

Universidade Federal de Itajubá

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
PROFÁGUA

Karen Quintão Castro

**Caracterização e Quantificação do Potencial Hídrico Subterrâneo do Baixo
Curso do Rio Piracicaba (MG).**



Itabira – Minas Gerais

2021

Karen Quintão Castro

**Caracterização e Quantificação do Potencial Hídrico Subterrâneo do Baixo
Curso do rio Piracicaba (MG)**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (PROFÁGUA), na Universidade Federal de Itajubá.

Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos.

Linha de pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água.

Aprovada em 17 de _____ junho _____ de 2021.

Orientador: Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Coorientador: Prof. Dr. Gláucio Marcelino Marques

Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Augusto Costa Gonçalves - Orientador
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dra. Eliane Maria Vieira
Instituto de Ciências Puras e Aplicadas – UNIFEI

Prof. Dra. Isabel Margarida Horta Ribeiro Antunes
Dep. de Ciências da Terra - Universidade do Minho

Itabira – Minas Gerais

2021

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e força para chegar até aqui.

Aos meus pais, Claudina e Geraldo, ao meu irmão Kenner, e ao Gustavo, pelo incentivo, apoio e carinho ao longo desta jornada, que só foi possível por acreditarem no meu sucesso e estarem sempre ao meu lado.

A todos os amigos conquistados durante esse período, que me acompanharam nas horas acadêmicas e fizeram desta caminhada muito mais leve e divertida.

Ao José Augusto Costa Gonçalves e Gláucio Marcelino Marques, pelas orientações recebidas ao longo da realização deste trabalho. E aos demais professores que estiveram ao nosso lado compartilhando conhecimentos e experiência.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento.

É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser
conhecer as borboletas.

O Pequeno Príncipe.

RESUMO

CASTRO, Karen Quintão. **Caracterização e Quantificação do Potencial Hídrico Subterrâneo do Baixo Curso do Rio Piracicaba (MG)**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021.

A demanda por recursos hídricos é um processo que anda em sentido contrário a quantidade e qualidade apresentada pela maioria dos corpos hídricos superficiais. Diante disso três situações são observadas: o elevado custo para recuperação dos corpos hídricos, o tratamento das águas para obtenção de potabilidade, e a exploração das águas subterrâneas, justificada pela abundância e limpidez. Este trabalho tem como principal objetivo a caracterização e avaliação do potencial hídrico subterrâneo, com bases nas características geológicas e hidrogeológicas do baixo curso do Rio Piracicaba, região esta, dependente das águas subterrâneas para o desenvolvimento de todas as atividades. O estudo dos poços perfurados e das vazões outorgadas, permitiu a caracterização dos aquíferos. A quantificação das componentes superficiais e subterrâneas, reproduzidas por meio de hidrogramas, possibilitaram os cálculos das contribuições dos aquíferos para a perenidade dos cursos d'água, mediante avaliação dos volumes referentes ao deflúvio total e ao deflúvio subterrâneo. Das sete cidades que constituem a área de estudo, apenas Jaguaraçu não utiliza das águas subterrâneas para abastecimento público. Foram cadastrados 1275 poços que estão assentados em quatro sistemas aquíferos identificados. Metade destes poços estão perfurados no sistema aquífero fissural das rochas cristalinas. No sistema aquífero fissural formado por rochas metassedimentares/metavulcânicas e no sistema aquífero poroso proveniente das formações cenozoicas são encontrados os poços com as maiores vazões de captação. Estimativas realizadas considerando o aumento populacional, correlacionado com a demanda hídrica regional, para o ano de 2035, mostram que será necessário uma nova e eficiente gestão dos recursos hídricos subterrâneos capaz de atender as necessidades de um futuro bem próximo.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas. Gestão dos Recursos Hídricos. Hidrogramas. Bacia do Rio Piracicaba.

ABSTRACT

CASTRO, Karen Quintão. **Characterisation and Quantification of the Ground Hydric Potential of the Lower Course of Piracicaba River (MG)**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – PROFÁGUA), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itabira, Minas Gerais, 2021.

The demand for hydric resources is a process that moves in the opposite direction of the quantity and quality of superficial hydric bodies majority. Considering this circumstance, three situations are identified: the high cost for recovering hydric bodies, water treatment aiming to achieve potability, and the exploitation of groundwaters, justified by its abundance and limpidity. The main goal of this work is to characterize and evaluate the ground hydric potential, based on the geological and hydrogeological characteristics of the low course of Piracicaba River, region in which the development of all activities depends on groundwater. The study of the drilled wells and granted flows, enabled the characterization of the aquifers. The quantification of the superficial and subterranean components, presented through hydrographs, led to the calculation of the contribution of the aquifers to the perpetuity of the water course, upon the evaluation of total and subterranean defluvium volumes. Considering the seven cities included in the studied area, only Jaguaraçu doesn't use groundwater for public supply. In total, 1275 wells were registered, which are placed within four aquifer systems identified. Half of these wells are drilled in the fissural aquifer system of the crystalline rocks. In the fissural aquifer system formed by metasedimentary / metavolcanic rocks and in the porous aquifer system from the cenozoic formations, the wells with the highest flow rates are found. Estimates developed considering population growth, correlated to the regional hydric demand, for 2035, show that a new and efficient ground hydric resource management will be necessary in order to meet the necessities of a near future.

Key-words: Groundwaters. Water resource management. Hydrographs. Piracicaba River Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo hidrológico	15
Figura 2: Relação de textura e porosidade.....	17
Figura 3: Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais	18
Figura 4: Distribuição de água no solo	19
Figura 5: Classificação dos aquíferos quanto a porosidade	21
Figura 6: Esquematização dos aquíferos quanto a pressão da água.....	23
Figura 7: Cone de depressão formado pela retirada com velocidade excedente de água, ocasionando a seca dos poços próximos mais rasos.....	24
Figura 8: Interação de águas superficiais e subterrâneas	28
Figura 9: Comitês das sub-bacias hidrográficas da Bacia do Rio Doce	41
Figura 10: Delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba.....	42
Figura 11: Mapa de localização, baixo curso do rio Piracicaba	43
Figura 12: Rede de drenagem da área de estudo	45
Figura 13: Mapa climatológico do Baixo curso do Rio Piracicaba	47
Figura 14: Mapa de solos do baixo curso do Rio Piracicaba	48
Figura 15: Relevo da área de estudo	50
Figura 16: Mapa geológico do baixo curso do Rio Piracicaba	52
Figura 17: Metodologia	53
Figura 18: Poços outorgados por município	57
Figura 19: Hidrogeologia do baixo curso do Rio Piracicaba	60
Figura 20: Poços outorgados por unidade hidrogeológica	61
Figura 21: Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Guilman-Amorim.....	68
Figura 22: Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Mário Carvalho	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Legislações sobre gestão de Recursos Hídricos, em Minas Gerais	34
Tabela 2: Legislações federais sobre gestão de águas subterrâneas	36
Tabela 3: Legislações estaduais sobre gestão de águas subterrâneas.....	37
Tabela 4: Enquadramento dos corpos de água	39
Tabela 5: Identificação e localização das estações fluviométricas	53
Tabela 6: Consumo de água per capita	56
Tabela 7: Origem da captação do recurso hídrico por cidade.....	56
Tabela 8: Quantitativos de poços outorgador por cidade em relação a área estudada	58
Tabela 9: Vazões outorgadas por cidade	58
Tabela 10: Aquíferos / Unidades lito-estratigráficas.....	60
Tabela 11: Dados de produção de poços	62
Tabela 12: Frequência de poços por produção.....	62
Tabela 13: Frequência de poços por profundidade.....	62
Tabela 14: Dados de produção de poços	63
Tabela 15: Frequência de poços por produção.....	63
Tabela 16: Frequência de poços por profundidade.....	63
Tabela 17: Dados de produção de poços	64
Tabela 18: Frequência de poços por produção.....	64
Tabela 19: Frequência de poços por profundidade.....	64
Tabela 20: Distribuição de poços quanto ao tipo de uso, em porcentagem.....	71
Tabela 21: Projeção da população urbana em 2035 / Demanda hídrica prevista para 2035, para abastecimento urbano das cidades	72

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CNMA	Conselho Nacional Do Meio Ambiente
CNRH	Conselho Nacional De Recursos Hídricos
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
IBGE	Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística
IDE-SISEMA	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
MMA	Ministério Do Meio Ambiente
SIAGAS	Sistema De Informações De Águas Subterrâneas
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UPGRH	Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ADERÊNCIA DO ESTUDO ÀS LINHAS DE PESQUISA DO PROFÁGUA	12
3	OBJETIVOS	13
3.1	Objetivo Geral	13
3.2	Objetivos Específicos	13
4	JUSTIFICATIVAS	13
5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
5.1	Ciclo Hidrológico	14
5.1.1	Águas subterrâneas	16
5.1.2	Aquíferos.....	20
5.2	Poços para captação das águas subterrâneas	23
5.3	Importância da indissociabilidade da gestão das águas superficiais e subterrâneas.....	25
5.4	Recargas e reservas de aquíferos	26
5.5	Contextualização legal dos Recursos Hídricos	30
5.5.1	Arcabouço nacional.....	30
5.5.2	Arcabouço estadual - Minas Gerais	33
5.5.3	Arcabouço legal sobre gestão de águas subterrâneas	36
6	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	39
6.1	Bacia do Rio Doce	39
6.2	Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Rio Piracicaba.....	41
6.3	Baixo Curso do Rio Piracicaba.....	43
6.4	Hidrografia.....	44
6.5	Clima	46
6.6	Solos	47
6.7	Relevo	49
6.8	Geologia.....	50
7	MATERIAIS E MÉTODOS	52
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
8.1	Quantificação de poços perfurados e outorgados	57
8.2	Caracterização dos sistemas aquíferos	59
8.2.1	Sistema Aquífero Fissural de Domínio Cristalino	61
8.2.2	Sistema Aquífero Fissural de Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas.....	62
8.2.3	Sistema Aquífero Poroso de Formações Cenozoicas	64
8.2.4	Sistema Aquífero Misto	65
8.2.5	Discussão sobre a caracterização dos sistemas aquíferos.....	65
8.3	Potencial e disponibilidades hídricas	66
8.3.1	Discussão sobre o potencial e disponibilidades hídricas	70
8.4	Uso das águas subterrâneas e estimativas de demandas futuras	70
8.4.1	Discussão sobre o uso das águas subterrâneas e estimativas de demandas futuras.....	72
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos constituem um dos mais importantes bens naturais existentes, sendo indispensável para a manutenção da vida, construção da sociedade e para o desenvolvimento socioeconômico. É elemento indispensável para o abastecimento da população, irrigação agrícola, saneamento básico, meio de transporte, geração de energia e processos produtivos.

A maior parte da superfície terrestre é coberta por água, e ainda que em abundância, a sua distribuição é desigual e o recurso já é escasso em diversos lugares do planeta (ANA, 2018). O planeta Terra é constituído por massas de água que compõem a hidrosfera terrestre. As águas salgadas, presentes em mares e oceanos, que correspondem a 97,4 % do total, inapropriadas para consumo direto. Já as águas doces próprias para consumo humano totalizam 2,6% da água terrestre, distribuídas em calotas polares, aquíferos rios, lagos, lagoas e áreas alagadas. Destes 2,6% de águas doces, cerca de 0,8 % estão concentradas nas reservas de águas subterrâneas (BICUDO, 2010).

Os diversos usos dependentes de água e o desenvolvimento socioeconômico ocasionaram a diminuição da disponibilidade de água per capita, além da deterioração da qualidade desta. O cenário atual de escassez hídrica vivenciado por diversas partes do mundo trouxe à tona conflitos pela quantidade e qualidade da água disponível, visto que a quantidade é fundamental para a manutenção da vida e atividades, enquanto a qualidade irá influenciar o livre consumo, os processos produtivos e as atividades de lazer.

O ciclo hidrológico é o fluxo das águas entre o oceano, a atmosfera e o continente. O continente é composto pelos cursos de águas superficiais, os reservatórios de águas subterrâneas e os aquíferos. Estes estabelecem entre si relações de fluxos de água de acordo com a sazonalidade. No período de estiagem, os aquíferos contribuem para o abastecimento dos cursos d'água, enquanto no período de maior quantidade de chuva, o processo de infiltração atua como a recarga dos aquíferos (FITTS, 2015).

Via de regra, os recursos subterrâneos são uma fração dos recursos hídricos totais, que passam pela zona saturada, onde podem ser extraídos ou podem ser utilizados quando regressarem ao ramo superficial do ciclo hidrológico. As reservas de águas subterrâneas podem apresentar caráter permanente ou renovável. As permanentes são as situadas abaixo do nível freático de variação sazonal, enquanto as

renováveis correspondem ao volume de água variável pela sazonalidade. Essas reservas influenciam diretamente no volume de escoamento dos rios, por meio da contribuição de volumes de água ao longo do ano hidrológico (ANA, 2005).

Com o incremento da demanda, grau de contaminação das águas superficiais, dificuldades técnicas e custo elevado de tratamento, o uso das águas subterrâneas tem aumentado. As águas subterrâneas possuem relativa limpidez, onde as camadas de solos existentes entre os aquíferos e a superfície terrestre dificultam a contaminação desses reservatórios naturais (Luz e Sant, 2016).

Atualmente mais da metade da população brasileira já é abastecida por águas de fontes subterrâneas (ANA, 2019); o que torna o gerenciamento deste recurso necessário e urgente, a fim de evitar o uso insustentável, incontrolável e predatório, como se deu com as águas superficiais. Contudo, a água subterrânea é gerenciada por um sistema ainda precário frente ao aumento do uso que vem sendo apresentado. Faz-se necessária a gestão integrada das águas subterrâneas e superficiais conjuntamente, visto que, a água é uma só, em estados e processos diferentes em movimento contínuo entre a atmosfera, superfície terrestre e oceano (Luz e Sant, 2016).

Em busca da melhor gestão da água, um estudo hidrogeológico que estime o potencial hídrico subterrâneo é primordial. Por meio do cálculo do potencial hídrico, torna-se possível analisar o quantitativo das vazões a serem retiradas dos aquíferos, estabelecendo critérios que respeitem a sua recuperação; onde o valor do escoamento básico de um curso hídrico superficial, pode ser considerado o valor de recarga dos aquíferos (ANA, 2005).

A Lei 9.433/1997 (BRASIL, 1997) definiu a bacia hidrográfica como unidade de estudo, planejamento e gestão integrados de recursos hídricos e estas são compartimentos geográficos de terras topograficamente drenadas por um curso d'água e seus afluentes. A área de estudo, é parte da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, umas das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) da bacia hidrográfica do Rio Doce.

O baixo curso do Rio Piracicaba – área de estudo – compreende o maior aglomerado urbano de toda bacia, assim como o maior complexo siderúrgico da América Latina, onde se desenvolvem atividades minerárias, monocultura de eucalipto, além da agricultura e pecuária. Sendo o desenvolvimento das atividades econômicas e manutenção da população local da área em estudo, completamente dependentes do abastecimento pelas águas subterrâneas (CONSÓRCIO ECOPLAN – LUME, 2010).

O presente estudo se dá a partir da avaliação e caracterização da interligação entre as águas superficiais e subterrâneas, por meio dos processos de fluxos efluentes dos aquíferos para a perenização dos deflúvios superficiais. Avaliando os dados das estações fluviométricas localizadas na área de estudo, foi possível estabelecer a relação quantitativa das águas superficiais e subterrâneas utilizando parâmetros hidrológicos de suas componentes de escoamento.

