográfica, o que não é necessariamente verdadeiro (HEALY, 2010). Rutledge (1998) sugere que a técnica seja aplicada em bacias menores que 1300 km^2 .

Para a comparação da recarga anual com a precipitação foram utilizados dados diários das mesmas estações mostradas na tabela 5.1.

5.3. Avaliação da Qualidade da Água

O presente estudo tem foco na quantificação das reservas renováveis do SAG. Porém, sabe-se que os parâmetros qualitativos estão intimamente relacionados à disponibilidade das reservas hídricas, uma vez que não é satisfatório ou eficiente haver recursos hídricos em excesso, se estes estiverem impróprios para uso. Portanto, ambas as análises- quantitativas e qualitativas, devem estar assimiladas para a gestão integrada sustentável dos recursos.

Neste cenário, é importante a apresentação de um panorama geral simplificado da situação da qualidade das águas subterrâneas na área de interesse. Os quatro poços de monitoramento do RIMAS de interesse são munidos de informações de análises de 43 parâmetros químicos do ano de 2016.

Os resultados analíticos foram organizados em tabela e comparados com os respectivos valores orientadores mais restritivos dentre os seguintes:

- Valores Máximos Permitidos da Portaria de Potabilidade 2.914 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011);
- Valores Orientadores para Água Subterrânea da Resolução nº420 (CONAMA, 2009);
- Valores de intervenção para Água Subterrânea da Decisão de Diretoria nº 256 (CETESB, 2016); e
- Valores Máximos Aceitáveis para Águas de Consumo Alimentar- Categoria IIb (Águas de poços) da Resolução CNNPA nº12 (ANVISA, 1978).

Na ausência de valores comparativos nestas normas foram utilizados os *Regional Screening Levels- RSL* (THQ=1; TR=10E-6) para Tap Water (EPA, 2017).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

• Preenchimento de lacunas de dados de vazão

Na avaliação inicial dos dados pluviométricos foram identificadas inúmeras lacunas nos dados, que foram preenchidos aplicando técnicas de regressões lineares simples e múltiplas nas séries temporais. Para algumas das estações as séries temporais foram divididas entre os períodos seco e chuvoso, de acordo com sugestão do Sisvaznat (HORA et al., 2010), a fim de se alcançar um alto valor de r . O valor máximo obtido foi 0,85. Ressalta-se que o método não foi usado para fazer previsões de grandes períodos, portanto não são esperados erros significantes decorrentes desta correção. Os resultados são apresentados de maneira resumida na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Métodos utilizados no preenchimento de lacunas de dados de vazões e respectivos valores de r .

Estação	Dias			Método de Preenchimento	R	2ª opção de método de preenchimento	R
	Sem dados	Totais	%				
1-Brotas 5D-028	264	1995	13,2	RLMs (seca e chuva) com base nas estações 5C-013, 5C-027, 5C-028	0,79 (chuva) 0,85 (seca)	RLS (seca e chuva) com base nas estações 5C-013 e 5C-027	0,79 (chuva) 0,83 (seca)
2-B. Esp. Sul 5C-027	34	1995	1,7	RLMs (seca e total) com base nas estações 5C-013, 5D-028, 5C-028	0,75 (seca): 0,68 (geral)	RLS com base nas estações 5D-028 ou 5C-013	5D-028: 0,61 5C-013: 0,54
3-Conchas 5E-12	30	1997	1,5	RLS com base na estação 4E-004	0,61	RSL com base na estação 4E-019	0,53
4- Ribeirão Preto 4C-001	0	1992	0,0	-	-	-	-

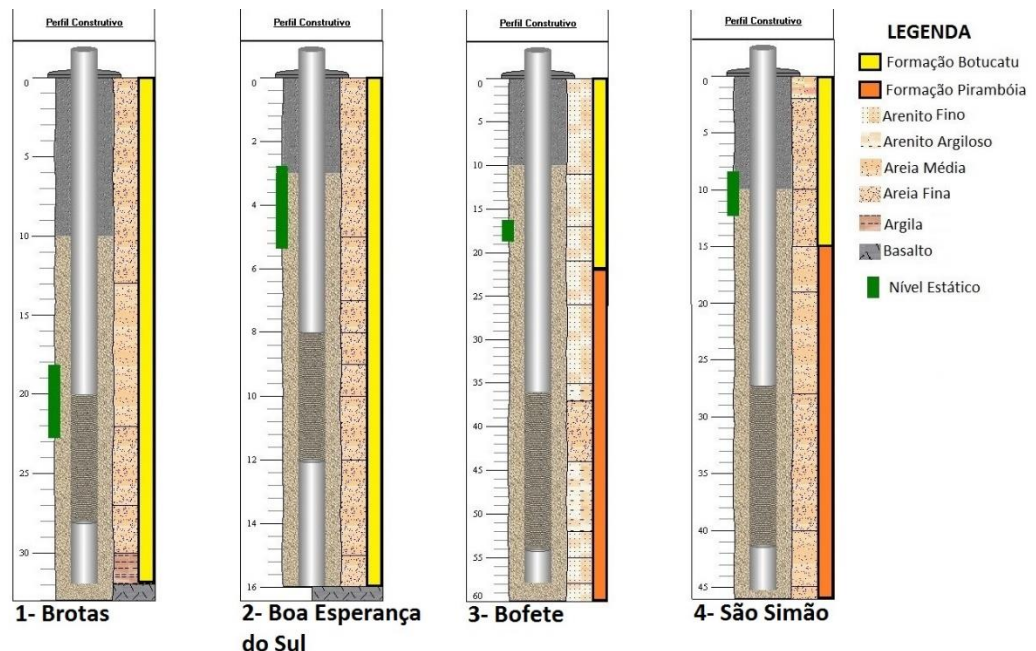
Legenda: RLM: Regressão Linear Múltipla; RLS: Regressão Linear Simples.

• Análise dos perfis geológicos

Os perfis litológicos dos poços do RIMAS (Figura 6.1), indicam que as profundidades dos PM variam de 16 a 60 metros, todos eles perfurados em litologias do SAG. De acordo com a análise dos perfis e da descrição litológica, a Formação Botucatu está presente em todos os PMs, com espessura variando de 15 a 32 metros, e composição que varia entre materiais arenosos finos pouco argilosos a médios e bem selecionados. No poço localizado no município de Bofete, a descrição indica que o material é mais consolidado, sendo a formação Botucatu composta por arenitos finos no PM em questão.

A Formação Pirambóia ocorre nos poços de Bofete e São Simão, entre 15 e 20 metros de profundidade, sendo que em São Simão há descrições de areias de diferentes granulometrias (finas a grossas) com fácies argilosas e/ou conglomeráticas. Já em Bofete há, novamente, materiais mais bem consolidados, sendo descritos como arenitos finos- argilosos ou bem selecionados.

Figura 6.1. Perfis litológicos dos Poços de Monitoramento na área de interesse.



Fonte: Modificado de RIMAS- CPRM (Acesso: julho/2017)

6.1. Cálculo das taxas de recarga

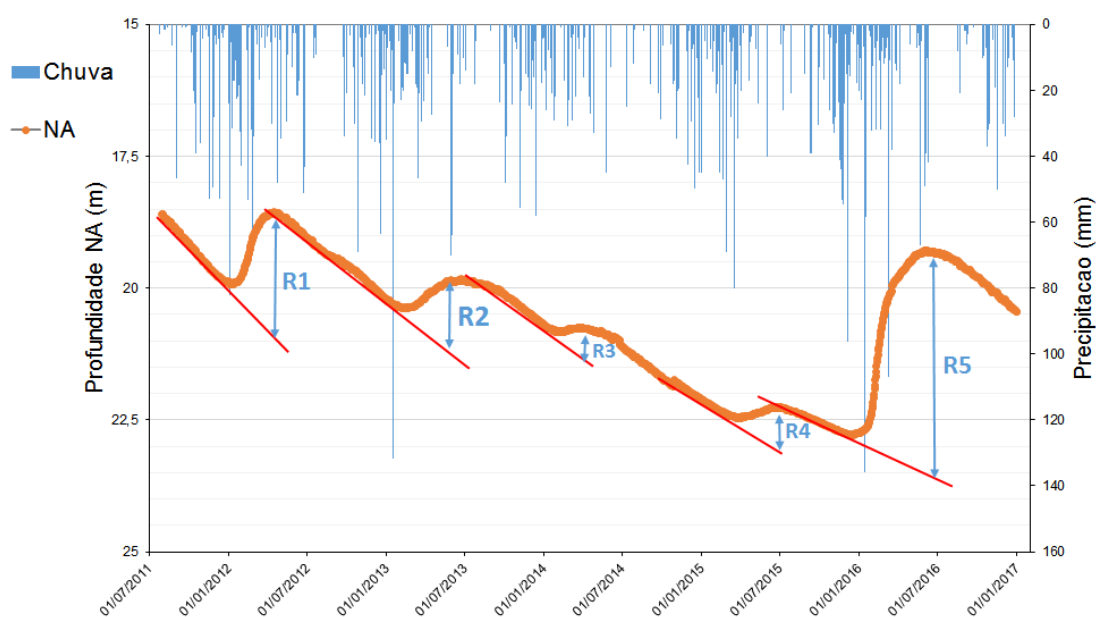
A seguir serão apresentados os resultados e discussões referentes aos cálculos das taxas de recarga por Bacia, de acordo com ambos os métodos descritos no capítulo 5; e subsequente análise comparativa da adequabilidade e integração metodológica.

