

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

GIANCARLO PINTO SARAIVA

PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA COMO FERRAMENTA PARA
A FAVORABILIDADE DE PROJETOS DE ÁGUAS MINERAIS
ENVASADAS

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-graduação em Geociências do Instituto de Geociências e Meio Ambiente da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Rio Claro como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro - SP
2020

S243p

Saraiva, Giancarlo Pinto

Prospecção hidrogeológica como ferramenta para a favorabilidade de projetos de águas minerais envasadas / Giancarlo Pinto Saraiva. -- Rio Claro, 2020

88 f. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Didier Gastmans

1. Águas subterrâneas. 2. Hidrogeologia. 3. Prospecção. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

GIANCARLO PINTO SARAIVA

PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA COMO FERRAMENTA PARA A
FAVORABILIDADE DE PROJETOS DE ÁGUAS MINERAIS
ENVASADAS

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao Programa de Pós-graduação em Geociências do Instituto de Geociências e Meio Ambiente da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Rio Claro como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Didier Gastmans – Orientador
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde
Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Rio Claro, São Paulo, 09 de setembro de 2020

RESULTADO: APROVADO

*“Se o mais distraído dos homens estiver mergulhado em
seus mais profundos devaneios, erga-o sobre suas pernas,
ponha-o para andar e ele infalivelmente o levará até a água.”*

Herman Melville

AGRADECIMENTOS

Embora uma dissertação de mestrado seja, pela sua finalidade acadêmica, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem e nem devem deixar de ser realçados. Por esta razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Em especial ao professor Dr. Didier Gastmans, pela orientação ao longo de toda a realização deste trabalho, pela disponibilidade, pelos ensinamentos, apoio, compreensão, incentivos, contribuições científicas, paciência e principalmente pela amizade e respeito que certamente irá perdurar por toda a vida.

Um agradecimento muito especial e toda minha sincera gratidão à Danone Águas Brasil (DWB), por todo suporte e investimento nesta importante etapa de minha vida. Em especial ao Daniel L., Rafael C., Rafael G., Patrick L. e que de alguma forma são também responsáveis por isto.

A minha maior companheira, amiga, Maria Fernanda, que durante toda esta etapa acompanhou-me, incentivando e sobretudo apoiando-me inigualavelmente, e que sobre a qual as palavras no papel pouco podem significar.

A toda minha família pelo apoio e amor incondicional, meus pais maravilhosos, Celso e Elenice meus irmãos Sabrina e Celso Junior. A minha querida sobrinha e afilhada Marina.

A todo o brilhante time de pesquisadores do LARHIA, pelo suporte e pelo companheirismo durante este trabalho, em especial ao Lucas Santarosa, Vinicius, Sebastian, Carolina, Lia, Ludmila, Vanderlei, Marcelo, Andrea e José Cláudio Viegas.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação da UNESP de Rio Claro pela oportunidade.

Por fim um agradecimento sincero a todos que de alguma forma participaram de minha caminhada e que não se encontram aqui citados. Meu muitíssimo obrigado.

RESUMO

O presente estudo propôs um modelo para a prospecção mineral hidrogeológica em escala regional voltada a projetos de águas minerais, por meio da avaliação e interpretação de perfis construtivos e análises hidroquímicas de captações e poços tubulares profundos. Para a definição das áreas alvo, foram utilizados os seguintes parâmetros prospectivos: capacidade específica; espessura de aquífero ou unidade geológica reservatória de água; grau de confinamento do aquífero; aspectos hidroclimatológicos (recarga); densidade de poços; caracterização econômica (tamanho do mercado consumidor e sua renda); além da caracterização e perfil hidroquímico, o qual incluiu a condutividade elétrica (mineralização), a quantificação do íon nitrato (referindo-se à qualidade e potenciais riscos antrópicos) e a presença do íon fluoreto (classificação e aproveitamento quanto ao potencial mineral). Todas as informações dos parâmetros selecionados foram avaliadas individualmente e estatisticamente através de mapas temáticos específicos e afetados com coeficientes de ponderação que serviram de base para o desenvolvimento de um modelo metodológico de prospecção para a viabilização de projetos de águas minerais cujo o resultado se deu através de um ranqueamento com áreas alvos a serem priorizadas em uma campanha exploratória pontual detalhada. Para sua validação e verificação quanto à eficácia e efetividade, este modelo de prospecção hidrogeológica foi aplicado nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no Estado de São Paulo, que compreendem 93 municípios, representando cerca de 6,2% da área total do Estado de São Paulo. Desta forma, a utilização deste modelo demonstrou-se ser válida e eficaz, resultando em um ranqueamento da potencialidade e favorabilidade mineral, apontando áreas alvos a serem priorizadas em uma campanha de pesquisa detalhada.

Palavras-chave: Prospecção Hidrogeológica, Água Mineral, Sistema Aquífero Guarani

ABSTRACT

This study proposed a model for hydrogeological assessment and prospection on a regional scale aimed at mineral water projects, through the evaluation and interpretation of technical profiles and hydrochemical analysis of abstractions and deep wells. The following prospective parameters were used: specific capacity; aquifer thickness or geological water reservoir unit; degree of aquifer confinement; hydroclimatological aspects (aquifer recharge); well density; economic characterization (size of the consumer market and income); in addition to the characterization and hydrochemical profile, which included electrical conductivity (water mineralization), quantification of the nitrate ion (referring to the quality and potential anthropic risks) and the presence of the fluoride ion (classification and use as to the mineral potential). All information provided from the selected parameters were evaluated individually and statistically through specific thematic maps and affected with weighting coefficients that served as the basis for the development of a methodological prospecting model for the viability of natural mineral water projects whose result was given through ranking with target areas to be prioritized in a detailed exploratory campaign. For its validation and verification as to efficacy and effectiveness, this hydrogeological prospecting model was applied in the outcrop areas of the Guarani Aquifer System (SAG) in the State of São Paulo, which comprise 93 municipalities representing about 6,2% of the total area of the State of São Paulo. Thus, the use of this model proved to be valid and effective, resulting in a ranking of potentiality and mineral favorability, pointing out target areas to be prioritized in a detailed research campaign.

Keywords: Hydrogeological Prospection, Natural Mineral Water, Guarani Aquifer System

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos.....	3
2	ÁGUA MINERAL	4
2.1	Mercado de Águas Minerais no Mundo.....	4
2.2	Mercado de Águas Minerais no Brasil.....	6
2.3	Legislação de Águas Minerais	7
2.3.1	Águas Minerais no Brasil – Código de Águas Minerais.....	7
2.3.2	Regulamentação das Águas Minerais nos EUA.....	13
2.3.3	Regulamentação das Águas Minerais na Comunidade Europeia.....	15
2.3.4	Contextualização da Regulamentação Brasileira X CE e EUA	17
3	PESQUISA E PROSPECÇÃO MINERAL.....	19
3.1	Arcabouço Legal.....	19
3.2	Aspectos Econômicos do Minério	20
3.3	Revisão Bibliográfica e Informações Existentes	21
3.4	Levantamentos Técnicos.....	22
3.4.1	Fotografias Aéreas e Sensoriamento Remoto	22
3.4.2	Geofísica.....	22
3.4.3	Geoquímica	23
4	O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI	25
5	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	29
5.1	Aspectos Fisiográficos.....	29
5.2	Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos	30
5.2.1	Formação Piramboia.....	31
5.2.2	Formação Botucatu.....	32
5.2.3	Formação Serra Geral.....	32
5.3	Hidroquímica	33

5.4	Potencialidade Hídrica.....	35
5.5	Concessões Minerárias	36
6	MODELO DE PROSPECÇÃO MINERAL HIDROGEOLÓGICO.....	38
6.1	Parâmetros Técnicos e Definição de Dados Utilizados	40
6.1.1	Etapa 1 - Avaliação Preliminar	40
6.1.1.1	Aspectos Econômicos.....	40
6.1.1.2	Aspectos Hidrogeológicos e Geológicos	41
6.1.1.2.1	Capacidade Específica.....	41
6.1.1.2.2	Densidade de Poços	41
6.1.1.2.3	Espessura de Aquífero	42
6.1.1.2.4	Grau de Confinamento do Aquífero	42
6.1.1.3	Aspectos Hidroclimatológicos.....	42
6.1.1.3.1	Recarga	42
6.1.2	Etapa 2 – Refinamento	43
6.1.2.1	Hidroquímica	44
6.1.2.1.1	Condutividade Elétrica	44
6.1.2.1.2	Nitrato.....	44
6.1.2.1.3	Fluoreto.....	45
7	PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA NAS ÁREAS DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO ESTADO DE SÃO PAULO	46
7.1	Avaliação Preliminar	48
7.1.1	Aspectos Econômicos	50
7.1.2	Aspectos Hidrogeológicos e Geológicos.....	51
7.1.2.1	Capacidade Específica.....	53
7.1.2.2	Densidade de Poços	54
7.1.2.3	Espessura de Aquífero	55
7.1.2.4	Espessura de Basalto	56

7.1.2.5	Recarga	57
7.1.3	Categorização Preliminar	58
7.2	Refinamento	59
7.2.1	Condutividade Elétrica	60
7.2.2	Nitrato.....	61
7.2.3	Fluoreto	62
7.2.4	Refinamento Hidroquímico – Categorização	63
7.3	Ranqueamento Final e Definição de Alvos Exploratórios.....	64
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	66
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Localização do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (IPT, 2011).....	2
Figura 2.1. Tipologia das águas minerais brasileiras segundo o Código de Águas Minerais Decreto Lei 7.841 08/08/1945. Modificado de QUEIROZ, 2015.....	7
Figura 3.1. Fases de um Empreendimento Mineiro e variáveis envolvidas de Tempo, Risco e Fluxo de Caixa. A= Geração, B = Exploração, Descoberta e Avaliação, C = Pré-desenvolvimento, D = Desenvolvimento e E = Produção. Fonte CAVALCANTI NETO et al. 2010.	21
Figura 4.1. Mapa de localização do Sistema Aquífero Guarani em continente Sul-americano (Modificado de LEBAC, 2008 a,b). Em detalhe, área foco desta pesquisa, áreas de afloramento do SAG no Estado de São Paulo.	25
Figura 5.1. Mapa de localização das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, Brasil.	29
Figura 5.2. Perfil litoestratigráfico simplificado do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na Bacia do Paraná. Unidades do SAG, pré e pós SAG. (Modificado de PAULA e SILVA et al., 2005).	31
Figura 5.3. Perfil geológico simplificado do Sistema Aquífero Guarani e unidades pré e pós SAG com direção leste-oeste no Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul da Bacia Sedimentar do Paraná. Sistema Aquífero Guarani representado pelas Formações Piramboia e Botucatu. (II Congresso Aquífero Guarani/ OEA, 2009).	33
Figura 5.4. Diagrama de Piper das águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Evolução hidroquímica no sentido do fluxo e seu confinamento (Modificado de SILVA, 1983).	34
Figura 5.5. Potencial explorável e piezometria aparente do Sistema Aquífero Guarani (Retirado e modificado de SÃO PAULO, 2005).	36
Figura 5.6. Mapa de distribuição e localização das Concessões de Pesquisa e de Lavra para água mineral nas áreas de Afloramento do SAG no Estado de São Paulo (ANM, 2019).	37
Figura 6.1. Critérios exploratórios para caracterização e categorização de áreas quanto à favorabilidade para projetos de águas minerais.....	39
Figura 7.1. Aplicação de critérios exploratórios para categorização de áreas quanto à favorabilidade para projetos de águas minerais nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.	47

Figura 7.2. Avaliação estatística (diagramas <i>box plot</i>) dos parâmetros utilizados na avaliação preliminar; Aspectos Econômicos, Densidade de Poços, Recarga, Capacidade Específica, Espessura de Basalto e Aquífero.....	49
Figura 7.3. Mapa de categorização e classificação da favorabilidade econômica nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.....	51
Figura 7.4. Mapa de localização e distribuição dos poços SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – CPRM), em preto toda base de dados disponível e em amarelo os 269 poços tubulares profundos considerados neste projeto.	52
Figura 7.5. Categorização e potencialidade da Capacidade Específica (Qesp) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.....	53
Figura 7.6. Categorização e potencialidade da Densidade de Poços (poço/100 km ²) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.....	55
Figura 7.7. Categorização e potencialidade da Espessura de Aquífero (metros) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.....	56
Figura 7.8. Categorização e potencialidade da espessura de basalto e grau de confinamento (metros) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	57
Figura 7.9. Categorização e potencialidade da recarga (mm/ano) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais. (SANTAROSA et al., 2020) (<i>em publicação</i>).....	58
Figura 7.10. Categorização e potencialidade preliminar nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	59
Figura 7.11. Avaliação estatística (diagramas <i>box plot</i>) dos parâmetros utilizados no refinamento; Condutividade Elétrica, Fluoreto e Nitrato.	60
Figura 7.12. Categorização e potencialidade da condutividade elétrica (µS/cm) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.....	61

Figura 7.13. Categorização e potencialidade de nitrato (mg/L) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	62
Figura 7.14. Categorização e potencialidade de fluoreto (mg/L) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	63
Figura 7.15. Categorização e potencialidade hidroquímica Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	64
Figura 7.16. Categorização final e definição de alvos potenciais para a pesquisa mineral de projetos para águas minerais nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.	65

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Volumes de produção acumulados de águas envasadas nos anos de 2013 e 2018, Taxa de Crescimento (Taxa de Crescimento Anual Composta) para o mesmo período e Classificação/Representatividade dos principais produtores de águas envasadas no ano de 2018. Modificado de RODWAN JR., 2019.	4
Tabela 2.2. Consumo mundial de águas envasadas per capita nos anos de 2013 e 2018. Taxa de crescimento de consumo de águas envasadas no mundo per capita no período de 2013 a 2018. Modificado de RODWAN JR., 2019.	5
Tabela 2.3. Classificação química das águas minerais. Retirado de Art. 35º Decreto Lei 7.841 08/08/1945 (BRASIL, 1945).	9
Tabela 2.4. Classificação das fontes de águas minerais. Retirado de Art. 36º Decreto Lei 7.841 08/08/1945 (BRASIL, 1945).	10
Tabela 2.5. Limites para potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde. Retirado de Resolução RDC nº274, de 22 de setembro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (BRASIL, 2005).	11
Tabela 2.6. Limites para potabilidade bacteriológica. Retirado de Resolução RDC nº275, de 21 de outubro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (BRASIL, 2005).	12
Tabela 2.7. Classificações de Águas Minerais na Comunidade Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2009).	16
Tabela 2.8. Constituintes naturalmente presentes nas águas minerais naturais e limites máximos que, se forem ultrapassados, podem constituir um risco para a saúde pública (UNIÃO EUROPEIA, 2009).	17
Tabela 2.9. Limites máximos para os resíduos de tratamento das águas minerais naturais e para as águas de nascente com ar enriquecido em ozônio de acordo com Regulamentação da Comunidade Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2009).	17
Tabela 2.10. Distribuição das águas minerais e potáveis de mesa de acordo com o Resíduo Seco a 180°C – Modificado de QUEIROZ, 2015.	18
Tabela 3.1. Exemplos de elementos farejadores típicos para alguns modelos de depósitos minerais. Fonte LEVINSON, 1974.	24
Tabela 4.1. Unidades estratigráficas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG, em destaque) e suas unidades Pré e Pós SAG. Modificado de LEBAC, 2008.	27
Tabela 5.1. Principais características químicas das águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SILVA, 1983 e SRACECK & HIRATA, 2002).	35

Tabela 5.2. Principais características do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Compilado de SÃO PAULO, 2005).....	36
Tabela 7.1. Favorabilidade econômica dos 10 principais municípios nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.	50
Tabela 7.2. Síntese dos dados SIAGAS avaliados e utilizados neste estudo.	52

1 INTRODUÇÃO

Entre os anos de 2013 e 2018 observou-se um crescimento no consumo mundial de água mineral da ordem de 6,2%, sendo o volume global consumido de aproximadamente 397 trilhões de litros neste último ano. Entre os principais mercados consumidores mundiais estão: China, Estados Unidos, México, Indonésia e Brasil (RODWAN JR., 2019).

No Brasil, o aproveitamento de águas minerais depende de autorização ou Concessão da União Federal através de Portaria de Lavra e de acordo com o Código de Águas Minerais (Decreto Lei nº 7.841, de 08 de agosto de 1954) “*águas minerais são aquelas provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que possuem composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns, com características que lhes conferem uma ação medicamentosa*”, podendo ser classificadas conforme características permanentes da água (composição química, presença de oligominerais e propriedade físico químicas) e de acordo com as características das fontes (gases e temperatura) (BRASIL, 1945).

Dados recentes da ANM (Agência Nacional de Mineração) divulgados no Sumário Mineral 2018 (BRASIL, 2018), apontam que a produção brasileira total declarada no ano de 2017 foi de 8,44 bilhões de litros e os Estados com as maiores produções de águas envasadas declaradas, bem como sua contribuição em porcentagens foram: São Paulo (20,8%), Pernambuco (9,3%), Bahia (7,0%), Ceará (6,5%), Rio Grande do Norte (6,3%) e Minas Gerais (5,1%). Os dados também mostraram que ao final do ano de 2017 existiam 1.205 Concessões de Lavra de água mineral e potável de mesa, sendo que 567 complexos produtivos declararam o envase de água mineral e a fabricação de bebidas em todas as Unidades da Federação e destes, 151 estão localizados no Estado de São Paulo (BRASIL, 2020).

É de senso comum que águas minerais de baixa mineralização são as mais populares entre os consumidores brasileiros devido a seu sabor/gosto específico. Além disso, a alta capacidade hídrica e os baixos riscos de exposição e interferência quanto à qualidade e quantidade (contaminação e superexploração respectivamente) são também características importantes para o desenvolvimento e seguimento de projetos de prospecção hidrogeológica para fins de exploração de águas minerais naturais.

Metodologias para prospecção mineral focadas em minérios metálicos e não metálicos são muito difundidas na bibliografia (MARANHÃO, 1985; PEREIRA, 2003;

MELFI, MISI, CAMPOS, CORDANI, 2016), entretanto, por apresentar características únicas, a prospecção mineral focada em águas minerais ainda não é devidamente difundida no meio científico, havendo assim, uma lacuna técnica e de conhecimento a ser preenchida, o que justifica a realização desse projeto.

Á área selecionada para a aplicação deste modelo proposto, constituída pelas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Figura 1.1), e representada pelas formações geológicas Piramboia e Botucatu, corresponde a aproximadamente 16.000 km², equivalente a 6,2% da área total do Estado, compreendendo 93 municípios com população aproximada de 4 milhões de habitantes, cerca de 10% da população total do Estado (SÃO PAULO, 2005).

Figura 1.1. Localização do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (IPT, 2011).



A justificativa para a aplicação deste modelo nesta área, se dá devido ao Sistema Aquífero Guarani (SAG) possuir características hidrogeológicas específicas que favorecem projetos robustos para o mercado de águas minerais. Em suas áreas aflorantes no Estado de São Paulo, apresenta-se com vazões na ordem de 20 a 40 m³/h, com capacidades específicas superiores a 4,0 m³/h/m (SÃO PAULO, 2005) e hidroquímica considerada de baixa a moderada mineralização predominando águas bicarbonatadas magnesianas e calco-magnesianas predominantemente oligomineralizadas como

fluoretadas (SILVA, 1983). Fatores geológicos-hidrogeológicos e físicos nestas áreas preservam a integridade e diminuem os riscos quanto a sua qualidade (físico química e microbiológica).

Levantamentos realizados junto à Agência Nacional de Mineração (ANM), indicaram que até o início do ano de 2019 havia 39 Concessões de Lavra em vigor e 25 Autorizações de Pesquisa concedidas nos 93 municípios compreendidos na área deste estudo, todas voltadas exclusivamente para a substância de águas minerais (BRASIL, 2019). Estes valores indicam a alta potencialidade mineral e econômica desta área para este bem mineral.

1.1 Objetivos

A água mineral é um minério de grande relevância econômica para o Brasil, que possui importantes aquíferos em termos de dimensão e capacidade, além de boa qualidade quanto à potabilidade, o que corrobora para a necessidade cada vez maior de estudos que forneçam subsídios para sua correta avaliação quanto à potencialidade de exploração.

Assim, o presente estudo procurou preencher uma lacuna ainda existente na bibliografia científica relativa à prospecção hidrogeológica focada em águas minerais, tendo como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo específico para a prospecção hidrogeológica voltada a projetos hidrominerais por meio de uma análise combinada de parâmetros que possibilitaram a criação de um ranqueamento de áreas com maior ou menor favorabilidade, determinando assim, alvos prioritários para uma pesquisa pontual detalhada para a implantação e desenvolvimento de projetos industriais.

Como objetivo secundário, este estudo aplicou este modelo desenvolvido nas áreas de afloramentos do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

Como consequência do desenvolvimento deste trabalho foram elencados e discutidos os principais parâmetros utilizados na determinação e definição de áreas com alto potencial hidrogeológico, capacidade e qualidade hídrica para o desenvolvimento de projetos de águas minerais.

Desta forma, este trabalho pretendeu elaborar um modelo que fosse replicável a outros ambientes, aquíferos e/ou perfis específicos de águas para campanhas exploratórias hidrogeológicas, bem como subsidiar a discussão de uma nova forma de desenvolvimento de projetos deste bem mineral, baseada em uma visão técnica e científica.

2 ÁGUA MINERAL

2.1 Mercado de Águas Minerais no Mundo

O maior produtor de águas envasadas do mundo é a China, representando cerca de 22% de todo o volume produzido em 2018, seguido, respectivamente, pelos Estados Unidos e México que juntos produzem cerca de 23% de todo o volume mundial (RODWAN JR., 2019).

Indonésia, Brasil, Índia, Tailândia, Alemanha, Itália e França completam com os 3 países citados anteriormente, os 10 maiores produtores de águas envasadas no mundo, representando cerca de 77,9% de todo o volume produzido. Este grupo de países mostrou crescimento médio na ordem de 6,8% no período de 2013 a 2018, superior ao total do Mercado Global que ficou em 6,3% para o mesmo período (RODWAN JR., 2019) (Tabela 2.1).

O mercado brasileiro ocupa a expressiva 5ª posição mundial representado cerca de 6,2% de todo o volume produzido de águas minerais envasadas global. No ano de 2018, este volume representou 22.899,80 milhões de litros. Os volumes produzidos no período de 2013 a 2018 mostram também que o mercado de águas minerais envasadas no país segue em elevação com uma taxa de crescimento do consumo anual estimado de 4,8% (RODWAN JR., 2019).

Tabela 2.1. Volumes de produção acumulados de águas envasadas nos anos de 2013 e 2018, Taxa de Crescimento (Taxa de Crescimento Anual Composta) para o mesmo período e Classificação/Representatividade dos principais produtores de águas envasadas no ano de 2018. Modificado de RODWAN JR., 2019.

Classificação 2018	PAÍS	Milhões de Litros		Crescimento*	Representatividade Global (2018)
		2013	2018	2013/2018	
1	China	65.790,0	105.101,5	9,8%	22,3%
2	Estados Unidos	37.817,0	52.415,8	6,7%	12,8%
3	México	29.932,0	35.823,2	3,7%	10,2%
4	Indonésia	20.300,0	32.842,2	10,1%	6,9%
5	Brasil	18.156,3	22.899,8	4,8%	6,2%
6	Índia	14.582,9	22.862,7	9,4%	4,9%
7	Tailândia	12.295,8	15.344,9	4,5%	4,2%
8	Alemanha	11.527,7	11.877,9	0,6%	3,9%
9	Itália	10.556,0	11.299,8	1,4%	3,6%
10	França	8.838,9	9.449,9	1,3%	3,0%
	Top 10 Subtotal	229.796,7	319.918,6	6,8%	77,9%
	Outros Países	65.030,3	77.557,8	3,6%	22,1%
	Total Mundial	294.827,0	397.476,4	6,2%	100,0%

Referente ao consumo per capita (Tabela 2.2), unidade de litros de águas envasadas consumidos por habitante, o México e Tailândia lideram o quadro mundial consumindo 274,10 litros por habitante, o segundo país também foi um dos que mais avançou em crescimento deste parâmetro no período de 5 anos, representando um aumento de 52% no período compreendido entre 2013 a 2018.

O Brasil encontra-se na 15ª posição mundial, apresentando 108,60 litros consumidos por habitantes no ano de 2018 em comparação ao 2013, este valor representava 89,7 litros/habitante o que refletiu um crescimento significativo de 21% deste parâmetro no intervalo de tempo citado (RODWAN JR., 2019).

Tabela 2.2. Consumo mundial de águas envasadas per capita nos anos de 2013 e 2018. Taxa de crescimento de consumo de águas envasadas no mundo per capita no período de 2013 a 2018. Modificado de RODWAN JR., 2019.

Classificação 2018	PAÍS	Litros Per Capita		Crescimento 2013/2018
		2013	2018	
1	México	244,2	274,1	12%
2	Tailândia	180,6	274,1	52%
3	Itália	176,8	190,4	8%
4	Estados Unidos	119,6	160,1	34%
5	França	138,2	145,0	5%
6	Alemanha	142,0	144,2	2%
7	Espanha	120,0	142,3	19%
8	Bélgica-Luxemburgo	131,7	134,0	2%
9	Emirados Árabes Unidos	104,1	132,5	27%
10	Indonésia	80,6	123,0	53%
11	Arábia Saudita	105,2	118,5	13%
12	Hungria	108,3	116,6	8%
13	Coréia do Sul	80,3	113,2	41%
14	Hong Kong	98,4	112,8	15%
15	Brasil	89,7	108,6	21%
16	Polônia	84,4	104,1	23%
17	Portugal	84,4	101,8	21%
18	Romênia	77,2	99,9	29%
19	Uruguai	77,2	96,5	25%
20	Suíça	93,5	95,0	2%
	Média Mundial	40,9	52,2	0,3

2.2 Mercado de Águas Minerais no Brasil

A produção anual total declarada em 2017 foi de 8,44 bilhões de litros no Brasil, este volume correspondeu a cerca de 40% a menos da produção de água mineral estimada para o país naquele ano (explicitado neste trabalho item 2.1), o que poderia indicar uma subdeclaração de produção, considerando que o comércio exterior não é representativo. Estes dados são da Agência Nacional de Mineração (ANM – Sumário Mineral 2018) (BRASIL, 2020).