O método utilizado para representar o escoamento total correspondente ao deflúvio dos rios e o deflúvio subterrâneo se deu a partir da construção de hidrogramas, que é a representação gráfica da variação da vazão (Q) ao longo do tempo (t) em uma seção do curso d'água. Amparado nos dados estudados e representados nos hidrogramas foi possível caracterizar a área sob os aspectos hidrogeológicos locais, visando quantificar o potencial hídrico subterrâneo.

2 ADERÊNCIA DO ESTUDO ÀS LINHAS DE PESQUISA DO PROFÁGUA

O Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos é um programa em rede nacional (ProfÁgua), cujo objetivo é a capacitação teórica e prática de profissionais em gestão de recursos hídricos, a fim do aprimoramento do sistema nacional de gestão e regulação das águas do país.

O ProfÁgua é um programa de pós-graduação *stricto sensu* em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos recomendado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação; que se dá pela implementação e ação conjunta da Agência Nacional de águas (ANA), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), da coordenação do programa pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), que são as unidades gestoras do programa, que é ofertado em 14 instituições de ensino superior distribuídos com a finalidade de qualificar profissionais sob a gestão de recursos hídricos de acordo com as características e problemáticas regionais.

Das linhas de pesquisa do programa, a presente dissertação contribui com a gestão de recursos hídricos enquadrada na linha de pesquisa Regulação e Governança de Recursos Hídricos, demonstrando a relevância da gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, inserida na área de concentração Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água, onde a aplicação de metodologias de quantificação facilita o entendimento da dinâmica hídrica e subsidia a tomada de decisões pelos

órgãos gestores do sistema de gestão das águas, a contribuir para a gestão de riscos do setor.

Os resultados do trabalho são importantes para um desenvolvimento sustentável que garanta disponibilidade do recurso para as gerações atuais e futuras, de modo a subsidiar ações econômicas e ambientais. De modo, a estabelecer quantitativamente a disponibilidade de água subterrânea na região, promovendo e sinalizando futuras locações de novos poços tubulares. Portanto poderá auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos por meio do órgão competente, fornecendo dados técnico-estatísticos para acervo técnico do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH, de uma região cujas águas subterrâneas são de extrema importância para abastecimento da população e atividades econômicas locais e ainda sim, muito pouco estudadas.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Caracterização hidrogeológica do baixo curso do Rio Piracicaba, visando a quantificação do potencial hídrico subterrâneo.

3.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliação e análise dos dados de outorga de captação de água subterrânea ao longo do baixo curso da Bacia do Rio Piracicaba;
- b) Caracterização dos aquíferos existentes no baixo curso do Rio Piracicaba;
- c) Avaliação do potencial e disponibilidade hídrica subterrânea.

4 JUSTIFICATIVAS

O uso intensivo dos recursos hídricos subterrâneos na região de desenvolvimento do trabalho demonstra a necessidade de implantação de um novo sistema de gestão dos recursos hídricos. Este deve estabelecer novas políticas públicas que abordem as peculiaridades dos sistemas hídricos subterrâneos regionais.

O presente estudo visa contribuir para o melhor desempenho da gestão dos recursos hídricos e a subsidiar políticas públicas de gestão, em cima do controle quantitativo do potencial hídrico subterrâneo regional. De modo que, por meio da compilação de dados hidrogeológicos prévios, apresentando como produto uma

abordagem gráfica da disponibilidade hídrica subterrânea local, um banco de dados com informações sobre os poços tubulares cadastrados nos municípios da área de estudo. Portanto o trabalho pode subsidiar as análises estatísticas das informações hidrogeológicas derivadas dos poços correlacionando-os com a caracterização dos aquíferos regionais.

A área de estudo compreende a região da foz do Rio Piracicaba, afluente do Rio Doce. De toda a bacia hidrográfica do Rio Piracicaba, na região em estudo localiza-se o maior aglomerado urbano, e as atividades locais são totalmente dependentes de fontes de águas subterrâneas para sua sobrevivência, visto que os cursos de água superficiais não apresentam índices de qualidade e quantidade necessária para os usos. Além do aglomerado urbano, a região abriga o maior polo industrial de toda a bacia, além de atividade minerária, agricultura e extensa área de monocultura de eucalipto.

5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

5.1 Ciclo Hidrológico

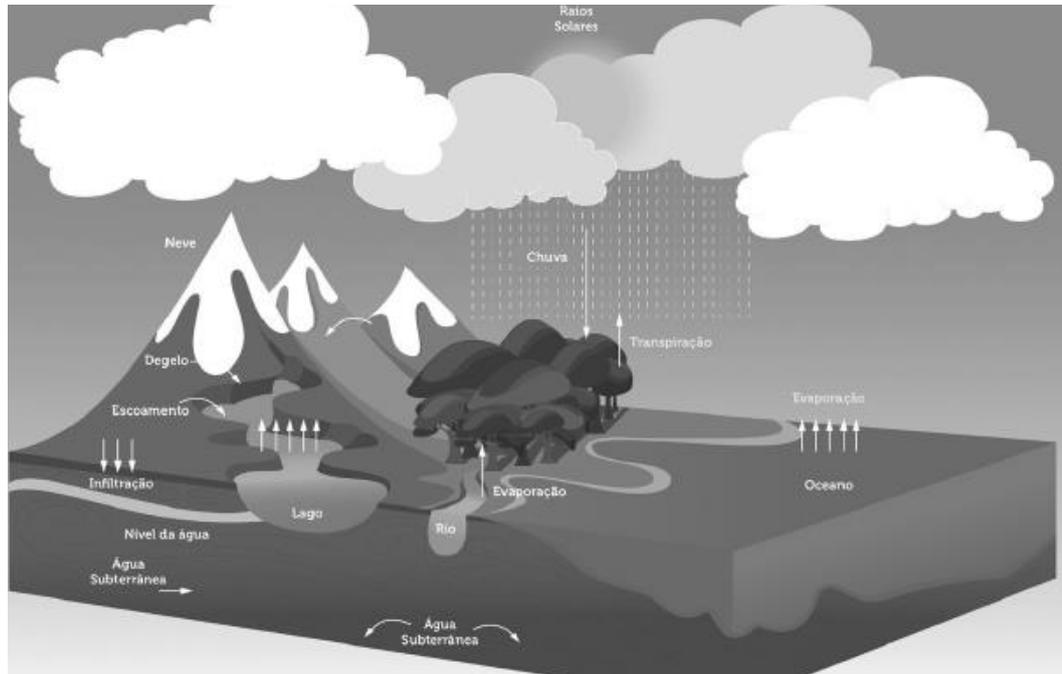
É denominado de ciclo hidrológico a contínua interação da água entre os oceanos, atmosfera e superfície terrestre. Tendo a precipitação como fluxo de entrada para o sistema hidrológico; e o escoamento e evapotranspiração como fluxo de saída (Freeze e Cherry, 2017).

A bacia hidrográfica compreende um dos componentes relacionados à água superficial, sendo ela uma extensão de escoamento de um rio central e seus afluentes; também considerada a unidade de gestão e estudo sobre determinado fluxo hidrológico. Da chuva que cai no interior de uma bacia hidrográfica uma parte escoar pela superfície e parte infiltra no solo.

Os rios são canais bem delimitados permanentes ou sazonais de fluxo de água superficial que irá desembocar em outro rio, lagos ou no oceano; esses por sua vez são essenciais a vida humana por servirem de via de transporte, fonte de água, geração de eletricidade, além de promover pesca e irrigação para áreas agrícolas. São os rios a parte principal da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica. Já as águas subterrâneas são aquelas que infiltram no solo e se instalam no interior dos subsolos, servindo de reservatórios para as águas e possibilitando o fluxo das mesmas (ROSSI, 2017).

As águas superficiais e subterrâneas são partes integrantes de um ciclo permanente, devendo apresentar a gestão conjunta. Segundo Wicander e Monroe (2009) a água é continuamente reciclada dos oceanos, no ciclo hidrológico, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1: Ciclo hidrológico



Fonte: Luz e Sant (2016).

Quando a água deixa de compor os oceanos e passa para a atmosfera, ocorre a evaporação, e assim se dá a formação das nuvens e condensação. Após a condensação, temos a precipitação no ciclo hidrológico, esta, quando ocorre sobre os oceanos, compõe um ciclo de precipitação hidrológico fechado, composto apenas pelos processos de: evaporação, condensação e precipitação. Quando a precipitação se dá sob os continentes, a circulação de ar atmosférica transportou o vapor d'água dos oceanos aos continentes, e ao atingir esses terão destinos diferentes.

Ao atingir corpos hídricos, a água irá retornar aos oceanos por escoamento; ao atingir lagos ou pântanos, e campos de neve ou geleiras, ficam retidas ao sistema local; e quando atingem superfície, escoam até o corpo hídrico mais próximo, evaporam ou infiltram no solo. Da porção de água que penetra no solo, por meio da infiltração, parte é absorvida pelo processo de evapotranspiração e o restante percola pelos vazios dos solos, sedimentos e rochas a inserir-se no processo de recarga dos aquíferos, que são as áreas de armazenamento e fluxo de água subterrânea, onde

concentra-se cerca de 30% de toda água disponível para consumo direto da superfície terrestre (Freeze e Cherry, 2017).

5.1.1 Águas subterrâneas

As águas subterrâneas são aquelas que se encontram abaixo da superfície da terra, ocupando os poros ou vazios intergranulares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas. Quando submetida a duas forças (de adesão e de gravidade), desempenham um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos (ABAS).

Ao atingir o solo, parte da água proveniente da precipitação se infiltra e percola no interior do subsolo, durante períodos variáveis, decorrentes de fatores, como: tipo de chuva, inclinação do terreno, cobertura vegetal e porosidade do subsolo. A ocorrência de chuvas intensas satura rapidamente o solo, logo a precipitação é fator decisivo no volume de recarga da água subterrânea. Em regiões que apresentam chuvas regularmente distribuídas ao longo do ano, tem-se uma infiltração maior, pois, a velocidade de infiltração acompanha o volume de precipitação. Por outro lado, chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial direto, visto que a velocidade de infiltração é inferior ao grande volume de água precipitada em curto intervalo de tempo. (ABAS).

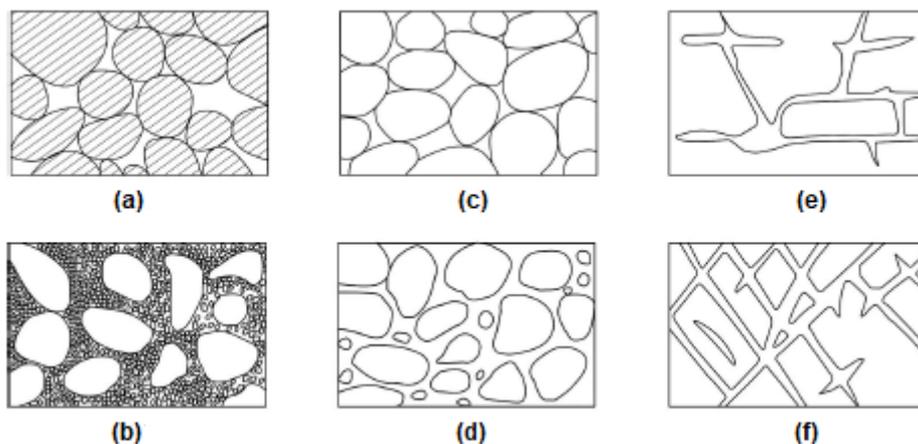
A topografia influencia o processo diante do fato de que declives acentuados favorecem o escoamento superficial direto, diminuindo a infiltração, e superfícies suavemente onduladas permitem o escoamento superficial menos veloz, aumentando a possibilidade de infiltração. A precipitação ao atingir um solo coberto por vegetação, que é mais permeável do que um solo desmatado, tem mais facilidade de infiltração (ABAS). A presença de vegetação facilita a infiltração pelas raízes, que abrem caminhos para a água descendente para solo.

Já a porosidade é a ocorrência de vazios intragranulares na superfície a ser penetrada, quanto maior número de vazios, maior permeabilidade e infiltração. A porosidade é a relação entre o volume de poros e o volume total de certo material, sendo uma propriedade física classificada em dois tipos de acordo com a porosidade nos materiais terrestres: primária e secundária. Segundo Teixeira *et al.* (2000):

- a) A porosidade primária é gerada juntamente com o sedimento ou rocha, sendo caracterizada nas rochas sedimentares pelos espaços entre os clastos ou grãos (porosidade intergranular) ou planos de estratificação. Nos materiais sedimentares o tamanho e forma das partículas, o seu grau de seleção e a presença de cimentação influenciam a porosidade.
- b) A porosidade secundária, por sua vez, se desenvolve após a formação das rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, por fraturamento ou falhamentos durante sua deformação (porosidade de fraturas). Um tipo especial de porosidade secundária se desenvolve em rochas solúveis, como calcários e mármore, através da criação de vazios por dissolução, caracterizando a porosidade cárstica (Teixeira *et al.*, 2000).

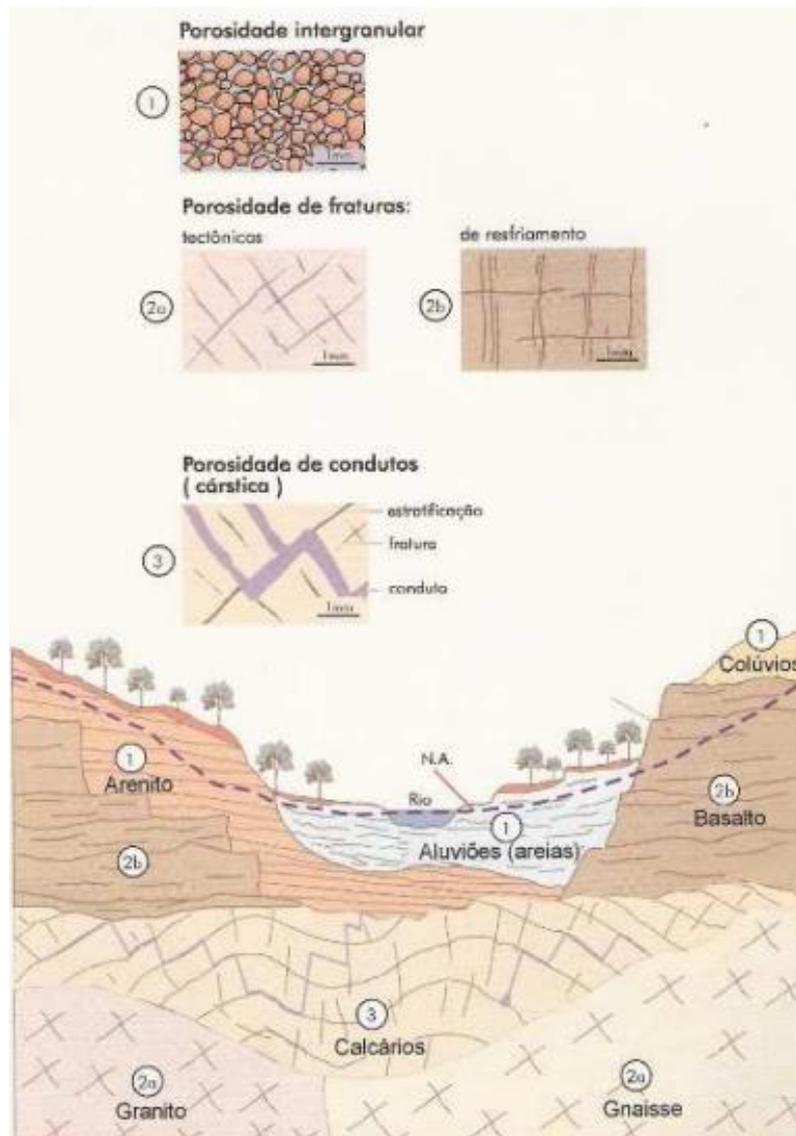
As Figuras 2 e 3 apresentam a relação entre textura e porosidade. Na Figura 2, a imagem **(a)** representa um depósito sedimentar bem selecionado, com alta porosidade; a imagem **(b)**, um depósito sedimentar pobremente selecionado, com baixa porosidade; o **(c)** um depósito sedimentar bem selecionado consistindo de seixos que são eles próprios poros, então o depósito como um todo possui altíssima porosidade; **(d)** depósito sedimentar bem selecionado, onde a porosidade tem sido diminuída pela deposição de matéria mineral em seus interstícios; **(e)** rocha que adquiriu poros por dissolução; **(f)** rocha que adquiriu poros por faturamento (FREEZE E CHERRY, 2017). Na Figura 3 tem-se os tipos fundamentais de porosidade numa seção geológica.