6.1.1. Cálculo das taxas de recarga na região de Brotas (Bacia 1)

A Figura 6.1.1.1. apresenta a variação diária do NA no Poço RIMAS em Brotas e a precipitação na observada no município.

No período do monitoramento a precipitação total observada na área foi de aproximadamente 7900 mm, com os anos mais chuvosos 2012 e 2015, e o mais seco 2014. A profundidade do nível d'água no poço de monitoramento variou de 18,56 a 22,79, com média 20,55 metros com principais eventos de recarga (R1 e R5) associados às precipitações nos anos de 2011-2012 e 2015-2016.

Figura 6.1.1.1. Bacia 1: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Brotas e precipitação diária na Estação 02247197, no mesmo município, com designação dos 5 eventos de recarga no período (30/07/2011 a 31/12/2016).



Fonte: RIMAS Web e Banco de dados hidrológicos- DAEE.

As taxas de recarga calculadas pelo método WTF, considerando-se um S_y de 15%, são apresentadas na Tabela 6.1.1.1., discriminadas por eventos e a recarga total.

Tabela 6.1.1.1. Bacia 1: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Brotas (3500027886).

Evento	R1	R2	R3	R4	R5	Recarga total ¹	Precipitação total ¹	R (%)
Valores	348	217,5	63	102	613,5	1344	7908,95	16,99%

Legenda: (1): em mm, no período (30/07/11 a 31/12/16)

A Figura 6.1.1.2. e a Tabela 6.1.1.2. apresentam, respectivamente, o hidrograma com a separação do escoamento de base e os principais parâmetros calculados para a Bacia 1.

No período de monitoramento a vazão do rio Jacaré-Pepira na estação fluviométrica 5D-028, apresentou valores que variaram de 1,6 a 65,1 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, com vazão média de 7,2 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e vazões Q_{90} e Q_{50} de 3,03 e 5,94, respectivamente. Observa-se que os aumentos de vazão no rio estão associados aos períodos chuvosos.

Figura 6.1.1.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5D-028 (DAEE), em Brotas, no período de 01/05/2011 a 15/10/2016, com os respectivos hidrogramas representativos do Escoamento de base, calculados com base em dois diferentes parâmetros BF_{Imax} .

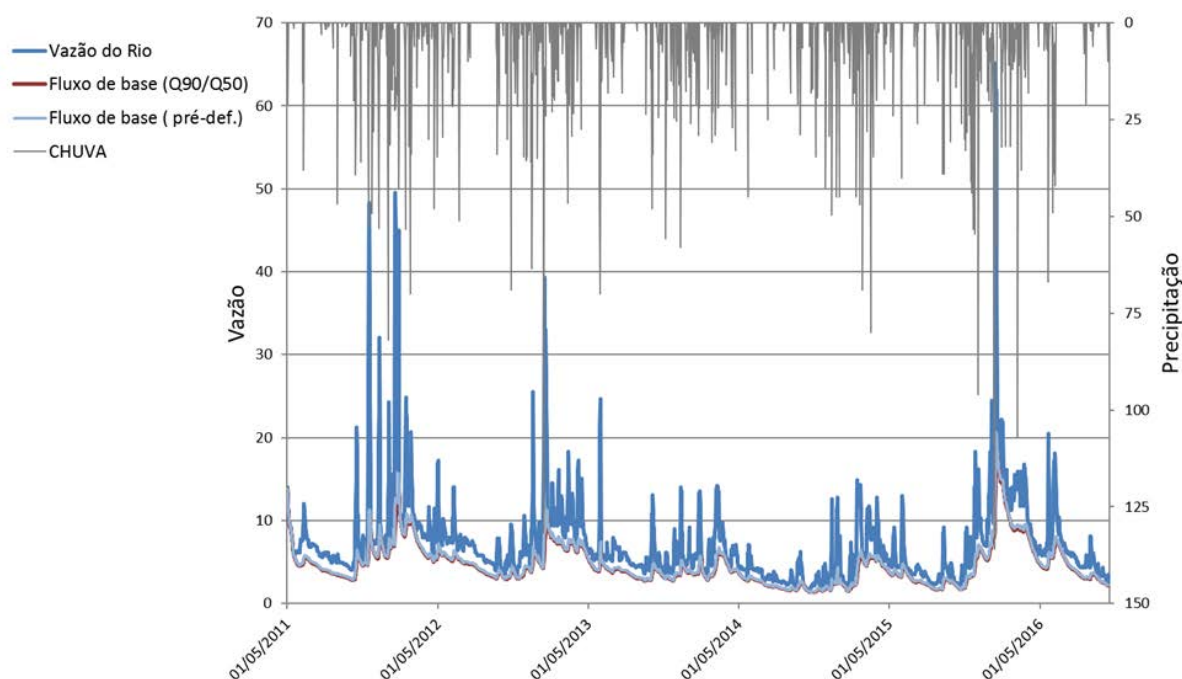


Tabela 6.1.1.2. Bacia 1- Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5D-028 (DAEE).

P (mm/ano)	Área (km ²)	a	Cálculo em função de Q90/Q50				Cálculo com BFImax pré-definido				Recarga média (%)
			BFImax	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	BFImax	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	
1507	442	0,968	0,64	64	330	21,94	0,8	66	342	22,7	22,32

Legenda: (1): Recarga (mm/ano); Recarga em relação à Precipitação Efetiva (mm/ano).

Na bacia 1 a recarga estimada pelo método do WTF foi de aproximadamente 17% da precipitação, enquanto a calculada pelo método da separação do escoamento de base apresentou valores aproximados de 22% da precipitação, não havendo grandes diferenças entre o valor calculado pelo BFImax_{Q90/Q50} e pelo BFImax pré-definido. De acordo com o Mapa Geológico (Figura 4.2), o contexto geológico da região é variado, composto principalmente pelas Formações Botucatu e Itaqueri, unidade constituída principalmente por sedimentos grossos. Esses aquíferos tendem a possuir altas permeabilidade e porosidade, portanto são esperados valores mais altos de infiltração de água e recarga.

Com relação aos métodos utilizados, sabendo-se que um deles estima a recarga pela entrada e outro pela saída de água do sistema (de acordo com Equação 1), é possível sugerir que a diferença entre os valores calculados pode estar relacionada à entrada de água na bacia (proveniente de outro sistema). Porém, neste caso, é mais provável que a variação esteja associada à subestimativa da porosidade efetiva (inicialmente estabelecida em 15%), gerando um erro no cálculo pelo WTF. De acordo com a Tabela 2.1.1, os valores de S_y são mais altos para sedimentos mais grosseiros, portanto o valor calculado pelo método do WTF pode não ser representativo para a bacia toda. Dessa forma, o valor calculado pelo método de separação de escoamento de base foi considerado mais próximo da realidade.

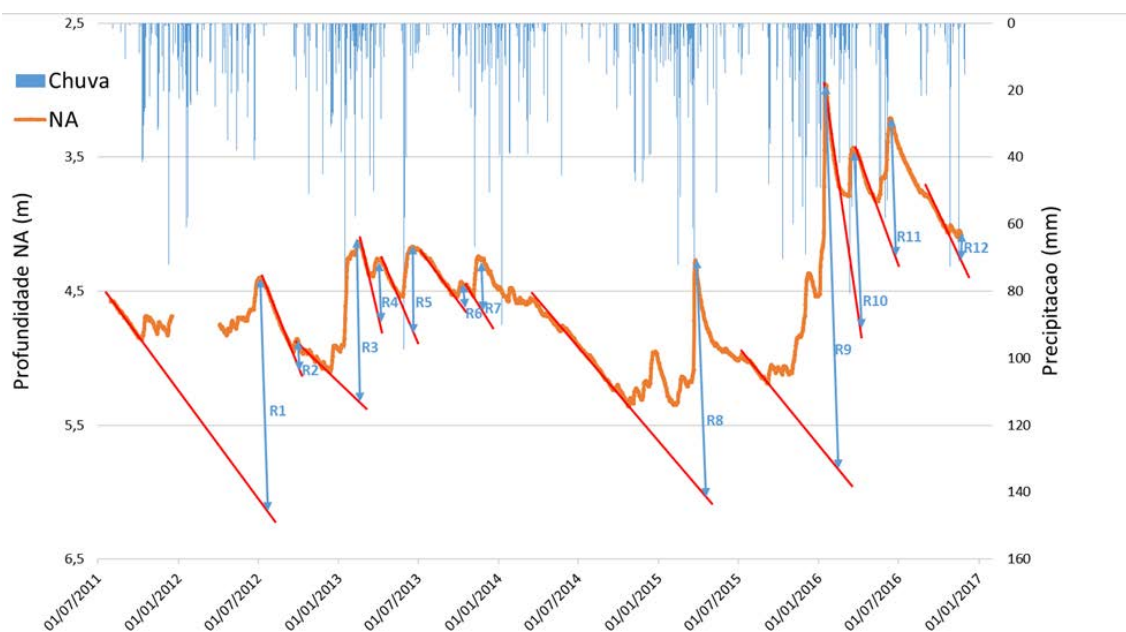
6.1.2. Cálculo das taxas de recarga na região de Boa Esperança do Sul (Bacia 2)

No período do monitoramento a precipitação total observada na área foi de aproximadamente 7800 mm, com os anos mais chuvosos 2015 e 2016, e o mais seco 2014. A profundidade do nível d'água no poço de monitoramento variou de 2,96 a

5,36, com média 4,57 metros com principais eventos de recarga (R1, R8 e R9) associados às precipitações nos anos de 2011-2012, 2014-2015 e 2015-2016.