A lista de Estados com maior produção de água mineral envasada declarada é composta por: São Paulo (20,8%), Pernambuco (9,3%), Bahia (7,0%), Ceará (6,5%), Rio Grande do Norte (6,3%) e Minas Gerais (5,1%) (BRASIL, 2020).

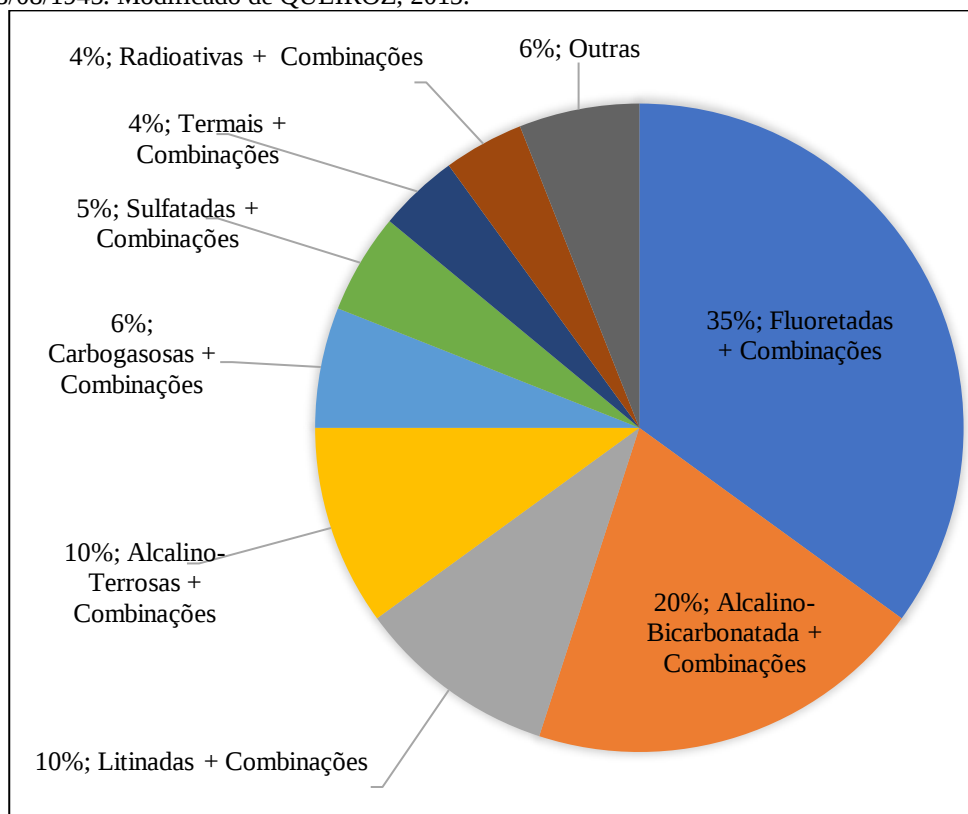
Os dados também mostraram que ao final do ano de 2017 existiam 567 complexos produtivos que declararam envase de água mineral e fabricação de bebidas em todas as Unidades da Federação, sendo 151 destes localizados no Estado de São Paulo, 59 em Minas Gerais, 58 no Rio de Janeiro e 33 em Pernambuco.

Ainda referente ao ano de 2017, 73,3% do volume de água mineral envasada no país foi comercializada em garrações retornáveis, 26,7% em embalagens descartáveis (BRASIL, 2020).

A produção dos onze maiores grupos produtores representou aproximadamente 30% do volume total de água mineral envasada declarada no país. De acordo com dados oficiais, no ano de 2017 destacaram-se como os cinco maiores produtores o Grupo Edson Queiroz com 8,3% (atuando em 11 unidades da Federação), Coca-Cola/FEMSA com cerca de 4,8% (atuando em 4 unidades da Federação); Danone com cerca de 3,3% ; Flamin com cerca de 2,7% (Estado de São Paulo) e Nestlé com cerca de 2,1% (em 3 unidades da Federação) da produção total declarada nacional (BRASIL, 2020).

De um total de 2.415 fontes aprovadas e classificadas sob a égide do Código de Águas Minerais (Decreto Lei 7.841 08/08/1945) para o envase em todo o país, cerca de 35% das águas minerais brasileiras são classificadas como fluoretadas e combinações, cerca de 20% alcalino-bicarbonatadas e combinações, cerca de 10% classificadas como litinadas e combinações e alcalino-terrosas e combinações. Cerca de apenas 4% de todas as fontes consideradas são classificadas como “potáveis de mesa” (Figura 2.1) (QUEIROZ, 2015).

Figura 2.1. Tipologia das águas minerais brasileiras segundo o Código de Águas Minerais Decreto Lei 7.841 08/08/1945. Modificado de QUEIROZ, 2015.



2.3 Legislação de Águas Minerais

2.3.1 Águas Minerais no Brasil – Código de Águas Minerais

Por ser um recurso mineral dotado de valor econômico, a água mineral é considerada um bem da União (Constituição Federativa do Brasil - Artigo 20º), estando seu aproveitamento regido pelo Código de Águas Minerais, (Decreto Lei nº 7.841 08/08/1945) conjugado com o Código de Mineração, (Decreto Lei nº 227, 27/02/1967) e legislações correlatas, cuja aplicação e fiscalização está sob responsabilidade da Agência Nacional de Mineração, ANM (substituindo em 2017 o extinto Departamento Nacional de Produção Mineral, DNPM), autarquia federal, vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME) (BRASIL, 1945) (BRASIL, 1967) (BRASIL, 1988).

A Agência é responsável pela regulação, gestão, fiscalização e atividade de mineração de todos os bens minerais brasileiros, com exceção dos hidrocarbonetos, sob reponsabilidade da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e substâncias nucleares sob a égide da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEM).

Os regimes legais que regem a outorga de direitos para o aproveitamento das águas minerais são os de Autorização e Concessões definidos no Art. 2º do Código de

Mineração, (BRASIL, 1967) conjugado ao Art. 4º do Código de Águas Minerais, (BRASIL, 1945). Condicionando os trabalhos de pesquisa, exploração ou aproveitamento das águas minerais à autorização ou concessão federal, sendo de competência privativa da União legislar sobre a matéria (BRASIL, 1988).

Preconizado pelo Código de Águas Minerais, as Águas Minerais são definidas como *"aquelas provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que possuam composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas distintas das águas comuns, com características que lhes confirmam uma ação medicamentosa"* (BRASIL, 1945).

São ainda definidos os padrões físicos e físico-químicos e as concentrações químicas mínimas para o enquadramento dessas águas como minerais (Tabela 2.3), além de dois critérios para o mesmo, o das características permanentes da água (constituição química) e as que lhes são inerentes apenas na fonte (gases e temperaturas) (Tabela 2.4), deste modo são feitas duas classificações quanto à fonte e quanto à água (BRASIL, 1945).

Tabela 2.3. Classificação química das águas minerais. Retirado de Art. 35º Decreto Lei 7.841 08/08/1945 (BRASIL, 1945).

CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA	CLASSIFICAÇÃO	JUSTIFICATIVA
	OLIGOMINERAIS	Quando apresentarem apenas uma ação medicamentosa
	RADÍFERAS	Quando tiverem radioatividade permanente
	ALCALINO BICARBONATADA	Bicarbonato de sódio = ou > 200 mg/L
	ALCALINO TERROSAS	Carbonato de cálcio = ou > 120 mg/L
	• Alcalino Terrosas Cálcicas	Cálcio = ou > 48 mg/L sob a forma de bicarbonato de cálcio
	• Alcalino Terrosas Magnesianas	Magnésio = ou > 30 mg/L sob a forma de bicarbonato de magnésio
	SULFATADAS	SO ₄ = ou > 100 mg/L
	SULFUROSAS	Sulfeto = ou > 1 mg/L
	NITRATADAS	NO ₃ ⁻ = (Nitrato de origem mineral) = ou > 100 mg/L
	CLORETADAS	Cloreto de sódio (Na CL) = ou > 500 mg/L
	FERRUGINOSAS	Ferro = ou > 5 mg/L (5.000 µg)
	RADIOATIVAS	Que tiverem radônio em dissolução
	• Fracamente Radioativas	Teor de radônio mínimo entre 5 e 10 unidades Mache por litro, a 20°C e 760 mm de Hg de pressão
	• Radioativas	Teor de radônio entre 10 e 50 unidades Mache por litro, a 20°C e 760 mm de Hg de pressão
	• FORTEMENTE RADIOATIVAS	Teor de radônio acima de 50 unidades Mache por litro, a 20°C e 760 mm de Hg de pressão
	TORIATIVAS	Que possuírem teor em torônio (isótopo do radônio) em dissolução equivalente em unidades eletrostáticas, a 2 unidades Mache por litro, no mínimo
	CARBOGASOSAS	Gás carbônico livre dissolvido = ou > 200 mg/L
	ELEMENTO PREDOMINANTE	(> 0,01 mg/L): Iodadas; Arseniadas; Litinadas, etc.
	FLOURETADA	Quando conter no mínimo 0,02 mg/L de fluoreto
	VANÁDICA	Quando conter no mínimo 0,03 mg/L de vanádio
	LITINADA	Quando conter no mínimo 0,01 mg/L de lítio
	SELENIADA	Quando conter no mínimo 0,006 mg/L de selênio

Tabela 2.4. Classificação das fontes de águas minerais. Retirado de Art. 36º Decreto Lei 7.841 08/08/1945 (BRASIL, 1945).

CLASSIFICAÇÃO DA FONTE	QUANTO AOS GASES	
	FONTES RADIOATIVAS	
	• FRACAMENTE RADIOATIVAS	As que apresentarem, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto com um teor em radônio compreendido entre 5 a 10 unidades Mache/L de gás espontâneo, a 200C e 760 mm de Hg de pressão
	• RADIOATIVAS	As que apresentarem, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto com um teor em radônio compreendido entre 10 e 50 unidades Mache/L de gás espontâneo, a 200C e 760 mm de Hg de pressão
	• FORTEMENTE RADIOATIVAS	As que apresentarem, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto com um teor em radônio superior a 50 unidades Mache/L de gás espontâneo, a 200C e 760 mm de Hg de pressão
	FONTES TORIATIVAS	As que apresentarem, no mínimo, uma vazão gasosa de 1 litro por minuto, com um teor em torônio na emergência equivalente em unidades eletrostáticas, a 2 unidades Mache/L
	FONTES SULFUROSAS	As que possuírem na emergência desprendimentos definidos de gás sulfídrico
	QUANTO A TEMPERATURA	
	• FONTES FRIAS	Quando sua temperatura for inferior a 25°C
	• FONTES HIPOTERMAIS	Quando sua temperatura estiver compreendida entre 25 e 33°C
	• FONTES MESOTERMAIS	Quando sua temperatura estiver compreendida entre 33 e 36°C
	• FONTES ISOTERMAIS	Quando sua temperatura estiver compreendida entre 36 e 38°C
	• FONTES HIPERTERMAIS	Quando sua temperatura for superior a 38°C

Importante salientar também que o mesmo instrumento legal considera em seu artigo 3º, a existência da água potável de mesa como sendo aquelas *de “composição normal provenientes de fontes naturais ou de fontes artificialmente captadas que preenchem tão somente as condições de potabilidade para a região”*. Desta forma, uma água natural pode ser comercializada mesmo sem apresentar composição química ou propriedades físicas ou físico-químicas especiais que lhe confirmam ação medicamentosa, porém sua denominação será como “água potável de mesa”, diferentemente das denominadas “águas minerais” que necessariamente deverão comprovar a ação presumidamente medicamentosa (constituição química) preconizado nos Artigos 35º e 36º do Código de Águas Minerais (BRASIL, 1945).

O mesmo código ainda estabeleceu a Comissão Permanente de Crenologia (Artigo 2º) como a instância técnica adequada para reconhecer, aprovar ou fiscalizar a ação medicamentosa de uma água classificada como mineral.

A potabilidade química e bacteriológica das águas minerais deve atender aos parâmetros definidos e preconizados nas Resoluções nº 274/2005 e nº 275/2005 da

Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA, respectivamente (Tabelas 2.5 e 2.6) (BRASIL, 2005).

Tabela 2.5. Limites para potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde. Retirado de Resolução RDC nº274, de 22 de setembro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (BRASIL, 2005).

	SUBSTÂNCIA	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO
SUBSTÂNCIAS INORGÂNICAS	Antimônio	0,005 mg/L
	Arsênio	0,01 mg/L (Calculado como Arsênio Total)
	Bário	0,7 mg/L
	Boro	5 mg/L
	Cádmio	0,003 mg/L
	Cromo	0,05 mg/L (Calculado como Cromo Total)
	Cobre	1 mg/L
	Cianeto	0,07 mg/L
	Chumbo	0,01 mg/L
	Manganês	0,5 mg/L
	Mercúrio	0,001 mg/L
	Níquel	0,02 mg/L
	Nitrato	50 mg/L (Calculado como Nitrato)
	Nitrito	0,02 mg/L (Calculado como Nitrito)
	Selênio	0,01 mg/L
SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS	Acrilamida	0,5 µg/L
	Benzeno	5 µg/L
	Benzopireno	0,7 µg/L
	Cloreto de Vinila	5 µg/L
	1,2 Dicloroetano	10 µg/L
	1,1 Dicloroetano	30 µg/L
	Diclorometano	20 µg/L
	Estireno	20 µg/L
	Tetracloroeto de Carbono	2 µg/L
	Tetracloroetano	40 µg/L
	Triclorobenzenos	20 µg/L
	Tricloroetano	70 µg/L
	Alaclar	20 µg/L
AGROTÓXICOS	aldrin e Diedron	0,03 µg/L
	Atrazina	2 µg/L
	Bentazona	300 µg/L
	Clordano (Isômeros)	0,2 µg/L
	2,4 D	30 µg/L
	DDT (Isômeros)	2 µg/L
	Ensossulfan	20 µg/L
	Endrin	0,6 µg/L
	Glifosato	500 µg/L

	Heptacloro e Heotacloro Epóxido	0,03 µg/L
	Hexaclorobenzeno	1 µg/L
	Lindano (gama-BHC)	2 µg/L
	Matolacoloro	10 µg/L
	Metoxicloro	20 µg/L
	Molinato	6 µg/L
	Pendimetalina	20 µg/L
	Pentaclorofenol	9 µg/L
	Permetrina	20 µg/L
	Propanil	20 µg/L
	Simazina	2 µg/L
	Trifluralina	20 µg/L
CIANOTOXINAS	Microcistinas	1 µg/L
DESINFETANTES E PRODUTOS SECUNDÁRIOS DE DESINFECÇÃO	Bromato	0,025 mg/L
	Clorito	0,2 mg/L
	Cloro Livre	5 mg/L
	Monocloramina	3 mg/L
	2,4,6 Triclorofenol	0,2 mg/L
	Trihalometans totais	0,1 mg/L

Tabela 2.6. Limites para potabilidade bacteriológica. Retirado de Resolução RDC nº275, de 21 de outubro de 2005 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (BRASIL, 2005).

MICROORGANISMO	AMOSTRA INDICATIVA LIMITES	AMOSTRA REPRESENTATIVA			
		n (unidade)	c (aceitável)	m (limite inferior)	M (limite superior)
ESCHERICHIA COLI ou COLIFORME (fecais) TERMOTOLERANTES em 100 ml	Ausência	5	0	-	Ausência
COLIFORMES TOTAIS, em 100 mL	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	5	1	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	2,0 UFC ou 2,2 NMP
ENTEROCOCOS, em 100 ml	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	5	1	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	2,0 UFC ou 2,2 NMP
PSEUDOMONAS AERUGINOSA em 100 ml	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	5	1	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	2,0 UFC ou 2,2 NMP
CLOSTRÍDIOS SULFITO REDUTORES ou CLOSTRIDIUM PERFRINGENS em 100 mL	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	5	1	<1,0 UFC; <1,1 NMP ou ausência	2,0 UFC ou 2,2 NMP

2.3.2 Regulamentação das Águas Minerais nos EUA

Nos Estados Unidos, a água mineral (*bottled mineral water*) é definida como a destinada ao consumo humano e selada em garrafas ou outros recipientes sem adição de ingredientes, exceto que pode conter opcionalmente agentes antimicrobianos seguros e adequados além do fluoreto, opcional e dentro das limitações estabelecidas (*Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2, Sec. 165.110*) (U.S.A. FEDERAL GOVERNMENT, 2011b).

É regulada pelo *Code of Federal Regulations* (*Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2*, revisado em 01/04/2019) e a entidade responsável pela organização, deliberação e alteração desse Código é a *Food and Drug Administration (FDA)*.

Este Código responsável pela regulamentação, muito amplo, estabelece e preconiza;

- 1 - Regras de funcionamento da indústria de água envasada
- 2 - Conceitos relativos à indústria e às regras de funcionamento do complexo industrial.
- 3 – Definições dos tipos de águas envasadas
- 4 – Valores máximos de elementos e substâncias permissivos
- 5 – Metodologias para análises das águas envasadas

A água envasada nos EUA, por ser considerada um alimento, pode ter diversas origens, e sofrer tratamentos. Assim, resumidamente, os diversos tipos de águas envasadas e suas principais características pode sem descritos como *Regulations* (*Code of Federal Regulations, Title 21*) (U.S.A. FEDERAL GOVERNMENT, 2011b):

Artesian Water ou Atersian Well Water: Água proveniente de um aquífero confinado.

Ground Water: Água Proveniente da zona saturada sob uma pressão maior ou igual à atmosférica.

Mineral Water: Águas provenientes de fontes captadas em nascentes ou poços cujo valor total de sólidos dissolvidos (TDS) não seja inferior a 250 partes por milhão (ppm). Esta água não pode sofrer adição de minerais.

Low Mineral Content: Água mineral que possui menos de 500 partes por milhão (ppm) de sólidos totais dissolvidos (TDS).

High Mineral Content: Água mineral que possui mais de 1.500 partes por milhão (ppm) de sólidos totais dissolvidos (TDS).

Purified Water, Demineralized Water, Deionized Water, Distilled Water, Reverse Osmosis Water e Drinking Water: Água que sofreu algum tipo de tratamento. Neste caso,

é incluído o termo “*Drinking Water*” a fim de determinar que a mesma atenda ao padrão comercial para o consumo.

Sparkling Bottled Water: Água proveniente de fonte com concentração de dióxido de carbono. É autorizado o tratamento e posterior gaseificação desde que a quantidade de dióxido de carbono no produto final seja a mesma medida na fonte.

Spring Water: Água subterrânea que flui naturalmente a superfície caracterizando-a como uma surgência natural. O bombeamento e extração é autorizada quando comprovado através de estudo hidrogeológico pertinente a origem do aquífero.

Sterile Water* ou *Sterilized Water: Água que atende aos requisitos de esterilidade do “*United States Pharmacopedia*”.

Well Water: Água proveniente de uma captação subterrânea, perfurado e/ou escavado.

From a Community Water* ou *From a Municipal Source: Proveniente de sistemas de abastecimento.

Cabe ressaltar que, diferentemente das águas envasadas, que é regulada pela FDA (*Food and Drug Administration*), a água de abastecimento público é regulamentada pela agência ambiental americana, *Environmental Protection Agency*, (*EPA – Safe Drinking Water Act - Chapter 373 of the 78th Congress, Approved July, 1944, 58 Stat. 682*).

O FDA estabeleceu padrões de qualidade para águas envasadas (*Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2, Seção 165.110* revisado em 01/04/2019), incluindo aquelas utilizadas como ingredientes de bebidas (com exceção daquelas que possuam algum tratamento e desinfecção). Estes padrões compreendem os níveis máximos permissíveis de contaminantes que representariam riscos à saúde humana; dentre os principais padrões descritos no regulamento encontram-se:

- Microbiológicos: Coliformes totais e E. Coli.
- Qualidade Física: Turbidez, cor e odor.
- Qualidade Química: Inclusos substâncias inorgânicas, compostos orgânicos voláteis (VOCs), pesticidas e outros orgânicos químicos sintéticos (SOCs), resíduos e subprodutos de desinfecção; totalizando mais de 70 parâmetros.
- Qualidade Radiológica: Atividade do Rádio-226 e do Rádio-228, Urânio, Partícula Alfa e a Partícula Beta.

Apesar do Código apresentar toda a metodologia para análises das águas envasadas, a aplicação destas no complexo industrial não é obrigatória, autorizando a utilização de

métodos alternativos entretanto, cabe as empresas engarrafadoras a responsabilidade de assegurar a compatibilidade dos valores quando comparados aos testes oficiais da FDA além da adequação aos padrões de qualidade por ele determinados (*Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2, Secção 165.110* revisado em 01/04/2019).

2.3.3 Regulamentação das Águas Minerais na Comunidade Europeia

Na Comunidade Europeia, a exploração e comercialização de águas minerais é regida pela Diretiva 2009/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 18 de junho de 2009. O Anexo 1 da mesma Diretiva, define “água mineral natural” como sendo microbiologicamente pura, com origem em um lençol subterrâneo e ou depósito proveniente de uma nascente explorada através de uma ou várias descargas naturais ou artificialmente perfuradas. Devido a sua origem subterrânea e pura, oferecem proteção a qualquer risco de poluição (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

Estas águas distinguem-se das ordinárias devido a sua pureza original e composição com presença de teor em minerais, oligo-elementos ou outros constituintes e por determinados efeitos (Tabela 2.7).

Uma água mineral natural, tal como se apresenta à saída da nascente, não pode ser sujeita a nenhum tratamento para além dos dispostos no artigo 4º da Diretiva 2009/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (UNIÃO EUROPEIA, 2009), que são:

a) Separação dos elementos instáveis, como os compostos de ferro e de enxofre, por meio de filtração ou decantação, eventualmente precedida de uma oxigenação, desde que esse tratamento não tenha por efeito uma alteração da composição dessa água nos constituintes essenciais que lhe conferem as suas propriedades;

b) Separação dos compostos de ferro, manganês e enxofre, e do arsênico de certas águas minerais naturais por tratamento com ar enriquecido em ozônio, desde que esse tratamento não altere a composição da água quanto aos constituintes essenciais que lhe conferem as suas propriedades e desde que observe as condições de utilização a aprovar pela Comissão após consulta à Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos além que o tratamento seja notificado as autoridades competentes e por elas sujeito a um controle específico.

c) Separação de componentes indesejáveis além dos que constam das alíneas, desde que esse tratamento não altere a composição da água quanto aos constituintes essenciais que lhe conferem as suas propriedades e desde que observe as condições de utilização a

aprovar pela Comissão após consulta à Autoridade Europeia para a Segurança dos Alimentos além que o tratamento seja notificado as autoridades competentes e por elas sujeito a um controle específico.

d) Eliminação total ou parcial do gás carbônico livre por processos exclusivamente físicos.

Uma água mineral natural, tal como se apresenta à saída da nascente, não pode ser objeto de qualquer outra adição para além da incorporação ou reincorporação de gás carbônico, são proibidos todos os tratamentos de desinfecção, por qualquer meio, a adição de elementos bacteriostáticos ou de qualquer outro tratamento suscetível de alterar a flora natural da água mineral natural (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

Tabela 2.7. Classificações de Águas Minerais na Comunidade Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

CLASSIFICAÇÃO	CRITÉRIOS
Mineralização muito baixa	As que apresentam menos de 50 mg/L de resíduo seco
Oligometálicas ou de mineralização baixa	As que apresentam menos de 500 mg/L de resíduo seco
De mineralização média	As que apresentam entre 500 e 1.500 mg/L de resíduo seco
De mineralização elevada	As que apresentam mais de 1.500 mg/L de resíduo seco
Bicarbonatada	As que contêm mais de 600 mg/L de bicarbonato
Sulfurosa	As que contêm mais de 200 mg/L de sulfatos
Cloretada	As que contêm mais de 200 mg/L de cloreto
Cálcica	As que contêm mais de 150 mg/L de cálcio
Magnésiana	As que contêm mais de 50 mg/L de magnésio
Fluoretada	As que contêm mais de 1 mg/L de fluoreto
Ferruginosa ou que contém ferro	As que contêm mais de 1 mg/L de ferro ferroso
Acidulada	As que contêm mais de 250 mg/L de CO ₂ livre
Sódica	As que contêm mais de 200 mg/L de sódio
Indicadas para dietas pobres em sódio	As que contêm menos de 20 mg/L de sódio

Cabe ressaltar que esta Diretiva não é aplicável a águas com ação medicamentosa (Diretiva 2001/83/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 6 de novembro de 2001), que estabelece um código comunitário relativo aos medicamentos para uso humano; e as águas minerais naturais utilizadas para fins curativos na nascente, em estabelecimentos termais ou hidrominerais.

A Diretiva 2003/40/CE de 16 de maio de 2003 foi responsável por estabelecer a lista e os limites de concentração e as menções constantes do rótulo para os constituintes das águas minerais naturais. Após estudos do Comitê Científico da Alimentação Humana, comparando os limites máximos estipulados pelo *Codex Alimentarius*, e as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS), fixou valores máximos

diferenciados dessas duas organizações para o arsênio, o bário, o flúor, o boro e o manganês. Todos os demais parâmetros, com exceção do nitrato, cujo limite máximo permitido segue a orientação do *Codex Alimentarius* (Tabelas 2.8 e 2.9).