Figura 2: Relação de textura e porosidade



Fonte: Freeze e Cherry (2017).

Figura 3: Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais



Fonte: Teixeira et al. (2000).

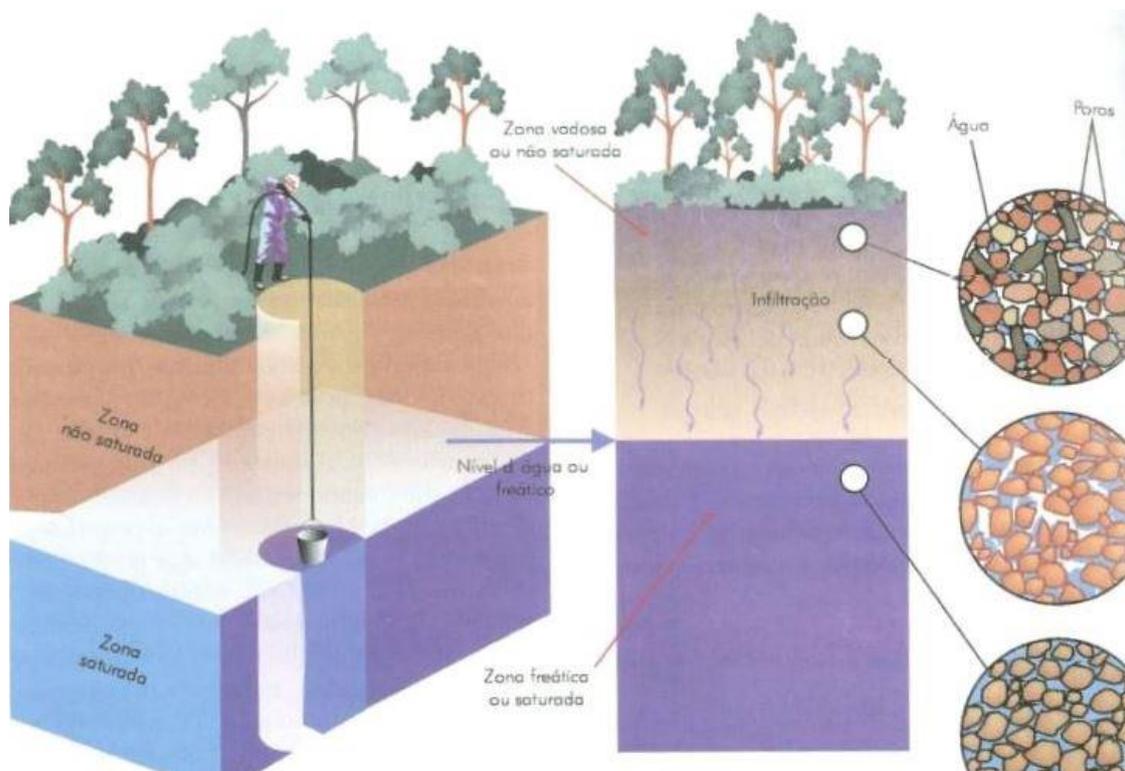
A disponibilidade de água subterrânea tem como principal fator determinante a permeabilidade, que é a capacidade do solo em permitir o fluxo de água através dos poros no meio; esta depende da porosidade, do tamanho dos poros, do tamanho das fraturas e das suas interconexões (WICANDER E MONROE, 2009). Como exemplo da relação permeabilidade e porosidade segundo Teixeira *et al.*, (2000):

- a) Sedimento argiloso: apesar de possuir alta porosidade, é praticamente impermeável, pois os poros são muito pequenos e a água fica presa por adsorção.
- b) Derrames basálticos: a rocha em si não tem porosidade alguma, mas possui abundantes fraturas abertas e interconectadas, como disjunções colunares (juntas de resfriamento), podem apresentar alta permeabilidade (Teixeira et al., 2000).

À medida que a água penetra no solo vai preenchendo os espaços – poros - disponíveis. Na região mais próxima da superfície os poros são preenchidos de água e ar, sendo chamada de zona não saturada, também chamada de vadosa ou zona de aeração. Nesta região a pressão atmosférica é maior que a pressão da água porosa. Aprofundando no solo, variando de acordo com o aspecto topográfico e tipo de rocha, tem-se a região em que todos os poros são preenchidos com água, formando a zona livre para águas subterrâneas; nesta região, a pressão da água é maior que a pressão atmosférica devido a profundidade, o que ocasiona a inexistência de moléculas de ar; sendo denominada zona saturada ou freática (FITTS, 2015).

Entre as zonas saturadas e não saturadas tem-se a superfície freática, ou nível da água subterrânea, que é facilmente identificado na prática, ao se perfurarem poços, nos quais a altura da água marca a posição do nível da água (TEIXEIRA *et al.*, 2000). A Figura 4 a seguir, apresenta a distribuição da água no solo.

Figura 4: Distribuição de água no solo



Fonte: Teixeira *et al.* (2000).

5.1.2 Aquíferos

Os aquíferos são, segundo Fitts (2015), uma camada geológica permeável na zona saturada, que irá armazenar e transmitir volumes significativos de água subterrânea passíveis de serem exploradas pela sociedade. Ao contrário do conceito de aquífero, as unidades geológicas saturadas e com grandes quantidades de água absorvida lentamente, mas incapazes de transmitir um volume significativo de água com velocidade suficiente para abastecer poços ou nascentes, por serem rochas relativamente impermeáveis, são chamadas de aquícludes.

As unidades geológicas que não apresentam poros interconectados e não absorvem e nem transmitem água são denominadas de aquífugos. E as camadas que são suficientemente permeáveis para transmitir água, ainda que lentamente, mas não apresenta produção suficiente para o seu aproveitamento a partir de poços são os aquítarde (Freeze e Cherry, 2017).

Os termos aquíferos e aquítarde exprimem comparativamente a capacidade de produção de água por unidades rochosas, onde a unidade produtiva de água é o aquífero e a menos produtiva ao aquítarde. Para exemplificar essa questão temos: numa sequência de estratos intercalados de arenitos e siltitos; os siltitos são menos permeáveis que os arenitos, correspondem ao aquítarde. Em outra sequência formada de siltitos e argilitos, os siltitos representam os aquíferos, por serem mais permeáveis que os argilitos. Logo, aquítarde corresponde à camada ou unidade geológica relativamente menos permeável numa determinada sequência estratigráfica (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Segundo Teixeira *et al.* (2000), são classificados como bons aquíferos as camadas que possuem média a alta condutividade hidráulica, como sedimentos inconsolidados (por exemplo, cascalhos e areias), rochas sedimentares (por exemplo, arenitos, conglomerados e alguns calcários), além de rochas vulcânicas, plutônicas e metamórficas com alto grau de fraturamento.

Os aquíferos são classificados quanto a porosidade e a pressão de confinamento da água. De acordo com os três tipos fundamentais de porosidade, identificam-se aquíferos de porosidade intergranular (ou granular), de fraturas e de condutos (cárstico). Em relação a pressão da água, os aquíferos podem ser livres e confinados.

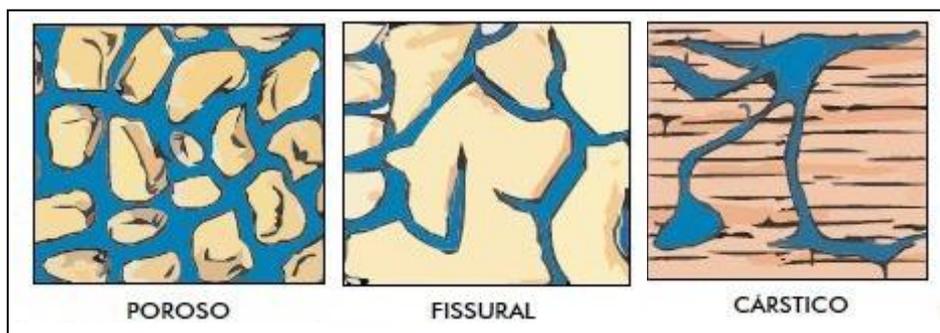
Conforme a porosidade, os aquíferos granulares normalmente possuem água armazenada e circulação desta nos poros (ROSSI, 2017); dá-se no regolito e em

rochas sedimentares clásticas com porosidade primária. Como exemplo de excelente aquífero deste tipo, tem-se os arenitos, entretanto a produtividade em água dos arenitos diminui com o seu grau de cimentação, como é o caso de arenitos silicificados, quase em permeabilidade intergranular (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Os aquíferos fissurais ou fraturados formam-se em consequência de deformação tectônica, quando processos de dobramentos e falhamentos geram sistemas de fraturas; que posteriormente sofrem aberturas submilimétricas, que permitem a entrada e fluxo de água, pela expansão das rochas devido ao alívio de carga litostática causado pelo soerguimento regional e erosão das rochas subjacentes. O fluxo de água neste tipo de aquífero se instala quando as fraturas que compõem o sistema estão interconectadas. As fraturas do tipo disjunção colunar em rochas vulcânicas, como nos derrames de basaltos, podem ser geradas durante as etapas de resfriamento e contração, possibilitando que estas rochas se tornem posteriormente importantes aquíferos (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Os aquíferos de condutos ou cársticos, caracterizam-se pela porosidade cárstica, constituída por uma rede de condutos, onde as fraturas surgem devido à dissolução do carbonato pela água, com diâmetros milimétricos a métricos, que podem atingir aberturas tão grande sendo considerados verdadeiros rios subterrâneos (ROSSI, 2017). Apresentam grandes volumes de água, mas altamente vulneráveis à contaminação, devido à baixa capacidade de filtração deste tipo de porosidade. Esses ocorrem em situações transitórias entre os tipos de aquíferos, como por exemplo, em regiões calcárias, onde aquíferos de fraturas passam a aquíferos cársticos; esses por sua vez são reflexo da variedade litológica e estrutural de seqüências estratigráficas (TEIXEIRA *et al.*, 2000). A Figura 5 representa a porosidade da classificação dos aquíferos.

Figura 5: Classificação dos aquíferos quanto a porosidade



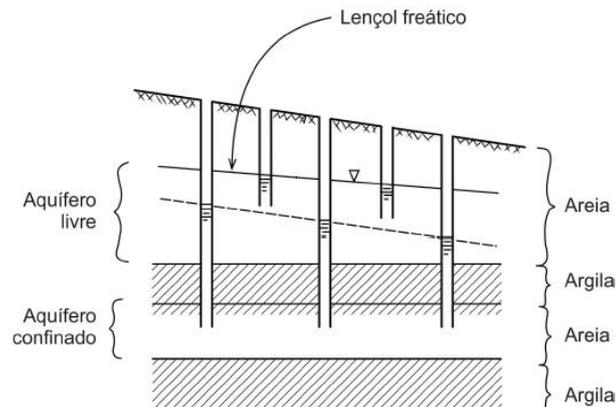
Fonte: MMA (2007).

Quanto a pressão da água, os aquíferos são classificados em livres e confinados, a Figura 6, representa a esquematização dos aquíferos quanto a pressão da água. Os aquíferos livres, são demarcados pelo nível freático em seu topo, estando em contato com a atmosfera; localizando-se, normalmente, alguns metros a poucas dezenas de metros da superfície, associados ao regolito (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

É constituído por formação geológica permeável e superficial, totalmente aflorante em toda a sua extensão, e limitado na base por uma camada impermeável. A superfície superior da zona saturada está em equilíbrio com a pressão atmosférica, com a qual se comunica livremente. Esses passam pelo processo de recarga direta, quando o nível da água varia segundo a quantidade de chuva. Este tipo é o mais comum e mais explorados pela população, sendo também os mais vulneráveis a contaminação, devido a sua localização mais superficial (ABAS, s.d.).

Já os aquíferos confinados são constituídos por uma formação geológica permeável, confinada entre duas camadas impermeáveis ou semipermeáveis. A pressão da água no topo da zona saturada é maior do que a pressão atmosférica naquele ponto, o que faz com que a água ascenda no poço para além da zona aquífera. Neste tipo de aquífero tem-se o processo de recarga indireta e estão em locais onde ocorrem rochas sedimentares profundas; a sua recarga por meio de água da chuva é limitada a locais onde a formação rochosa aflora à superfície. Um fenômeno presente neste tipo de aquífero é o artesianismo, que devido à pressão que a água é submetida, forma-se poços jorrantes (ABAS, s.d.), o que ocasiona esse fenômeno é a penetração da água no aquíferos confinado em direção a profundidade crescente, onde sofre a pressão hidrostática crescente da coluna de água entre a zona de recarga e um ponto em profundidade (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Figura 6: Esquematisação dos aquíferos quanto a pressão da água



Fonte: Freeze e Cherry (2017).

5.2 Poços para captação das águas subterrâneas

A perfuração de poços é o meio mais comum de acesso dos seres humanos às águas subterrâneas. Poços são aberturas escavadas manualmente, como são feitas as cacimbas, poços amazonas e cisternas, ou por meio de equipamentos, como os poços tubulares profundos (TEIXEIRA *et al.*, 2000).

Segundo Freeze e Cherry (2017), a classificação de poços se dá por base no método de perfuração destes; se escavados à mão, introduzidos por percussão ou jateamento sob a forma de poços-ponteira, ou escavados por trado manual ou por uma sonda perfuratriz. O melhor método a ser utilizado na construção de um poço varia de acordo com a finalidade do poço, o ambiente hidrogeológico, a quantidade de água necessária, a profundidade, o diâmetro previsto e fatores econômicos.