A Figura 6.1.2.1. apresenta a variação diária do NA no Poço RIMAS em Boa Esperança do Sul e a precipitação na estação mais próxima, no mesmo município. As taxas de recarga por evento e total no período, considerando-se um Sy de 15%, podem ser observadas na Tabela 6.1.2.1.

Figura 6.1.2.1. Bacia 2: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Boa Esperança do Sul e precipitação diária na Estação C5-117, no mesmo município, com designação dos 12 eventos de recarga no período (30/07/2011 a 31/12/2016).



Fonte: RIMAS Web e Banco de dados hidrológicos- DAEE.

Tabela 6.1.2.1. Bacia 2: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Boa Esperança do Sul (350027888).

Evento	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R _{total} ¹	P total ¹	R (%)
Valores	246	25	170	49	84	24	52.5	237	416	126	136	26	1592	7800	20,67%

Legenda: R: Recarga; P: Precipitação; (1): em mm, no período (30/07/11 a 31/12/16)

No período de monitoramento a vazão do rio Boa Esperança do Sul na estação fluviométrica 5C-027, apresentou valores que variaram de 1,09 a 19,1 m³.s⁻¹, com

vazão média de $2,15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ e vazões Q_{90} e Q_{50} de 1,41 e 1,9, respectivamente. Observa-se que os aumentos de vazão no rio estão associados aos períodos chuvosos.

A Figura 6.1.2.2 e a Tabela 6.1.2.2 apresentam, respectivamente, o hidrograma com a separação do escoamento de base e os principais parâmetros calculados para a Bacia 2.

Figura 6.1.2.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5C-027 (DAEE), em Boa Esperança do Sul, no período de 01/05/2011 a 15/10/2016, com os respectivos hidrogramas representativos do Escoamento de base, calculados com base em dois diferentes BFI_{max}.

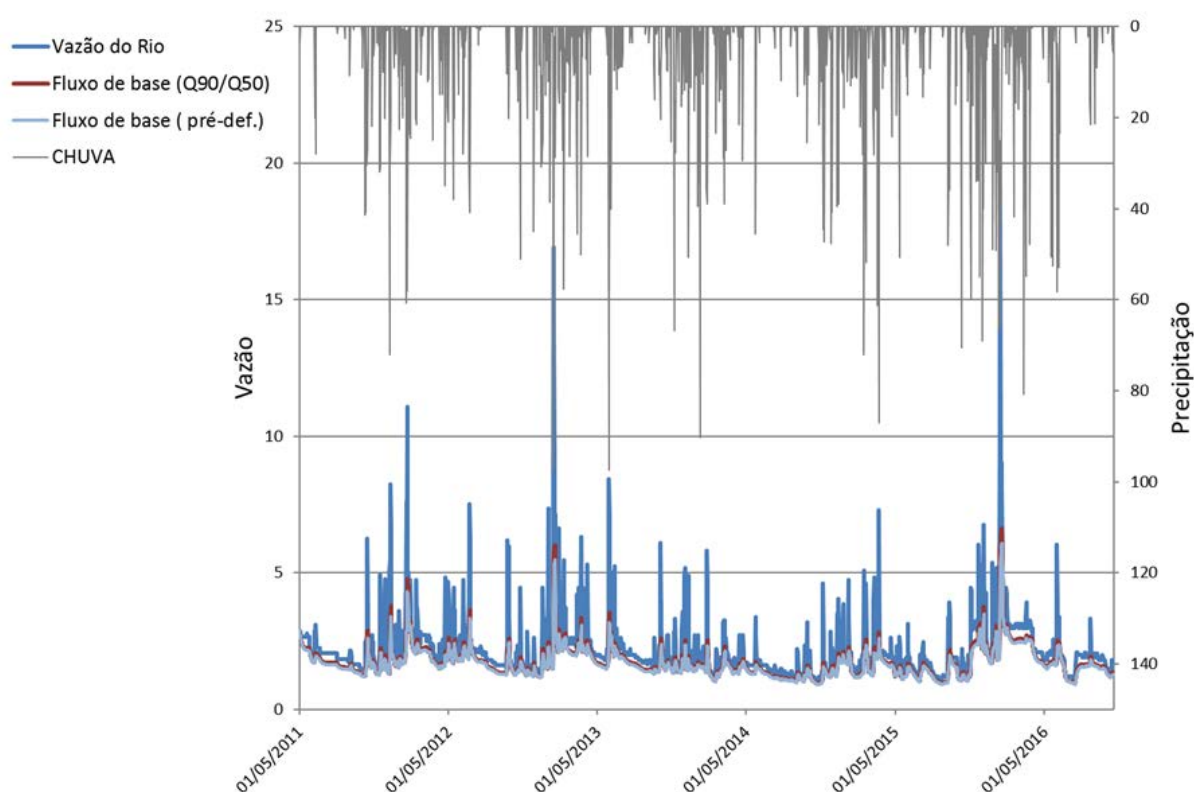


Tabela 6.1.2.2. Bacia 2- Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5C-027 (DAEE).

P (mm/ano)	Área (km²)	a	Cálculo em função de Q90/Q50				Cálculo com BFI _{max} pré definido				Recarga média (%)
			BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	
1369	190	0,959	0,833	81	289,6	21,15%	0,8	78	279,3	20,40%	20,78%

Legenda: (1): Recarga (mm/ano); Recarga em relação à Precipitação Efetiva (mm/ano).

As taxas de recarga das águas subterrâneas para a Bacia 2 indicaram valores de aproximadamente 21% para ambos os métodos, havendo ótima correlação entre eles.

Os valores altos devem ser atribuídos principalmente às excelentes propriedades hidrogeológicas da Formação Botucatu, como ocorre na Bacia 1. Os altos valores de recarga também podem ter contribuição do uso do solo na região (Figura 4.3), com escassa cobertura vegetal, que reduz a evapotranspiração na área.

A Bacia se diferencia das demais por ser a de menor tamanho (aproximadamente 200km²), e a com maior área do SAG aflorante (relativa à área total), representado exclusivamente pela Formação Botucatu. Outro aspecto hidrogeológico que a difere das demais é seu padrão de recarga, constituído por 12 eventos- mais que o dobro dos outros poços, no mesmo período.

O padrão de recarga está relacionado à profundidade rasa do NA (cerca de 4,5 metros), que fornece à região alta sensibilidade às chuvas, mesmo àquelas menos expressivas, pois uma vez que a distância a ser percorrida pela água (espessura da zona não saturada) é menor, ela leva menos tempo para chegar ao aquífero. Isto é claramente evidenciado no gráfico, uma vez que mesmo as precipitações isoladas causam breves elevações do NA. Um exemplo disso está entre os dias 28 e 30 de maio de 2013, quando choveu 174mm e o NA subiu 15 centímetros (de 4,52 a 4,37 m) em apenas 4 dias.

Quanto à metodologia de cálculo, o fato de a bacia ser pequena indica uma certa propensão à maior representatividade de ambos os métodos, já que possíveis erros relacionados à regionalização das informações obtidas pontualmente são minimizados. Isto é evidenciado pelos resultados muito parecidos (diferença máxima de 0,75%) de ambos os métodos.

É importante salientar, também, que, uma vez que os processos de circulação de água são mais dinâmicos nesta bacia, a vulnerabilidade dela à contaminação tende a ser maior.

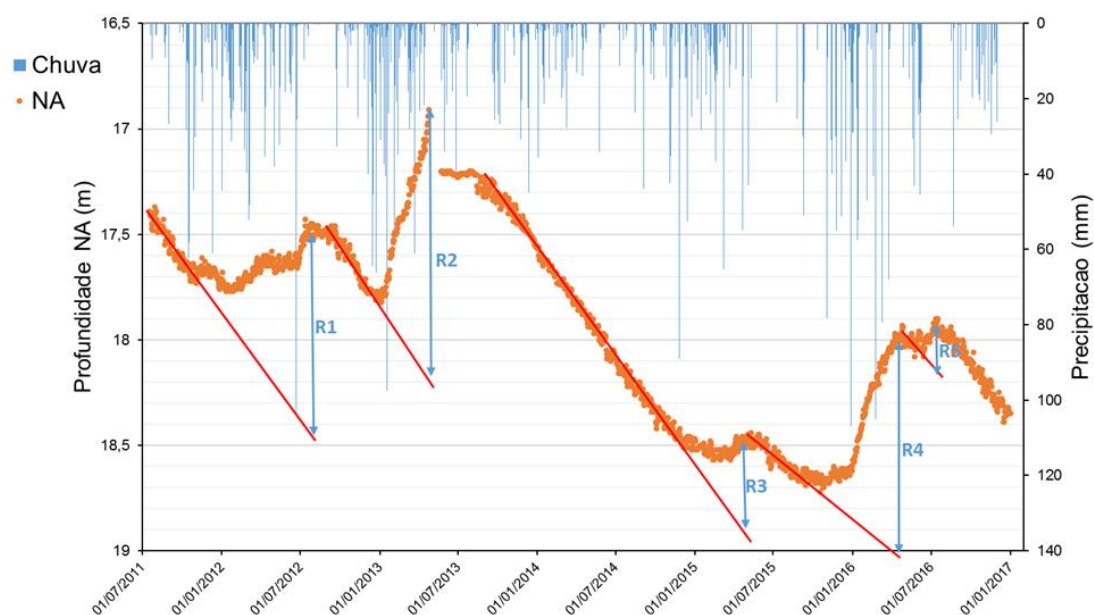
6.1.3. Cálculo das taxas de recarga na região de Bofete (Bacia 3)

No período do monitoramento a precipitação total observada na área foi de aproximadamente 7065 mm, com os anos mais chuvosos 2012 e 2013, e o mais seco 2014. A profundidade do nível d'água no poço de monitoramento variou de 18,72 a

16,91, com média 17,93 metros com principais eventos de recarga (R1, e R2) associados às precipitações nos anos de 2011-2012 e 2012-2013.