Tabela 2.8. Constituintes naturalmente presentes nas águas minerais naturais e limites máximos que, se forem ultrapassados, podem constituir um risco para a saúde pública (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

CONTAMINANTES	LIMITES MÁXIMOS (mg/L)
Antimônio	0,005
Arsênio	0,010 (total)
Bário	1
Boro	1,5
Cádmio	0,003
Cromo	0,05
Cobre	1
Cianeto	0,07
Fluoreto	5
Chumbo	0,01
Manganês	0,5
Mercúrio	0,001
Níquel	0,02
Nitratos	50
Nitritos	0,1
Selênio	0,01

Tabela 2.9. Limites máximos para os resíduos de tratamento das águas minerais naturais e para as águas de nascente com ar enriquecido em ozônio de acordo com Regulamentação da Comunidade Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

CONTAMINANTES	LIMITES MÁXIMOS (µg/L)
Ozônio Dissolvido	50
Bromatos	3
Bromorfômios	2

Finalmente, cabe ressaltar que a água mineral natural importada para a União Europeia deve ser certificada e obedecer aos mesmos critérios que os concorrentes nacionais (UNIÃO EUROPEIA, 2009).

2.3.4 Contextualização da Regulamentação Brasileira X CE e EUA

Conforme citado anteriormente, a classificação das águas minerais brasileiras é fundamentada no Código de Águas Minerais e tem como base a composição química, as características físicas e físico-químicas e microbiológicas, que são propriedades variáveis

e inerentes a cada tipo de água do subsolo enquanto que as águas envasadas na Comunidade Europeia e nos Estados Unidos são caracterizadas principalmente pela concentração de resíduo sólido (ou sólidos totais dissolvidos, STD).

A tabela 2.10 apresenta a distribuição da composição de resíduo seco a 180°C de um total de 2.442 captações cadastradas e avaliadas até a data de 31/12/2012 na Agência Nacional de Mineração (QUEIROZ, 2015). Cerca de 41% das águas minerais e potáveis de mesa apresentaram teores em sais minerais considerados muito baixos, ou seja, contemplaram as águas leves de baixa a muito baixa mineralização, cujo resíduo seco é inferior a 50 mg/L de resíduo seco. Cerca de 30%, pertence às águas de baixa mineralização (também consideradas leves), com resíduos acima de 50 mg/L até 100 mg/L. Seguido por cerca de 22% do grupo de águas de médio conteúdo em sais minerais, com resíduo seco entre 100 e 200 mg/L. Finalmente cerca de 6%, englobam as águas de alta a muito alta mineralização, cujo resíduo vai além de 200 mg/L. Nessa faixa se incluem também as águas fortemente mineralizadas, cujo conteúdo de sais minerais ultrapassa o patamar de 500 mg/L.

Tabela 2.10. Distribuição das águas minerais e potáveis de mesa de acordo com o Resíduo Seco a 180°C – Modificado de QUEIROZ, 2015.

RESÍDUO SECO	CAPTAÇÕES	
< 50 mg/L	1000	41%
> 50 e 100 mg/L	729	30%
>100 e 200 mg/L	555	23%
> 200 mg/L	158	6%
TOTAL	2442	100%

Contextualizando os dados apresentados anteriormente com base na Diretiva da Comunidade Europeia (UNIÃO EUROPEIA, 2009), nota-se que: cerca de 41% de todas as águas minerais brasileiras seriam classificadas de “mineralização muito baixa”, isto é, apresentando Resíduo Seco menor que 50 mg/L. Também pode-se concluir que mais de 94% de todas as águas brasileiras consideradas seriam classificadas como de “baixa mineralização ou oligometálica” isto é apresentando resíduo seco menor de 500 mg/L.

Levando-se em consideração o Code of Federal Regulations (U.S.A. FEDERAL GOVERNMENT, 2011b), base de classificação de água mineral nos Estados Unidos (exclusivamente em TDS), apenas 6% de toda a água envasada classificada como mineral no Brasil poderia levar o rótulo de água mineral nos Estados Unidos.

3 PESQUISA E PROSPECÇÃO MINERAL

Pesquisa e exploração mineral por definição é o conjunto de conhecimentos, técnicas e ferramentas utilizadas para a descoberta e estudo de depósitos minerais. Alguns autores diferenciam exploração e prospecção, sendo o objetivo da prospecção o reconhecimento geral de um depósito mineral enquanto a exploração é o reconhecimento detalhado desse depósito (CAVALCANTI NETO et al., 2010).

Os trabalhos de Pesquisa e Prospecção Mineral objetivam a seleção de áreas “alvos” para desenvolvimento de um levantamento em detalhe e a viabilidade técnica do seu aproveitamento econômico. As etapas da Pesquisa e Prospecção Mineral se configuram; pela avaliação dos aspectos econômicos do minério; pelas informações preliminares da região (compilação de dados e pesquisa bibliográfica, mapas, histórico de eventos e presença deste minério), pelas informações sobre a favorabilidade regional de ambientes geológicos, geoquímico e geofísico; pelo reconhecimento e presença e semelhança de outros depósitos, informação da estrutura física disponível (vias de acesso, municípios e propriedades) e além do conhecimento de todo arcabouço legal pertinente.

A eficiência da Pesquisa e Prospecção Mineral dependerá da combinação de diferentes métodos de seleção de alvos ampliando o conhecimento regional e consequentemente visando a redução dos custos do empreendimento.

3.1 Arcabouço Legal

A Pesquisa mineral é a execução dos trabalhos necessários à definição da jazida, à sua avaliação e à determinação da exequibilidade de seu aproveitamento econômico. Ela compreende os trabalhos de campo e laboratório, os quais, de acordo com Código de Mineração e Legislação Correlata - Decreto Lei 227/1.967 e seu Regulamento 9.406/2.018, envolvem as seguintes atividades: Levantamentos Geológicos da área a ser pesquisada, em escala conveniente; Estudos dos Afloramentos e suas correlações; Levantamentos Geofísicos e Geoquímicos; Aberturas de escavações visitáveis e Execução de sondagens no corpo mineral; Amostragens Sistemáticas; Análises Físicas e Químicas das amostras e dos testemunhos de sondagens e Ensaio de beneficiamento dos minérios ou das substâncias minerais úteis, para obtenção de concentrados de acordo com as especificações do mercado ou para aproveitamento industrial (BRASIL, 1967).

Todo Recurso Mineral incluindo os de subsolo em território nacional são bens da União, competindo a ela legislar sobre as jazidas, minas e outros recursos minerais; porém o registro, acompanhamento e fiscalização das concessões de direito de pesquisa e

exploração mineral são competências comuns à União, Estados e Municípios ao qual pertençam (BRASIL, 1988).

Cabe ainda à União, no interesse nacional, mediante a autorização de regime de Concessão a pesquisa por tempo determinado (de 1 a 3 anos admitindo uma única prorrogação) de recursos minerais, bem como o aproveitamento de seu potencial através de regime de Concessão de Lavra, admitindo-se até em condições específicas sua pesquisa e exploração em faixa de fronteira ou reserva indígena (Art. 176).

Ainda, sob responsabilidade da União através da ANM (Agência Nacional de Mineração) dentre outros, a implementação da política nacional para as atividades de mineração estabelece áreas máximas a serem fixadas em ato, estabelece normas e padrões para o aproveitamento dos recursos minerais e regula e fiscaliza a atividade de mineração incluindo a pesquisa e prospecção mineral (BRASIL, 1967).

Os trabalhos de pesquisa finalizam-se formalmente após a apresentação de Relatório Final de Pesquisa junto à ANM (Agência Nacional de Mineração) com a verificação do órgão para despacho quando a sua aprovação, podendo o mesmo ser: Aprovado - quando fica demonstrada a existência de jazida; Não Aprovado - quando é julgada a insuficiência dos trabalhos de pesquisa ou deficiência técnica; Arquivamento do relatório - quando fica demonstrada a inexistência de jazida, passando a área por disponibilidade e o Sobrestamento - quando fica caracterizada a impossibilidade temporária da exequibilidade técnico-econômica (Decreto Lei 227/1.967 e seu Regulamento 9.406/2018).

3.2 Aspectos Econômicos do Minério

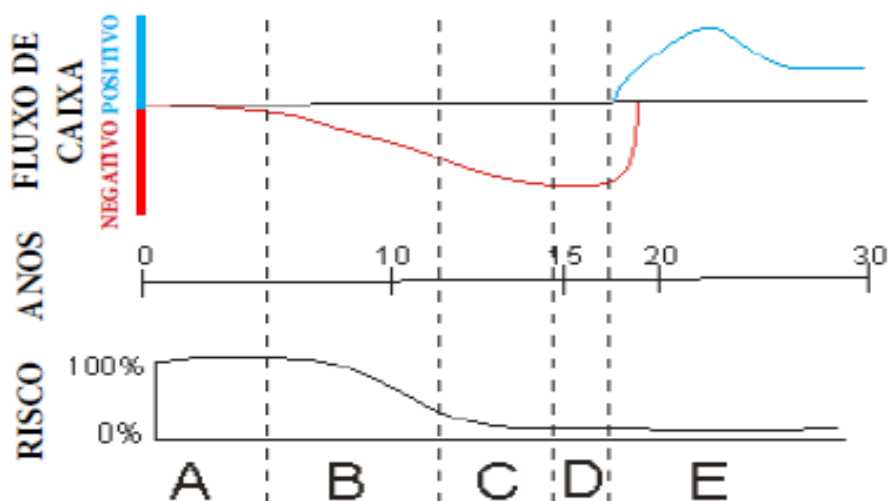
Os bens minerais, também chamados pelo termo em inglês *commodities*, correspondem a produtos de base, ou matéria prima com qualidades e características uniformes, sendo seu preço regulado pela oferta e procura internacional, negociados em bolsas de mercadorias e valores. Caso a demanda por uma *commodity* mineral, esteja em alta e com tendência a valorização, torna-se mais estimulante a sua pesquisa, prospecção e produção. Da mesma forma, prospectos de *commodities* atualmente desvalorizados economicamente podem tornar-se favoráveis com a futura valorização de seu preço. Importante ressaltar que os preços das *commodities* também são influenciados por fatores geopolíticos e macroeconômicos, podendo apresentar grande volatilidade durante um determinado período.

Além da variação do preço da *commodity*, que afeta diretamente a viabilidade do empreendimento mineiro, a extração mineral é um ramo econômico considerado de alto risco devido à complexidade de sua implantação e a gênese de seus produtos, despendendo-se altos valores durante as fases de pesquisa até seu desenvolvimento e cuja recuperação do capital investido se dará apenas após a efetiva operação do empreendimento com a extração e beneficiamento do minério, o que pode atingir mais de uma década.

Dessa forma, uma seleção criteriosa dos alvos visa reduzir os riscos de investimento e tempo subsidiando a tomada de decisão de forma acertada.

Na figura 3.1 são descritas as variáveis de um Empreendimento Mineiro, desde sua concepção até sua fase de lavra.

Figura 3.1. Fases de um Empreendimento Mineiro e variáveis envolvidas de Tempo, Risco e Fluxo de Caixa. A = Geração, B = Exploração, Descoberta e Avaliação, C = Pré-desenvolvimento, D = Desenvolvimento e E = Produção. Fonte CAVALCANTI NETO et al. 2010.



Apesar do termo *commodity*, não ser empregado às águas minerais, ainda sim, este é considerado um bem mineral, segundo o código de mineração vigente (BRASIL, 1967). Ainda, por possuírem características únicas dentre os outros minérios, faz-se com que sejam incluídas em campanhas específicas de prospecção mineral (pesquisa mineral) ainda escassa em bibliografia.

3.3 Revisão Bibliográfica e Informações Existentes

Nesta fase todas as informações disponíveis da região e bancos de dados foram levantados, incluindo-se relatórios técnicos, publicações, mapas técnicos diversos

(Geológico, Hidrogeológico, Metalogenético, Geoquímico, Geofísico, Vegetação, Topográfico, etc.) fotografias aéreas, imagens de satélite, processos minerais em andamento (pesquisa e/ou lavra e/ou lavra garimpeira), além de entrevista com diversos *stakeholders*. O objetivo é construir um acervo robusto com informações da região de trabalho.

Dentre as bases técnicas de informações para produção de acervo técnico regional estão as instituições públicas da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil), ANM (Agência Nacional de Mineração), os institutos geológicos dos Estados da Federação (como o Instituto Geológico do Estado de São Paulo e o DRM - Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro) além das diversas Instituições e Universidade públicas e privadas que atuam com ciência e informação técnica-geológica básica.

3.4 Levantamentos Técnicos

3.4.1 Fotografias Aéreas e Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é um termo utilizado na área das ciências aplicadas que se refere à obtenção de imagens à distância através de satélites ou aeronaves, sobre a superfície terrestre (STEFFEN, 1993).

A interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélites é uma importante ferramenta na elaboração de mapas topográficos prévios para posterior confirmação em campo. Tem sido utilizado também de maneira a auxiliar na identificação e seleção de alvos, possibilitando a interpretação preliminar litológica, estratigráfica e estrutural regional. Proporcionam a confecção de mapas fotogeológicos com estruturas, contatos litológicos e drenagens inferidos.

O sensoriamento remoto tem sido utilizado desde a fase de planejamento até a fase de campo também com a utilização tridimensional proporcionada pelos pares de fotografias aéreas (estereoscopia), possibilitando uma visualização prévia de altimetria, vegetação e vias de acesso.

3.4.2 Geofísica

A utilização da Geofísica exploratória na pesquisa mineral, tem como finalidade a caracterização indireta de anomalias físicas ou discontinuidades (calor, magnetismo,

radioatividade, gravidade, eletricidade, propagação de ondas elásticas etc.) que podem indicar presença de um depósito mineral.

Em função do parâmetro físico estudado, a geofísica pode ser dividida em quatro grupos: gravimétrico, magnetométrico, geolétrico e sísmico. A gravimetria e magnetometria utilizam o campo natural, estudando as perturbações que determinadas estruturas ou corpos produzem sobre campos preexistentes. Os métodos elétricos (exceção do potencial espontâneo e o magnetotelúrico) e os sísmicos são artificiais, ou seja, o campo físico estudado é criado por meio de equipamentos apropriados.

Para a pesquisa mineral regional, emprega-se esses métodos aéreos (aviões, helicópteros e drones), chamados levantamentos aerogeofísicos para visualização de grandes áreas e posterior os terrestres, uma vez que os alvos já foram definidos.

Os principais métodos geofísicos utilizados na pesquisa e prospecção mineral são: Gravimetria (Grav), Radiométricos (Rad), Magnético (Mag), Elétricos (Resistividade, Potencial Espontâneo, Polarização Induzida, Magnetotelúrico), Eletromagnético (EM), Sísmicos (Reflexão, Refração), Radiométricos (gama) e Ground Penetrating Radar (GPR) ou Georadar (CAVALCANTI NETO et al., 2010).

Os métodos geoelétricos (sondagens elétricas, caminhamentos elétricos e perfilagens elétricas) são os mais utilizados para fins de prospecção de águas subterrâneas objetivando a identificação de camadas promissoras para captação de águas subterrâneas.

As sondagens elétricas investigam em profundidade a partir de um ponto fixo na superfície do terreno, o objetivo do caminhamento elétrico é a investigação lateral de discontinuidades dos materiais geológicos e a perfilagem elétrica utiliza furos ou sondagens para verificação *in situ*. (BRAGA, 2016).

3.4.3 Geoquímica

O método geoquímico mais utilizado na prospecção mineral para a seleção de alvos é o sedimento de corrente. A composição da amostra do sedimento (aluvião) é coletada no fundo de um canal ativo da drenagem e reflete o quimismo de toda a bacia hidrográfica, pois este sedimento foi produzido a partir do intemperismo de rochas a montante do ponto de captação. Trata-se de um meio amostral muito adequado para levantamentos regionais.

Elementos indicadores são aqueles analisados com o objetivo de detectar um corpo de minério, na maioria das vezes um componente economicamente importante (elemento maior) no minério. Em muitas situações, por apresentarem dificuldades analíticas, tem

mobilidade muito reduzida ou por produzirem dados de interpretação difícil, é comum utilizar outros elementos associados ao minério de concentrações mais baixas (menores ou traços) denominados farejadores (LICHT, 2001).

Elementos farejadores (*pathfinders*) úteis são aqueles com propriedades geoquímicas e analíticas mais adequadas que dos elementos indicadores do minério procurado. Alguns exemplos de elementos farejadores e os tipos de jazimentos para os quais eles são indicados estão apresentados na Tabela 3.1 (LICHT, 2001).

Tabela 3.1. Exemplos de elementos farejadores típicos para alguns modelos de depósitos minerais. Fonte LEVINSON, 1974.

Modelo de depósito	Elementos farejadores
Au; Ag; filonianos	As
Au-Ag-Co-Cu-Zn; sulfetos complexos	As
W-Be-Zn-Mo-Cu-Pb; skarn	B
Sn-W-Be; veios ou graisen	B
Pb-Zn-Ag; sulfetos complexos	Hg
W-Sn; metamorfismo de contato	Mo
U; sedimentar	Se,V,Mo
Platina e platinóides nas ultramáficas	Pd,Cr,Cu,Ni,Co
Ag-Pb-Zn; sulfetos em geral	Zn
Cu-Pb-Zn; sulfetos em geral	Zn,Cu
U; todos os tipos	Rn (água e gás do solo)
sulfetos de todos os tipos	SO ₄ ²⁻ (água)

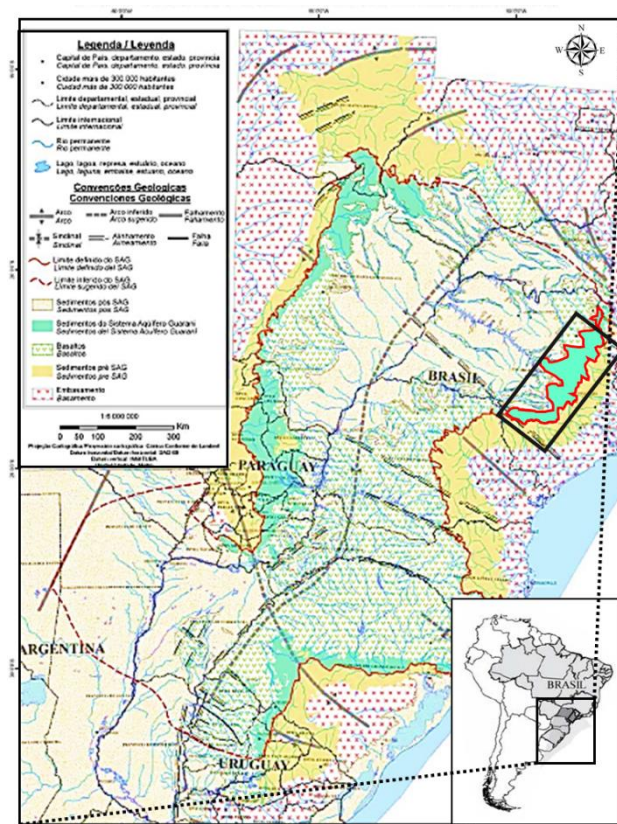
A geoquímica é aplicada às águas subterrâneas durante a prospecção para a caracterização, avaliação da qualidade (química e microbiológica), riscos quanto à contaminação antrópica, vulnerabilidade, mineralização, além da sua classificação e aproveitamento como bem mineral, por exemplo, águas minerais fluoretadas, quando contiverem no mínimo 0,02 mg/L de fluoreto.

Os conceitos de elementos indicadores e farejadores também podem ser empregados nas águas subterrâneas para a sua caracterização (mineralização, perfil geoquímico e qualidade) e classificações de águas minerais (composição química com ação medicamentosa).

4 O SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

O Sistema Aquífero Guarani (SAG) (Figura 4.1), constitui a unidade hidroestratigráfica mais importante da porção meridional do continente sul-americano, está localizado na América do Sul, inserido na Bacia Geológica Sedimentar do Paraná, em uma área de cerca de 1.195.700 de km², distribuídos pelos territórios do Brasil (840.000 km²) nos Estados de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), Uruguai (58.500 km²), Argentina (225.500 km²) e Paraguai (71.700 km²), onde vive uma população aproximada de 29,9 milhões de pessoas (BORGHETTI; BORGHETTI; ROSA FILHO, 2004). No Estado de São Paulo, o SAG ocupa cerca de 60% de seu território e ocorre confinado por derrames de rochas basálticas em 90% de sua área de ocorrência.

Figura 4.1. Mapa de localização do Sistema Aquífero Guarani em continente Sul-americano (Modificado de LEBAC, 2008 a,b). Em detalhe, área foco desta pesquisa, áreas de afloramento do SAG no Estado de São Paulo.



O Sistema Aquífero Guarani está inserido no arcabouço geológico das bacias sedimentares do Paraná e Chacoparanaense, com estratigrafia constituída por rochas sedimentares e ígneas que podem atingir até 7.000 metros de espessura. A Bacia Sedimentar do Paraná possui formato ovalado ou de sinéclise, apresentando seu eixo mais

alongado na direção N-S, refletindo fenômenos erosivos instalados no pós-paleozoico do continente sul-americano. Sua borda leste foi erodida em função do rifteamento sul-atlântico que soergueu e expôs as rochas do embasamento (MILANI, 2004).

As unidades geológicas que constituem o SAG são associadas ao período Mesozoico, caracterizadas por rochas sedimentares siliciclásticas continentais da Bacia Sedimentar do Paraná (Brasil e Paraguai), Chacoparanense (Argentina) e Bacia do Norte (Uruguai). Limitada na 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 (SANGRAM et al., 2008; LEBAC 2008 a,b; GASTMANS et al., 2012) (Tabela 4.1).

Durante o Mesozoico, a evolução geológica da Bacia Sedimentar do Paraná teve como característica principal a implantação de um sistema deposicional continental tipificado por climas quentes úmidos a desérticos com a presença de áreas onde se preservaram depósitos fluviais e eólicos associados, com reduzido tectonismo atuante onde foram depositadas as rochas constituintes do Sistema Aquífero Guarani.

O substrato do SAG é constituído por rochas de idade Permiana, denominadas de Pré-SAG na Argentina e Uruguai, Formação Buena Vista, no Paraguai pela Formação Tacuary e no Brasil, ao sul, Formação Sanga do Cabral, na região central, Formação Rio do Rastro e na porção Norte, Formação Corumbataí e Grupo Estrada Nova.

As unidades constituintes do SAG, depositadas sobre a discordância regional permo-eotriássica, são as Formações Caturrita e Santa Maria na porção sul da bacia e Formação Piramboia, a norte. As rochas Juro-Cretáceas estão presentes em todas as bacias citadas anteriormente também fazem parte do SAG. Tais rochas são caracterizadas pelas Formações Tacuarembó no Uruguai, Guará (sul) e Botucatu (norte) no Brasil e Misiones na Argentina e Paraguai. A deposição posterior às rochas do SAG, de idade Neo-Cretáceo, foi atribuída à Formação Arapey no Uruguai, Formação Alto Paraná no Paraguai e Formação Serra Geral no Brasil (GASTMANS et al., 2012).

Tabela 4.1. Unidades estratigráficas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG, em destaque) e suas unidades Pré e Pós SAG. Modificado de LEBAC, 2008.

IDADE	PARAGUAI	ARGENTINA	URUGUAI	BRASIL (S)	BRASIL (C-N)
130 Ma	Alto Paraná (Clásticos/ígneos)	Serra Geral (Curuzu Cuatia) Posadas / Solari	Arapey	Serra Geral	Bauru Serra Geral
Js - K	Misiones	Misiones	Tucuaembó (Itacumbu)	Botucatu Guará	Botucatu
Triássico (Tr)				Caturrita Santa Maria	Piramboia
250 Ma.	Tacuary Grupo Independencia	Buena Vista	Buena Vista	Sanga do Cabral	Corumbataí/Rio do Rastro

Os elementos estruturais da Bacia Sedimentar do Paraná controlam a geometria, compartimentação, preenchimento sedimentar e fluxo de água subterrânea. Dentre os principais estão: Arcos da Canastra e São Vicente (ao norte), Arcos de Assunção e Pampeano/Puna (oeste) e Arco do Rio Prata (ao sul), no interior da Bacia são conhecidos importantes elementos estruturais como o Arco de Ponta Grossa, o Arco do Rio Grande e o Sinclinal de Torres, alguns já definidos por Zalán et al. (1990).

As espessura do SAG são bem variáveis, as menores espessuras foram verificadas na região da divisa entre Santa Catarina e Rio Grande do Sul (70 a 100 metros) e as maiores encontram-se subparallelamente aos Rios Paraná e Uruguai, sendo concordante com o eixo deposicional da Bacia do Paraná, os depocentros dessa unidade podem chegar a 500 metros (ARAÚJO et al. 1995). Segundo estudos do LEBAC (2008a, b), as estruturas presentes na bacia obtiveram grande influência nas continuidades observadas desses depocentros, como o Arco de Ponta Grossa e a Dorsal Assunção-Rio Grande, este último considerado por Rossello et al. (2006), como um alto estrutural ativo entre o Permiano/Eo-Triássico e o início dos derrames basálticos no Eo-Cretáceo que subdivide os arenitos do SAG em duas bacias de sedimentação distintas, a norte e a sul.

A recarga do aquífero é feita de forma direta nas áreas de afloramento, onde a água da chuva infiltra-se nos arenitos expostos. No Estado de São Paulo, a porção aflorante estende-se por cerca de 16.000 km², de Rifaina, ao norte, a Fartura, ao sul, passando pela região de Ribeirão Preto e Botucatu (IRITANI, 2008). A recarga é indireta pela drenagem (infiltração vertical) das águas através das fissuras das rochas das formações basálticas que estão sobre o aquífero.

O fluxo das águas subterrâneas do SAG apresenta uma tendência regional de norte a sul, acompanhando o eixo da Bacia do Paraná. A partir da confluência entre os Estados

de Paraná e Mato Grosso do Sul e o território paraguaio, onde podem ser reconhecidos quatro grandes domínios hidrodinâmicos para o SAG, que apresentam relações diretas com as grandes feições estruturais da bacia. Por outro lado, no Estado de São Paulo, o aquífero, apresenta fluxo de água subterrânea para oeste, em direção ao Rio Paraná (GASTMANS et al., 2012).