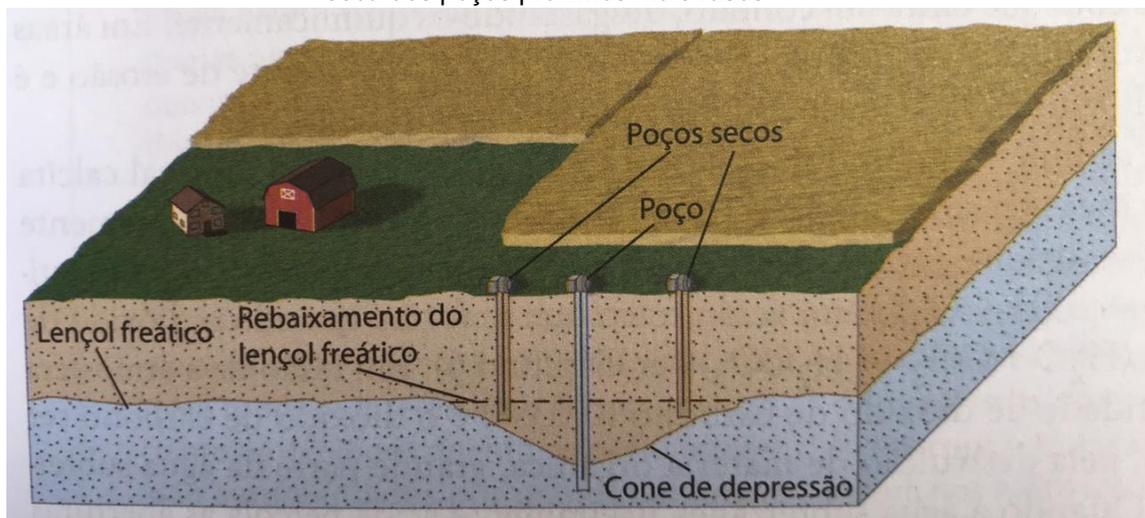
Os poços escavados, perfurados por trado, por jateamento ou poços-ponteira possuem profundidades mais rasas, encontram-se em depósitos não consolidados e suas produções são relativamente baixas. Para poços mais profundos e de maior produção em depósitos não consolidados, e para todos os poços em rocha, a perfuração mecânica é a opção viável, ocorrendo por meio de sonda percussora, rotativa e rotativa reversa.

Nos aquíferos confinados, os poços tubulares profundos podem apresentar o nível de água acima da parte superior do aquífero, e esse poço passa a ser chamada de artesiano e o aquífero se diz estar sob condições artesianas. E nos casos, onde, a água fica acima da superfície do terreno, o poço denomina-se de fluxo artesianos, e o aquífero está sob condições de artesianismo (FREEZE E CHERRY, 2017). Estes casos

submetem a prospecção a situação de se quer necessidade de um equipamento de bombeamento para a retirada da água (ROSSI, 2017).

A zona saturada ao ser penetrada pela perfuração do poço tem-se que o nível d'água no interior do poço atingirá o nível do lençol freático. À medida que a água é bombeada, o lençol freático da área circundante do poço é rebaixado, formando um cone de depressão, conforme mostra a Figura 7. Este por sua vez, se forma à medida que a captação da água possui velocidade maior à velocidade de penetração da água no lençol, causando o rebaixamento do lençol na área do poço (WICANDER E MONROE, 2009).

Figura 7: Cone de depressão formado pela retirada com velocidade excedente de água, ocasionando a seca dos poços próximos mais rasos



Fonte: Wicander e Monroe (2009).

A construção de poços deve atender as especificações de engenharia geológica, hidráulica e sanitária, visto que um poço mau construído é a fonte mais relevante de poluição ou degradação da qualidade das águas subterrâneas. De acordo com a realidade brasileira a degradação dos mananciais é desencadeada por variados fatores: (1) falta de saneamento, (2) falta de coleta ou disposição adequada do lixo, (3) vazamento de tanques de combustíveis, (4) caóticas condições de uso e ocupação do solo, (5) uso de métodos de irrigação pouco eficientes.

No Brasil, quase sempre os poços perfurados são em aquíferos freáticos, rasos, que é o primeiro nível de acumulação de água no solo, e conseqüentemente, as interações de fluxos de líquidos superficiais e subterrâneos são mais intensas, situação

que agrava ainda mais diante dos fatores anteriormente citados. Um ponto contraditório a ser levantado sobre o uso e ocupação do solo no país, é que este é um dos motivos pelo qual o uso das águas subterrâneas tem aumentado, principalmente para abastecimento público e consumo humano (visto que as águas superficiais não são aptas para consumo até que passem por tratamento avançado), entretanto, é também um dos fatores de degradação da qualidade das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2008)

5.3 Importância da indissociabilidade da gestão das águas superficiais e subterrâneas.

A Lei Federal nº 9.433 (BRASIL, 1997) estabelece que a bacia hidrográfica é a unidade territorial de gestão dos recursos hídricos. Nesta deve ser implementada a Política Nacional de Recursos Hídricos e deve acontecer a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

As águas superficiais e subterrâneas são parte do mesmo ciclo hidrológico devendo possuir gestão integrada, onde a água subterrânea é uma parcela da precipitação que infiltra na superfície, circula pelo subsolo das bacias hidrográficas e contribui para o escoamento básico dos rios nos períodos de estiagem. Entretanto o que estabelece na Lei nº 9.433/97 representa um grande desafio na gestão do recurso hídrico subterrâneo, visto que os aquíferos subterrâneos não obedecem aos limites das bacias hidrográficas estabelecidas como unidade de gestão. Essas por sua vez são definidas com base nos aspectos topográficos e fluxos de águas superficiais, ignorando a caracterização dos aspectos das águas subterrâneas.

Na legislação brasileira tem-se normativos que regem a gestão conjunta entre águas superficiais e subterrâneas, enquanto outros fazem distinção entre elas (apresentadas à frente). Sendo ideal que a regulamentação seja incorporada em um só instrumento legal, considerando as interrelações do uso conjunto das águas superficiais e subterrâneas.

A gestão dos recursos hídricos deve incluir as duas fontes de água em um sistema único levando em consideração as particularidades de cada uma, visto que as tomadas de decisão sobre uma fonte irão afetar também a outra. Dentre essas particularidades, tem-se por exemplo, segundo Rebouças (2002):

(a) Diferentes tempos de renovação – a renovação das águas retiradas dos aquíferos não se faz na mesma velocidade da extração das águas superficiais resultando na exploração de parte das reservas permanentes, com risco de exaustão, quando a captação não é devidamente monitorada.

(b) Evaporação, facilidade de acesso e contaminação – onde as águas superficiais estão sujeitas a este processo. (REBOUÇAS, 2002)

Logo, a gestão conjunta dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos se faz essencial de modo a integrar as legislações específicas, buscar um melhor equilíbrio e promover a gestão integrada dos recursos.

5.4 Recargas e reservas de aquíferos

Segundo Dewandel *et. al.*, (2002) as vazões dos cursos d'água são influenciadas pelos regimes de recarga e descarga de águas subterrâneas. O processo de recarga é definido como o fluxo descendente de água, por meio da infiltração, que atinge a zona não saturada sob forças gravitacionais, adicionando um volume de água extra ao aquífero, sendo um quantitativo de água que alimenta a reserva subterrânea, sendo essa permanente ou renovável; e originada de fontes naturais, provenientes de chuva, rios e lagos, ou de fontes não-naturais, provenientes de irrigação, vazamentos da rede de distribuição de água, coleta de esgoto ou fossas.

O processo de recarga natural acontece das seguintes formas, segundo Lerner *et. al.* (1990):

(a) Recarga direta: a água oriunda da chuva, por meio da infiltração, percorre da zona não- saturada até o nível de água do aquífero. Entretanto, nem todo volume de água infiltrado atinge o aquífero, parte pode ficar concentrada na zona não-saturada ou pode ser retirada do solo por meio da evapotranspiração;

(b) Recarga indireta: água também somada ao aquífero por meio do processo de infiltração, entretanto esta é originada de corpos superficiais, rios e lagos;

(c) Recarga localizada: quantitativo de água que atinge o aquífero, originado de acumulações pontuais de água advindas das precipitações. (LERNER *et. al.*,1990)

Os processos que ocorrem na superfície do terreno, no percurso da água entre a superfície até o nível d'água e no próprio aquífero, são fatores que influenciam no

processo de recarga. Quanto a recarga direta, os principais controles são as propriedades da zona de umidade do solo e da zona não saturada, e a habilidade do aquífero em aceitar o aporte de água; quanto a recarga indireta, as relações entre aquíferos e rios é o principal fator de influência. Lerner *et. al.* (1990), mostra que os principais fatores de influência de recarga são:

- I. Ambiente externo: clima, topografia, formação de poças de água, evapotranspiração, uso e ocupação do solo, escoamento e precipitação (intensidade, magnitude, distribuição espacial e duração);
- II. Aquífero: capacidade de armazenamento de água e profundidade do nível de água;
- III. Irrigação: perda d'água oriunda de canais, frequência, preparação do terreno, forma de aplicação;
- IV. Rio: se são efluentes ou influentes em relação ao aquíferos, e se entram ou saem da área de estudo;
- V. Solo: espessura, umidade, características hidráulicas, profundidade das zonas de raízes, composição;
- VI. Zona não-saturada: condutividade hidráulica, mecanismo de fluxo, e heterogeneidade.

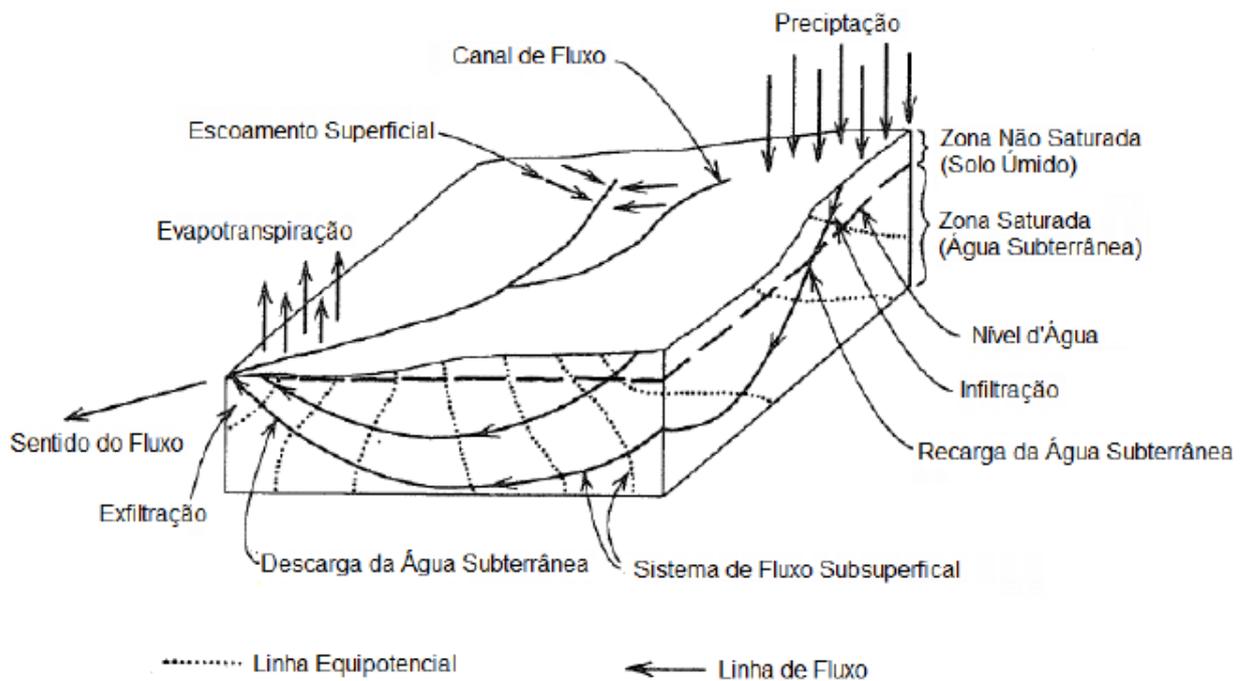
O processo de recarga é influenciado pela combinação dos fatores supracitados; em uma área cujo clima, padrão de chuva, geologia e cobertura superficial são semelhantes, a topografia pode ser o fator dominante de influência. Em estudo realizado, Schilling (2009) aborda que, em uma seção cujo desnível é de 20 metros, a recarga no topo foi de 24,3% da precipitação, enquanto na planície foi de 44%. Os processos de recarga e a sua distribuição no tempo e no espaço sofrem grandes influência pelo clima, sendo grandes as diferenças entre climas úmidos e áridos por exemplo. Os processos de recarga são maiores em áreas não vegetadas do que em regiões vegetadas, em razão da evapotranspiração; assim como áreas de pastagem e de uso agrícola também apresentam taxas de recarga maior que áreas ocupadas por bosques e arbustos, segundo Scanlon (2002).

Na Figura 8, tem-se a esquemática do ciclo hidrológico das partes atmosféricas e superfície terrestre, possibilitando a visibilidade da interação e dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, e a recarga dos aquíferos. O fluxo de entrada se dá por meio da precipitação, onde os destinos são: um canal de fluxo, o escoamento

superficial que leva algum canal ou reservatório de água e a infiltração. A parcela de água infiltrada atinge em primeiro momento a camada de solo, zona não saturada, até atingir a superfície do nível freático, seguindo para a zona saturada de água subterrânea; o sentido desse fluxo permite a recarga dos reservatórios de água subterrânea e o volume passa a ser parte da dinâmica do fluxo subsuperficial.

O fluxo de saída representado na figura, a evapotranspiração, demonstra a diminuição dos níveis de águas superficiais; neste momento os fenômenos da descarga da água subterrânea e exfiltração, que é quando a o fluxo da água subterrânea direciona a superfície, irá garantir e manter níveis de água dos componentes superficiais. Ao se ter conhecimento do escoamento básico dos rios, é possível perceber a importância da recarga dos aquíferos.

Figura 8: Interação de águas superficiais e subterrâneas



Fonte: Freeze e Cherry (2017).

Os aspectos que interferem no processo de recarga, influenciam também na escolha do método mais adequado de estimativa de recarga para cada área, e dão uma dimensão da complexidade e das incertezas envolvidas nesta estimativa. O processo de recarga direta é mais simples de ser avaliada, pois os processos envolvidos são mais fáceis de serem identificados e definidos; entretanto este é mais importante para áreas úmidas; para climas áridos, os processos de recarga indireta são mais importantes. O estudo da recarga é uma metodologia iterativa, devem ser

realizados estudos com mais de um método e outros dados, para que as estimativas sejam comparadas (LERNER *et. al.* 1990).

O processo de recarga aquífera pode ser avaliado pelas seguintes metodologias:

I) Métodos Diretos

- Balanço hídrico (formulação empírica);
- Modelos Físicos (balanço entre águas subterrâneas e superficiais);
- Modelos de circulação da zona saturada (modelos determinísticos);
- Traçadores (químicos, bacteriológicos, orgânicos e isotópicos).

II) Métodos Indiretos (zona saturada)

- Oscilação Piezométrica;
- Lei Darcy.

Segundo Barbosa e Mattos (2008) os métodos diretos retratam a recarga como um mecanismo de percolação da água entre o solo e o aquífero, utilizando parâmetros como a variação de umidade no solo, evapotranspiração (ET) e caudal de escoamento superficial, para obter uma estimativa da recarga. Nos métodos indiretos, os indicadores da recarga efetiva são por informação piezométrica; quando o nível piezométrico apresenta saldo positivo de variações tem-se processo de recarga possível de quantificar, com base em dados como Coeficiente de armazenamento (S), o Coeficiente de Recessão (CR - período entre o episódio de precipitação e a resposta do aquífero), a Condutividade hidráulica (K).