A Figura 6.1.3.1. apresenta a variação diária do NA no Poço RIMAS em Bofete e a precipitação na estação mais próxima, no mesmo município. As taxas de recarga por evento e total no período, considerando-se um Sy de 15%, podem ser observadas na Tabela 6.1.3.1.

Figura 6.1.3.1. Bacia 3: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de Bofete e precipitação diária na Estação E5-096, no mesmo município, com designação dos 5 eventos de recarga no período (30/07/2011 a 31/12/2016)



Fonte: RIMAS Web e Banco de dados hidrológicos- DAEE.

Tabela 6.1.3.1. Bacia 3: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de Bofete (3500027885).

Evento	R1	R2	R3	R4	R5	Recarga total¹	Precipitação total¹	R (%)
Valores	161	186	61,5	150	19,5	577,5	7064,94	8,17%

Legenda: (1): em mm, no período (30/07/11 a 31/12/16)

A Figura 6.1.3.2. e a Tabela 6.1.3.2 apresentam, respectivamente, o hidrograma com a separação do escoamento de base e os principais parâmetros calculados para a Bacia 3.

No período de monitoramento a vazão do Rio do Peixe na estação fluviométrica 5E-012, apresentou valores que variaram de 0,25 a 166,43 m³.s⁻¹, com vazão média de 5,16 m³.s⁻¹ e vazões Q₉₀ e Q₅₀ de 0,877 e 2,47, respectivamente. Observa-se que os aumentos de vazão no rio estão associados aos períodos chuvosos.

Figura 6.1.3.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 5E-012 (DAEE), em Conchas, no período de 01/05/2011 a 17/10/2016, com os respectivos hidrogramas representativos do Escoamento de base, calculados com base em dois diferentes BFI_{max}.

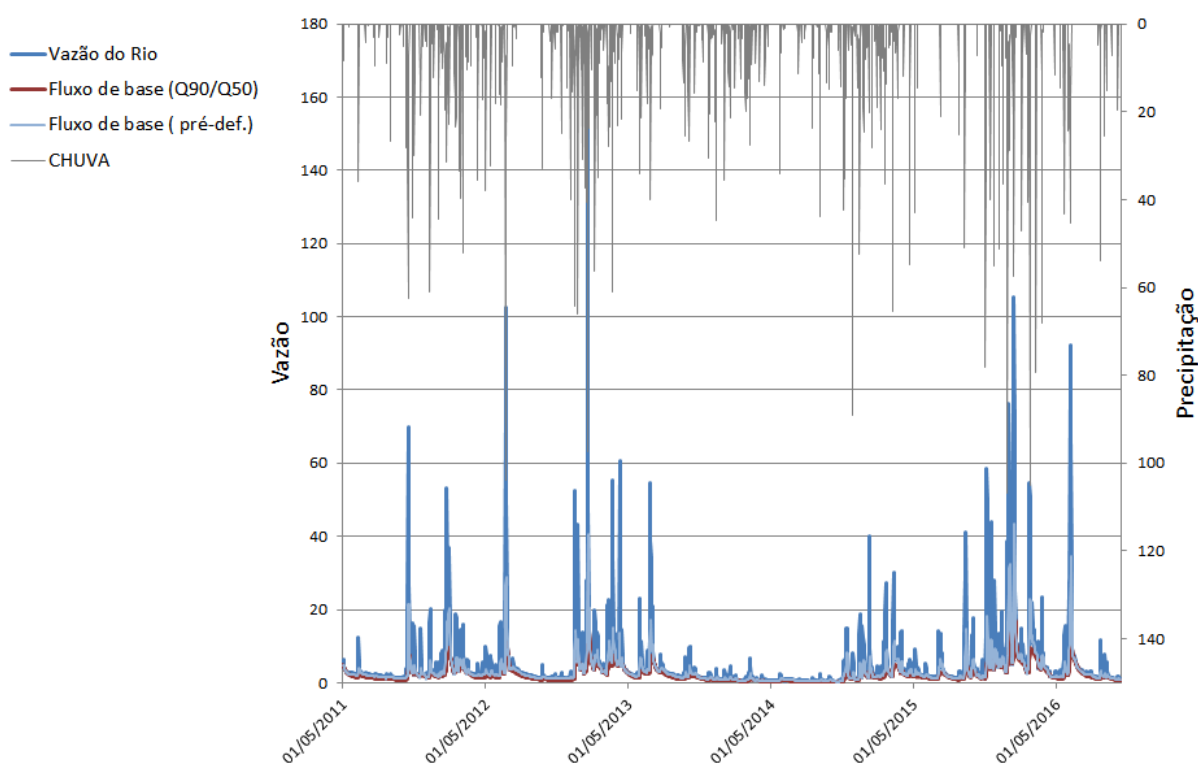


Tabela 6.1.3.2. Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 5E-012 (DAEE).

P (mm/ano)	Área (km ²)	a	Cálculo em função de Q90/Q50				Cálculo com BFI _{max} pré definido				Recarga média (%) (%)
			BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	
1354	584	0,957	0,511	44,5	124,4	9,19%	0,8	64	178,7	13,20%	11,19%

Legenda: (1): Recarga (mm/ano); Recarga em relação à Precipitação Efetiva (mm/ano).

As taxas de recarga calculadas para a Bacia 3 apresentaram valores de aproximadamente 8,2% pelo método do WTF; e 9,2 e 13,2% pelos métodos da

separação do escoamento básico com o $BF_{I\max Q_{90}/Q_{50}}$ e o $BF_{I\max}$ pré-definido, respectivamente.

A precipitação total acumulada na estação de Bofete destaca-se por ser a menor dentre todas, cerca de 800mm (10%) a menos que a estação de Brotas por exemplo. Somente este fator, no entanto, não justifica recargas tão baixas na região, sendo as taxas estimadas em menos da metade daquelas observada nas Bacias 1 e 2.

É muito provável que a menor recarga esteja relacionada à geologia e ao uso do solo local da área. De acordo com o Mapa Geológico (Figura 4.3), a Formação Pirambóia é predominante na Bacia, seguida pelo Grupo Passa Dois, que constitui um Aquicludo (IRITANI&EZAKI, 2009). Isso indica que há uma maior porcentagem de argila nas rochas da bacia, material de menores permeabilidades e condutividades hidráulicas. Essa relação de menor infiltração devido à característica mais impermeável do meio também é evidenciada pela grande variação das vazões do rio (de 0,25 a 166,43 m³.s⁻¹), indicando que o componente de escoamento superficial é bastante expressivo na bacia, o que faz com que a vazão aumente muito em épocas de chuva (chegando a 32 vezes sua vazão média). Além disso, de acordo com os perfis litológicos (Figura 6.1), o poço de Bofete é o único que possui materiais geológicos consolidados (classificados como ‘arenito’ ao invés de ‘areia’), o que sugere maior litificação e consequente menor porosidade. Essas características proporcionam um certo “grau de confinamento” ao aquífero na bacia, onde o NA é um dos mais profundos, dificultando assim a chegada da água na zona saturada. Somado a isto, a bacia em questão tem maior área de cobertura vegetal, o que propicia uma maior evapotranspiração da água, antes de ela chegar à zona saturada de fato.

Apesar de a recarga ser menor na Bacia 3, tanto em termos absolutos como relativos, uma vez que a água chega ao NA, ela tende a se movimentar muito mais lentamente, devido à propriedade de baixa condutividade hidráulica da argila. Tal fato é evidenciado pelas curvas de recessão do NA serem bem mais suaves (Figura 6.1.6.1.) e, portanto, possuírem menores coeficientes de angulação na equação.

Com relação ao método da separação do escoamento de base, utiliza-lo com o $BF_{I\max}$ pré-definido por Eckhardt (2005) não é recomendável para esta bacia, uma vez que, apesar de o rio principal da área constituir um ‘rio perene em aquífero granular’, há grande heterogeneidade do arcabouço geológico na região quanto à sua

composição (havendo muita argila), portanto utilizar o BFI_{max} igual à 0,8, como proposto, superestima os valores da recarga.