As principais zonas de descarga do sistema são de difícil reconhecimento e aproximam-se às regiões próximas ao nível de base do Rio Paraná ou dentro da área de influência à jusante de sua bacia hidrográfica, bem como no Chaco argentino (BORGHETTI, BORGHETTI e ROSA FILHO (2004). Para Hirata (2007) é difícil saber onde exatamente ocorre a descarga do aquífero, por não ser perceptível facilmente. Porém, imagina-se, segundo ele, que de fato, grande parte da descarga ocorra no Rio Paraná; no entanto, não há como saber se isto é verdadeiro e, ainda mais, qual o volume de água que entraria no rio.

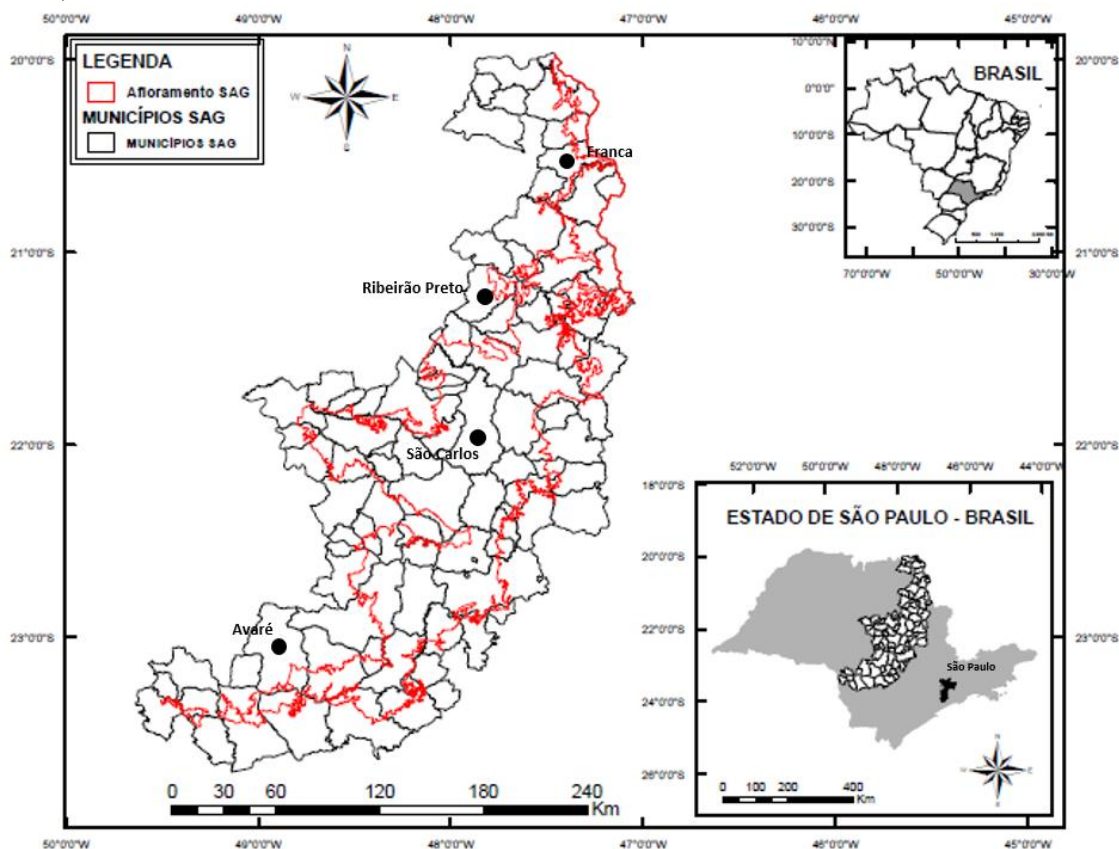
Os arenitos da Formação Piramboia no limite leste da Bacia Sedimentar do Paraná possuem porosidades próximas a 35%, e variados eventos diagenéticos alteraram a porosidade primária dessas rochas na região (CAETANO-CHANG 1997 e CAETANO-CHANG e WU 2006). Entretanto, na porção oeste da Bacia Sedimentar do Paraná, amostras da Formação Botucatu e Piramboia apresentaram valores médios de porosidade de 30% e devido à presença de cimento carbonático ou silicoso nos poros dos arenitos que poderia reduzir os valores apresentados anteriormente (GASTMANS, 2010). Em trabalho desenvolvido na borda oeste da Bacia, em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, o mesmo autor, apresentou médias de 30% e 20% de porosidade para as Formações Botucatu e Piramboia respectivamente, através de avaliações de perfis sônicos.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Á área de estudo selecionada para a aplicação do modelo desenvolvido (Figuras 4.1 e 5.1), é constituída pelas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, representada pelas formações geológicas Piramboia e Botucatu, localizando-se próximo a borda oeste da Depressão Periférica Paulista e constituindo-se em um aquífero granular, homogêneo e regionalmente livre.

Compreende 93 municípios, com área total de aproximadamente 16.000 km², equivalente a 6,2% da área total do Estado e possui uma população total aproximada de 4 milhões de habitantes, representando cerca de 10% da população total do Estado.

Figura 5.1. Mapa de localização das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, Brasil.



5.1 Aspectos Fisiográficos

As áreas de afloramento do SAG no Estado de São Paulo situam-se na transição entre as zonas de climas Subtropical Quente a Tropical, e localmente, a Subtropical Temperado e Tropical com chuvas excessivas. Dominante na região em estudo, abrangendo toda a parte central do Estado de São Paulo é o Clima Subtropical Quente, com verão quente e sem estação seca de inverno, em que a temperatura média do mês mais frio está entre

18°C e -3°C. As porções norte e noroeste, mais quentes, pertencem ao tipo Tropical e localmente Tropical com Chuvas Excessivas, climas tropicais chuvosos com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18°C. A porção sudeste da área de estudo apresenta faixas características do clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. Este tipo climático possui verão quente e inverno não muito frio, tipicamente Subtropical. O mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm e o período chuvoso avança na estação de outono. Algumas áreas serranas, com verão ameno, são classificadas como Subtropical Temperado, em que a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C e, durante pelo menos quatro meses, é superior a 10°C (SANTOS, 2012).

O índice pluviométrico médio anual para toda área de estudo é de 1.476 mm/ano, onde os valores inferiores foram encontrados no Município de Porangaba com cerca de 1.240 mm/ano e os valores superiores no Município de Brodowski, com cerca de 2.122 mm/ano. A série histórica mínima considerada neste trabalho foi de 30 anos, representado por 59 estações pluviométricas pertencentes ao banco de Dados Hidrológicos/Pluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (de um total de 173 estações localizadas na área de estudo).

Com relação a hidrografia, a região de trabalho é drenada principalmente pelos rios Tietê, Piracicaba, Mogi-Guaçu, Pardo e Paranapanema.

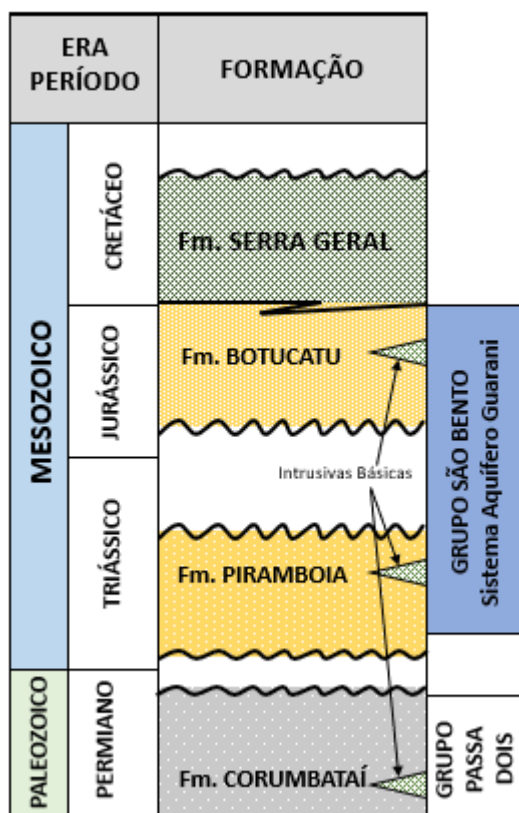
A cobertura vegetal natural da área de trabalho é composta por resquícios dos seguintes tipos fitofisionômicos: mata, capoeira, cerrado, campo, campo-cerrado e cerradão (MARTINELLI, 2010). A maior parte da ocupação do solo desta região é formada pela agricultura extensiva predominantemente cana de açúcar e laranja, além de pecuária.

5.2 Aspectos Geológicos e Hidrogeológicos

O quadro litoestratigráfico do Sistema Aquífero Guarani na área de estudo é composto pelas formações geológicas Botucatu e Piramboia de idade Mesozoica (Figura 5.2). O substrato geológico do SAG é representado pela Formação Corumbataí de idade Permiana, que foi depositada em ambiente de sedimentação essencialmente marinho e é limitada no topo por discordância regional de idade permo-eotriássica, que marca o início do processo de continentalização dos depósitos sedimentares da Bacia Sedimentar do Paraná. A Formação Piramboia, estratigraficamente inferior no SAG, insere-se na

Supersequência Gondwana II, enquanto a Formação Botucatu, superior, insere-se na Supersequência Gondwana III, juntamente com os basaltos do derrame Serra Geral que a recobre regionalmente todo o SAG (MILANI, 1997).

Figura 5.2. Perfil litoestratigráfico simplificado do Sistema Aquífero Guarani (SAG) na Bacia do Paraná. Unidades do SAG, pré e pós SAG. (Modificado de PAULA e SILVA et al., 2005).



5.2.1 Formação Piramboia

A Formação Piramboia encontra-se assentada sobre a Formação Corumbataí. O contato erosivo representado pela discordância de idade Permo-Eotriássica separa as duas unidades geológicas.

A gênese da Formação Piramboia foi caracterizada pela predominância de deposição eólica sobre a deposição fluvial, caracterizada por diferentes associações de fácies de duna, interduna e de lençóis de areia que por vezes apresentam interação com depósitos de canais fluviais e planícies de inundação (CAETANO-CHANG, 1997).

Está caracterizada pela ocorrência de sucessivas camadas arenosas, geralmente avermelhadas e de granulação média a fina, de idade Triássico-Jurássico. A unidade possui maior fração argilosa na base quando comparada às camadas superiores onde, localmente, podem ocorrer arenitos conglomeráticos. Localmente é possível evidenciar

presença de camadas horizontais de pequena espessura de lamitos. Estratificações plano-paralelas e cruzadas de médio e grande porte podem ser evidenciadas nos arenitos desta unidade.

5.2.2 Formação Botucatu

A Formação Botucatu é caracterizada predominantemente por arenitos finos a médios, friáveis, quartzosos, bem arredondados, bem selecionados e com estratificações cruzadas de grande e médio porte.

O ambiente de sedimentação desta Formação é do tipo desértico, tendo sofrido grande influência dos processos eólicos com fácies de depósitos torrenciais e provenientes de depósitos lacustres. Na base da unidade são encontrados arenitos conglomeráticos depositados por *wadis*, enquanto na parte mais superior da formação, que ocorre entre os primeiros derrames de basaltos, ocorre a sequência lacustre, que é caracterizada por lamitos arenosos, siltitos e arenitos lamíticos (PAULA e SILVA et al., 2008).

Nesta unidade predominam as fácies de *foresets* de dunas eólicas, de interdunas secas e de lençóis de areia (CAETANO-CHANG, 1997) e a espessura desta formação é bastante variável, sendo que não ultrapassa os 150 metros (SOARES, 1975) e para ASSINE et al. (2005), a variação de espessura da Formação Botucatu se dá, em grande parte, em função da distribuição dos campos de dunas e de seu recobrimento pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, sendo que em alguns casos observam-se os campos de dunas recobertas concordantemente pelos derrames basálticos da Fm. Serra Geral, fato este que preservou a forma original das construções eólicas (ALMEIDA, 1953).

O contato basal com a Formação Piramboia é marcado por brusca mudança de textura e coloração, representando para diversos autores, uma discordância regional, (ZALÁN et al, 1990; MILANI, 1997; CAETANO-CHANG, 1997).

5.2.3 Formação Serra Geral

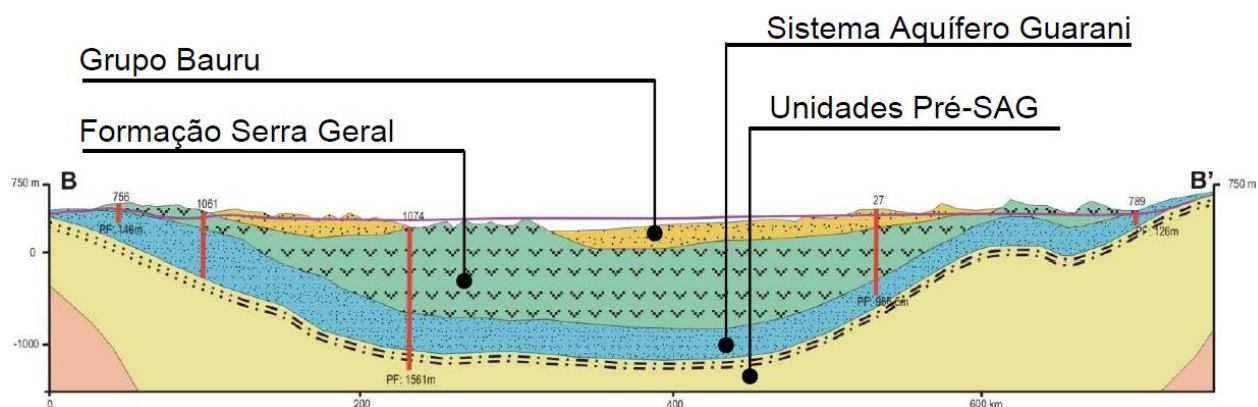
A Formação Serra Geral está relacionada a um conjunto de derrames de rochas basálticas em associação a magmatitos intrusivos. É, portanto, constituída por basaltos toleíticos e andesitos basálticos com quantidades subordinadas de riolitos e riodacitos (PEATE et al, 1992). Na região sudoeste do Estado de São Paulo, região do Pontal do Paranapanema ocorre o depocentro das lavas, apresentando sua máxima espessura, cerca de 2.000 metros.

A recorrência de arenitos nas camadas inferiores dos basaltos da Formação Serra Geral assinala a contemporaneidade entre a sedimentação eólica da Formação Botucatu e os primeiros derrames de lavas.

O contato basal entre estas duas Formações é localmente abrupto e para SOARES *et al.* (1973), a continuidade do processo eólico durante as primeiras manifestações vulcânicas deu origem a numerosos corpos arenosos intertrapeados com espessura de até 40 metros. No entanto, SOARES (1975) reconheceu que é difícil precisar se os magmatitos, aos quais se intercalam corpos arenosos, se são intrusivos ou extrusivos. Assim, este contato é geralmente colocado na base do primeiro derrame basáltico.

A porção não aflorante da Formação Serra Geral está recoberta pelos sedimentos do Grupo Bauru e formações cenozóicas. Regionalmente, sua espessura aumenta de leste para oeste, até atingir valores da ordem de 1.500 metros na confluência dos rios Paraná e Paranapanema (PAULA e SILVA & CAVAGUTI, 1994).

Figura 5.3. Perfil geológico simplificado do Sistema Aquífero Guarani e unidades pré e pós SAG com direção leste-oeste no Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul da Bacia Sedimentar do Paraná. Sistema Aquífero Guarani representado pelas Formações Piramboia e Botucatu. (II Congresso Aquífero Guarani/OEA, 2009).



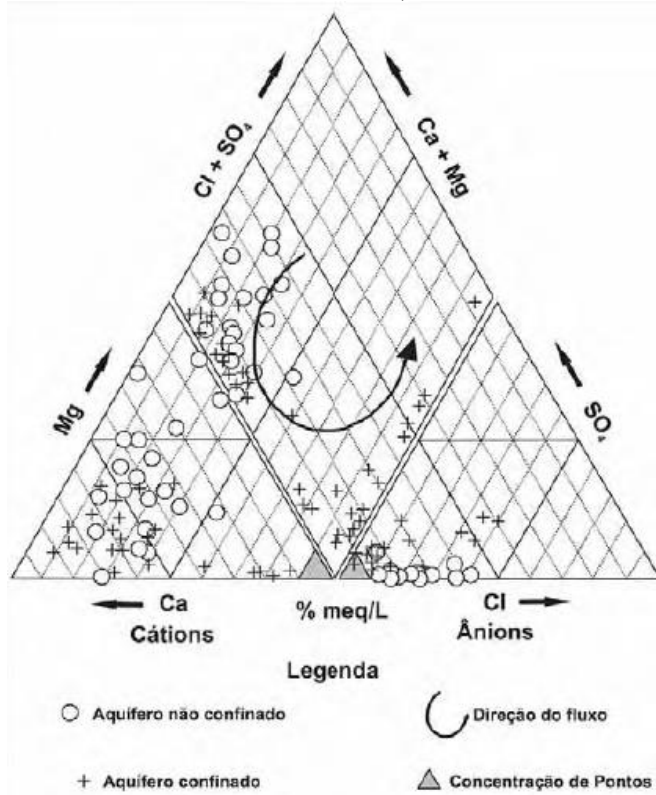
5.3 Hidroquímica

As águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo podem ser divididas em três principais grupos relacionados principalmente ao seu grau de confinamento. Desta forma, os grupos foram identificados como sendo da região de afloramentos, da região em direção a oeste e de uma região de maior confinamento, localizada a oeste da faixa de afloramentos, próxima à calha do Rio Paraná (SILVA, 1983).

Na região de afloramentos, foco deste estudo, identificou-se a predominância de águas bicarbonatadas magnesianas e calco-magnesianas; em direção a oeste, numa faixa de cerca de 60 quilômetros de largura a partir do contato da zona de afloramentos das

formações Botucatu/Piramboia com os basaltos da Formação Serra Geral, as águas são bicarbonatadas cálcicas e calco-magnesianas; e na terceira região, de maior confinamento, as águas tornam-se bicarbonatadas sódicas, evoluindo no extremo sudoeste do estado para cloro-sulfatadas sódicas (Figura 5.4).

Figura 5.4. Diagrama de Piper das águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Evolução hidroquímica no sentido do fluxo e seu confinamento (Modificado de SILVA, 1983).



Sraceck & Hirata (2002), estudaram a evolução das águas bicarbonatadas calco-magnesianas, com ocorrência nas proximidades das zonas de afloramento, para as águas bicarbonatadas sódicas e clorosulfatadas nas zonas de maior confinamento do aquífero. O modelo de troca de cátions (cálcio por sódio) associado à contribuição de íons cloreto e sulfato, provenientes de depósitos evaporíticos contidos na Formação Piramboia, explicaria esta evolução hidroquímica.

Tabela 5.1. Principais características químicas das águas do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (SILVA, 1983 e SRACECK & HIRATA, 2002).

CARACTERÍSTICA	ZONA AFLORANTE	ZONA CONFINADA
Região no Estado de São Paulo	Leste	Centro e Oeste
Classificação das Águas segundo Piper	Bicarbonatadas Calco-Magnesianas	Bicarbonatadas Sódicas e Cloro-Sulfatas Sódicas
TDS (mg/L)	< 294	61 - 650
pH	< 7,5	8,2 - 10,4
Cálcio (Ca) (meq/L)	0,04 - 2,5	0,02 - 0,84
Magnésio (Mg) (meq/L)	< 1,13	< 0,08
Carbonato (CO ³⁻) (meq/L)	< 0,04	< 2,9
Cloroeto (Cl-) (meq/L)	< 0,31	0,01 - 3,75
Na (Sódio) (meq/L)	< 0,9	0,6 - 9,8
Bicarbonato (HCO ₃) (meq/L)	0,06 - 3,16	0,66 - 3,4
Sulfato (SO ₄) (meq/L)	<0,25	< 1,92

5.4 Potencialidade Hídrica

O Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo apresenta em sua porção leste aflorante, superfície potenciométrica com cotas de nível d'água da ordem de 800 metros que diminuem no sentido oeste, atingindo valores de até 400 metros em sua área confinada. A geometria destas equipotenciais indicam um fluxo regional de leste para sudoeste (SÃO PAULO, 2005, Figura 5.5). O gradiente hidráulico médio na área confinada é de aproximadamente 0,001; enquanto na área de estudo, aflorante, a leste, com maiores valores, de 0,008 e 0,003, observados por exemplo ao longo dos eixos dos rios Pardo e Jacaré-Pepira, respectivamente.

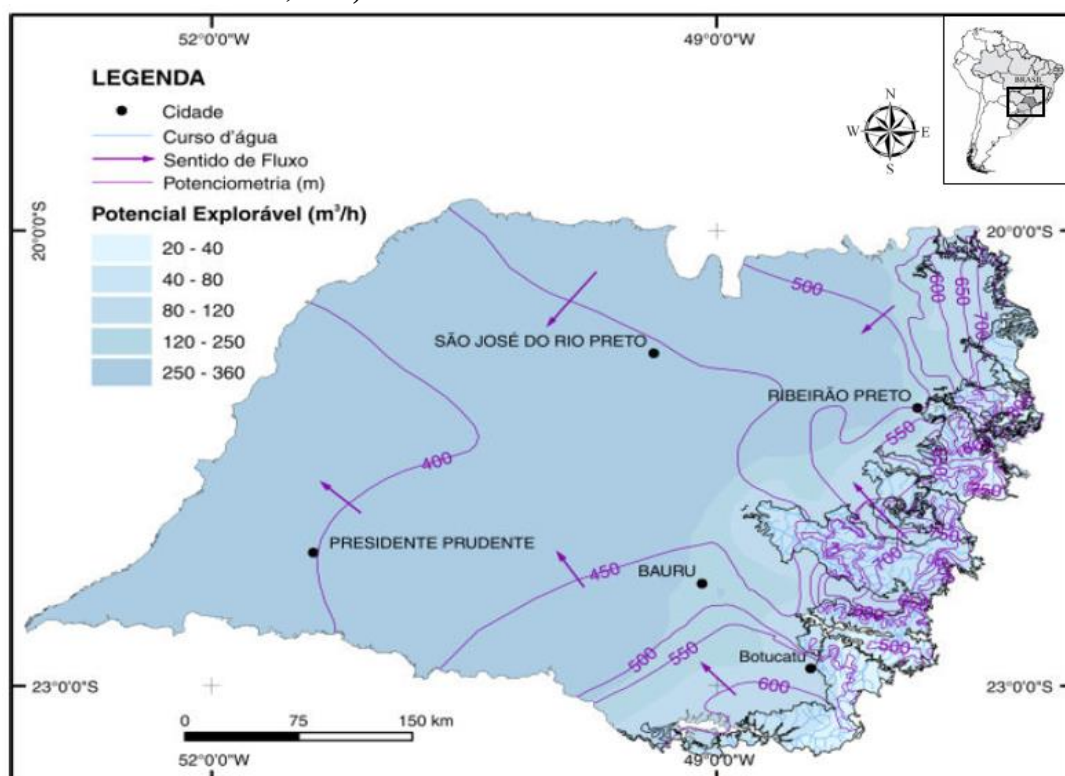
Os valores médios de condutividade hidráulica (K) do Sistema Aquífero Guarani são de 2,6 m/dia para a área confinada e 3,0 m/dia para a área aflorante/livre, o coeficiente de armazenamento médio (S) para a porção aflorante/livre é de 0,17 enquanto para a porção confinada de 10^{-3} e os valores de transmissividade (T) de 260 m²/dia e para a área leste, aflorante atingindo até valores de 1.200 m²/dia em sua área confinada a oeste ao longo do Vale do Rio Tietê (DAEE, 1974) (Tabela 5.2).

Em relação a vazão explorável (Q), as menores faixas, de 20 a 40 m³/h encontram-se a leste do Estado de São Paulo, nas áreas próximas à Formação Passa Dois, onde o aquífero possui as menores espessuras saturadas. Seguindo a oeste-noroeste, dentro da zona confinada os valores aumentam chegando a 360 m³/h a partir dos municípios de Miguelópolis a noroeste e Ourinhos a sudoeste, onde fixam-se os valores máximos deste aquífero (SÃO PAULO, 2005).

Tabela 5.2. Principais características do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Compilado de SÃO PAULO, 2005).

CARACTERÍSTICA	ZONA AFLORANTE	ZONA CONFINADA
Área Aproximada (km ²)	16.000	174.000
Espessura Média Aquífero (m)	100	400
Cota do Topo do Aquífero (m)	600	-600
Superfície Potenciométrica (m)	800	400
Gradiente hidráulico	0,001	entre 0,003 e 0,008
Condutividade Hidráulica (K) (m/dia)	3	2,6
Coefficiente de Armazenamento (S)	0,17	10 ⁻³
Transmissividade (T) (m ² /dia)	260	1.200
Vazões Explotáveis (Q) (m ³ /h)	< 40	360

Figura 5.5. Potencial explorável e piezometria aparente do Sistema Aquífero Guarani (Retirado e modificado de SÃO PAULO, 2005).