As reservas se traduzem pelo volume total de água armazenada em um sistema aquífero (FEITOSA *et al.*, 2008). Para Costa (1998) as reservas de água subterrâneas podem ser:

- (a) Reserva permanente – Volume hídrico acumulado no meio aquífero, em função da porosidade eficaz e do coeficiente de armazenamento, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica.
- (b) Reserva renovável: Volume hídrico acumulado no meio aquífero, em função da porosidade eficaz ou do coeficiente de armazenamento e variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exutórios. (COSTA, 1998)

Outros conceitos importantes acerca de reservas aquíferas levantados por Costa (1998), são sobre a potencialidade, disponibilidade virtual e disponibilidade instalada. A potencialidade é o volume hídrico que pode ser extraído, em um espaço de tempo das reservas permanentes. A disponibilidade virtual é a quantidade máxima da potencialidade que pode ser aproveitada do aquífero, sem causar danos. E a disponibilidade instalada, consiste no volume hídrico que pode ser extraído para garantir a operação dos poços existentes.

A partir desses conceitos, Costa (1998) aborda que a parcela utilizável das reservas permanentes, é estimada em 10 a 30% ao longo de 50 anos, para que não sejam causados prejuízos ao aquífero. O monitoramento do nível freático utilizando dados de disponibilidade instalada, pode ser realizado por meio dos poços perfurados, que permite avaliar a capacidade de recarga dos aquíferos, a partir da diferença do nível mais alto medido e o nível mais baixo (DORA, 2013).

5.5 Contextualização legal dos Recursos Hídricos

5.5.1 Arcabouço nacional

Possuindo infinitos usos e sendo o recurso fundamental à vida e desenvolvimento, a água vem se tornando um bem cada vez mais escasso. Ainda que seja abundante no planeta terra, a grande maioria da água se encontra em qualidade e estado que a torna inviável para consumo, tornando-se, então, um recurso natural com necessidade de gestão para evitar a escassez, exigindo-se atitudes sociais para seu uso em níveis sustentáveis.

A Carta de Salvador, de 1987, constitui-se os princípios básicos da legislação brasileira de águas. Esta, realça o uso múltiplo e integrado da água, a gestão compartilhada, com divisão de custos e institucionalização de decisões entre as partes. O princípio da gestão descentralizada objetiva garantir adequação das decisões às diversidades e peculiaridades regionais, e a participação de todos, incluindo a sociedade, ocasiona um sistema de gerenciamento nacional integrando estados, municípios e população (CARVALHO *et al.*, 2008).

A proteção legal das águas brasileiras, até a criação da Constituição Federal em 1988, ocorria de forma indireta, com normas de caráter econômico, sanitário ou relacionado ao direito de propriedades e acessória a outros interesses. A estrutura legal definida a partir da Constituição Federal de 1988, indica a implantação de um

Sistema Nacional de Recursos Hídricos e a divisão do domínio das águas entre a União e os estados.

Outros aspectos da gestão de recursos hídricos foram apresentados em 1989, pela Carta de Foz do Iguaçu, que enuncia sobre: aspectos quantitativos e qualitativos do gerenciamento integrado, levando em consideração as fases e estados da água no ciclo hidrológico; determinando a bacia hidrográfica como unidade de gerenciamento; e a atribuição de valor a água, assim como a visibilidade desta como recurso limitado, passando a ser considerada bem econômico; e o estabelecimento da outorga como instrumento de gestão e disciplina do uso do recurso (CARVALHO *et al.*, 2008).

A LEI nº 9.433 (BRASIL, 1997), Lei das Águas, presente na Constituição Federal, indica os instrumentos para a gestão dos recursos hídricos de domínio federal e criação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A Política Nacional de Recursos Hídricos, apresenta todos os fundamentos citados anteriormente, além de estabelecer como prioridade de uso da água o consumo humano e a dessedentação animal.

O Art. 1º da LEI nº 9.433 (BRASIL, 1997) baseia-se em alguns fundamentos como: a água é um bem de domínio público; um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas, de caráter descentralizado e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Essa lei apresenta então, como objetivo, assegurar a disponibilidade de água para as gerações atuais e futuras, com uso racional e preservando sempre o recurso hídrico; tornando assim a gestão dos recursos hídricos democrática.

Ao se atribuir valor econômico a água, a ferramenta de cobrança de uso do recurso hídricos tornou fundamental, garantindo o uso racional do bem e gerando receita para a gestão do recurso pelos fóruns locais. A unidade de gestão das bacias hidrográficas é denominada comitês, que são fóruns em que um grupo se reúne para discutir sobre um interesse comum – o uso d'água na bacia; neste, a sociedade civil que participa não se restringe a usuários, mas integra também entidades de classe, movimentos sociais e ambientalistas, diferentemente da tradição internacional.

A legislação brasileira prevê representação paritária: Estado e sociedade civil, enquanto a estadual é tripartite, isto é, garante igual número aos representantes do estado, dos municípios e da sociedade civil. Define as necessidades de outorga para captar água, lançar efluente, extrair água subterrânea, aproveitamento na geração de

energia e qualquer outro uso que altere o regime, quantidade e qualidade do corpo d'água. A competência da outorga é do Poder Executivo Federal, dos Estados ou do Distrito Federal, e a União pode delegar sua competência.

A lei 9.433/97 propõe a ação integrada no tratamento das águas superficiais e subterrâneas e define a obrigatoriedade da outorga pelo Poder Público, das infrações e penalidades. A Constituição de 1988 deu aos Estados o domínio das águas subterrâneas, levando à discussão sobre a necessidade de legislação federal específica a respeito. O modelo de gestão dos recursos hídricos tem como desafio articular ações do Estado, da Sociedade e do Mercado.

O novo modelo de gestão envolve um processo contínuo de negociação, que tem o desafio tanto de responder a questões contingenciais objetivas como construir cenários desejados. Orienta-se pelo princípio da “subsidiariedade” (Correia, 1998, IN: COSTA, 2003), o qual define que toda ação passível de ser decidida e implementada em nível local não deve ser submetida à decisão de nível hierárquico superior, determinando assim um ajuste mais adequado à esfera de implementação e acompanhamento.

É isto que garante que o modelo vá sendo construído “de baixo para cima” e que possa dar respostas criativas às especificidades de cada local, por reduzir os custos de informação e identificar prioridades dentro do orçamento existente. Para COSTA (2003): “a gestão compartilhada significa qualificar as instituições e organização original com suas atribuições precípua (regulatória e de planejamento), criando dispositivos adicionais para uma gestão conjugada, pautada por um patamar mais avançado de articulação intergovernamental e intersetorial e pela incorporação de interesses e agentes particulares (empreendedores e sociedade civil organizada), parceiros potenciais de objetivos pactuados.” COSTA (2002) identifica a função específica de cada uma.

O espaço de atuação do Estado é restrito a formulação de políticas de comando e controle, no exercício das suas funções de disciplinamento legal e fiscalização. Instrumentos de comando e controle que atuem de forma descentralizada têm sido desenvolvidos pelos mercados através de certificações que estimulam tecnologias ambientalmente adequadas.

5.5.2 Arcabouço estadual - Minas Gerais

O estado foi um dos pioneiros na elaboração do Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), pela instituição da Lei Estadual nº 11.504, que dispunha sobre a política e elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERHMG), a cobrança pelo uso dos recursos hídricos e a composição do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH). Entretanto, esta lei foi revogada em 1999, quando instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SEGRH) (IGAM, 2014).

Em Minas Gerais a gestão das águas é realizada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, responsável pela implementação da Política Estadual de Recursos Hídricos. A Lei nº 13.199 (MINAS GERAIS, 1999) tem como finalidade garantir a gestão das finalidades de uso da água, as quantidades e qualidades das fontes de recurso hídrico, de modo a garantir o recurso para as atuais e futuras gerações, desse modo fundamenta:

- I – o direito de acesso de todos aos recursos hídricos, com prioridade para o abastecimento público e a manutenção dos ecossistemas;
- II – o gerenciamento integrado dos recursos hídricos com vistas ao uso múltiplo;
- III – o reconhecimento dos recursos hídricos como bem natural de valor ecológico, social e econômico, cuja utilização deve ser orientada pelos princípios do desenvolvimento sustentável;
- IV – a adoção da bacia hidrográfica, vista como sistema integrado que engloba os meios físico, biótico e antrópico, como unidade físico-territorial de planejamento e gerenciamento;
- V – a vinculação da cobrança pelo uso dos recursos hídricos às disponibilidades quantitativas e qualitativas e às peculiaridades das bacias hidrográficas;
- VI – a prevenção dos efeitos adversos da poluição, das inundações e da erosão do solo;
- VII – a compensação ao município afetado por inundação resultante da implantação de reservatório ou por restrição decorrente de lei ou outorga relacionada com os recursos hídricos;
- VIII – a compatibilização do gerenciamento dos recursos hídricos com o desenvolvimento regional e com a proteção do meio ambiente;
- IX – o reconhecimento da unidade do ciclo hidrológico em suas três fases: superficial, subterrânea e meteórica;
- X – o rateio do custo de obras de aproveitamento múltiplo, de interesse comum ou coletivo, entre as pessoas físicas e jurídicas beneficiadas;
- XI – a gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade;
- XII – a descentralização da gestão dos recursos hídricos;
- XIII – a participação do poder público, dos usuários e das comunidades na gestão dos recursos hídricos. (MINAS GERAIS, 1999)

A gestão das águas superficiais e subterrâneas, embora sendo parte de mesmo ciclo natural, estão regulamentadas em legislações diferentes. A Lei nº 13.771 vigente em Minas Gerais desde dezembro de 2000 regula sobre administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado (MINAS GERAIS, 2000).

A longo do tempo, alterações na realidade das bacias hidrográficas, como nos aspectos referentes a uso e ocupação do solo, clima, vegetação e interesse social; foram sendo estabelecidas novas legislações complementarem, que promovem uma melhor estruturação do gerenciamento dos recursos hídricos e seus organismos, sobre os aspectos da Lei nº 13.199. Quanto a gestão dos recursos hídricos e os órgãos competentes a ela, institui-se as legislações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Legislações sobre gestão de Recursos Hídricos, em Minas Gerais

LEGISLAÇÃO	CONTEXTO
Lei Federal 9.433, de 08 de janeiro de 1997	Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.
Lei Federal 8.666, de 21 de junho de 1993	Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências.
Lei 13.199, de 29 de janeiro de 1999	Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências.
Decreto 41.578, de 08 de março de 2001	Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos.
Decreto 44.046, de 13 de junho de 2005	Regulamenta a cobrança pelo uso de recursos hídricos de domínio do Estado.
Decreto 47.633, de 12 de abril de 2019	Dispõe sobre os contratos de gestão firmados entre o Estado, representado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas, e as Agências de Bacias Hidrográficas ou as entidades sem fins lucrativos a elas equiparadas, relativos à gestão de recursos hídricos de domínio do Estado e dá outras providências
Decreto Estadual 46.830, de 14 de setembro de 2015	Estabelece o regulamento do Processo Administrativo de Constituição do Crédito Estadual não Tributário decorrente de danos ao erário apurado em prestação de contas de transferências de recursos financeiros mediante parcerias – PACE - Parcerias –, no âmbito da Administração Pública direta, autárquica e fundacional do Poder Executivo.
Decreto Estadual 45.242, de 11 de dezembro de 2009	Regulamenta a gestão de material, no âmbito da Administração Pública Direta, Autárquica e Fundacional do Poder Executivo.
Decreto Estadual 46.319, de 26 de setembro de 2013	Dispõe sobre as normas relativas à transferência de recursos financeiros da administração pública do poder executivo estadual, mediante convênio de saída.
Decreto Estadual 47.553, de 07 de dezembro de 2018	Regulamenta a qualificação de pessoa jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, como Organização Social e a instituição do contrato de gestão

Fonte: IGAM (2021).

Tabela 1: Legislações sobre gestão de Recursos Hídricos, em Minas Gerais (Continuação)

LEGISLAÇÃO	CONTEXTO
Deliberação Normativa CERH n.º 19, de 28 de junho de 2006	Regulamenta o art. 19, do Decreto 41.578/2001 que dispõe sobre as agências de bacia hidrográfica e entidades a elas equiparadas e dá outras providências.
Deliberação Normativa CERH n.º 22, de 25 de agosto de 2008	Dispõe sobre os procedimentos de equiparação e de desequiparação das entidades equiparadas à agência de bacia hidrográfica e dá outras providências.
Deliberação Normativa CERH n.º 23, de 12 de setembro de 2008	Dispõe sobre os contratos de gestão entre o Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM e as entidades equiparadas a Agências de Bacias Hidrográficas relativas à gestão de recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais.
Deliberação CERH-MG nº 215, de 15 de dezembro de 2009	Aprova a indicação do Agente Financeiro e do Agente Técnico para a cobrança pelo uso de recursos hídricos do domínio do Estado de Minas Gerais.
Deliberação CERH-MG nº 216, de 15 de dezembro de 2009	Aprova o Manual Financeiro e o Manual Técnico da cobrança pelo uso de recursos hídricos do domínio do Estado de Minas Gerais
Manual de Procedimentos Técnicos para Aplicação de Recursos da Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos	Estabelece normas, condições e procedimentos para aplicação de recursos financeiros provenientes da Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos
Portaria IGAM nº 52, de 25 de outubro de 2019	Estabelece procedimentos e normas para aplicação dos recursos, prestação e deliberação das contas com recurso da cobrança pelo uso de recursos hídricos, no âmbito das Agências de Bacias Hidrográficas e das Entidades a elas equiparadas do Estado de Minas Gerais e dá outras providências
Portaria IGAM nº 60, de 14 de novembro de 2019	Estabelece normas relativas aos procedimentos de seleção e de contratação de fornecedores e de pessoal para as entidades equiparadas às Agências de Bacia Hidrográficas do Estado de Minas Gerais e dá outras providências.
Portaria IGAM nº 11, de 05 de fevereiro de 2020	Altera o artigo 66 da Portaria IGAM nº 60, de 14 de novembro de 2019, que estabelece normas relativas aos procedimentos de seleção e de contratação de fornecedores e de pessoal para as entidades equiparadas às Agências de Bacia Hidrográficas do Estado de Minas Gerais e dá outras providências.
Portaria IGAM nº 60, de 14 de novembro de 2019 (Compilado)	Estabelece normas relativas aos procedimentos de seleção e de contratação de fornecedores e de pessoal para as entidades equiparadas às Agências de Bacia Hidrográficas do Estado de Minas Gerais e dá outras providências.

Fonte: IGAM (2021).

A diversidade biológica, física e socioeconômica do estado de Minas Gerais configura desafios para a gestão dos recursos hídricos, visto que as particularidades de cada bacia devem ser levadas em consideração para implementação das legislações supracitadas.

A gestão é dividida entre 5 bacias principais: dos rios São Francisco, Grande, Paranaíba, Doce e Jequitinhonha; drenando cerca de 90% do território estadual. Essas bacias foram divididas administrativamente em 36 UPGRH's, para facilitar a gestão e implementação das ferramentas, adequando-as a realidade local; e para cada uma dessas UPGRH's existe um comitê de Comitê de Bacia Hidrográfica, que atua no

gerenciamento das águas de forma descentralizada, integrada e participativa (IGAM, 2014).

5.5.3 Arcabouço legal sobre gestão de águas subterrâneas

Diante da situação do aumento da utilização da água subterrânea, na maioria das vezes de forma inconsciente, foram estabelecidas diversas leis a fim de gerir o recurso hídrico nacional, e evitar então uma (maior) crise futura. O gerenciamento do recurso hídrico subterrâneo se caracteriza por apresentar legislações recentes, e ainda em fase de implementação no país; a Tabela 2 apresenta as principais legislações federais sobre as águas subterrâneas.

