

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 09/09/2021.

**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.

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.