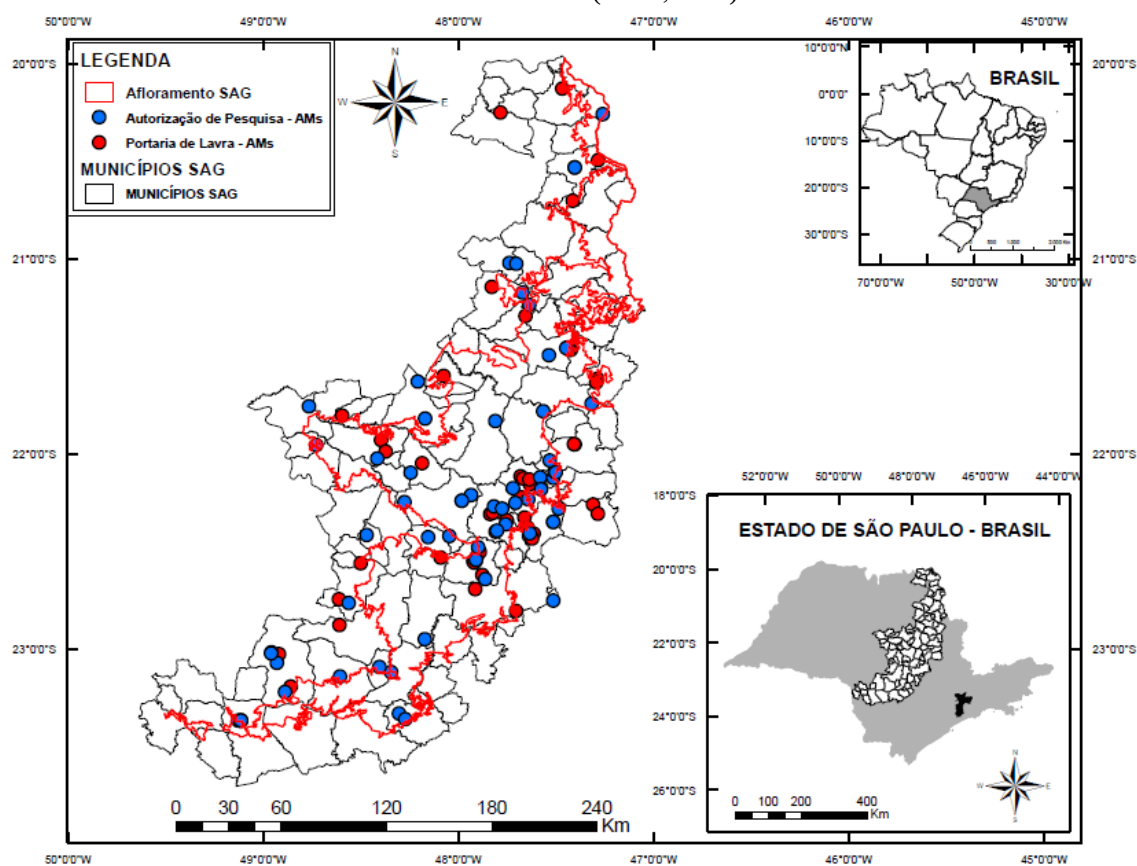


5.5 Concessões Minerárias

Na área de estudo existem atualmente 111 processos minerários requeridos para a substância água mineral (Figura 5.6). Deste total, 54% estão outorgados para Pesquisa e 46% já em fase de Concessão e Portaria de Lavra, significando que já foram aprovados para produção e envase.

É relevante considerar que áreas já requeridas para Pesquisa ou em fase de Lavra junto à Agência Nacional de Mineração para substâncias minerais diversas (podem variar de 50 a 2.000 hectares), por já encontrarem-se requeridas, tornam-se indisponíveis para novos requerimentos e campanhas exploratórias. Entretanto, por tratar-se de uma prospecção em escala regional, com base nos limites dos municípios, a avaliação de Concessões Minerárias deverá ser realizada após a determinação dos alvos na campanha exploratória aqui proposta em um eventual detalhamento das áreas potenciais identificadas.

Figura 5.6. Mapa de distribuição e localização das Concessões de Pesquisa e de Lavra para água mineral nas áreas de Afloramento do SAG no Estado de São Paulo (ANM, 2019).



6 MODELO DE PROSPECÇÃO MINERAL HIDROGEOLÓGICO

Quantificar e avaliar a potencialidade mineral em escala regional requer a análise de um grande volume de dados, além do uso de simplificações para a determinação de áreas “alvos”, que caracterizam-se por serem mais propícias ao desenvolvimento de um projeto de água mineral que contemple alta capacidade hídrica, excelente qualidade e baixo risco antrópico.

Para o desenvolvimento do modelo de prospecção mineral hidrogeológica em escala regional foram selecionados nove parâmetros técnicos prioritários considerando aspectos econômicos, hidrogeológicos, geológicos, hidroclimatológicos e hidroquímicos. A análise combinada destes parâmetros resultou na criação de um ranqueamento de áreas com maior ou menor favorabilidade para a implantação de projetos industriais de águas minerais.

Por meio de uma análise estatística, técnica e científica foi aplicada uma pontuação variável de 1 a 10 para cada parâmetro avaliado. Para a definição do ranqueamento final foi realizada a somatória das pontuações acumuladas para cada parâmetro.

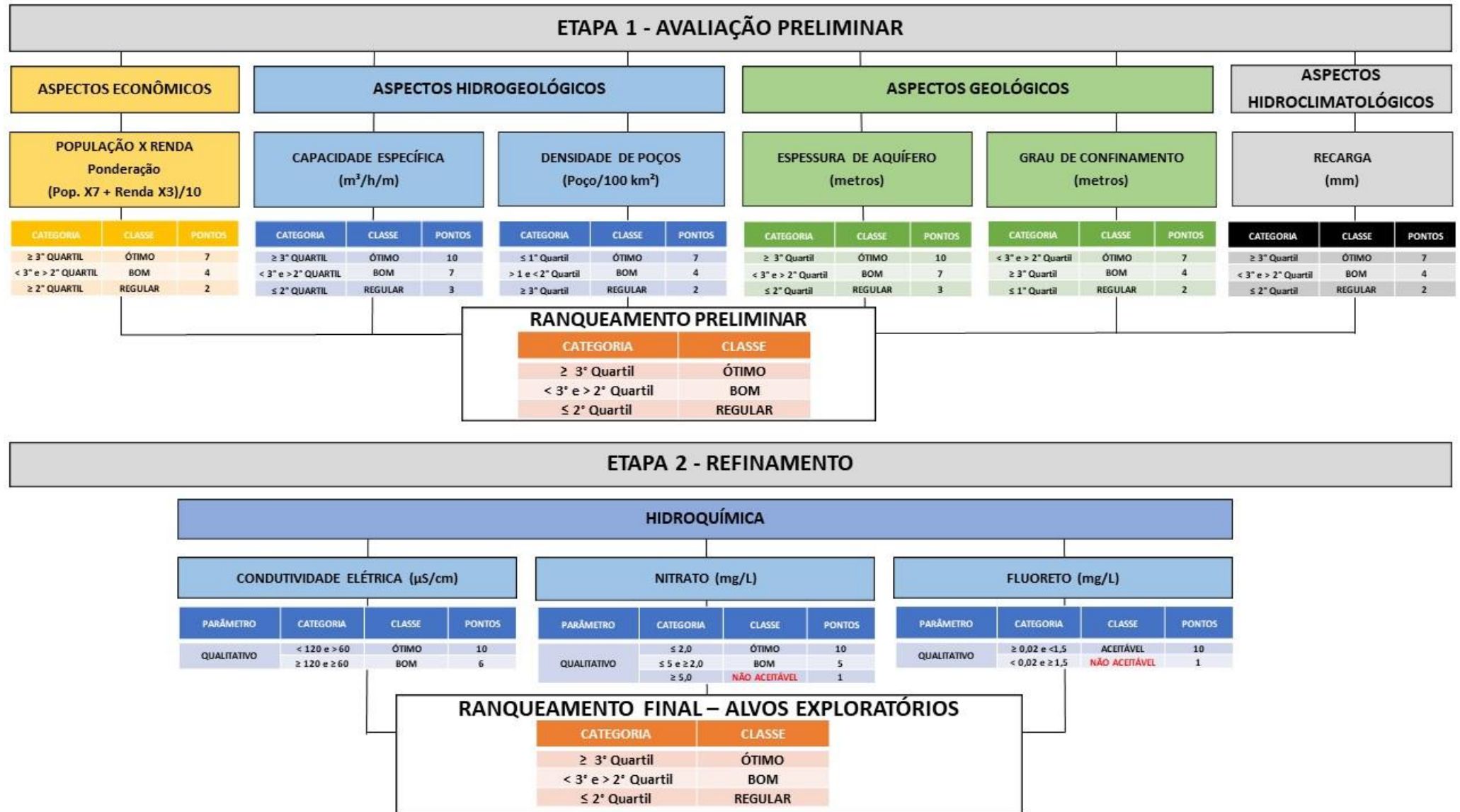
Os principais parâmetros utilizados para o desenvolvimento deste modelo de prospecção foram estruturados por um fluxograma específico (Figura 6.1), onde é possível associar as análises e critérios técnicos/estatísticos empregados neste modelo.

O modelo foi dividido em 2 etapas distintas; a avaliação preliminar e o refinamento. Para a primeira etapa considerou-se elementos técnicos e econômicos, enquanto para a segunda foram considerados o perfil e a qualidade hidroquímica.

Para a integração de todos os parâmetros com os critérios de avaliação e priorização definidos foi utilizado uma plataforma de GIS (ArcGIS) para o fornecimento de uma análise convergente para a correta tomada de decisão, resultando em mapas temáticos e de favorabilidade.

Para fins de avaliação da efetividade e validação deste modelo proposto, optou-se pela sua aplicação nas áreas de afloramento do SAG no Estado de São Paulo compreendida por 93 municípios, detalhado no capítulo 7 deste trabalho.

Figura 6.1. Critérios exploratórios para caracterização e categorização de áreas quanto à favorabilidade para projetos de águas minerais



6.1 Parâmetros Técnicos e Definição de Dados Utilizados

Foram considerados os seguintes parâmetros técnicos em cada uma das duas etapas de desenvolvimento deste projeto:

6.1.1 Etapa 1 - Avaliação Preliminar

A primeira etapa deste modelo considerou os principais aspectos econômicos, hidrogeológicos, geológicos e hidroclimatológicos responsáveis pela caracterização regional preliminar. Como resultado desta etapa foi obtido um ranqueamento preliminar regional e a correlação de alguns parâmetros, permitindo uma análise técnica importante dos aspectos considerados.

6.1.1.1 Aspectos Econômicos

A favorabilidade econômica é um importante aspecto de uma campanha exploratória de águas minerais. Devido ao valor final do produto ser relativamente baixo, a distância do mercado consumidor (frete) é essencial para a viabilização do negócio. Desta forma, dois fatores foram condicionantes: o tamanho do potencial mercado consumidor (população) e a renda per capita do município que o projeto deverá se desenvolver.

Para fins de simplificação e desenvolvimento de um parâmetro exploratório que representasse o potencial econômico de cada município, optou-se pela associação ponderada dos dois fatores supracitados. Desta forma o parâmetro econômico pôde ser definido por:

$$\text{Parâmetro Econômico} = (7X \text{ População}) + (3X \text{ Renda per capita}) / 10$$

Durante a aplicação na área de estudo, optou-se pela utilização da escala logarítmica deste parâmetro para melhor expressão e visualização de seus valores (Figura 7.3).

Para a caracterização econômica dos municípios, população e renda per capita, foram utilizados os bancos de dados oficiais do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – População Estimada 2019) bem como o Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, desenvolvido pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) e Fundação João Pinheiro Brasil.

6.1.1.2 Aspectos Hidrogeológicos e Geológicos

O principal banco de dados técnico para poços tubulares profundos disponíveis no Brasil é o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) organizado e gerenciado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), nele são disponibilizadas informações de mais de 318.000 poços tubulares profundos em todo território nacional (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>).

De forma complementar, o banco de dados da Agência Nacional de Mineração (ANM) (<http://sigmine.dnpm.gov.br/>), apesar de pouco extenso devido ao reduzido número de Processos em Fase de Portaria de Lavra, possui informações consideradas satisfatórias com dados representativos que também serviram de base para este estudo. Cabe ressaltar que todas as informações técnicas (perfis de poços tubulares profundos e análises químicas) incluídas nos processos minerários sob responsabilidade da Agência Nacional de Mineração (ANM), são considerados sigilosos segundo resoluções vigentes, desta forma, o presente estudo utilizou divulgações técnicas disponíveis em bibliografia (QUEIROZ 2015).

Por meio destes bancos de dados foi possível extrair informações referentes aos aspectos hidrogeológicos e geológicos utilizados como parâmetros exploratórios (capacidade específica, densidade de poços, espessura de aquífero e espessura das formações geológicas sobrepostas) detalhados a seguir.

6.1.1.2.1 Capacidade Específica

Por correlacionar a descarga do aquífero (Q) com o rebaixamento (s = Nível Dinâmico – Nível Estático) por um determinado tempo (t), a capacidade específica (q_s) é o parâmetro utilizado para expressar a produtividade de um poço e aquífero. Definido por $q_s = Q/s$. Expresso em $m^3/h/m$.

A disponibilidade de um minério é um parâmetro prioritário em uma campanha exploratória, desta forma, foi considerado um peso relativo superior para este parâmetro dentro deste modelo de prospecção hidrogeológica.

6.1.1.2.2 Densidade de Poços

A densidade de poços correlaciona o número de poços tubulares profundos por uma determinada área. É um importante parâmetro para a correta gestão dos recursos hídricos e pode indicar um potencial risco de superexploração, competição ou conflito em

determinadas localidades para este bem mineral. Expressa neste trabalho em Poços/100 km².

6.1.1.2.3 Espessura de Aquífero

Profundidade ou altura do pacote de reservatório de água, referente à litologia com porosidade e permeabilidade capaz de armazenar e transmitir água.

Assim como a capacidade específica, por caracterizar a disponibilidade de minério, foi considerado um peso relativo superior para este parâmetro neste modelo de prospecção proposto.

6.1.1.2.4 Grau de Confinamento do Aquífero

A proteção das águas subterrâneas ao risco de contaminação antrópica é uma questão importante a ser considerada, pois a qualidade das águas subterrâneas pode ser alterada resultando na descaracterização para sua finalidade mineral.

Aquíferos confinados tendem a estar menos expostos à influência antrópica devido à presença de litologias impermeáveis sobrepostas (aquiclude). Aquíferos livres estão mais propensos a riscos devido a sua maior vulnerabilidade. Desta forma, o presente estudo considerou a presença destes litotipos como fator positivo para a favorabilidade de um projeto voltado às águas minerais.

Espessuras muito elevadas destas camadas impermeáveis sobrepostas podem elevar consideravelmente os custos de implantação e manutenção do projeto (perfuração, instalação e manutenção de poços tubulares profundos) portanto, este foi um fator importante considerado neste modelo.

Para a aplicação do modelo de prospecção hidrogeológica proposto na área de Estudo (Capítulo 7) foi considerada a espessura dos derrames basálticos da Formação Serra Geral sobrepostos ao Sistema Aquífero Guarani.

6.1.1.3 Aspectos Hidroclimatológicos

6.1.1.3.1 Recarga

A quantidade de minério disponível para exploração é uma questão chave para projetos de prospecção mineral. Para uma prospecção hidrogeológica, esta questão é essencial para a gestão sustentável das águas a médio e longo prazo e refere-se a quanto

de água pode-se extrair de forma segura de um aquífero respeitando a característica renovável específica do mesmo.

A recarga de um aquífero consiste na infiltração das águas meteóricas que posteriormente são armazenadas e transmitidas nos espaços vazios das rochas, poros ou fraturas dos aquíferos.

Em geral, para uma região, a equação básica do balanço hídrico que expressa a recarga/infiltração pode ser descrita considerando as seguintes variáveis: precipitação (P), evapotranspiração real (ETR), escoamento superficial (R), infiltração (I) e consequentemente a ΔS variação do armazenamento

$$P - ETR - R - I = \Delta S \quad \text{Equação 01}$$

A precipitação (P) é a chegada da água líquida ou sólida na superfície da terra, constituindo a matéria prima das descargas dos rios e recarga dos aquíferos, a evapotranspiração (ETR) consiste na evaporação, que é o processo pelo qual as moléculas de água adquirem energia suficiente através da radiação solar, passando do estado líquido para o gasoso; a transpiração, que é o processo pelo qual as plantas perdem água para a atmosfera; a Infiltração (I) pode ser considerada como a taxa máxima a qual um solo pode absorver a precipitação numa certa condição; já o escoamento superficial, deflúvio ou *run-off* (R) é o processo pelo qual a precipitação flui por ação da gravidade, das partes mais altas para as mais baixas, nos leitos dos rios e riachos.

Os dados de recarga utilizados como parâmetro prospectivo aplicados neste trabalho foram retirados de SANTAROSA et al., 2020 (*em publicação*) e referem-se ao valor global de recarga potencial média para o período de 2011 a 2016 (mm/ano).

6.1.2 Etapa 2 – Refinamento

A etapa de refinamento considerou três parâmetros qualitativos, todos ligados a hidroquímica (condutividade elétrica, nitrato e fluoreto).

A utilização da condutividade elétrica como parâmetro exploratório, objetivou a definição de um perfil hidroquímico específico de água (mineralização), o nitrato considerado como um elemento de qualidade, podendo indicar potencial risco antrópico e para fins de aproveitamento deste recurso como mineral, em consonância com o Código de Águas Minerais, considerou a presença do elemento digno de nota, o íon fluoreto.

As amostras de águas subterrâneas (poços tubulares profundos) analisadas e disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) compuseram a avaliação do perfil hidroquímico e de qualidade.

Cabe ressaltar que para fins de aplicação na área de Estudo (Capítulo 7), apenas as análises químicas dos poços tubulares que apresentaram dados completos, ou seja, que contemplaram os três parâmetros anteriormente citados, foram consideradas satisfatórias em relação ao perfil hidroquímico e à qualidade.

6.1.2.1 Hidroquímica

6.1.2.1.1 Condutividade Elétrica

É a medida da facilidade de uma água em conduzir corrente elétrica e está diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob forma de íons, isto é, sua mineralização.

Sendo de senso comum que águas minerais de baixa mineralização são as mais populares entre os consumidores brasileiros devido a seu sabor/gosto específico. Desta forma, este parâmetro foi abordado para fins de favorabilidade durante a exploração hidrogeológica, considerando-o de forma qualitativa “ótima” para uma faixa específica deste parâmetro (entre 60 e 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

6.1.2.1.2 Nitrato

O íon nitrato, NO_3^- é comumente associado como parâmetro indicativo para a classificação de qualidade das águas subterrâneas, pois normalmente, origina-se de fontes associadas a atividades antrópicas como: aplicação de fertilizantes com nitrogênio, bem como inorgânicos e de esterco animal, em plantações; cultivo do solo; esgoto humano depositado em sistemas sépticos e deposição atmosférica. Sua presença em altas concentrações é indicativa de vulnerabilidade do aquífero associado ao contato com águas superficiais. Portanto, este íon é um importante parâmetro para uma pesquisa exploratória.

O nitrato ocorre naturalmente apenas em pequenas concentrações nas águas subterrâneas, Mueller & Helsel (1996) definiram um background máximo de 9 mg/L de nitrato em águas de regiões de florestas nos Estados Unidos, por outro lado Cagnon & Hirata (2004), estudando o impacto do nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do município de Urânia (SP), definiram como background máximo concentrações de até 3 mg/L. Cabe ressaltar que a Portaria de Consolidação nº 5

de 28/09/2017 (Anexo XX) estabelece o limite e padrão de qualidade da água para fins de abastecimento e consumo humano especificando como 10 mg/L o limite aceitável para este elemento.

Desta forma, o presente modelo exploratório optou por considerar de forma qualitativa águas cuja composição química contenham valores de nitrato abaixo de 2 mg/L como “ótimo” e superiores a 5,0 mg/L como “não aceitáveis” restringindo e/ou excluindo áreas com estas características.

6.1.2.1.3 Fluoreto

O íon fluoreto, frequentemente encontrado nas águas subterrâneas, são benéficos à saúde em pequenas concentrações. Por esse motivo, o Código de Águas Minerais considera a presença deste íon importante em águas subterrâneas, como um elemento digno de nota, classificando-as como fluoretadas quando apresentarem no mínimo 0,02 mg/L deste íon.

Considerando que no Estado de São Paulo aproximadamente 86% de todas as águas minerais são classificadas como fluoretadas e/ou fluoretadas e combinações (QUEIROZ, 2015), a presença deste íon dentro dos limites preconizados pelo Código de Águas Minerais é uma referência prática para a prospecção hidrogeológica essencialmente no que tange as legislações pertinentes para a classificação deste recurso como um bem mineral.

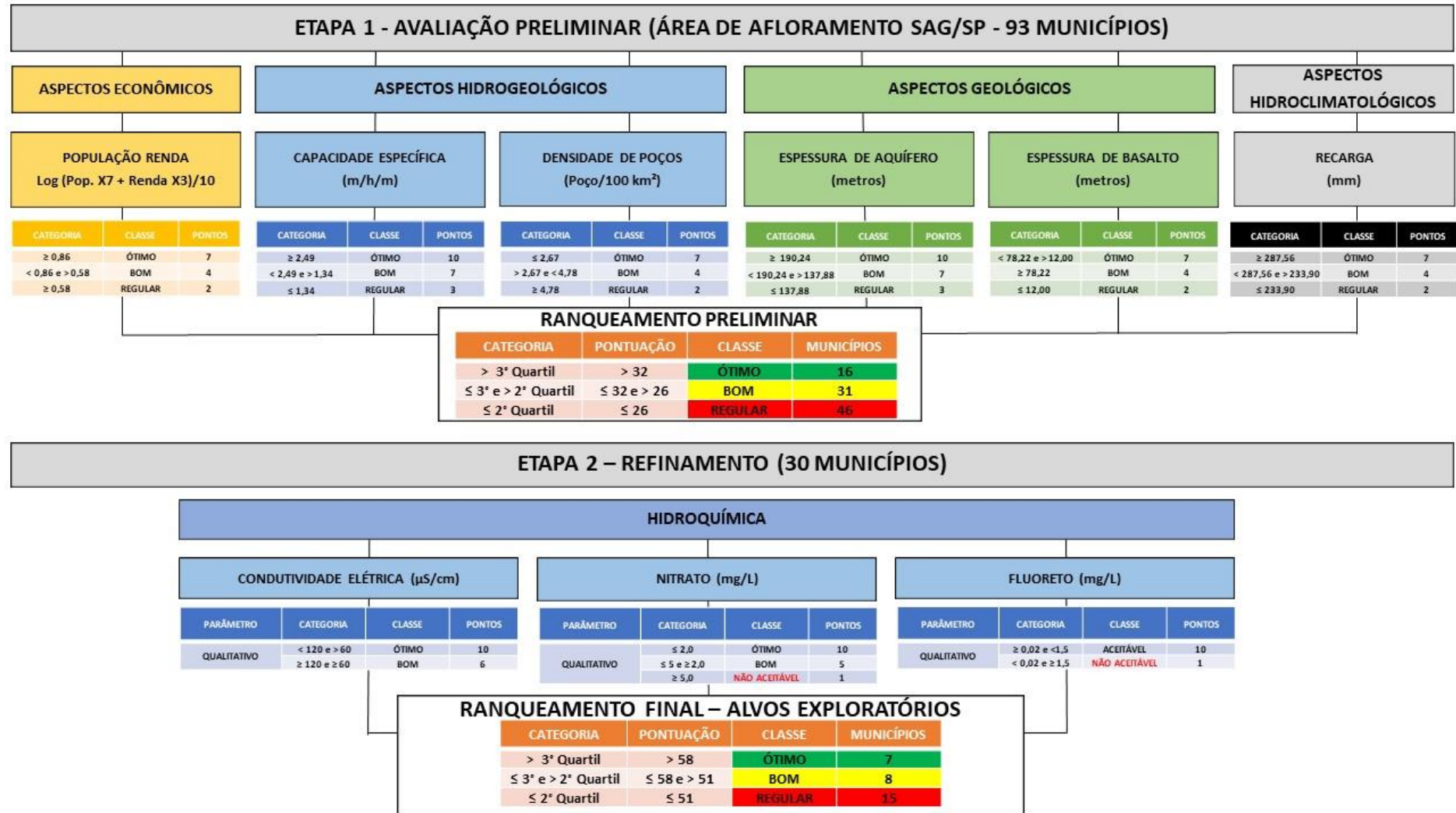
Qualitativamente, considerou-se como “não aceitáveis” restringindo e/ou excluindo águas que não apresentaram em sua composição química valores do íon fluoreto entre 0,02 a 1,50 mg/L, este último valor considerado com um limitante de riscos à saúde humana em consonância com a Portaria de Consolidação nº 5 de 28/09/2017 (Anexo XX).

7 PROSPECÇÃO HIDROGEOLÓGICA NAS ÁREAS DE AFLORAMENTO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NO ESTADO DE SÃO PAULO

A aplicabilidade do modelo proposto é uma etapa necessária para a validação deste projeto, para tanto, foram utilizadas as áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo, compreendendo 93 municípios, com área total aproximada equivalente a 6,2% da área total do Estado.

Os principais resultados da aplicação deste modelo de prospecção estão estruturados no fluxograma (Figura 7.1), onde é possível associar as análises e critérios técnicos/estatísticos bem como os valores unitários empregados.