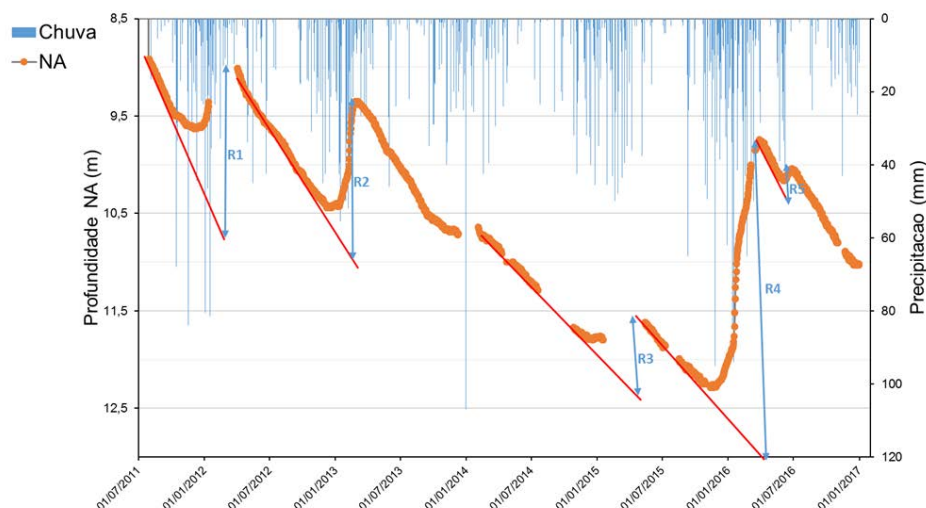
Já os resultados calculados com base no Q_{90}/Q_{50} e no WTF possuem boa correlação e podem, inclusive, ser indicados para cálculo de outras variantes do balanço hídrico. Wendland et al. (2015) utilizaram o cálculo de recarga por WTF, juntamente com o método de separação de escoamento de base (GOMES 2008; COLLISCHONN & TUCCI, 2001), para estimar a recarga profunda do SAG na Bacia do Ribeirão da Onça, uma vez que não há um método ou dispositivo técnico específico para esta estimativa.

6.1.4. Cálculo das taxas de recarga na região de São Simão (Bacia 4)

No período do monitoramento a precipitação total observada na área foi de aproximadamente 7160 mm, com os anos mais chuvosos 2013 e 2016, e o mais seco 2014. A profundidade do nível d'água no poço de monitoramento variou de 12,29 a 8,92, com média 10,47 metros com principais eventos de recarga (R1, R2, e R4) associados às precipitações nos anos de 2011-2012, 2012-2013 e 2015-2016.

A Figura 6.1.4.1. apresenta a variação diária do NA no Poço RIMAS em São Simão e a precipitação na estação mais próxima, no mesmo município. As taxas de recarga por evento e total no período podem ser observadas na Tabela 6.1.4.1.

Figura 6.1.4.1. Bacia 4: Variação diária do nível d'água no Poço RIMAS do município de São Simão e precipitação diária na Estação C4-087, no mesmo município, com designação dos 5 eventos de recarga no período (30/07/2011 a 31/12/2016).



Fonte: RIMAS Web e Banco de dados hidrológicos- DAEE.

Tabela 6.1.4.1. Bacia 4: Recarga total no período, discriminada por evento, no Poço RIMAS de São Simão (350027884).

Evento	R1	R2	R3	R4	R5	Recarga total ¹	Precipitação total ¹	R (%)
Valores	211.5	229.5	114	454.5	46.5	1056	7160,1	14,75%

(1): em mm, no período (30/07/11 a 31/12/16)

A Figura 6.1.4.2. e a Tabela 6.1.4.2. apresentam, respectivamente, o hidrograma com a separação do escoamento de base e os principais parâmetros calculados para a Bacia 4.

No período de monitoramento a vazão do Rio Pardo na estação fluviométrica 4C-001, apresentou valores que variaram de 32,3 a 786,27 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, com vazão média de 143 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ e vazões Q_{90} e Q_{50} de 57,35 e 122,1, respectivamente. Observa-se que os aumentos de vazão no rio estão associados aos períodos chuvosos.

Figura 6.1.4.2. Hidrograma de Vazão na Estação Fluviométrica 4C-001 (DAEE), em Ribeirão Preto, no período de 01/05/2011 a 12/10/2016, com os respectivos hidrogramas representativos do Escoamento de base, calculados com base em dois diferentes BFI_{max}.

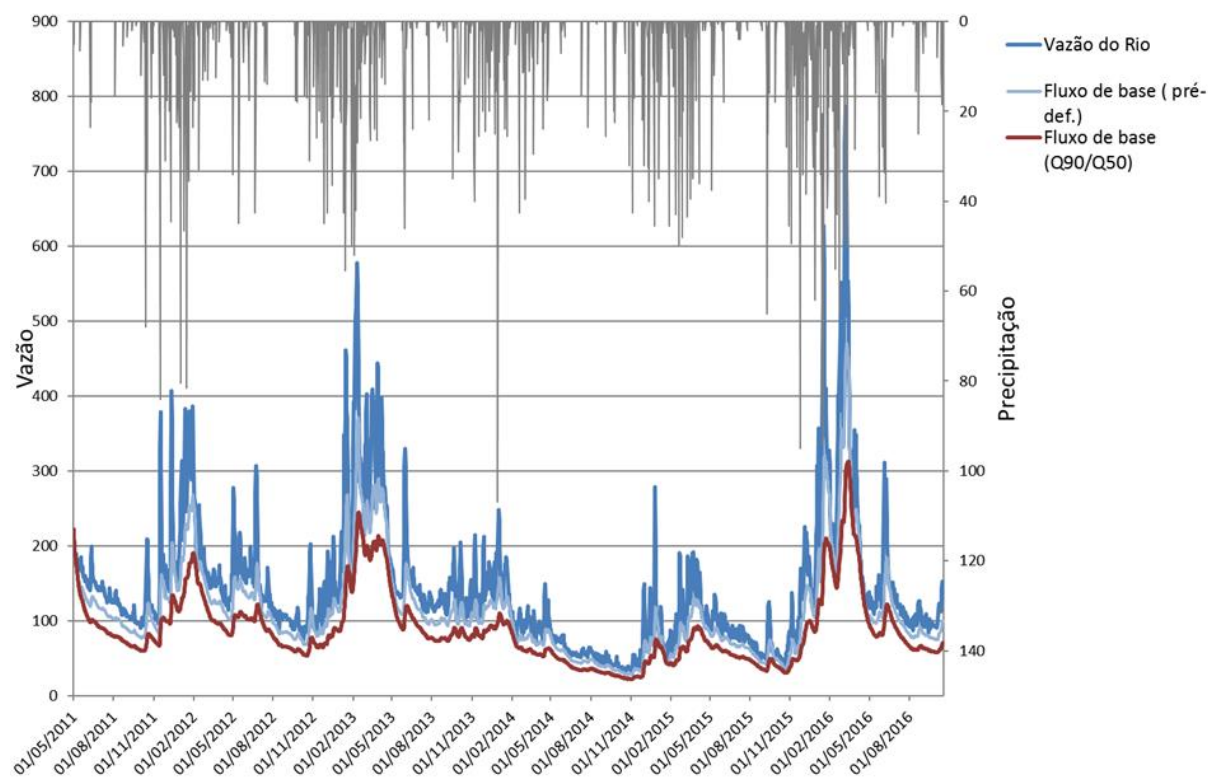


Tabela 6.1.4.2. Resultados obtidos com o método da separação do escoamento de base aplicado nas vazões da Estação 4C-001 (DAEE).

P (mm/ano)	Área (km²)	a	Cálculo em função de Q90/Q50				Cálculo com BFI _{max} pré definido				Recarga média (%)
			BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	BFI _{max}	R _{pef} ² (%)	R ¹	R (%)	
1374	10679	0,966	0,607	61,2	259,1	18,86%	0,8	79	334,6	24,35%	21,60%

Legenda: (1): Recarga (mm/ano); Recarga em relação à Precipitação Efetiva (mm/ano).

A Bacia 4 tem taxas de recarga estimadas em aproximadamente 14,8% pelo método do WTF; e 18,9 e 24,4% pelos métodos da separação do escoamento básico com o BFI_{max}_{Q90/Q50} e o BFI_{max} pré-definido, respectivamente.

A taxa de recarga calculada pelo WTF para essa bacia, em primeira análise, é condizente com os valores das bacias 1 a 3, uma vez que é uma taxa relativamente intermediária e, a área ao redor do Poço de monitoramento de São Simão tem certos

aspectos de fato intermediários entre o PMs de Bofete e de Boa Esperança do Sul. O contexto geológico dos arredores do poço, por exemplo, é composto por parcelas análogas das Formações Botucatu e Pirambóia e a cobertura vegetal do solo é aproximadamente maior que a da Bacia 2 e menor que a da Bacia 3.

A área total da Bacia 4, porém, se destaca por ser consideravelmente maior que as outras (cerca de 10.000km²) e conseqüentemente ter grande variação geológica de seu substrato, incluindo unidades fraturadas a leste, além do SAG, Formação Serra Geral e Grupo Itararé e, portanto, grande heterogeneidade de suas propriedades hidrogeológicas.

Neste cenário, é justificada a grande variação de estimativas entre os métodos utilizados, que chega a quase 10%. Devido à grande heterogeneidade do substrato da bacia, certamente é possível afirmar que o método de separação do escoamento de base com o BFI_{max} pré-definido não é eficiente e/ou representativo.

A utilização do método do WTF é provavelmente o método mais adequado para essa situação, porém ressalta-se que haveria a necessidade de seleção de uma bacia de área menor, o que não foi feito no presente trabalho por conta dos critérios de delimitação das bacias, descritos no Capítulo 3.