Tabela 2: Legislações federais sobre gestão de águas subterrâneas

ANO / RESOLUÇÃO	ANO / LEGISLAÇÃO
1967	Decretado o Código de Mineração que classifica entre as jazidas minerais as águas subterrâneas e especifica que elas serão regidas por leis especiais.
Resolução 09/2000	Institui a Câmara Técnica Permanente de Águas Subterrâneas e estabelece suas competências
Resolução 013/2000	Estabelece diretrizes para a implementação do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
Resolução 015/2001	Estabelece diretriz para a gestão integrada das águas subterrâneas
Resolução 016/2001	Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos
Resolução 022/2001	Orienta estudos e informações sobre águas subterrâneas para elaboração dos planos de recursos hídricos
2005	A criação da Resolução CONAMA 357 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes para o enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, revoga a Resolução CONAMA 20/86.
2006	Decreto lei n°. 5 776 define normas e planos políticos estratégicos de gestão de águas fronteiriças.
Resolução 065/2006	Estabelece diretrizes de articulação dos procedimentos para a obtenção da outorga de direito de uso de recursos hídricos com os procedimentos de licenciamento ambiental
Resolução 091/2008	Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos
Resolução 092/2008	Estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro.
Resolução 107/2010	Estabelecem diretrizes e procedimentos para o planejamento, instalação e operação da Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo das águas subterrâneas.

Fonte: Nogueira (2010) (Adaptado).

A Resolução nº. 16 do CNRH de 8 de maio de 2001, aborda a outorga como um ato administrativo onde a autoridade outorgante faculta ao outorgado o direito de uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato, que obrigatoriamente seguia as restrições legislativas específicas vigentes. E as diretrizes e procedimentos para obtenção da outorga de direito de uso

de recursos hídricos está prevista na Resolução 65 do CNRH de 2006 (NOGUEIRA, 2010).

Os aspectos sobre a preservação e conservação dos aquíferos, como também a exploração de água subterrânea é descrita na Resolução CNRH nº. 92/2008. Esta aborda os princípios de prevenção contra processos de super exploração, poluição e contaminação de aquíferos, e responsabiliza os órgãos gestores de promoverem estudos hidrológicos que visam mapear áreas de recarga dos aquíferos, identificar as potencialidades, disponibilidades e vulnerabilidades para devida utilização das águas subterrâneas, instituindo áreas de restrição e controle de águas subterrâneas.

A resolução nº. 107/2010 do CNRH, implementa os procedimentos para o planejamento, instalação e operação da Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas. Onde a Agência Nacional de Águas (ANA), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), e os órgãos estaduais responsáveis coordenará a implantação e manutenção desta rede, e inserção dos dados coletados no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e como deve realizar-se o monitoramento e instalação destes poços (NOGUEIRA, 2010).

Em âmbito estadual, a Tabela 3 a seguir apresentam legislações que regem sobre as águas subterrâneas.

Tabela 3: Legislações estaduais sobre gestão de águas subterrâneas

ANO	LEGISLAÇÃO
2000	É criada a Lei 13.771/00 que dispõe sobre a proteção e conservação das águas subterrâneas no domínio do Estado de Minas Gerais
2004	É criada a Deliberação Normativa nº. 09, de 16 de junho de 2004. Define os usos insignificantes: Art. 3º As captações subterrâneas, tais como, poços manuais, surgências e cisternas, com volume menor ou igual a 10 m ³ /dia, serão consideradas como usos insignificantes para todas as Unidades de Planejamento e Gestão ou Circunscrições Hidrográficas do Estado de Minas Gerais. § 1º Estão excluídos do critério do caput a captação através de poços tubulares, dos quais é exigido o instrumento de outorga.
2008	Criada a Deliberação Normativa Conjunta COPAM – CERH 1/2008 que dispõe as mesmas providências da CONAMA 357/2005 para o Estado de Minas Gerais e também revoga a legislação anterior existente (D.N. COPAM 20/86).
2009	Criou-se a Deliberação Normativa que define o uso insignificante de poços tubulares situados nos municípios da região semi-árida de Minas Gerais (D.N. CERH 33/2009).

Fonte: Nogueira (2010) (Adaptado).

A Lei nº 13.771, de 11 de dezembro de 2000, rege sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado e dá outras

providências. Sobre as ferramentas de gestão das águas subterrâneas, a Lei 13.771 (MINAS GERAIS, 2000) estabelece:

I - a sua avaliação quantitativa e qualitativa e o planejamento de seu aproveitamento racional;

II - a outorga e a fiscalização dos direitos de uso dessas águas;

III - a adoção de medidas relativas à sua conservação, preservação e recuperação. (MINAS GERAIS, 2000)

Em busca da efetividade dos métodos de gestão a serem aplicados no estado o órgão se encarregou, a partir da publicação da Lei 13.771 (MINAS GERAIS, 2000), o estabelecimento e a manutenção de cadastramento de poços profundos e demais sistemas de captação de água subterrânea; a criação e implantação de programas visando a conservação e proteção de aquíferos, a fim de garantir qualidade e quantidade do recurso; além de estabelecer um sistema que otimize os processos de implantação da outorga.

Quanto os aspectos de conservação e proteção, a Lei 13.771 (MINAS GERAIS, 2000) submete o uso racional das águas subterrâneas, medidas de controle da poluição e a manutenção de seu equilíbrio físico-químico e biológico em relação aos demais recursos naturais. É desautorizada qualquer tipo de atividade que polua o recurso hídricos, seja a alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas das águas subterrâneas que possa ocasionar prejuízo a saúde, a segurança e ao bem-estar da população e comprometer o seu uso para fins de abastecimento humano e outros.

Outro fator relevante na Lei, diz respeito a responsabilidade do risco poluidor, onde os empreendimentos que ofereçam risco de contaminação, deverão realizar o monitoramento e cumprir encargos a fim da recuperação da qualidade das águas.

Dentre as ferramentas estabelecidas pela Agência Nacional das Águas – ANA, a outorga, fornece o direito de uso da água proveniente de uma fonte específica a ser utilizada para fins conforme rege a lei. Segundo a Resolução nº 16, Art. 1º (CNRH, 2001): a outorga de direito de uso de recursos hídricos é o ato administrativo mediante o qual a autoridade outorgante faculta ao outorgado previamente ou mediante o direito de uso de recurso hídrico, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato, consideradas as legislações específicas vigentes. Essa resolução objetiva controlar o modo de utilização e a quantidade de água utilizada,

sendo o método de controle do estado quanto à captação e lançamentos de efluente em corpos de água e utilizado para questões de captação de água subterrânea.

A Resolução CNRH nº. 91/2008 aborda os procedimentos gerais para a classificação das águas subterrâneas e superficiais, de acordo com a Resolução CONAMA nº. 357/2005 e 396/2008. O enquadramento dos corpos de água é outra ferramenta de gestão prevista pela Lei das águas, que estabelece uma meta de qualidade da água a ser alcançada, ou mantida, em um segmento de corpo de água, de acordo com os usos pretendidos, segundo a resolução nº 357 do CNRH (2005). As águas subterrâneas devem ser enquadradas em diferentes classes (Tabela 4) de qualidade, segundo a Resolução nº 396 do CONAMA (2008), a saber:

Tabela 4: Enquadramento dos corpos de água

CLASSE	USO
Especial	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses destinadas à preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral e as que contribuam diretamente para os trechos de corpos de água superficial enquadrados como classe especial.
1	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que não exigem tratamento para quaisquer usos preponderantes devido às suas características hidrogeoquímicas naturais.
2	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, sem alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais;
3	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, para as quais não é necessário o tratamento em função dessas alterações, mas que podem exigir tratamento adequado, dependendo do uso preponderante, devido às suas características hidrogeoquímicas naturais
4	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, e que somente possam ser utilizadas, sem tratamento, para o uso preponderante menos restritivo
5	Águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses, que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas a atividades que não têm requisitos de qualidade para uso.

Fonte: Resolução nº 396 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (2008) (Adaptado).

6 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

6.1 Bacia do Rio Doce

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce integra a região hidrográfica do Atlântico Sudeste; com área de drenagem de aproximadamente 86.715 km². Caracteriza-se como bacia interestadual, onde 86% de sua área de drenagem pertence ao Estado de

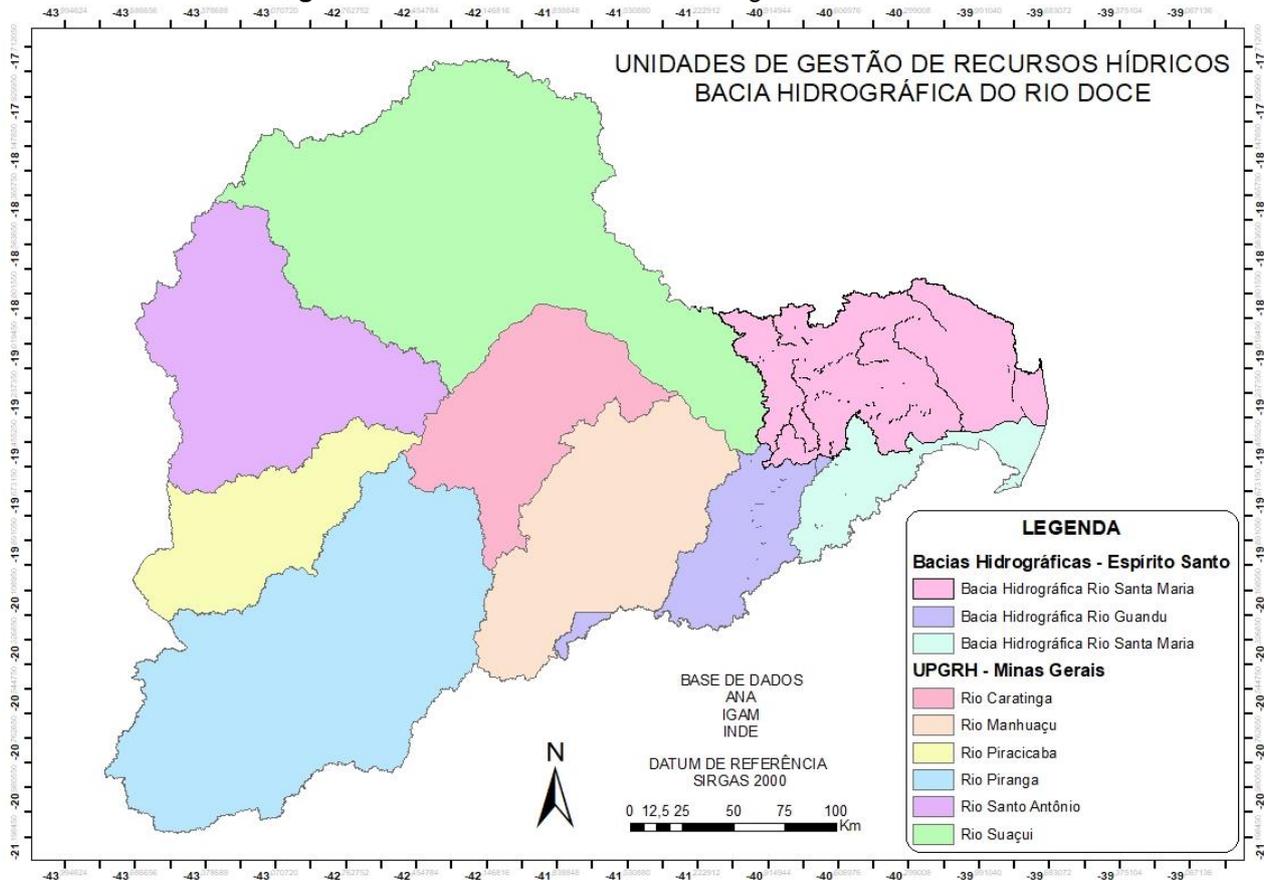
Minas Gerais e 14% ao Espírito Santo. A bacia abrange 230 municípios mineiros e capixabas, desde suas nascentes nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço até atingir o oceano Atlântico, junto ao povoado de Regência, no Espírito Santo, percorrendo uma área de 850 km. (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a)

Em sua rede de drenagem tem-se os principais afluentes no estado de Minas Gerais, que são: rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande, Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté e Manhuaçu; e no Espírito Santo tem-se os rios: São José, Pancas, Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce. Em busca de melhor gestão, a área da bacia pertencente a Minas Gerais foi subdivida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), sendo elas UPGRH do Rio Piracicaba, UPGRH do Rio Santo Antônio, UPGRH do Rio Piranga, UPGRH do Suaçuí, UPGRH do Rio Manhuaçu e UPGRH do Rio Caratinga; na área pertencente ao Espírito Santo não existem unidades de planejamento, e a gestão ocorre por meio dos comitês de bacia hidrográfica do rio Santa Maria do Doce, do rio Guandu e do rio São José; na Figura 9 tem-se a regionalização desses veículos de gestão (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a).

A bacia abriga uma população de cerca de 3,5 milhões de habitantes, cuja população urbana representa mais de 70% da população total, e a região do Vale do Aço, que compreende o baixo curso do rio Piracicaba, responde pelo maior adensamento populacional. Quanto à atividade econômica, tem-se o destaque para agropecuária, agroindústria, mineração, indústria, comércio e serviços de apoio aos complexos industriais; e a geração de energia elétrica (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a).

Quanto ao aspecto ambiental da bacia, os principais problemas são as contaminações dos rios por esgotos domésticos, agravado pelo processo de intensa urbanização, e a erosão e assoreamento, caracterizado pelo desmatamento generalizado, mau uso dos solos, incluindo a prática de monocultura de eucalipto.

Figura 9: Comitês das sub-bacias hidrográficas da Bacia do Rio Doce



Fonte: Autora – Base de dados ANA/IGAM/INDE (2020).