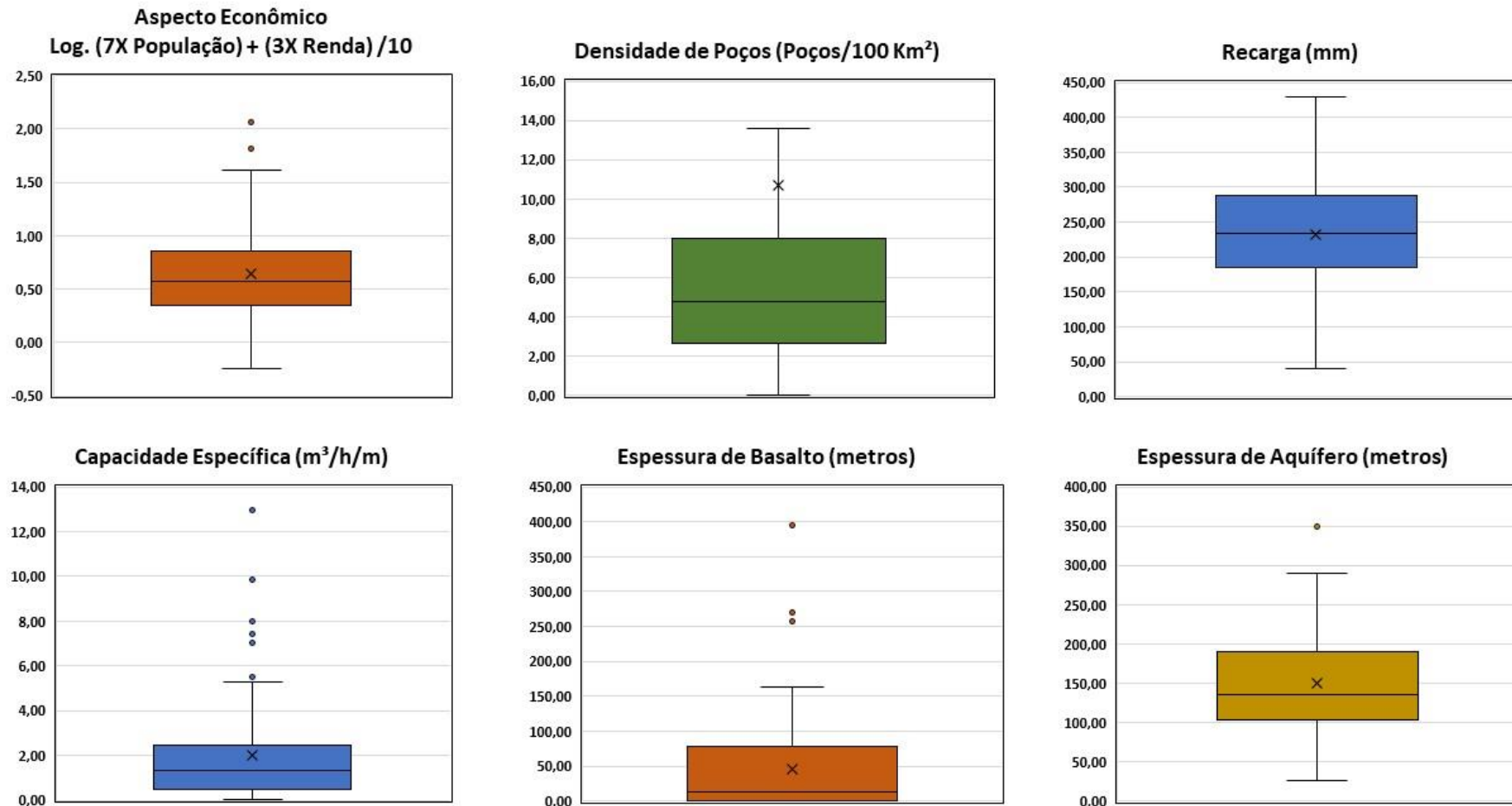
Figura 7.1. Aplicação de critérios exploratórios para categorização de áreas quanto à favorabilidade para projetos de águas minerais nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.



7.1 Avaliação Preliminar

Os dados e as análises estatísticas dos seis parâmetros utilizados na avaliação preliminar referentes aos aspectos econômicos, densidade de poços, recarga, capacidade específica, espessura de basalto e aquífero estão dispostos na Figura 7.2 e serão discutidos a seguir individualmente para cada parâmetro.

Figura 7.2. Avaliação estatística (diagramas *box plot*) dos parâmetros utilizados na avaliação preliminar; Aspectos Econômicos, Densidade de Poços, Recarga, Capacidade Específica, Espessura de Basalto e Aquífero.



7.1.1 Aspectos Econômicos

Os aspectos econômicos consideraram a população dos 93 municípios estimada em 2019 (em escala logarítmica/por 10.000 habitantes) e sua respectiva renda per capita mensal (salários mínimos/habitantes); seguindo a seguinte ponderação (sem unidade específica):

$$\text{Parâmetro Econômico} = \text{Log. (7X População)} + (3X \text{ Renda per capita}) / 10$$

Equação 02

O município de Ribeirão Preto foi o que apresentou maior potencial econômico seguido por Piracicaba, São Carlos, Araraquara e Franca, totalizando respectivamente os seguintes valores 2,07; 1,81; 1,62; 1,60 e 1,59.

Já os municípios de Águas de São Pedro, Santa Cruz da Esperança Cássia dos Coqueiros, Torre de Pedra e Trabiçu obtiveram os piores valores, respectivamente 0,61; -0,06; -0,09; -0,11 e -0,24.

Foram considerados “ótimos” 25 municípios que obtiveram valores iguais e superiores a 0,86 (3º quartil), recebendo uma pontuação de 7; “bons” representados por 19 municípios (cujos valores estavam entre 0,86 e 0,58) com pontuação de 4, e 49 municípios considerados “regulares” por apresentarem valores iguais e inferiores a 0,58, recebendo uma pontuação de 2.

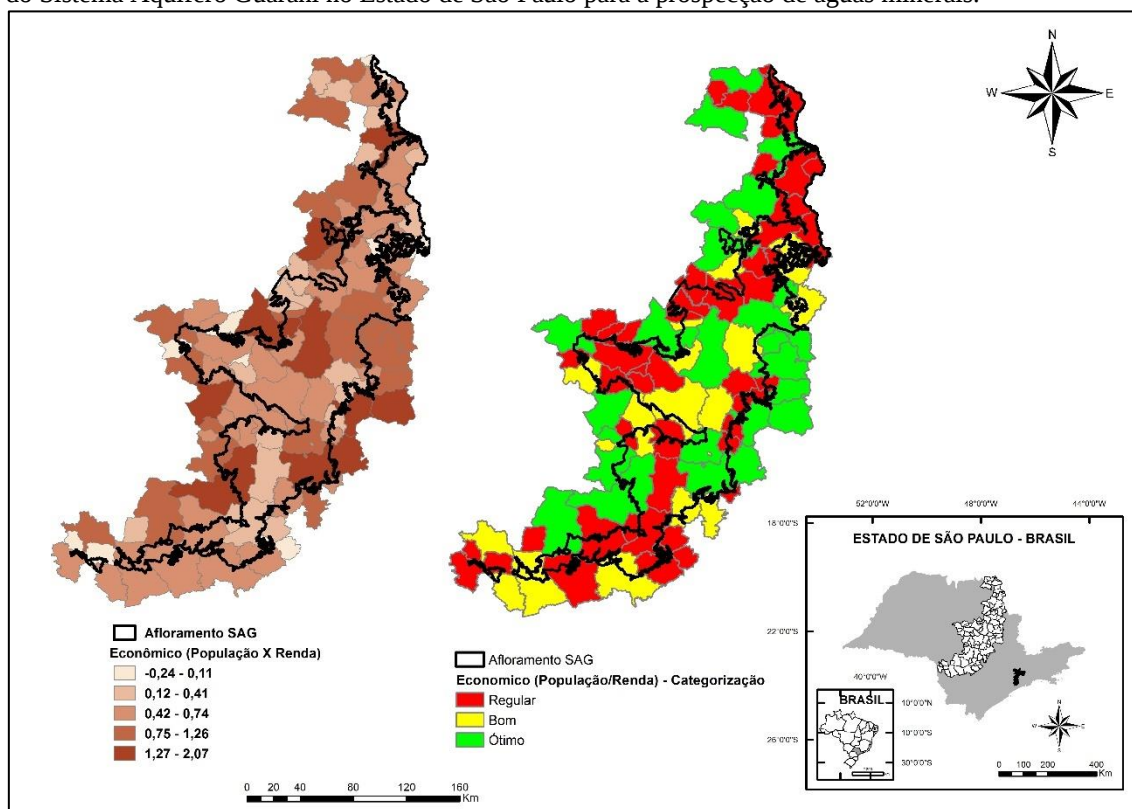
A tabela 7.1 mostra os 10 municípios de maior favorabilidade quanto ao seu potencial econômico para projetos de águas minerais.

A figura 7.2. apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto aos aspectos econômicos para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Tabela 7.1. Favorabilidade econômica dos 10 principais municípios nas áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.

MUNICÍPIOS	POPULAÇÃO (10.000/hab)	POPULAÇÃO (Log/10.000/hab.)	RENDA PER CAPITA (salário mínimos/mês)	PARÂMETRO ECONÔMICO (Log pop. X7 + Renda X3)/10
Ribeirão Preto	70,33	1,85	2,58	2,07
Piracicaba	40,41	1,61	2,30	1,81
São Carlos	25,20	1,40	2,12	1,62
Araraquara	23,61	1,37	2,12	1,60
Franca	35,32	1,55	1,69	1,59
Rio Claro	20,64	1,31	2,06	1,54
Botucatu	14,65	1,17	2,14	1,46
Jaú	15,03	1,18	1,87	1,38
Araras	13,42	1,13	1,81	1,33
Pirassununga	7,64	0,88	2,13	1,26

Figura 7.3. Mapa de categorização e classificação da favorabilidade econômica nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



7.1.2 Aspectos Hidrogeológicos e Geológicos

Foram avaliados todos os dados disponíveis no banco de dados do SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – CPRM), para os 93 municípios foco deste projeto, totalizando 3.035 poços investigados (Figura 7.2).

Para fins de formalização foram considerados apenas os poços tubulares que apresentaram dados completos e considerados satisfatórios no que se refere à descrição geológica, perfil construtivo/instalação, além de ensaios de bombeamento com definição de parâmetros hidrodinâmicos. Sendo assim, apenas cerca de 9% de todos os dados de poços tubulares profundos disponíveis foram considerados satisfatórios para o seguimento deste trabalho.

Cabe ressaltar que, por tratar-se de um modelo de prospecção em escala regional, com base nos municípios, para a maior representatividade, quando disponível mais de um poço em sua área, foi utilizada a média para cada valor de parâmetro analisado para a sua caracterização.

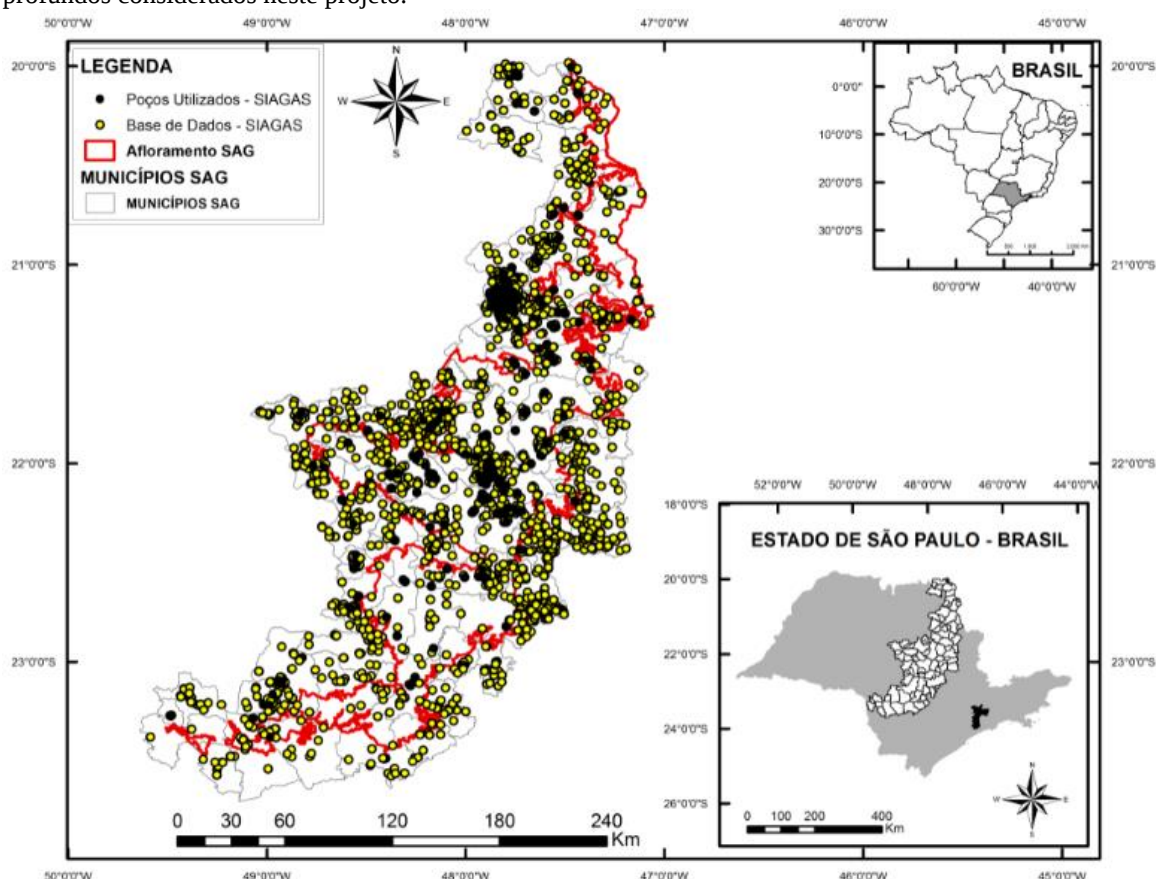
Devido a heterogeneidade da base de dados disponível, cerca de 39% dos municípios da área de estudo não dispuseram de dados completos de poços tubulares profundos. Desta forma, optou-se pela a interpolação dos dados disponíveis para toda área (inverso

da distância ao quadrado) em ArcGIS para posterior definição de um valor médio unitário para cada parâmetro por município.

Tabela 7.2. Síntese dos dados SIAGAS avaliados e utilizados neste estudo.

BANCO DE DADOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS SIAGAS (CPRM)		
Total de Poços Cadastrados base SIAGAS	3.035	100%
Poços com Dados Satisfatórios (Considerados nesta Pesquisa)	269	9%
Total de Municípios na Área de Estudo	93	100%
Municípios com Base de Dados Satisfatório	56	61%
Municípios com Base de Dados Incompletos	36	39%
Cidades sem Poços Cadastrados	1	1%

Figura 7.4. Mapa de localização e distribuição dos poços SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – CPRM), em preto toda base de dados disponível e em amarelo os 269 poços tubulares profundos considerados neste projeto.



De forma complementar, foi utilizado o banco de dados da Agência Nacional de Mineração, ANM (QUEIROZ, 2015) que apesar de pouco extenso, com apenas 25 captações, sendo 12 poços e 13 surgências, apresentam dados bem representativos e completos. Portanto, optou-se pela inclusão destes dados na caracterização da área de trabalho.

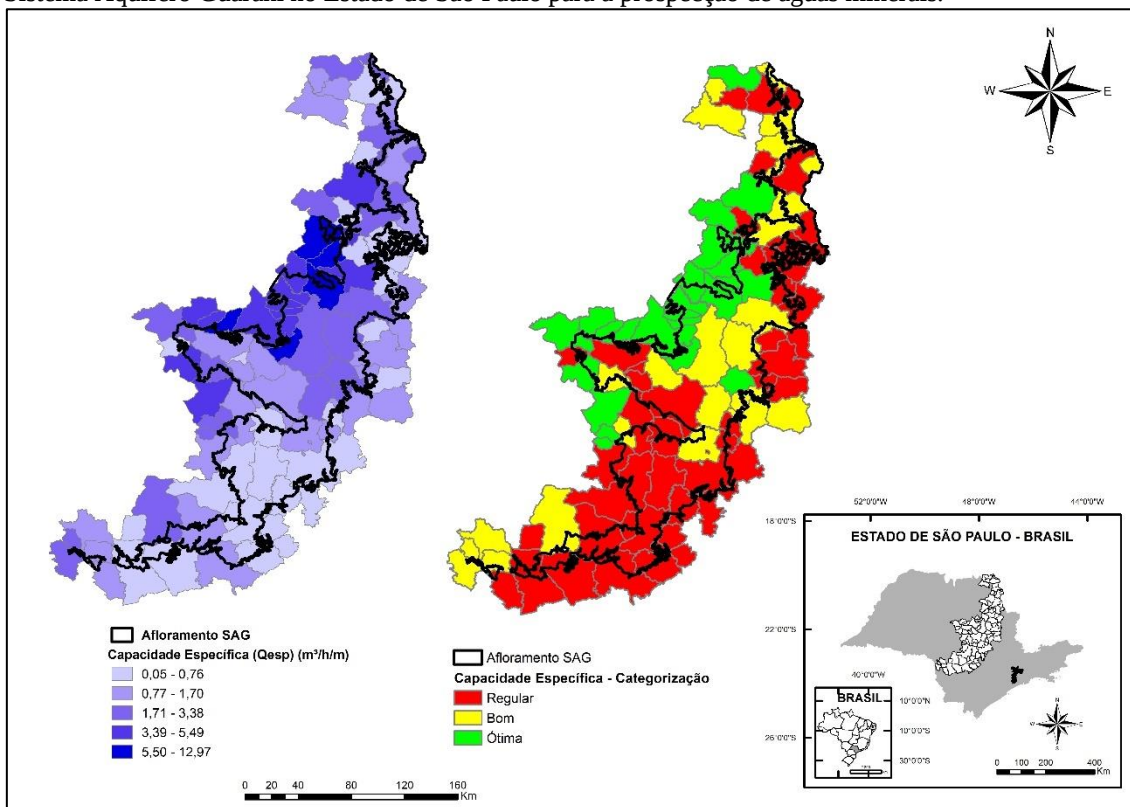
7.1.2.1 Capacidade Específica

Os valores de capacidade específica na área de estudo variaram de 0,05 a 12,95 m³/h/m (municípios de Anhembi e Cravinhos respectivamente) e média de 2,03 m³/h/m. Por tratar-se de um parâmetro essencial em uma campanha de prospecção hidrogeológica, indicando disponibilidade de minério, este parâmetro foi tratado como prioritário e recebeu um peso superior para o ranqueamento preliminar.

Foram considerados “ótimos” 23 municípios que obtiveram valores iguais ou superiores a 2,49 m³/h/m (3º quartil), recebendo 10 pontos; 23 municípios foram considerados “bons” com pontuação de 7, e 47 municípios considerados “regulares” por apresentarem valores iguais e abaixo de 1,34, recebendo uma pontuação de 3. A figura 7.5. apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto à capacidade específica para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Observou-se que os maiores valores de capacidade específica se encontram no limite centro-oeste e noroeste das áreas de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, condizente com o contexto geológico local, caracterizado por maiores valores de espessura de aquífero.

Figura 7.5. Categorização e potencialidade da Capacidade Específica (Qesp) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



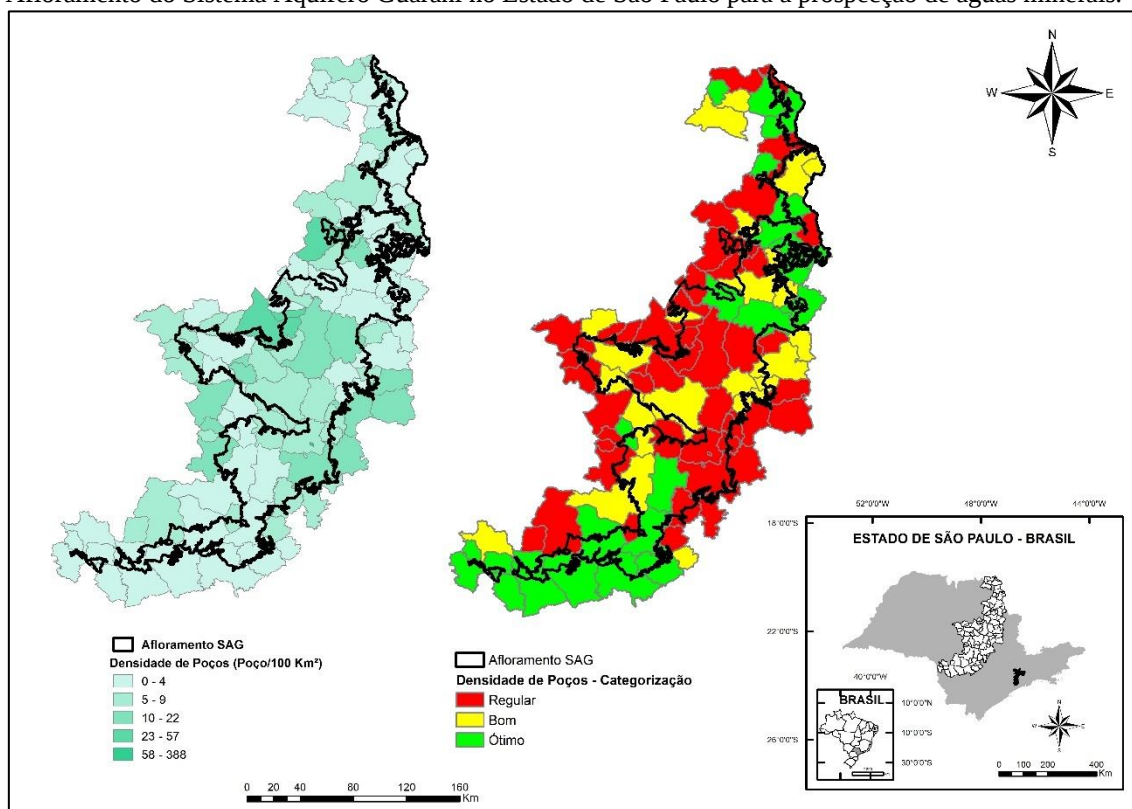
7.1.2.2 Densidade de Poços

O grande número de poços tubulares profundos perfurados na área refletem a importância da água subterrânea para os municípios com grande densidade populacional, como Ribeirão Preto, Araraquara, São Carlos e Rio Claro, que juntos representam 32% da população total da área de estudo e estão entre os 6 municípios de maior densidade de poços tubulares profundos, apresentando respectivamente 56,84; 27,80; 21,99 e 17,66 poços/100 km².

Os valores de densidade de poços tubulares profundos na área de estudo variaram de 0,0 a 387,60 poços/100 km² (municípios de Torre de Pedra e Águas de São Pedro respectivamente) e a média de 10,72 poços/100 km². Águas de São Pedro, uma Estância Hidromineral, possui 14 poços cadastrados no SIAGAS em uma área de apenas 3,612 km², sendo o menor município paulista e o segundo menor brasileiro em extensão territorial.

Foram considerados “ótimos” 23 municípios que obtiveram valores iguais ou inferiores a 2,67 poços/100 km² (1º quartil), recebendo 7 pontos; 23 municípios foram considerados “bons” com pontuação de 4, e 47 municípios considerados “regulares” por apresentarem valores iguais e superiores a 4,78 poços/100 km², recebendo uma pontuação de 2. A figura 7.6. apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto a densidade de poços para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Figura 7.6. Categorização e potencialidade da Densidade de Poços (poço/100 km²) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



7.1.2.3 Espessura de Aquífero

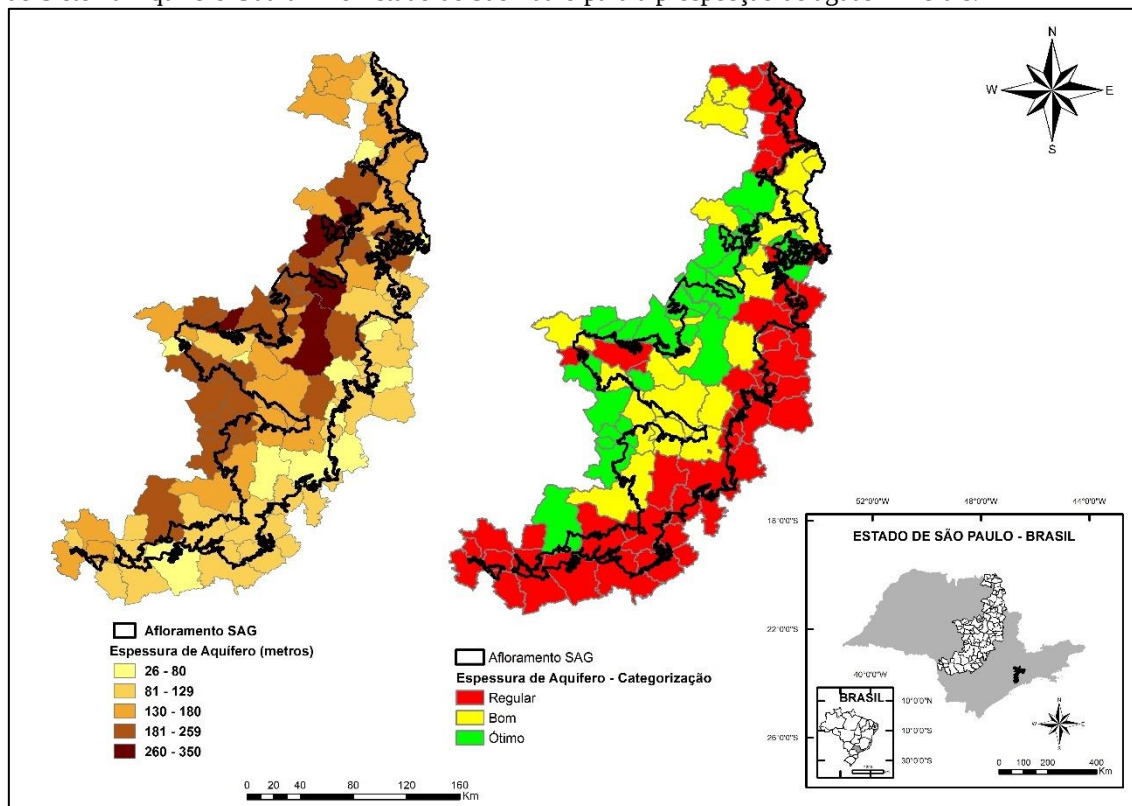
A espessura de aquífero na área de estudo, referentes às formações Botucatu e Piramboia, variou de 26 a 350 metros (municípios de Paranapanema e Luis Antônio respectivamente) tendo como a média de 150 metros. Por tratar-se de um parâmetro, assim como a capacidade específica, indicativo de disponibilidade de minério, este foi tratado como prioritário e recebeu um peso superior para o ranqueamento preliminar.