Rutledge (1998) sugeriu que a técnica de separação de escoamento de base seja aplicada somente em bacias menores que 1300 km². Esta sugestão é corroborada no presente estudo, de acordo com as grandes variações de taxas de recarga e da dificuldade em se estabelecer um BFI_{max} pré-definido para uma bacia com aquíferos fraturados e granulares.

6.1.5. Variabilidade das taxas de recarga para diferentes valores de Sy

De acordo com os valores mínimos e máximos de porosidade efetiva, mencionados no capítulo 5, a Tabela 6.1.5.1 ilustra um panorama geral sobre a sensibilidade do método para as variações de Sy na Bacia 1 (Poço RIMAS em Brotas). A escolha desta bacia para a análise se deu por esta ser a região onde o método WTF subestimou a recarga do SAG, fato atribuído ao valor relativamente baixo de Sy (15%) para o respectivo contexto geológico local.

Segundo a análise, o cálculo pode estar cerca de 13% subestimado ou superestimado, com recarga variando entre 14,3 a 19,26%, valores similares às análises de Simon et al (2017), que aplicaram o WTF para estimar recargas do SAG na Bacia do rio Ibicuí-RS.

Tabela 6.1.5.1. Variabilidade das taxas de recarga calculadas para diferentes valores de Sy.

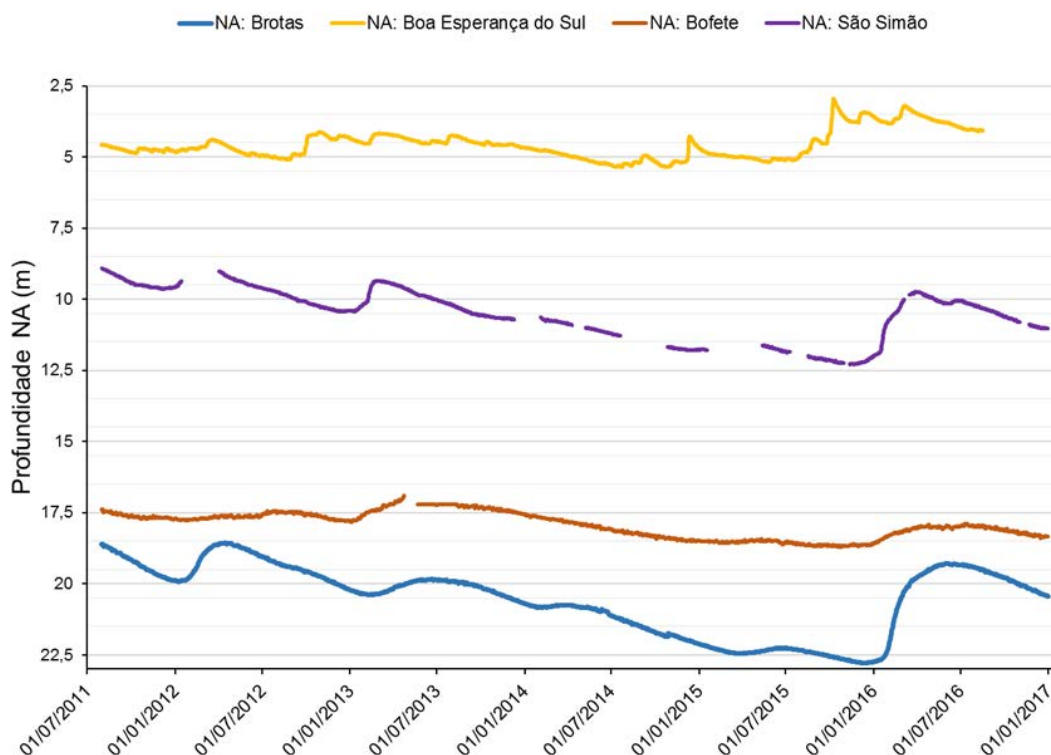
Sy	12,2 %	15%	17%
Recarga total (mm)	1093	1344	1523
Precipitação (mm)	7908,95		
Recarga (%)	14,3%	16,99%	19,26%
Variação (%)	-12,66	-	+13,33

É importante salientar que o valor da taxa de recarga calculada para o Sy de 17% na Bacia 1 (19,26%) é muito mais próximo ao valor encontrado pelo método do escoamento de base para a mesma bacia (21,94%). Provavelmente, estes valores mais altos correspondem a taxas mais próximas da realidade.

6.1.6. Síntese das estimativas

A Figura 6.1.6.1. mostra a variação do NA para cada poço observado.

Figura 6.1.6.1. Níveis d'água nos 4 poços de monitoramento do RIMAS, com destaque para Bofete, de inclinação consideravelmente mais suave.



Com base nos resultados obtidos e na argumentação proposta, foi possível escolher, dentre as diferentes taxas calculadas, os valores mais representativos de recarga para cada Bacia, de acordo com a Tabela 6.1.6.1.

Tabela 6.1.6.1. Valores de recarga absoluta e anual, por método, nas Bacia de 1 a 4, com destaque para o valor mais adequado e representativo, em azul.

Bacia	Método: WTF			Método: Filtro de Eckhardt (2005)							
	P total (mm)	Rtotal (mm)	R (%)	Precip (mm/ano)	Área (km²)	a	Em função de Q90/Q50				R Médio- 2 métodos (%)
							BFImax	Qbf/ Qmed (%)	R (mm/ano)	R (%)	
1	7909	1344	16,99%	1507	442	0,97	0,64	64	330,6	21,94%	19,47%
2	7800	1613	20,67%	1369	190	0,96	0,83	81	289,6	21,15%	20,91%
3	7065	577,5	8,17%	1354	584	0,96	0,51	44,5	124,4	9,19%	8,68%
4	7160	1056	14,7%*	1374	10679	0,97	0,61	61,2	259,1	18,86%	16,80%

Legenda: (*) Valor mais adequado somente para a microbacia ao redor do Poço RIMAS de São Simão, sendo necessário redelimitar a bacia.

Ressalta-se que, como os valores calculados com o BFI_{max} pré-definido por Eckhardt (2005) não foram considerados os mais representativos para nenhuma das áreas, estes resultados foram desconsiderados.

As taxas encontradas são bastante similares às estimativas de 7 a 20% de recarga do SAG na Bacia do Ribeirão da Onça, calculadas por Lucas et al. (2012).

Os valores encontrados são também correlacionáveis às taxas para áreas de afloramento do SAG em outros estados, como na Bacia do Rio Ibicuí, estimadas em 6 a 21 % e 11 a 18%, de acordo com Mattiuzi et al (2015) e Simon et al. (2017), respectivamente.

6.2. Panorama Geral Qualitativo

Os dados hidroquímicos dos poços do RIMAS são apresentados na Tabela 6.2.1, e mostram que as águas apresentam baixa mineralização com pH's ácidos, e para todos os poços, exceto o de Boa Esperança do Sul, esses valores são inferiores ao recomendado para águas de consumo alimentar (ANVISA, 1978).

Tabela 6.2.1. Resultados Analíticos por poço RIMAS e respectivos valores orientadores

Poço RIMAS	Unid.	3500027885	3500027886	3500027888	3500027884	Valores Orienta- dores¹
Município		Bofete	Brotas	Boa Esperança do Sul	São Simão	
Amostra		0916/SP/BF01	0716/SP/BT01	0716/SP/BE01	0716/SP/SS01	
Data da Coleta		12/09/2016	19/07/2016	19/07/2016	18/07/2016	
Condutividade Elétrica	µS/cm	32,60	11,50	18,70	20,80	-
Turbidez	NTU	0,04	0,1	0,16	0,12	5
Ph	-	4,80	4,87	5,54	4,70	5 - 10
Parâmetros						
Alumínio (Al)	mg/L	0,08	ND	ND	0,091	0,2
Arsenio (As)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,01
Berilo (Be)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,025
Boro (B)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,5
Calcio (Ca)	mg/L	1,29	0,411	1,28	0,873	-
Cadmio (Cd)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,005
Cloreto (Cl)	mg/L	0,91	ND	0,201	0,368	250

Cromo (Cr)	mg/L	0,01	0,012	ND	ND	0,05
Cobre (Cu)	mg/L	NA	ND	ND	ND	2
Dureza total	mg/L	4,95	3,85	13,5	6,5	200
Fluoretos (F)	mg/L	0,015	ND	0,016	ND	1,5
Ferro total (Fe)	mg/L	0,042	0,051	0,044	0,037	0,3
Mercurio (Hg)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,001
Potassio (K)	mg/L	1,56	0,236	0,375	0,4	-
Magnésio (Mg)	mg/L	0,833	0,163	0,654	0,265	-
Manganês (Mn)	mg/L	0,039	0,014	0,005	0,075	0,1
Sódio (Na)	mg/L	1,04	0,727	0,929	0,544	200
Níquel (Ni)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,02
Nitritos (NO ₂)	mg/L	ND	ND	ND	ND	1
Nitratos (NO ₃)	mg/L	9,317	1,102	1,943	5,834	10
Chumbo (Pb)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,01
PO ₄	mg/L	ND	ND	ND	ND	-
Selenio (Se)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,01
Silica (SiO ₂)	mg/L	3,51	4,14	7,55	4,61	-
Sulfato (SO ₄)	mg/L	1,354	ND	ND	ND	250
Resíduo seco	mg/L	37	ND	63	64	500
Zinco (Zn)	mg/L	0,012	ND	0,008	0,007	1,05
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	23	ND	71	94	1000
Bário (Ba)	mg/L	0,087	0,017	0,026	0,043	0,7
Cobalto (Co)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,07
Estanho (Sn)	mg/L	ND	ND	ND	ND	12
Estrôncio (Sr)	mg/L	0,015	0,004	0,013	0,008	12
Lítio (Li)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,04
Titânio (Ti)	mg/L	ND	ND	ND	ND	-
Vanádio (V)	mg/L	ND	ND	ND	ND	0,086
Brometo	mg/L	0,028	ND	ND	ND	-
Alcalinidade de Bicarbonato	mg/L	3,17	3,87	8,78	1,23	250
Alcalinidade de Carbonato	mg/L	ND	ND	ND	ND	120
Alcalinidade de Hidróxido	mg/L	ND	ND	ND	ND	0

Legenda: NA: Não Analisado; ND: Não detectado; **0,00**: Acima do limite de detecção do laboratório.