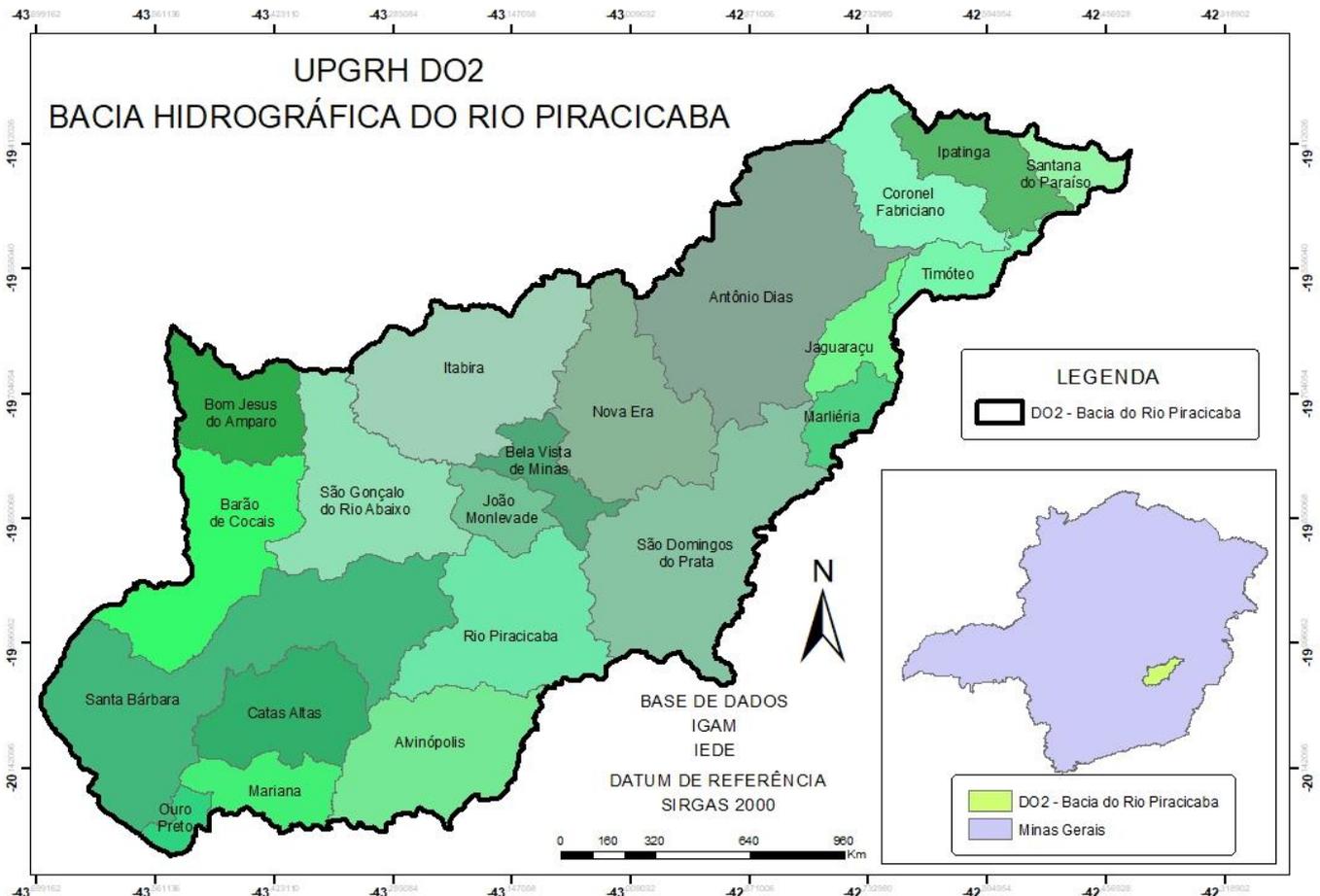
6.2 Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos do Rio Piracicaba

A bacia do rio Piracicaba é a UPRH DO2, constituinte da Bacia do Rio Doce, possuindo uma área de 5.465,38 km². O talvegue principal do rio estende-se por 241 km, desde a sua nascente na Serra do Caraça, distrito de São Bartolomeu, município de Ouro Preto até sua foz no rio Doce, localizada entre os municípios de Ipatinga e Timóteo conforme mostra a Figura 10 (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME,2010).

Inserida totalmente em Minas Gerais, a UPRH DO2 abrange 21 municípios, sendo eles: Alvinópolis, Antônio Dias, Barão de Cocais, Bela Vista de Minas, Bom Jesus do Amparo, Catas Altas, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Itabira, Jaguarauçu, João Monlevade, Mariana, Marliéria, Nova Era, Ouro Preto, Rio Piracicaba, Santa Bárbara, Santana do Paraíso, São Domingos do Prata, São Gonçalo do Rio Abaixo e Timóteo. Os municípios da bacia pertencem às mesorregiões Metropolitana de Belo Horizonte e Vale do Rio Doce e, com maior relevância, às microrregiões Itabira e Ipatinga

(CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME,2010). A população é de aproximadamente 733.360 habitantes em toda UPGRH; e a região conhecida como Vale do Aço, no baixo curso do Rio Piracicaba, tem-se o maior adensamento populacional da bacia (ANA, 2013).

Figura 10: Delimitação da Bacia Hidrográfica do Rio Piracicaba



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/IEDE (2020).

A UPGRH do Rio Piracicaba é a mais industrializada e apresenta maior taxa de crescimento populacional, quando comparada as demais UPGRH's da Bacia do Rio Doce, onde o PIB do setor industrial supera 50% do PIB total da bacia (ANA, 2013).

O rio Piracicaba é o curso principal da região, recebendo descarga dos rios mais significativos, que são as sub-bacias do rio do Peixe e do rio Santa Bárbara, pela margem esquerda, e pela sub-bacia do rio da Prata, pela margem direita. Além desses, ao longo do seu curso, afluem quase uma centena de córregos e ribeirões, os quais compõem sua rede de drenagem (CUNHA, 2013).

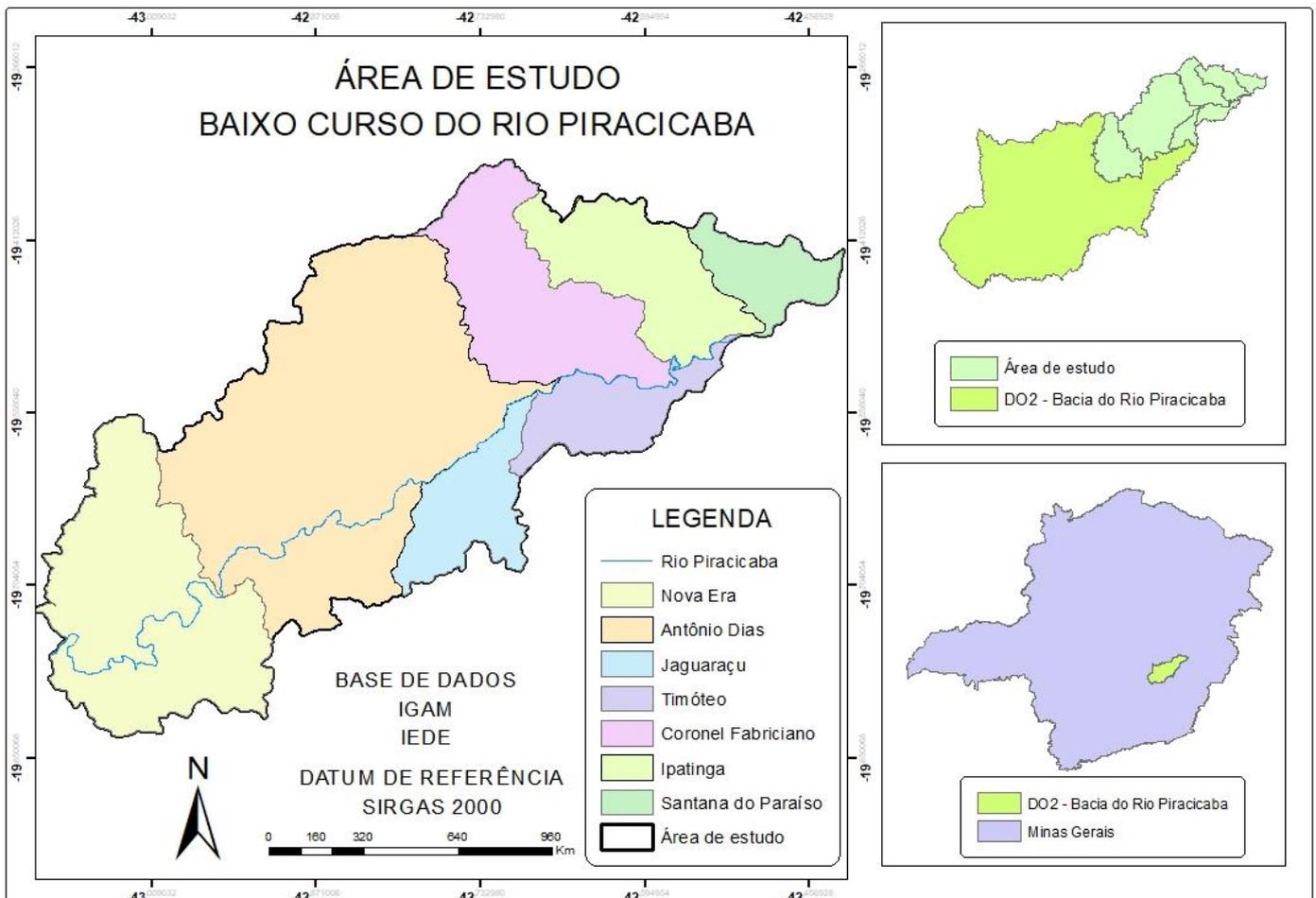
Assim como a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, a UPGRH do Rio Piracicaba, apresenta comportamento semelhante quanto a distribuição dos sistemas e naturais e

antrópicos; onde pelo menos 60% de toda a área se encontra em estágio antropizado; e o restante, em estágio natural se concentra próximas as nascentes dos rios Piracicaba, Conceição e Santa Bárbara, que apresenta fragmentos florestais significativos.

6.3 Baixo Curso do Rio Piracicaba

A área em estudo compreende o baixo curso do rio Piracicaba, abrangendo os municípios de Nova Era, Antônio Dias, Jaguaráçu, Coronel Fabriciano, Timóteo, Ipatinga e Santana do Paraíso (Figura 11). Localizada na porção leste do estado de Minas Gerais, a área de estudo se encontra a aproximadamente 150 km da capital Belo Horizonte, mesorregião do Vale do Rio Doce, e região metropolitana do Vale do Aço. O estudo desenvolve-se em uma área de aproximadamente 2.118 km², cuja população é de 481.753 mil habitantes, abrangendo os sete municípios, segundos dados do IBGE (2010).

Figura 11: Mapa de localização, baixo curso do rio Piracicaba



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/IEDE (2020).

A região possui um grande complexo siderúrgico, com empresas como a Aperam e Usiminas. No colar metropolitano, constata-se a presença das atividades minerárias de metais pesados, agregados de construção civil e gemas, com a presença da Companhia Vale A.S.; atividade agrícola e pecuária; extensa área de monocultura de eucalipto, devido à presença da Cenibra, maior indústria de celulose na região. Esta é a porção que apresenta maior aglomeração urbana e maior importância econômica na totalidade na bacia, sendo responsável por grande parte das exportações brasileiras de aço, minério de ferro e celulose (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a).

A região em questão se tornou uma das mais importantes unidades brasileiras de transformação do minério de ferro, denominada Vale do Aço; onde a presença do rio Piracicaba foi um dos pré-requisitos fundamentais para a escolha do local de instalação deste polo siderúrgico, e isso ocasionou um processo de urbanização intenso e rápido. As águas superficiais foram utilizadas para o abastecimento da indústria, enquanto todo o abastecimento d'água para a população advém dos aquíferos regionais (VASCONSELOS, 2002).

A área de estudo atualmente é marcada por uma diversidade de atividades econômicas já citadas anteriormente, e essas são totalmente dependentes do recurso hídrico para o desenvolvimento. O recurso hídrico utilizado para atividades econômicas é quase sempre proveniente de fontes superficiais e em alguns casos, de aquíferos. Devido à característica climática regional de sazonalidade pluviométrica, que levam alguns cursos d'água à vazão menor e até intermitência; e o abastecimento da população se mantém, tanto na região de aglomeração urbana, como nas áreas rurais, de fontes de águas subterrâneas, devido à qualidade da maioria dos rios locais estarem enquadrados em classe 2, exigindo tratamento convencional para o consumo.

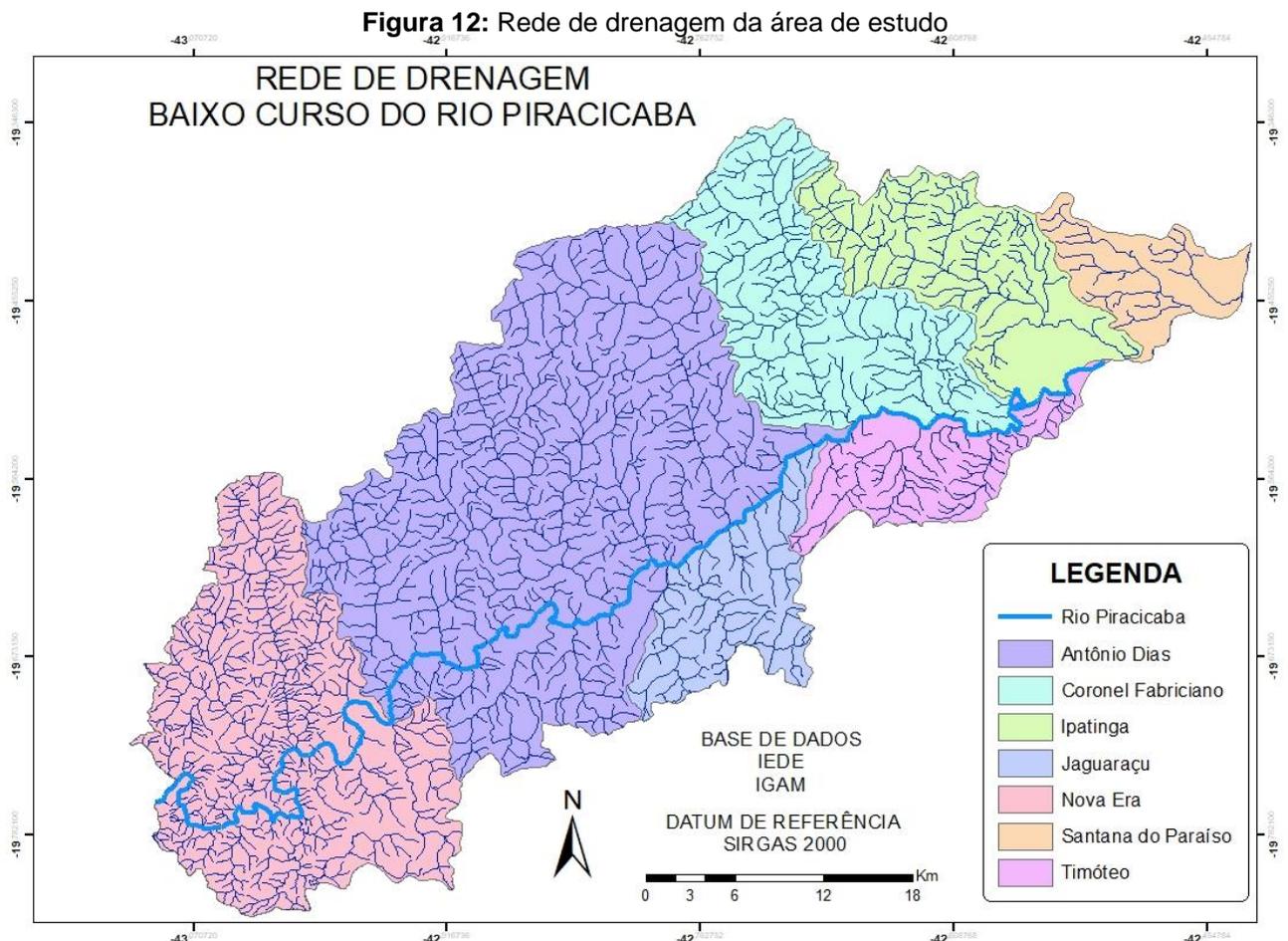
Devido à importância da região para a economia do estado e da bacia hidrográfica, e sua necessidade de abastecimento das diversas atividades por água subterrânea o estudo desenvolvido é de grande relevância para a gestão de recursos hídricos da Bacia do Rio Piracicaba.

6.4 Hidrografia

O rio Piracicaba é o principal curso d'água, onde tem-se as nascentes no município de Ouro Preto, a 1.680m de altitude. O rio Piracicaba percorre 241 km até encontrar o rio Doce; de todo esse percurso a área de estudo compreende baixo curso do rio

Piracicaba, com aproximadamente 112 km de talvegue principal do rio. Além do rio Piracicaba, a Figura 12 mostra toda a rede de drenagem da área de estudo, apresentando os demais rios tributários, que são aqueles de curso de água menor que desaguam no rio principal.