Cabe ressaltar que, de todos os poços avaliados, apenas um, situado na cidade de São Manuel (Poço 3500009798 - SIAGAS) foi considerado de penetração total, atravessando 259 metros do SAG atingindo em sua base a 382 metros de profundidade o Grupo Passa Dois. Todos os outros poços descritos como sendo de penetração total do SAG não foram confirmados em seus respectivos perfis técnicos.

Foram considerados “ótimos” 23 municípios que obtiveram valores iguais ou superiores a 190,24 metros (3º quartil), recebendo 10 pontos; 23 municípios foram considerados “bons”, com pontuação de 7, e 47 municípios considerados “regulares” por apresentarem valores iguais e abaixo de 137,88, recebendo uma pontuação de 3. A figura 7.7 apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto à espessura de aquífero para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Observou-se que os maiores valores de espessura de aquífero, assim como a capacidade específica encontram-se no limite oeste das áreas de afloramento, condizente com o modelo geológico/hidrogeológico regional local.

Figura 7.7. Categorização e potencialidade da Espessura de Aquífero (metros) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



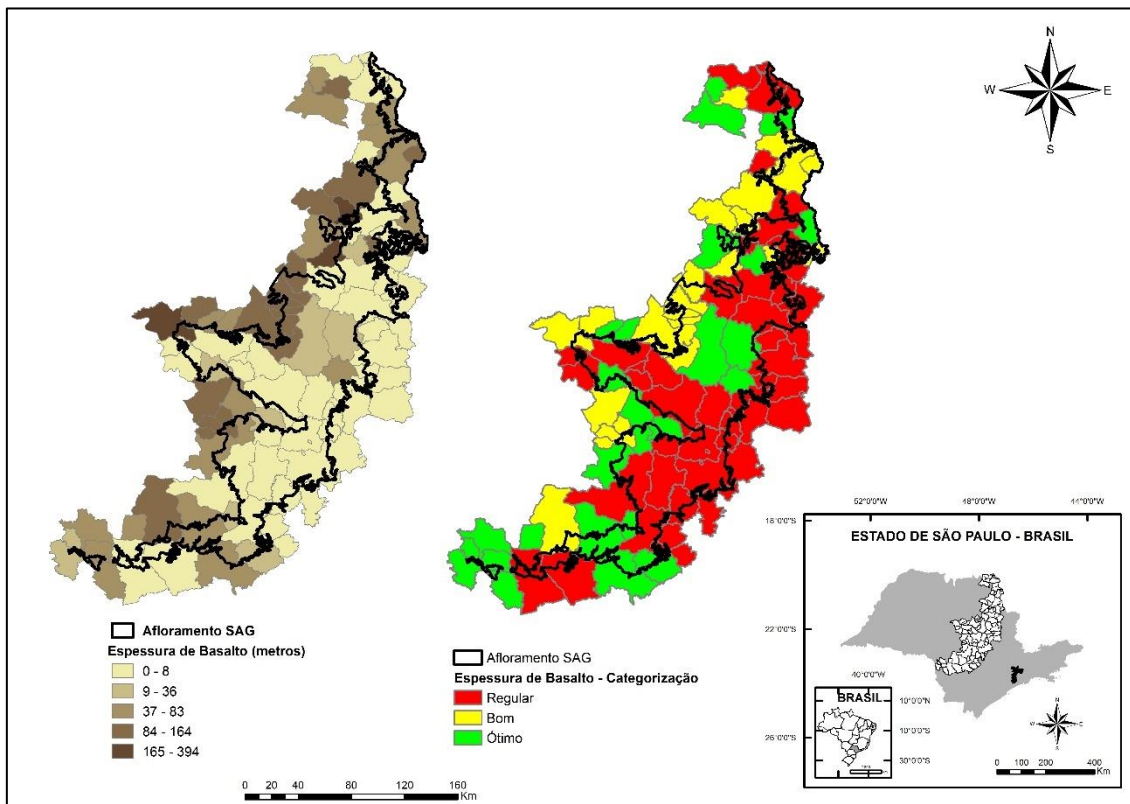
7.1.2.4 Espessura de Basalto

O grau de confinamento ou espessura de basalto (Formação Serra Geral) sobreposta ao aquífero na área de estudo, pode atingir até 395 metros (municípios de Cravinhos) tendo como a média de 45,58 metros.

Foram considerados “ótimos” 25 municípios que obtiveram valores entre 12 e 78,22 metros de espessura de basalto (entre 2º e 3º quartis), recebendo 7 pontos; 23 municípios foram considerados “bons”, com pontuação de 4, e 45 municípios considerados “regulares” por apresentarem espessuras iguais e inferiores a 12 metros, recebendo uma pontuação de 3. A figura 7.8 apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto a espessura de basalto e grau de confinamento para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Os menores valores de espessura de basalto podendo chegar a SAG aflorante, encontram-se no limite leste e central das áreas de afloramento, condizendo com o modelo geológico/hidrogeológico regional local.

Figura 7.8. Categorização e potencialidade da espessura de basalto e grau de confinamento (metros) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.

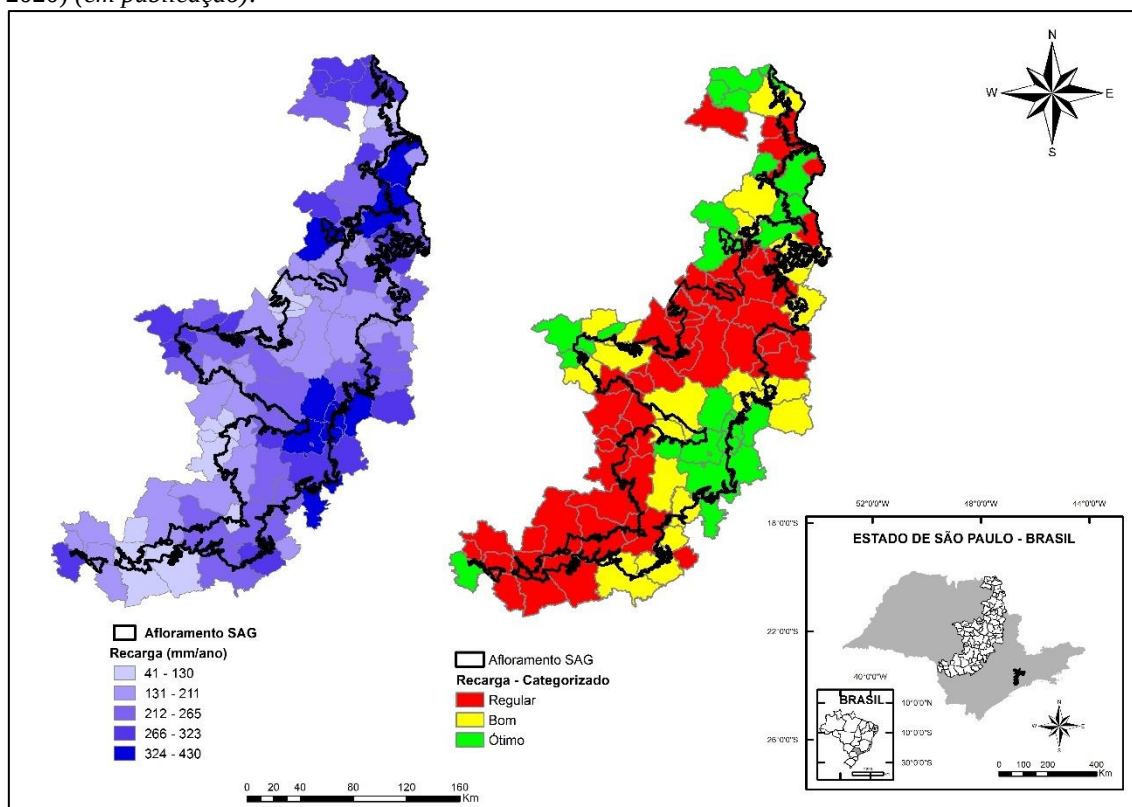


7.1.2.5 Recarga

Os valores de recarga na área de estudo variaram de 40,76 a 429,76 mm (municípios de Barra Bonita e Ipeúna respectivamente) e média de 231,34 mm.

Foram considerados “ótimos” 23 municípios que obtiveram valores iguais ou superiores a 287,56 mm/ano (3º quartil), recebendo 7 pontos; 23 municípios foram considerados “bons”, com pontuação de 4, e 47 municípios considerados “regulares” por apresentarem valores iguais e abaixo de 233,90 mm/ano, recebendo uma pontuação de 2. A figura 7.9. apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto à recarga para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Figura 7.9. Categorização e potencialidade da recarga (mm/ano) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais. (SANTAROSA et al., 2020) (em publicação).



7.1.3 Categorização Preliminar

O município de Ribeirão Preto foi o que apresentou maior potencial preliminar para a viabilização de projeto de água minerais seguido pelos municípios de Nova Europa, Aramina, Batatais, Ibitinga e Jardinópolis, totalizando respectivamente as seguintes pontuações 43, 38 e 37 para os três últimos.

Já os municípios de Trabiçu, Quadra e Porangaba obtiveram os piores valores, respectivamente 14 e 16 para os dois últimos.

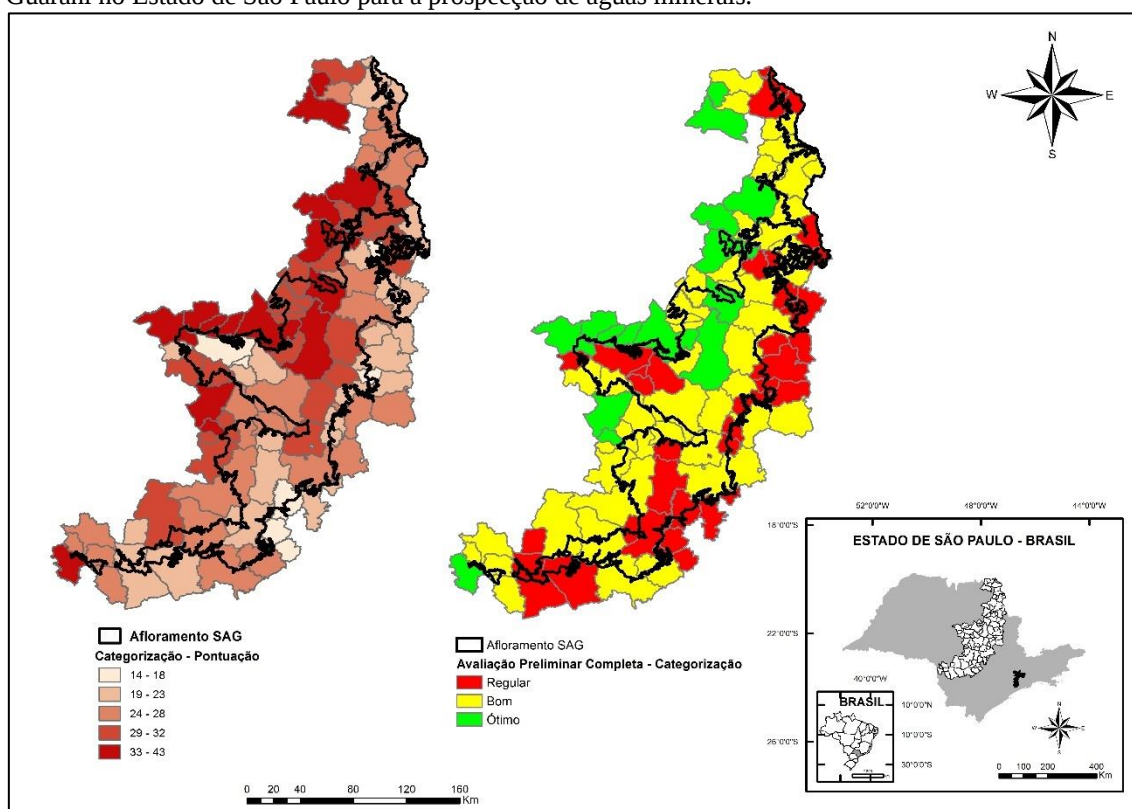
Foram considerados “ótimos” 16 municípios que obtiveram valores iguais ou superiores a 32 pontos (3º quartil estatístico); 31 municípios foram considerados “bons” com pontuações entre 26 e 32, e por fim, 46 municípios considerados “regulares” por apresentarem pontuações iguais e inferiores a 26.

A figura 7.10 apresenta a categorização e classificação dos 93 municípios avaliados quanto à favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Os 16 municípios que apresentaram maior favorabilidade e potencial para a viabilização de projetos de água minerais encontram-se no limite centro-oeste e noroeste das áreas de afloramento, condizendo com o modelo geológico/hidrogeológico regional,

onde ocorrem espessuras maior de aquífero e maiores capacidades específicas além de maior grau de confinamento. Por outro lado, observou-se que os municípios de menor favorabilidade localizam-se em todo limite leste das áreas de afloramento (de norte a sul), indicando também a conformidade com o modelo geológico/hidrogeológico por apresentarem menores espessura de aquífero, ausência ou baixa espessura de basalto e finalmente, menor capacidade específica.

Figura 7.10. Categorização e potencialidade preliminar nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



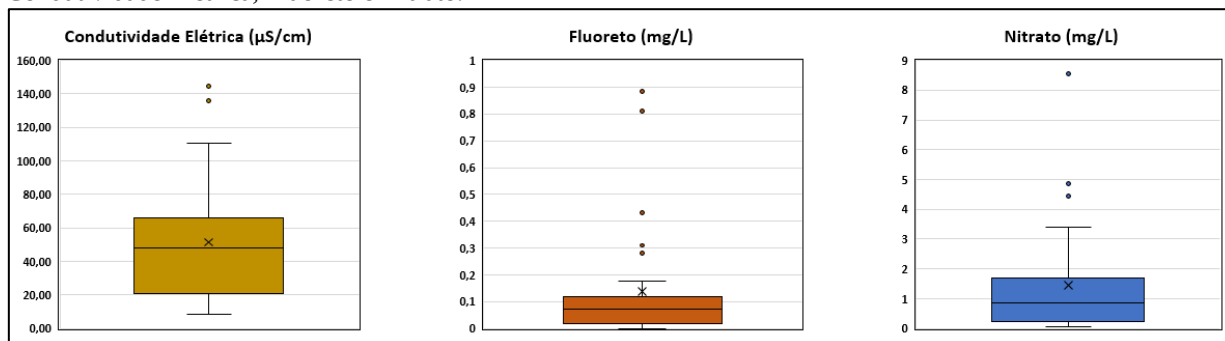
7.2 Refinamento

A avaliação do perfil hidroquímico e de qualidade foi realizada a partir de 198 amostras de águas subterrâneas (poços tubulares profundos) contemplando apenas 30 municípios na área de estudo, representando apenas cerca de 33% do total, analisadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2011).

Por tratar-se de um modelo de prospecção em escala regional com base nos municípios, para a maior representatividade, quando disponível mais de uma análise química em sua área, foi utilizada a média para cada valor de parâmetro analisado para a sua caracterização.

Os dados e as análises estatísticas dos três parâmetros utilizados no refinamento (Etapa 2) referentes a condutividade elétrica, fluoreto e nitrato estão dispostos na Figura 7.11 e serão discutidos a seguir individualmente.

Figura 7.11. Avaliação estatística (diagramas *box plot*) dos parâmetros utilizados no refinamento; Condutividade Elétrica, Fluoreto e Nitrato.



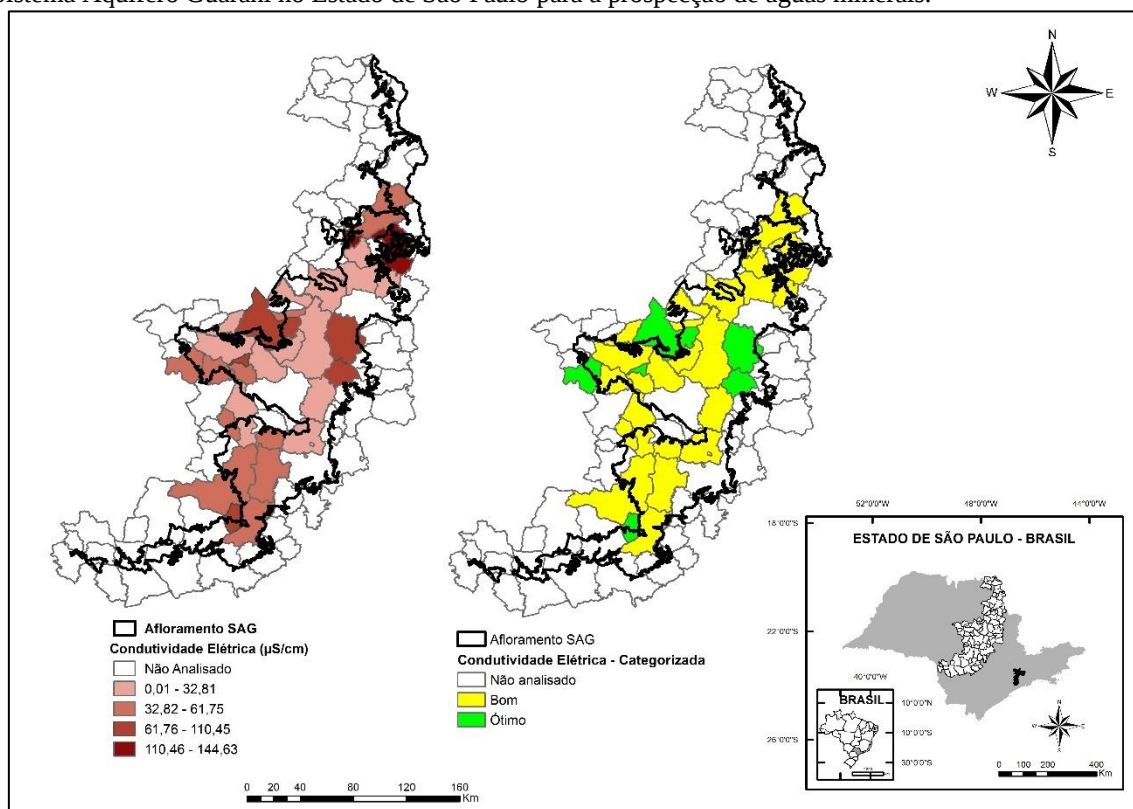
7.2.1 Condutividade Elétrica

Os valores de condutividade elétrica, nos 30 municípios da área de estudo variaram de 8,60 a 144,33 $\mu\text{S/cm}$ (municípios de Rincão e Serrana respectivamente) e média de 51,44 $\mu\text{S/cm}$.

Foram considerados “ótimos” 6 municípios que apresentaram valores de condutividade elétrica entre 60 e 120 $\mu\text{S/cm}$, recebendo 10 pontos, enquanto 24 municípios foram considerados “bons”, apresentando valores superiores a 120 ou inferiores a 60 $\mu\text{S/cm}$, recebendo 6 pontos. Por tratar-se de um parâmetro qualitativo, o perfil hidroquímico, de baixa mineralização (60 a 120 $\mu\text{S/cm}$), foi também determinante para a definição da área na etapa inicial, (Áreas de Afloramento do SAG), onde já esperado valores inferiores a 150 $\mu\text{S/cm}$, desta forma nenhuma análise química apresentou valores considerados anômalos superiores ao citado anteriormente para terem a avaliação de “regulares”.

A figura 7.12. apresenta a categorização e classificação dos 30 municípios avaliados quanto a condutividade elétrica para a favorabilidade de prospecção para águas minerais.

Figura 7.12. Categorização e potencialidade da condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.

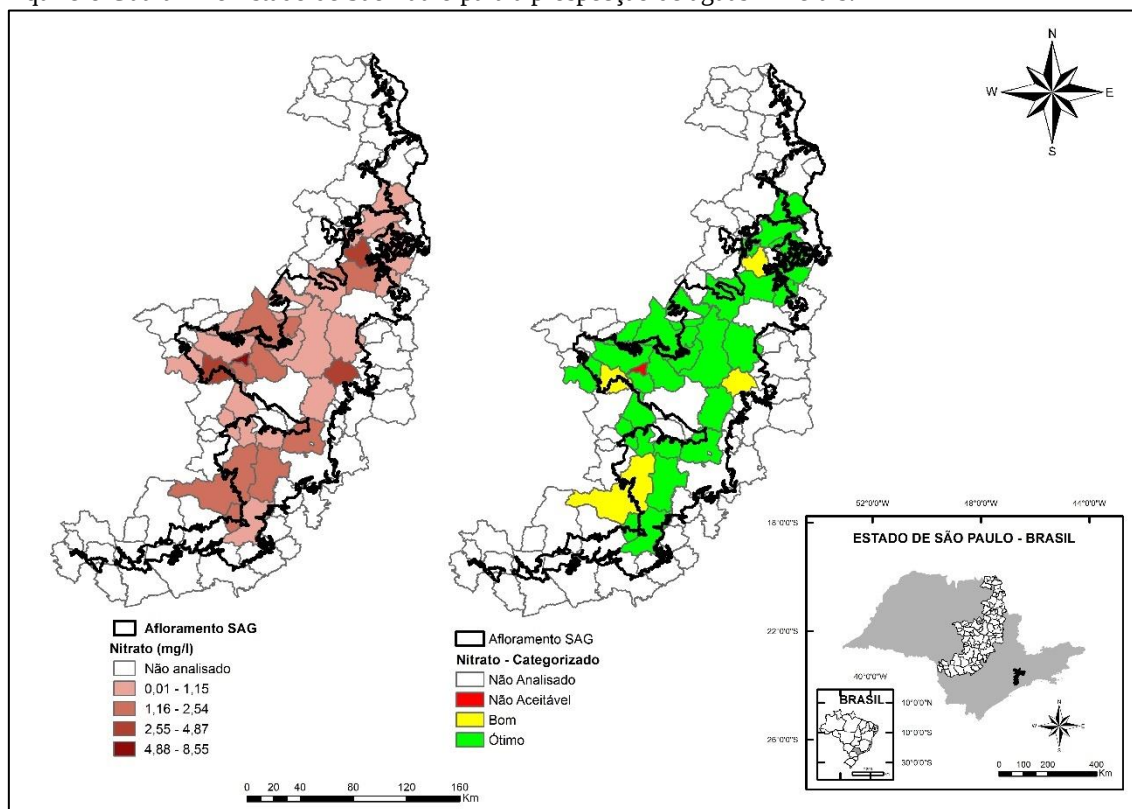


7.2.2 Nitrato

Os valores de nitrato nos 30 municípios da área de estudo, variaram de 0,05 a 8,55 mg/L (municípios de Serrana e Trabiju respectivamente) com média de 1,43 mg/L.

25 municípios apresentaram valores inferiores a 2,0 mg/L e foram considerados “ótimos”, recebendo uma pontuação no valor de 10, quatro municípios foram considerados “bons” apresentando valores entre 2,0 mg/L e 5,0 mg/L recebendo assim 5 pontos e apenas um município (Trabiju) apresentou valor superior a 5,0 mg/L sendo considerado não aceitável para fins de aproveitamento mineral.

Figura 7.13. Categorização e potencialidade de nitrato (mg/L) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.

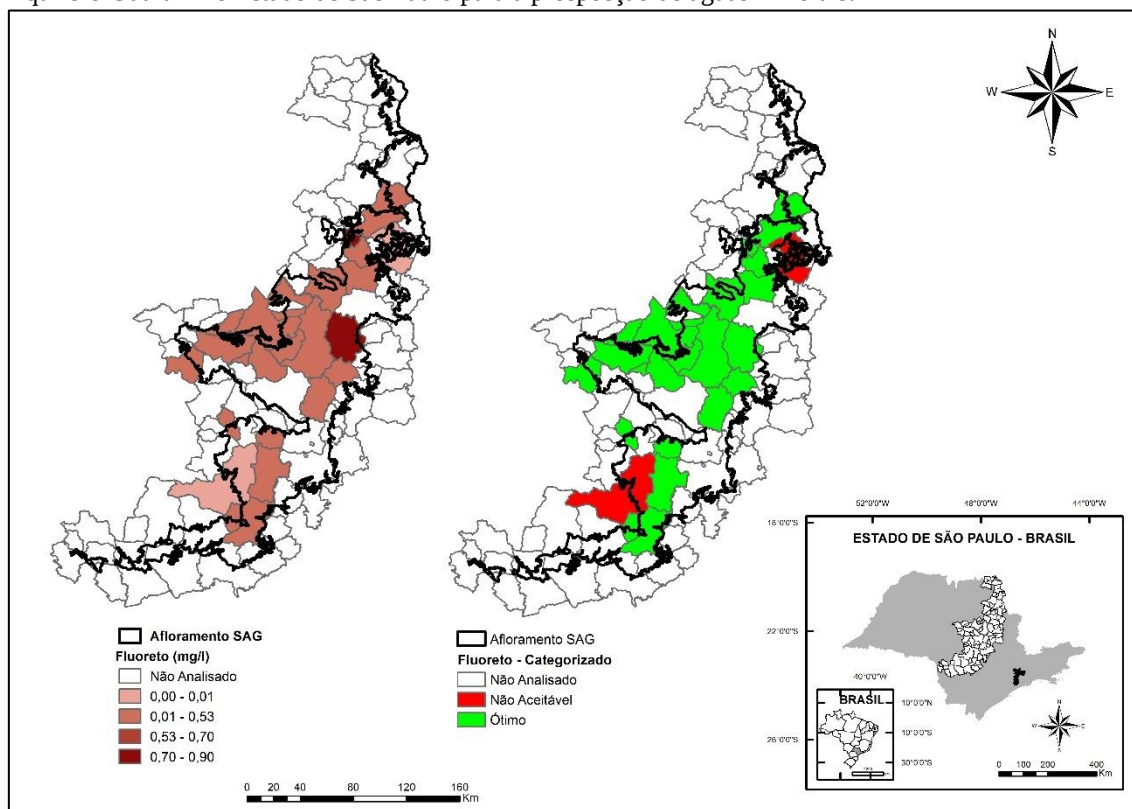


7.2.3 Fluoreto

A presença do íon fluoreto superior a 0,02 mg/L é requisito obrigatório nesta campanha exploratória, visto que este elemento caracteriza o aproveitamento da água subterrânea como um recurso mineral. Foi considerado um limite máximo aceitável de 1,50 mg/L deste íon, visto o potencial risco deste elemento a saúde humana em concentrações elevadas, em consonância com as legislações vigentes de potabilidade (Portaria de Consolidação nº 5 de 28/09/2017 - Anexo XX).