(1): Valores Orientadores, com base em: 0,0: Valores Máximos Permitidos- Padrão de Potabilidade, Portaria 2,914/2011 (MS); **0,0**: Valores Orientadores para Água Subterrânea- Resolução CONAMA n°420/2009 (MMA); **0,0**: Valores de intervenção- Água Subterrânea, Decisão de Diretoria CETESB 256/2016; **0,0**: Valores máximos aceitáveis para águas de consumo alimentar, Categoria IIb (Águas de poços), Resolução CNNPA n°12/1978 (ANVISA); **0,0**: Regional Screening Levels (RSL), Tap Water (THQ=1; TR=10E-6), EPA, 2017, Fonte: RIMAS (Acesso: Out./2017),

A baixa mineralização, refletida nos baixos valores de Condutividade Elétrica, inferiores a $30\mu\text{S.cm}^{-1}$, faz com que nenhuma das amostras apresente algum dos parâmetros medidos com concentrações acima dos valores orientadores.

A presença de nitrato é significativa nos poços de Bofete e São Simão, porém ainda está dentro dos padrões de potabilidade e deve estar relacionada à atividade antropogênica. Os níveis de alerta segundo a CETESB são valores acima de 5 mg.L^{-1} . Em 2015 foram detectadas pela Rede Estadual de Monitoramento de Qualidade das Águas Subterrâneas da CETESB concentrações de nitrato de cerca de 5,4 a $7,12\text{ mg.L}^{-1}$ no Aquífero Guarani nos municípios de Orlândia, Botucatu e Ribeirão Bonito. Dessa forma, o monitoramento, controle e fiscalização das áreas de recarga, a fim de se preservar e evitar contaminação no SAG, se fazem necessários.

7. CONCLUSÕES

As taxas de recarga em áreas de afloramento do SAG no estado de São Paulo, estimadas pelo método do WTF (*Water-Table Fluctuation Method*), variaram entre 8,2 a 20,7% da precipitação, dependendo da Bacia observada. Com o método de separação do escoamento de base pelo Filtro de Eckhardt (2005) as taxas variaram de 13,2 a 24,4%, utilizando o BFI_{max} pré-definido, e de 9,2 a 22%, utilizando o BFI_{max} proposto por Collinchon & Fan (2012), com base na razão Q_{90}/Q_{50} . As taxas concordam com os valores estimados para outras áreas de afloramento do SAG, como a Bacia do Ribeirão da Onça por Lucas et al. (2012), e para a Bacia do Rio Ibicuí, no Rio Grande do Sul, por Mattiuzzi et al (2015) e Simon et al. (2017).

Foi possível observar correlação direta das taxas e padrões de recarga com o arcabouço geológico e hidrogeológico local, indicando que onde há mais argila, (representada principalmente pela Formação Pirambóia, em se tratando de SAG) a recarga é consideravelmente menor. Enquanto que, se a área for composta majoritariamente por arenitos da Formação Botucatu, as taxas de recarga tendem a ser maiores. A composição litológica também exerce influência no comportamento da água depois que ela chega à zona saturada, de forma que, onde há estratos mais argilosos, a curva de rebaixamento do NA tende a ser mais suave, devido aos baixos valores de condutividade hidráulica do material. Já um local com mais areia tem o comportamento inverso, ocorrendo mais infiltração, por conta de maiores valores de permeabilidade e porosidade, mas aumentando a movimentação da água no sistema como um todo.

O uso do solo na região também impacta nas taxas de recarga, sendo que, onde há maior cobertura vegetal, há mais evapotranspiração da água na zona insaturada, chegando menos água à superfície livre do SAG.

Quanto aos métodos utilizados, o método de separação pelo Filtro de Eckhardt (2005) utilizando o parâmetro BFI_{max} pré-definido pelo mesmo autor gerou resultados superestimados e, portanto, não foi o mais indicado para as regiões estudadas. Nenhum dos métodos analisados foi considerado satisfatório para bacias muito grandes, o que condiz com recomendação da literatura, que sugere o uso do método de separação do escoamento de base para cálculo da recarga somente em bacias

menores que 1300km².

No entanto, tanto o WTF como o método de separação pelo Filtro de Eckhardt (2005) utilizando o parâmetro BFI_{max} sugerido por Collinschonn & Fann (2012) foram bastante eficientes e correlacionáveis entre si. É possível afirmar que os métodos são complementares já em sua essência, sendo que um deles calcula a recarga com base na entrada e outro com base na saída de água do sistema.

Quanto à qualidade da água, nenhuma das análises de parâmetros químicos dos poços do RIMAS indicaram concentrações acima dos valores orientadores. Porém os poços de Bofete e São Simão apresentaram valores expressivos de nitrato, exigindo atenção.

Com base no modelo de balanço hídrico proposto por outros autores e nas informações e estimativas contidas no presente trabalho, é possível continuar os estudos aqui desenvolvidos, de forma a estimar a recarga profunda do SAG ou, ainda, adquirir informações a respeito da evapotranspiração na região estudadas, objetivando um entendimento mais aprofundado das entradas e saídas de água nas respectivas bacias. É possível, também, aplicar traçadores químicos e/ou isotópicos para definição da origem, idade, altitude e outras informações complementares, referentes à recarga do aquífero.

Estudos recentes (HARTMANN et al., 2017) também mostraram a importância do cálculo preciso das taxas de recarga para entendimentos adequados a respeito das mudanças climáticas globais; portanto, o presente trabalho pode ser utilizado para este fim, já que suas áreas são relativamente pequenas e detalhadas.

Quanto à proposta de criação de uma APRM para a área de afloramento do SAG no estado de São Paulo (IPT, 2011), o presente trabalho corrobora essa sugestão de forma enfática, uma vez que esta é uma região que recebe a recarga do SAG, além de configurar uma área de grande vulnerabilidade do aquífero.

O estudo pode, ainda, fornecer base científica para orientar diretrizes a respeito do gerenciamento integrado dos recursos hídricos em escala local ou, em conjunto com outros estudos no tema, buscar mais acurácia e precisão no cálculo da recarga, com o objetivo de regionalização e uso prático do conhecimento científico como efetiva ferramenta de gestão.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A. N. Região de circundesnudação pós-cretácea, no Planalto Brasileiro. Boletim Paulista de Geografia, São Paulo, n. 1, p. 3-21, 1949.

ABAS- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Educação: Águas Subterrâneas, o que são? Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>> 201-. Ac: 7 dez. 2017.

ALVARES, C. A.; STAPE, L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, Vol. 22, No. 6, 711–728, 2013.

ANA-Agência Nacional de Águas, ATLAS Brasil- Abastecimento Urbano de Água, Brasília, 2010.

ANA-Agência Nacional de Águas, HIDROWEB – Sistemas de Informações Hidrológicas. Disponível em: < <http://hidroweb.ana.gov.br/default.asp>>. Acesso em 12 ago. 2017.

ANVISA- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Resolução - CNNPA nº 12, de 1978. D.O de 24/07/1978. 1978.

CAETANO-CHANG, M,R, & WU, F,T, Bacia do Paraná: formações Pirambóia e Botucatu, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992, São Paulo, Roteiro de Excursão, São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992, v, 2, p, 1-19.

CAMPOS, J, E, G, & SOUZA, M, M, Alternativa para Determinação de sobreexploração de Aquíferos, Geociências- UNESP, São Paulo, v, 36, p, 339 – 346, 2017.

CETESB- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decisão de Diretoria Nº 256/2016/E, de 22/11/2016. 2016.

CHAN, X, & SHU, L, Stream-Aquifer Interactions: Evaluation of Depletion Volume and Residual Effects from Groundwater Pumping, Ground Water, V40, N, 3, 284:296, 2002.

CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. Hydrological Processes., 13, 701–714, 1999.

CHEN, C.; PEI, S.; JIAO, J, Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China, Hydrogeology Journal, 2003.

COLLISCHONN, W, & FAN, F, M, Defining Parameters for Eckhardt's digital baseflow filter, Hydrol. Process. Published online. 2012.

CONAMA- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. RESOLUÇÃO Nº 420, DE 28 DE DEZEMBRO DE 2009. Publicado no DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84. 2009.

COSTA, W. D. Avaliação de Reservas, Potencialidade e Disponibilidade de aquíferos, In: X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1998.