Desta forma, foram considerados “ótimos” 23 municípios que apresentaram concentrações entre 0,02 mg/L e 1,50 mg/L, recebendo 10 pontos. Os municípios de Botucatu e Cajuru apresentaram valores abaixo de 0,01 mg/L, sendo considerados não aceitáveis para seu aproveitamento como mineral. Outros cinco municípios (Santa Rosa do Viterbo, Dois Córregos, São Pedro, Dourado e Bocaina) não obtiveram a análise de fluoreto realizada, desta forma, foram excluídos desta avaliação este parâmetro.

Figura 7.14. Categorização e potencialidade de fluoreto (mg/L) nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



7.2.4 Refinamento Hidroquímico – Categorização

Os municípios de Araraquara, Bariri, Descalvado e Pardinho foram os que apresentaram maior potencial hidroquímico para a viabilização de projetos de águas minerais, sendo avaliados como “ótimos” em todos os parâmetros avaliados (condutividade elétrica, nitrato e fluoreto), totalizando 30 pontos.

Foram considerados “bons” 18 municípios que obtiveram valores iguais ou superiores a 21 pontos e iguais ou inferiores que 26 (3º quartil estatístico); foram considerados “regulares” 5 municípios (Santa Rosa do Viterbo, Dois Córregos, São Pedro e Dourado), que apresentaram pontuações inferiores a 21.

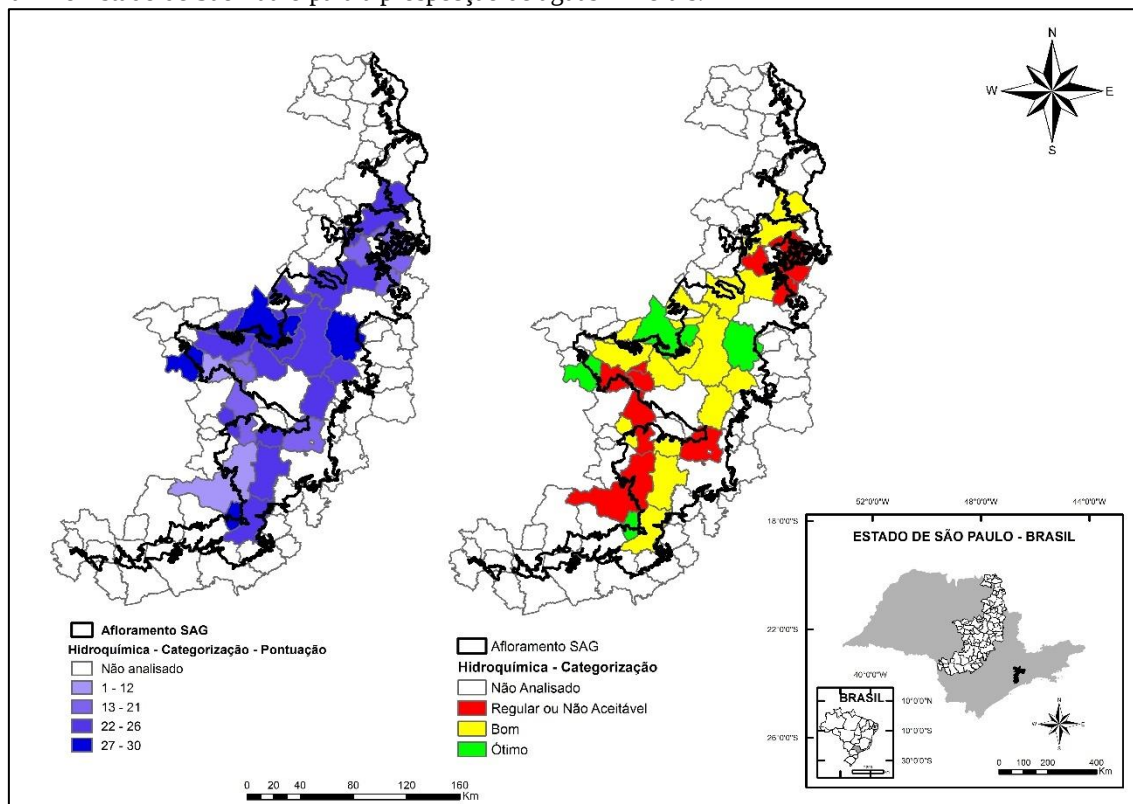
Já os municípios de Bocaina, Botucatu e Trabiju apresentaram avaliações excludentes, referentes ao íon fluoreto abaixo de 0,01 mg/L (Bocaina e Botucatu) e Trabiju, que apresentou os valores de nitrato acima do aceitável para esta avaliação e assim foram considerados como “não aceitáveis para fim de potencial exploratório” referente a hidroquímica.

Cabe ressaltar que o número de análises disponíveis utilizadas nesta etapa de avaliação (Refinamento) foi reduzido, contemplando apenas 33% do total dos municípios,

além de parte dos municípios (Analândia, Bocaina, Mineiros do Tietê, Pardinho e São Pedro) apresentarem apenas uma análise disponível associada para sua caracterização, o que estatisticamente reduziu a robustez nesta análise.

A figura 7.15 apresenta a categorização e classificação dos 30 municípios avaliados quanto à favorabilidade hidroquímica para a prospecção para águas minerais.

Figura 7.15. Categorização e potencialidade hidroquímica Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo para a prospecção de águas minerais.



7.3 Ranqueamento Final e Definição de Alvos Exploratórios

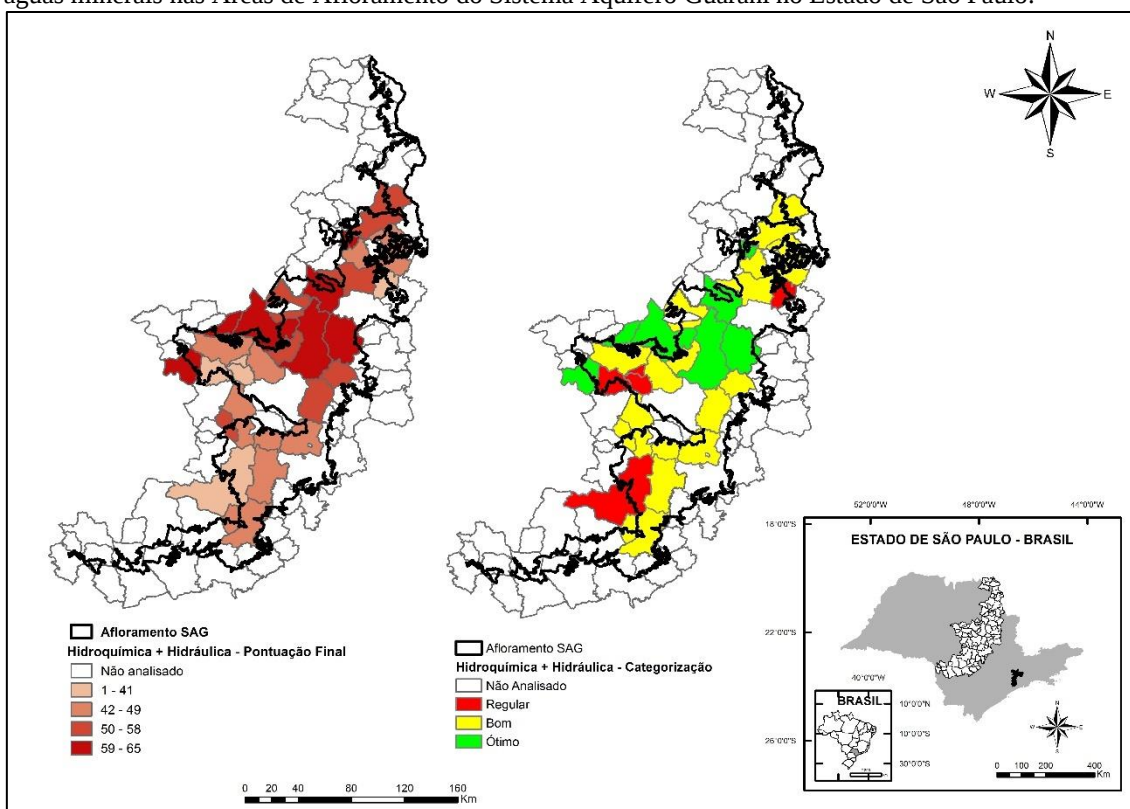
O ranqueamento final levou em consideração a pontuação de cada município na avaliação preliminar com o seu posterior refinamento (hidroquímica). Desta forma, apenas os 30 municípios com análises químicas, seguiram com esta avaliação final, que resultou em sete municípios considerados “ótimos” alvos exploratórios, com alto potencial para a exploração mineral (posterior pesquisa detalhada).

O município de Araraquara foi o que apresentou maior potencial exploratório seguido por Bariri, São Carlos, Gavião Peixoto, Descalvado, Serrana e Luís Antônio, totalizando respectivamente as seguintes pontuações 65, 62, 61, 61 e 59 para os três últimos municípios. Estes sete municípios de maior favorabilidade e potencial para a viabilização de projetos de água minerais (Figura 7.16) encontram-se no limite centro-oeste e central

das áreas de afloramento do SAG, condizente com os modelos econômicos e geológico/hidrogeológico aqui propostos. Grande potencial econômico, alta capacidade hídrica e relativa proteção antrópica pode ser atribuída a estes sete municípios.

Já os municípios de Bocaina, Santa Rosa do Viterbo, Dourado, Botucatu, Cajuru e Trabiju obtiveram as piores pontuações, abaixo de 41, na avaliação final, além de apresentarem algum parâmetro hidroquímico que os eliminou quanto a sua potencialidade mineral, ausência de íon fluoreto (Cajuru, Botucatu) ou ocorrência de nitrato acima do proposto (Trabiju).

Figura 7.16. Categorização final e definição de alvos potenciais para a pesquisa mineral de projetos para águas minerais nas Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.



8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo de prospecção hidrogeológica regional proposto considerou aspectos econômicos, hidrogeológicos, geológicos, hidroclimatológicos e hidroquímicos para avaliar e ranquear áreas de maior potencial exploratório para o desenvolvimento de projetos para águas minerais, sendo divididos em duas etapas específicas: Avaliação Preliminar e Refinamento.

A avaliação preliminar considerou uma análise multicriterial aferindo pesos e notas aos diversos parâmetros analisados: econômico (População X Renda per Capita), hidroclimatológico (Recarga), hidrogeológico (Capacidade Específica e Densidade de Poços) e geológicos (Espessura de Aquífero e Grau de Confinamento), mostrando-se muito eficiente quando aplicado à área de estudo proposta, composta por 93 municípios (Áreas de Afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo). Os parâmetros geológicos, hidrogeológicos referentes à capacidade hídrica e proteção (capacidade específica, espessura de aquífero e grau de confinamento/espessura de basalto) formaram os pilares principais da avaliação preliminar sendo possível observar uma forte correlação entre os mesmos.

Os 16 municípios de maior favorabilidade e potencial para a viabilização de projetos de águas minerais localizam-se no limite centro-oeste e noroeste das áreas de afloramento do SAG, apresentando características condizentes com os modelos geológico/hidrogeológico regionais, onde ocorrem espessuras maiores de aquífero Formações Piramboia e Botucatu (média superior a 240 metros), maiores capacidades específicas (média de 5,14 m³/h/m), além de relativo grau de confinamento (entre 12 e 78 metros de espessura de basalto). Por outro lado, observou-se que os 26 municípios de menor favorabilidade, localizam-se em todo limite leste das áreas de afloramento (norte a sul), também em conformidade com o modelo geológico/hidrogeológico regional, apresentaram menores espessura de aquífero (média de 94 metros), ausência ou baixo grau de confinamento (média de 9,50 metros de espessura de basalto) e, finalmente, menor capacidade específica (média de 0,54 m³/h/m).

Outra consideração relevante é a importância das águas subterrâneas para os municípios com grande densidade populacional e renda per capita (Parâmetro Econômico Figura 7.2), Ribeirão Preto, Araraquara, São Carlos e Rio Claro, que juntos representam 32% da população total da área de estudo. Eles estão entre os 6 municípios de mais alta densidade de poços tubulares profundos, apresentando respectivamente 56,84; 27,80; 21,99 e 17,66 poços/100 km² (Figura 7.6).

A etapa de refinamento, considerou três parâmetros qualitativos, todos ligados à composição química das águas (condutividade elétrica, nitrato e fluoreto) considerados com os mesmos pesos e pontuações. Estes foram empregados para fins de definição de perfil hidroquímico específico (mineralização), risco quanto a contaminação antrópica e vulnerabilidade (concentração de nitrato), além de seu aproveitamento mineral (presença do íon fluoreto em consonância com o Código de Águas Minerais), os últimos 2 parâmetros, foram auferidos com especificações de restrições quanto a algumas características não aceitáveis para um projeto de águas minerais (risco de contaminação e não classificação quanto a sua finalidade mineral). A aplicação desta etapa na área de trabalho foi limitada pelo número dados disponíveis, apenas 30 dos 93 municípios apresentaram análises químicas completas, possibilitando a aplicação desta fase em apenas 32% da área de trabalho. Desta forma, quatro municípios apresentaram classificação “ótimas” e cinco foram descartados, pela ausência de íon fluoreto (Bocaina, Santa Rosa do Viterbo, Dourado e Botucatu) e um por presença de nitrato acima do aceitável (Trabiju).

Para a avaliação e ranqueamento final (Fig. 7.16.), os resultados das duas etapas (preliminar e refinamento) foram somadas. Apenas os 30 municípios com análises químicas disponíveis foram considerados, resultando em sete municípios alvos, com maior favorabilidade e potencial para a viabilização de projetos de água minerais (Figura 7.17), sendo eles: Araraquara, Bariri, São Carlos, Gavião Peixoto, Descalvado Serrana e Luís Antônio.

Ainda que efetivo e eficiente, o modelo de prospecção proposto, acabou tornando-se restritivo em seu produto final, pois para a fase de refinamento 68% dos municípios foram descartados por não apresentarem análises químicas disponíveis, eliminando, por exemplo, os seis mais bem ranqueados na fase preliminar, (Ribeirão Preto, Nova Europa, Batatais, Jardinópolis, Ibitinga e Aramina). Assim, é importante ressaltar que o modelo pode sofrer limitações caso a base de dados utilizada não esteja robusta e completa.

Ainda que não aplicado em outros ambientes e aquíferos, espera-se que este modelo proposto seja replicável a outras campanhas de prospecção hidrogeológica em outras unidades cabendo ao usuário a adaptação ou inclusão de outros parâmetros às referências aqui propostas, como por exemplo, intervalo de condutividade elétrica específico, grau de confinamento, pH ou outro elemento de aproveitamento mineral (como a temperatura ou outro íon/elemento digno de nota como exemplos).

O modelo de prospecção proposto foi aplicado a 93 municípios, porém pode ser aplicado a apenas um único município ou parte deste em diferentes escalas de trabalho, desde que o banco de dados para a área selecionada esteja disponível.

Cabe ressaltar que limitações no banco de dados utilizado podem resultar em desvios e restrições deste modelo, o que indica que uma avaliação preliminar dos dados disponíveis seja necessária antes de sua aplicação.

O modelo e parâmetros exploratórios propostos foram considerados eficientes e aplicáveis para uma proposta prospectiva hidrogeológica regional, ainda, reforça-se que os resultados obtidos “alvos exploratórios” deverão ser posteriormente investigados em escala adequada (local), com ferramentas pontuais como a perfuração de poços exploratórios, análises químicas de poços instalados e geofísica local.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA F.F.M. – Botucatu: a triassic desert of South America. In: IUGS, International Geological Congress, 19, Argel (Argélia), Comptes Rendus, section 19, fasc. 7, p. 9-24, 1953.

ASSINE, M.L. et al. – Os paleodesertos Piramboia e Botucatu. In: Mantesso Neto, V. et al. (Eds.) Geologia do continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, 2005.

BRAGA A. C. M. – Geofísica Aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. São Paulo, Brasil: Editora Oficina de Texto, ISBN 978-85-7975-191-2, 2016.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário Mineral 2018 – Ano base 2017. 21/05/2020. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/> Acesso em: 04/06/2020.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). SIGMINE – Sistema de Informações Geográficas da Mineração. <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/>. Consulta realizada em 02/02/2019.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Decreto-Lei nº 7.841, de 8 de agosto de 1945. Código de Águas Minerais. Brasília, Brasil.

BRASIL. Decreto-lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Código de Mineração. In: Código de Mineração e Legislação Correlata. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral do Ministério de Minas e Energia, Ver., p. 22-54, 1984.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5 – Anexo XX, Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde, 2017.

BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada, RDC nº 274, de 22 de setembro de 2005 – Regulamento Técnico para Águas Envasadas e Gelo, 2005a.

BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada, RDC nº 275, de 22 de setembro de 2005 – Regulamento Técnico de Características Microbiológicas para Água Mineral Natural e Água Natural, 2005b.

BORGHETTI. N.R.B; BORGHETTI. J.R; ROSA FILHO, E.F. Aquífero Guarani – A verdadeira Integração dos Países do Mercosul. Curitiba, 214 p., 2004.

CAETANO-CHANG, M.R. – A Formação Piramboia no centro-leste do estado de São Paulo. Habilitation Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1997.

CAETANO-CHANG, M.R.; WU, F.T. – Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Piramboia, na porção centro-leste paulista. Rev. Brasil. Geol. 36, p. 296–304, 2006.

CAVALCANTI NETO; ROCHA M. T. O.; ROCHA A. M. – Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração. Natal/RN: Editora do IFRN-RN, 270 p., ISBN 978-85-89571-52-4, 2010.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://siagasweb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 23/10/2019.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. – Hidrologia Subterrânea 2ª Ed. Barcelona: Ediciones Omega, 2v. 2350 p., 1983.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO – Estudo de Águas Subterrâneas. Região Administrativa 6 – Ribeirão Preto. São Paulo: DAEE, Volume 2. (Texto), 1974.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. – Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. 3ª Edição. Fortaleza, CE: CPRM, Serviço Geológico do Brasil, 2000.

GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H.K.; 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.

GASTMANS, D. – Hidrogeologia e Hidroquímica do Sistema Aquífero Guarani na Borda Ocidental da Bacia Sedimentar do Paraná. PhD Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Univ. Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2007.

GASTMANS, D.; REIS, M.M.; CHAN, H.K. – Geotermometria das águas hipertermais do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências p. 208-225, 2012.

GASTMANS, D.; CHAN, H.K.; HUTCHEON, I. – Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenic features. Applied Geochemistry, 25(1): p. 16-33, 2010.

GESICKI A.L.D. – Evolução diagenética das formações Piramboia e Botucatu (Sistema Aquífero Guarani) no estado de São Paulo. Tese de Doutorado Instituto de Geociências Universidade de São Paulo São Paulo, 175 p., 2007.

HIRATA, R. – Sistema Aquífero Guarani: Gestão e Sustentabilidade de um Grande Recurso. In: I Encontro Internacional Governança da Água na América Latina, 2007, São Paulo – SP. Anais. São Paulo: [s.n], 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Diretoria de Pesquisas - DPE - Coordenação de População e Indicadores Sociais - COPIS. Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 01/07/2019.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Sistema Internacional de Unidades: SI. — Duque de Caxias, RJ, 2012.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Subsídios ao Plano de Desenvolvimento e Proteção Ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo (Coordenação geral José Luiz Albuquerque Filho). São Paulo, 2011.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. – As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente – SMA, 104 p., 2008.

LEBAC. – Mapa Hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani. Coord.: SINELLI, O. Equipe: CHANG, H.K.; GASTMANS, D.; PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 54 p., e 8 mapas. 2008a.

LEBAC. Informe Final – Hidrogeologia do Sistema Aquífero Guarani. Coord.: GASTMANS, D.; CHANG, H.K. Equipe: PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani, Rio Claro, 127p., 2008b.

LEVINSON, A.A. – Introduction to Exploration Geochemistry. Maywood: Published by Applied Publishing, Limited., 1974.

LICHT, O. A. B. A – Geoquímica Multielementar na gestão ambiental identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à Prospecção Mineral e regiões de risco para a saúde no Estado do Paraná, Brasil. Tese de doutorado – Geologia Ambiental, Setor de Ciências da Terra) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

MARANHÃO, R. J.L. – Introdução a Prospecção Mineral. BNB/ETENE, Fortaleza, 3º. Ed., 1985.

MARTINELLI, M. – Estado de São Paulo: aspectos da natureza, Confins [online], 09/2010, posto online no dia 01 outubro 2010, consultado 19/01/2020. URL : <http://journals.openedition.org/confins/6557> ; DOI : 10.4000/confins.6557.

MELFI A.J.; MISI A.; CAMPOS D.A.; CORDANI U.G. (orgs.). – Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 2016.

MILANI, E. J. – Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-ocidental. 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E.J. – Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Neves, B.B.B. (Eds.). Geologia do continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, p. 264-279, 2004.

OEA – ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS. Aquífero Guarani: Programa Estratégico de Ações. Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento

Sustentável do Sistema Aquífero Guarani. Série de Manuais e Documentos Técnicos do PSAG. Edição Bilingue. Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: Organização dos Estados Americanos (PEA), janeiro de 2009, 424 p., 2009.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R.; SINELLI, O. – Arcabouço geológico e hidrofacies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, 38(1), p. 56-67, 2008.

PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. – Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. *Geociências*, Rio Claro, v. 1, p. 83-99, 1994.

PEREIRA, R. M. Fundamentos de prospecção mineral. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PERROTTA, M. M. et al. – Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. São Paulo: CPRM, Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, 2005.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro. – Brasília: PNUD, Ipea, FJP, 2013. 96 p. – (Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil), 2013.

QUEIROZ, E.T. – Diagnóstico das Águas Minerais e Potáveis de Mesa do Brasil. Brasília, DF. Departamento Nacional de Produção Mineral, Diretoria de Fiscalização da Atividade Minerária, 2015.

REIS, M. M. – Potencial Hidrotermal das Águas Hipertermais do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Rio Claro, p. 116. 2011.

RODWAN JR., J. G. – Bottled Water 2019: Significant, but Slower, Growth for Bottled Water in 2018, in Bottled Water Reporter. IBWA, International Bottled Water Association, 2019. Disponível em: <https://www.bottledwater.org/> Acesso em: 11/11/2019.

ROSSELLO E.; VEROSLAVSKY, G. de SANTA ANA, H.; FÚLFARO, V.J.; FERNÁNDEZ GARRASINO, C.A. – La Dorsal Asunción-Río Grande: Un Alto fondo Regional entre las Cuencas Paraná (Brasil, Paraguay y Uruguay) y Chacoparanense (Argentina). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, p. 181-196, 2006.

SANGRAM, H.; HUNT, J.; CHARLESWORTH, D. – Modelo Numérico Hidrogeológico Del Área Piloto Ribeirão Preto, SNC Lavalin Internacional, Maio, 2008.

SANTAROSA, L (No prelo); GASTMANS, D (No prelo); – Assessment of Groundwater Recharge along the Guarani Aquifer System Outcrop Zone in São Paulo State (Brazil): An important Tool Towards Integrated Management, 2020

SANTOS, M. M.; CAETANO CHANG, M. R.; CHANG, H.K. – Análise do balanço hídrico climatológico do Sistema Aquífero Guarani, em sua área de afloramento no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 10, p. 153-170, 2012.

SÃO PAULO. DAEE/IG/IPT/CPRM. – Mapa de águas subterrâneas do estado de São Paulo. São Paulo, CPRM, 1 mapa, escala 1:1.000.000, 2005.

SILVA, R.B.G. da. – Estudo Hidroquímico e isotópico do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo, 1983. 133p. Tese (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983.

SOARES P.C. – Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, 5, p. 229-251, 1975.

SOARES P.C.; SINELLI O., PENALVA F.; WERNICK E.; SOUZA A.; CASTRO P.R.M. – Geologia do nordeste do Estado de São Paulo. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, Anais, v.1, p. 209-236, 1973.

SRACEK, O.; HIRATA, R. – Geochemical and Stable Isotopic Evolution of the Guarani Aquifer System in the State of São Paulo, Brazil. Hydrogeology Journal, v. 10, p. 643-655, 2002.

STEFFEN, C.A. – Técnicas radiométricas com o Spectron SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., 1993, Curitiba. Anais. Curitiba: INPE/SELP, 7p., 1993.

UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2009/54/CE. Jornal Oficial da União Europeia. L 164/45, 26/06/2009.

U. S. FEDERAL GOVERNMENT. – Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2, CITE: 21CFR129. Revised as of April 1, 2003. p. 278-283. Disponível em: < <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=165.110&SearchTerm=bottled%20water> >. Acesso em: 10/01/2019.

U. S. FEDERAL GOVERNMENT. – Code of Federal Regulations, Title 21, Volume 2, CITE: 21CFR165.110. Revised as of April 1, 2004. p. 527-544. Disponível em: < <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=165.110&SearchTerm=bottled%20water> >. Acesso em: 10/01/2019.

ZALAN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S., APPI, V.T.; ZANOTTO, O. – Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SULBRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3, 1987, Curitiba, Atas....Curitiba: SBG, v. 1, p. 441- 477, 1987.

ZALAN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S., APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. – Bacia do Paraná. In: RAJA GABAGLIA, G.P., MILANI, E.J. (Ed.). Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro: Petrobras, p. 135-168, 1990.