COSTA, W, D, Riscos potenciais e reais decorrentes da super-exploração das águas subterrâneas no Recife - PE, In: 1ST JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, 2000, Fortaleza.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Atlas Pluviométrico do Brasil, CPRM, 2011, Escala 1:5.000.000.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Carta Hidrogeológica da Folha SF.22- Paranapanema, CPRM, 2016, Escala 1:1.000.000.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Carta Hidrogeológica da Folha SF.23- Rio de Janeiro, CPRM, 2015, Escala 1:1.000.000.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Folder do Projeto RIMAS- Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, Brasília, CPRM, [201-].

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, São Paulo, CPRM, 2006, Escala 1:750,000.

CPRM/SGB - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil. RIMAS- Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, 2009, Disponível em:
<http://rimasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php?rimas=true>, Acesso em: 17 jul, 2017.

DAEE- Departamento de Águas e Energia Elétrica, Banco de Dados Hidrológicos, 2016, Disponível em: <<http://www.hidrologia,daee.sp.gov.br/>>, Acesso em: 19 jun, 2017.

ECKHARDT, K, How to construct recursive digital filters for base flow separation, Hydrological Process, v,19, p, 507-515, 2005.

EPA- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Regional Screening Level (RSL) Summary Table (TR=1E-06, HQ=1). 2016.

FEITOSA, F, A, C, ET AL, Hidrogeologia: conceitos e aplicações/organização e coordenação científica, 3ª ed, Rio de Janeiro: CPRM,812p, 2008.

FETTER, C,W, Applied Hydrogeology, 4ª Ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, 598p.

FRANCISCO, R. F.. Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de São Paulo. 116f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2013.

GASTMANS, D. VEROSLAVSKY G., KIANG CHANG, H., CAETANO-CHANG M. R, NOGUEIRA PRESSINOTTI, M. M.. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. Boletín Geológico y Minero, 123 (3), p. 249-265, 2012.

GOMES, L, H, Determinação da recarga profunda na Bacia-Piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guaraní a partir de balanço hídrico em zona saturada, 2008, 167 p, Dissertação de mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

Andreas Hartmann, A., Gleeson, T, Wada, Y., Wagener T. Enhanced groundwater recharge rates and altered recharge sensitivity to climate variability through subsurface heterogeneity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.

HEALY, R, W, & COOK, P, G, Using groundwater levels to estimate recharge, Hydrogeology Journal, Springer-Verlag, Berlin, v, 10, n, 1, p 91-109, 2002.

HEALY, R,W, Estimating Groundwater Recharge, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2010, 244 p.

HORA, M. A. G. M; MARQUES, E.; HORA, A.F. SisVazNat: Sistema de Reconstituição de Séries de Vazões Naturais. Colorgraf Gráfica e Editora Ltda. Niterói, RJ, 75p., 2010.

IRITANI, M, A,& EZAKI, S, As águas subterrâneas do Estado de São Paulo, 2ª Edição, São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2009.

JOHNSON, A, I, Specific yield: compilation of specific yields for various materials, US Geological Survey Water-Supply Paper, 1662-D, 1967.

KUNIANSKY, E. L. Geohydrology and simulation of groundwater flow in the “400-foot,” “600-foot,” and adjacent aquifers, Baton Rouge area, Louisiana. Louisiana Department of Transportation and Development Technical Report 49, 1989.

LUCAS, M, C, GUARABARA, R, C, & WENDLAND, E., Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, Boletín Geológico y Minero, p 311-323. 2012.

MAILLET, E. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Sci., A. Hermann, Paris, 218p, 1905.

MATTIUZI, C. D. P, KIRCHHEIM, R., COLLISCHONN, W., FAN, F. M.. Estimativa de recarga Subterrânea a partir da separação de escoamento de base na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (América do Sul). Águas Subterrâneas, 29 (3): 285-300, 2015.

MILANI, EDISON & MELO, JOSÉ & SOUZA, PAULO & FERNANDES, LUIZ & BARROS FRANÇA, A, Bacia do Paraná, Boletim de Geociencias - Petrobras, 15, 265-287, 2007.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. PORTARIA Nº- 2.914, DE 12 DE DEZEMBRO DE 2011. Republicada por ter saído com incorreção no original, publicado no Diário Oficial da União nº 239, de 14 de dezembro de 2011, Seção 1, página 39/46. 2011.

MMA- Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos, Caderno da Região Hidrográfica do Paraná, Brasília, 2006.

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Ciclo Hidrológico. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>. Acesso em 10, nov., 2017.

MONTEIRO, R., C, Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do sistema Aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto (SP), Brasil, Tese (doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

MORGAN, C. P. AND STOLT, M. H. A comparison of several approaches to monitor water-table fluctuations. Soil Sci. Soc. Amer. J., 68, 562–566, 2004.

OEA – Organização dos Estados Americanos, Aquífero Guarani: Programa Estratégico de Ação, Relatório do Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento

Sustentável do Sistema Aquífero Guarani, Edição bilingue Brasil; Argentina; Paraguai; Uruguai, Montevideu, OEA, 2009.

ONU- Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Objetivo 6. Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos. Disponível em < <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods6/>>. Ac.:02 dez. 2017.

PRANDI, E. C. Gestão Integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí e Peixe/SP. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro. 2010.

REBOUÇAS, A, C, Gestão Sustentável dos grandes Aquíferos, In: VIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 1994.

RUTLEDGE, A. T.. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground- water recharge and discharge from streamflow records: update. US Geological Survey Water- Resources Investigations Report 98-4148, 1998.

ROCHA, G. A. O grande manancial do Cone Sul. ESTUDOS AVANÇADOS 11 (30), 191-212. 1997.

SÃO PAULO, GOVERNO DO ESTADO, Secretaria Do Meio Ambiente- SMA, DATAGEO- Sistema Ambiental Paulista, Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo-IDEA- SP, 2017, Disponível em: < <http://datageo.ambiente.sp.gov.br/>>, Acesso em: 12 jul, 2017.

SÃO PAULO, GOVERNO DO ESTADO, Secretaria Do Meio Ambiente- SMA, e Instituto de Pesquisas Tecnológicas- IPT, Sistema Aquífero Guarani- Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, São Paulo, IPT, 2011.

SÃO PAULO, GOVERNO DO ESTADO, Secretaria Do Meio Ambiente- SMA, e Instituto de Pesquisas Tecnológicas- IPT, Sistema Aquífero Guarani- Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da Área de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, São Paulo, IPT, 2011.

SÃO PAULO, GOVERNO DO ESTADO, Secretaria Do Meio Ambiente- SMA. MAPEAMENTO TEMÁTICO DE COBERTURA DA TERRA DO ESTADO DE SÃO PAULO NA ESCALA 1:100.000, São Paulo, SMA, 2013.

SCHICHT, R, J, & WALTON, W, C, Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois, Illinois State Water Survey Report of Investigation, 40, 1961.

SCHNEIDER, R,L,; MUHLMANN, H,; TOMMASI, E,; MEDEIROS, R,A,; DAEMON, R,F,; NOGUEIRA, A,A, Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná, In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre, Anais,, Porto Alegre: SBG, 1974, v, 1, p, 41-65.

SCHICHT, R, J, & WALTON, W, C, Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois, Illinois State Water Survey Report of Investigation, 40, 1961.

SIMON, F. W., REGINATO, P. A. R., KIRCHHEIM, R. E., TROIAN, G. C.. Estimativa de Recarga do Sistema Aquífero Guarani por meio da Aplicação do Método da Variação da Superfície Livre na Bacia do Rio Ibicuí (RS). Águas Subterrâneas, 31 (2), p. 19-29, 2017.

SINGH KP AND STALL JB. Derivation of Base Flow Recession Curves and Parameters. Water Resources 7 (2), p. 292-303, 1971.

SOARES P,C. Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, 5:229-251.1975.

SOARES, P. C. Arenito Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. Resumos. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 250-251, 1972.

SOLOMON, D. K., POREDA, R. J., SCHIFF, S. L., CHERRY, J. A. Tritium and helium 3 as groundwater age tracers in the Borden aquifer. Water Resour. Res., 28, 741–755, 1992.

STEFANUTO, E. B., LUPINACCI, C. M.. Características Morfoestruturais do Relevo em Setor de Cuestas: Um Estudo em Analândia (SP). Revista Brasileira de Geografia Física, Vol. 9 (4). 2016.

STRICKER, V. Base flow of streams in the outcrop area of southeastern sand aquifer, South Carolina, Georgia, Alabama, and Mississippi. US Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83–4106, 1983.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J. R. The water balance. Publications in Climatology, 8, 1–104. 1955.

TUCCI, C,E,M, Hidrologia: Ciência e Aplicação, 4, ed, Porto Alegre: Editora da Universidade, 943 p, 1993.

WENDLAND, E; GOMES, L. H., TROEGER, U. Recharge contribution to the Guarani Aquifer System estimated from the water balance method in a representative watershed. Anais da Academia Brasileira de Ciências 87(2), p. 595-609, 2015.

YAMABE, T, H,, ASSUMPÇÃO, M,; LOPES, A,E,V,, BARBOSA, J,; BIANCHI, M,, GALHARDO, L; SCHRAMM, D, Atividade sísmica de Bebedouro, Norte do estado de São Paulo - Outro caso de sismicidade induzida por poços tubulares? In: XIV ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, II SIMPÓSIO DE HIDROGEOLOGIA DO SUDESTE, Ribeirão Preto – SP, 2005.

ZANOTTO, O. A. Erosão pós-Cretáceo na Bacia do Paraná, com base em dados de reflectância da vitrinita. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 5., 1993, Curitiba. Resumos. Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 58, 1993.