Em estudo realizado pelo Consórcio Ecoplan-Lume (2010), foi utilizada a estação fluviométrica Mário de Carvalho para realização da caracterização hidrológica da bacia. Verificou-se que o rio Piracicaba, em Antônio Dias, apresenta uma vazão média de longo termo (Q_{MLT}) da ordem de $97,90 \text{ m}^3/\text{s}$, sendo que as vazões Q_{95} e $Q_{7,10}$, são, respectivamente, $37,30 \text{ m}^3/\text{s}$ e $29,90 \text{ m}^3/\text{s}$, representando, respectivamente, 38 % e 30,5% da vazão Q_{MLT} . As maiores vazões ocorrem entre novembro e março, e menores entre abril e outubro, isso devido a sazonalidade bastante marcante entre o período de inverno (menos chuvoso) e verão (mais chuvoso), refletindo nas vazões observadas.



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/IEDE (2020).

Quanto à disponibilidade hídrica subterrânea da região de estudo, junto a foz do rio Piracicaba tem-se a maior vazão específica; fato concordante a localização do aquífero

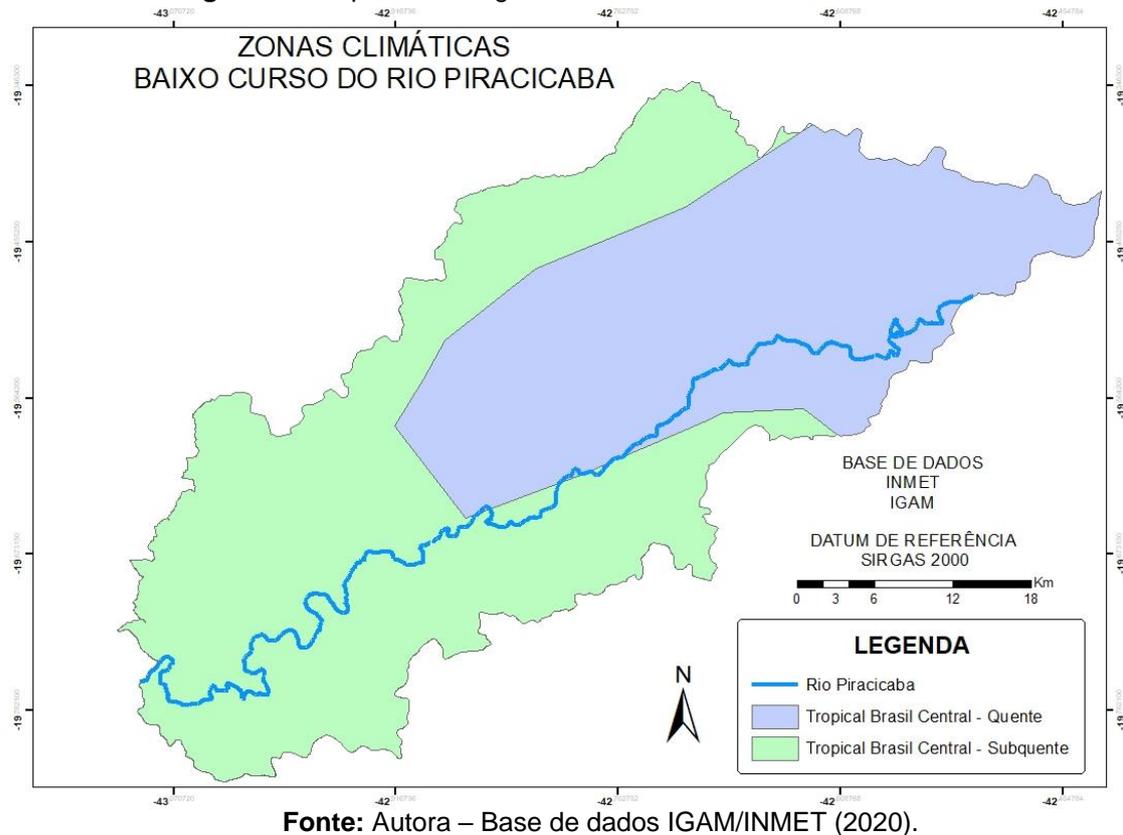
granular nas cidades de Ipatinga, Timóteo e Coronel Fabriciano. Foi estimado, pelo Consórcio Ecoplan-Lume (2010), que as captações por meio de poços tubulares mais produtivas estão localizadas nas aluviões do rio Piracicaba, onde a reserva reguladora total dos aquíferos desta região é estimada em $1,16 \times 10^9$ m³/ano, e os recursos exploráveis são $3,49 \times 10^8$ m³/ano. E os municípios de Timóteo, Ipatinga, Coronel Fabriciano e Santana do Paraíso respondem pela maior parte dos poços outorgados da região, confirmando, portanto, o intenso uso do aquífero local.

Com base na legislação de enquadramento do corpo hídrico, foram realizadas três fases para classificação do Rio Piracicaba: a normativa, avaliação da condição de qualidade das águas e efetivação do enquadramento. Considerando que o enquadramento é estabelecido a partir do conhecimento dos usos das águas e de suas respectivas necessidades de qualidade, tomando-se como referência o uso mais restritivo, independente da condição de qualidade atual das águas, sendo uma meta a ser atingida ou uma situação a ser conservada. E assim foi constatado que o curso principal do rio Piracicaba, é considerado classe 2, assim como os contribuintes rio do Peixe e rio Santa Bárbara; o rio da Prata, e a maioria dos menores contribuintes, se enquadram em classe 1, e uma minoria em classe especial (CUNHA, 2013).

6.5 Clima

Quanto ao clima, a área de estudo pode ser caracterizada por temperaturas mais elevadas nos meses de janeiro e fevereiro, e as temperaturas mais baixas do ano são as de junho e julho. Segundo a classificação de Köppen-Geiger a área de estudo se classifica em clima Aw, isto é, um clima tropical com inverno seco (REBOITA *et al.*, 2015). Como mostra a Figura 13, o clima da área se divide em tropical quente, com temperaturas médias maiores que 18 °C em todos os meses do ano, com 4 a 5 meses secos e os demais semi-úmido; e o restante da área, tem-se o clima Tropical subquente, com temperaturas médias entre 15 °C a 18 °C, pelo menos nos meses de inverno, 4 a 5 meses secos e os demais semi-úmido.

No período mais quente, de outubro a março, as precipitações são maiores, variando de 800 a 1.300 mm anualmente, e o período de seca compreende abril a setembro, com médias pluviométricas de 150 a 250 mm anualmente, sendo o período mais crítico, de junho a agosto (CLIMATE DATA).

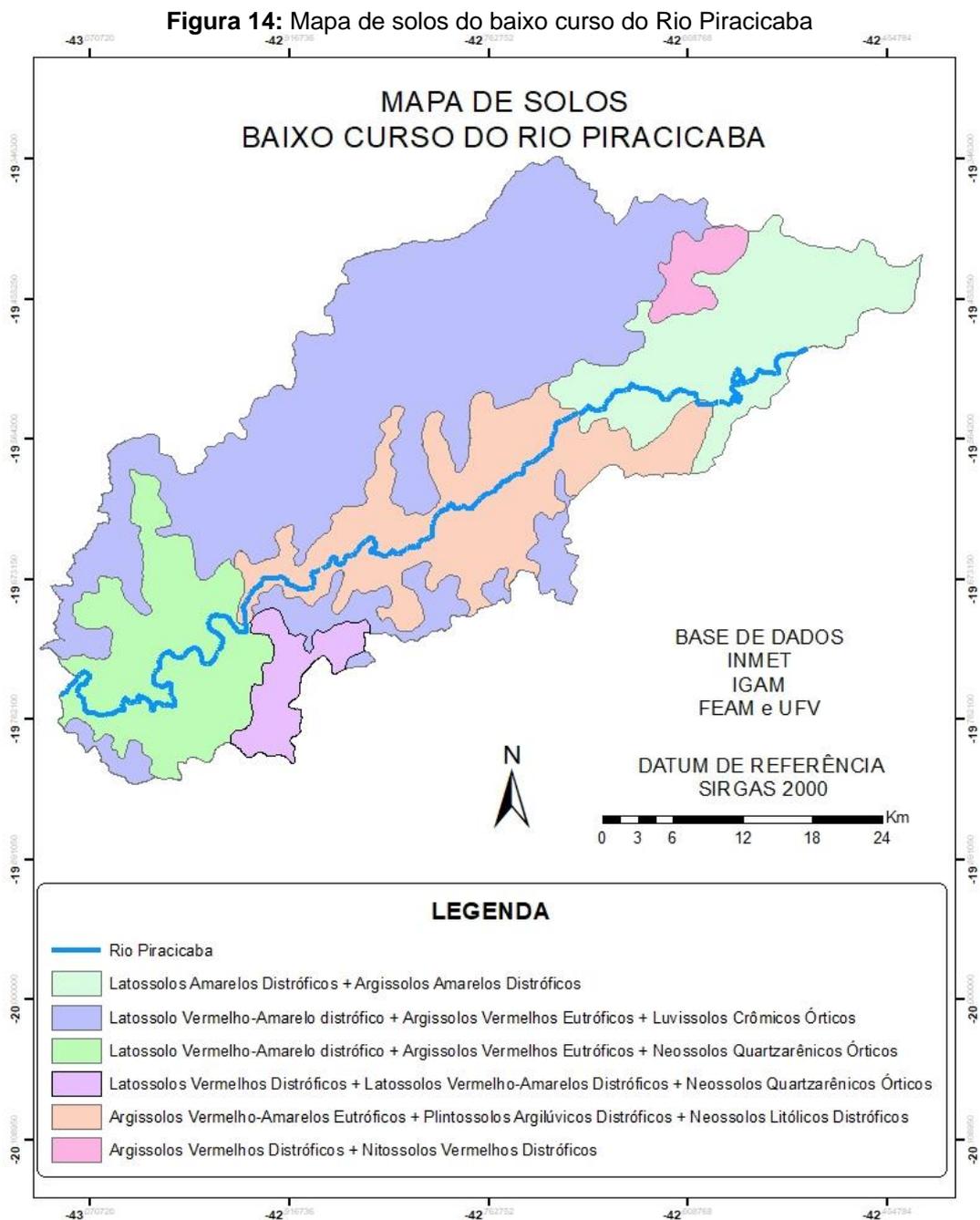
Figura 13: Mapa climatológico do Baixo curso do Rio Piracicaba

6.6 Solos

Na área de estudo tem predominância de latossolos e argissolos quanto à pedologia, como mostra a Figura 14. Os latossolos são constituídos por material mineral, normalmente solos profundos, com horizonte B latossólicos logo abaixo do horizonte A, dentro de 200 cm a 300 cm da superfície, quando o horizonte A tem por volta de 150 cm de espessura. Latossolos vermelho-amarelos distróficos são os que apresentam coloração amarela avermelhada e saturação por bases baixa na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B. Os latossolos amarelos distróficos são solos intermediários para argissolos, com coloração amarelada, estruturas em blocos, numa faixa de 200 cm da superfície do solo. Já os latossolos vermelhos distróficos apresentam coloração avermelhada, são intermediários para argissolos também e numa faixa de 200 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006).

Os argissolos apresentam o incremento no teor de argila no horizonte B, apresentam profundidades variáveis, e textura variável de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte B (EMBRAPA, 2006), sempre havendo aumento de argila daquele para este. Na área de estudo ocorrem os argissolos vermelhos eutróficos, cuja coloração é avermelhada e saturação acima de

50% nos primeiros 100 cm do horizonte B; argissolos amarelos distróficos apresentam coloração amarelada com saturação por bases menor que 50% e ocorre nos primeiros 100 cm do horizonte B; os argissolos vermelhos distróficos possuem coloração avermelhada, saturação por base menos que 50% e ocorre nos primeiros 100 cm do horizonte B; já os argissolos vermelho-amarelos eutróficos possuem uma coloração amarela avermelhada, com saturação maior ou igual a 50% em bases, e também ocorre nos primeiros 100 cm do horizonte B (EMBRAPA, 2006).



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/INMET/ FEAM e UFV (2020).

Os neossolos são solos poucos evoluídos com predomínio de características herdadas do material originário. Os neossolos litolíticos distróficos são solos com contato lítico fragmentário. Os neossolos quartzarênicos hidromórficos são solos com presença de lençol freático elevado durante grande parte do ano, na maioria dos anos, imperfeitamente ou mal drenados (EMBRAPA, 2006).

Os luvisolos crômicos órticos são um grupamento de solos com horizonte B textural, atividade alta da fração argila e saturação por bases alta. Os nitossolos são um grupamento de solos com horizonte b nítico, com argila de atividade baixa; os nitossolos vermelhos distróficos presentes na área de estudo são solos intermediários para latossolos, com horizonte b latossólico abaixo do horizonte b nítico, dentro de 150cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2006).

Os plintossolos são um grupamento de solos com preponderância e profundidade de manifestação de atributos que evidenciam a formação de plintita; os plintossolos argilúvicos distróficos são solos com saturação por bases menos que 50%, na maior parte do horizonte b ou c (EMBRAPA, 2006).

6.7 Relevo

Na área de estudo, predomina a ocorrência de planaltos, seguidos por depressão e uma pequena área de planície, como mostra a Figura 15. Os planaltos são constituídos por formas como colinas, cristas, pontões e vales, oriundos de processos de dissecação fluvial sobre rochas pré-cambrianas, as colinas e cristas com altitudes médias entre 1000 m a 1200 m e a vales com altitude variando de 750 m a 800 m, sendo que suas formas são típicas de relevo originado de superfície de degradação (FARIA, 2009). A drenagem principal do rio promoveu incisão dos vales, originando as depressões e dissecando os planaltos (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010a).

Já as planícies possuem uma organização alveolar, com origens nos estreitamentos dos vales, ligados a barramentos operados por soleiras rochosas, situadas onde o substrato do embasamento foi menos profundamente intemperizado ou erodido. Quanto ao aspecto hidrográfico a região é caracterizada pela associação das planícies com duas bacias fluviais apresentando relevo plano a suave ondulado (VASCONSELOS, 2002).

Figura 15: Relevo da área de estudo



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/INMET/IBGE (2020).

6.8 Geologia

A bacia do rio Piracicaba abriga grandes minerações a céu aberto do país, como a Mina do Brucutu em São Gonçalo do Rio Abaixo, Gongo Soco em Barão de Cocais, o Complexo Água Limpa em Rio Piracicaba, Fazendão São Luiz e Tamanduá em Catas Altas, além de minerações da Companhia Vale S.A. em Itabira e mineração de ouro em Santa Bárbara. Possuindo uma das maiores reservas do mundo em minério de ferro, manganês, bauxita, ouro, esmeralda, alumínio, quartzito (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

O aspecto geológico principal da bacia é a sua composição pelo quadrilátero ferrífero e pelo embasamento cristalino, formações relacionadas a estruturas do Arqueano ou Proterozóico. A área de estudo apresenta predominância de corpos graníticos da Suíte Borrachudos. A formação é caracterizada por relevo acidentado, com áreas de montanhas dissecadas e vales encaixados. São metragranitóides de granulação média à grossa, cinza, deformados com foliação marcada por biotita (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

O complexo Mantiqueira constitui-se de ortognaissesses do tipo tonalito-granodiorio-granito, migmatizados ou não, com bandamentos com alternância de banda milimétricas a centimétricas felsicas quartzo-feldspáticas e bandas máficas ricas em biotita (OLIVEIRA *et. al.* 2000).

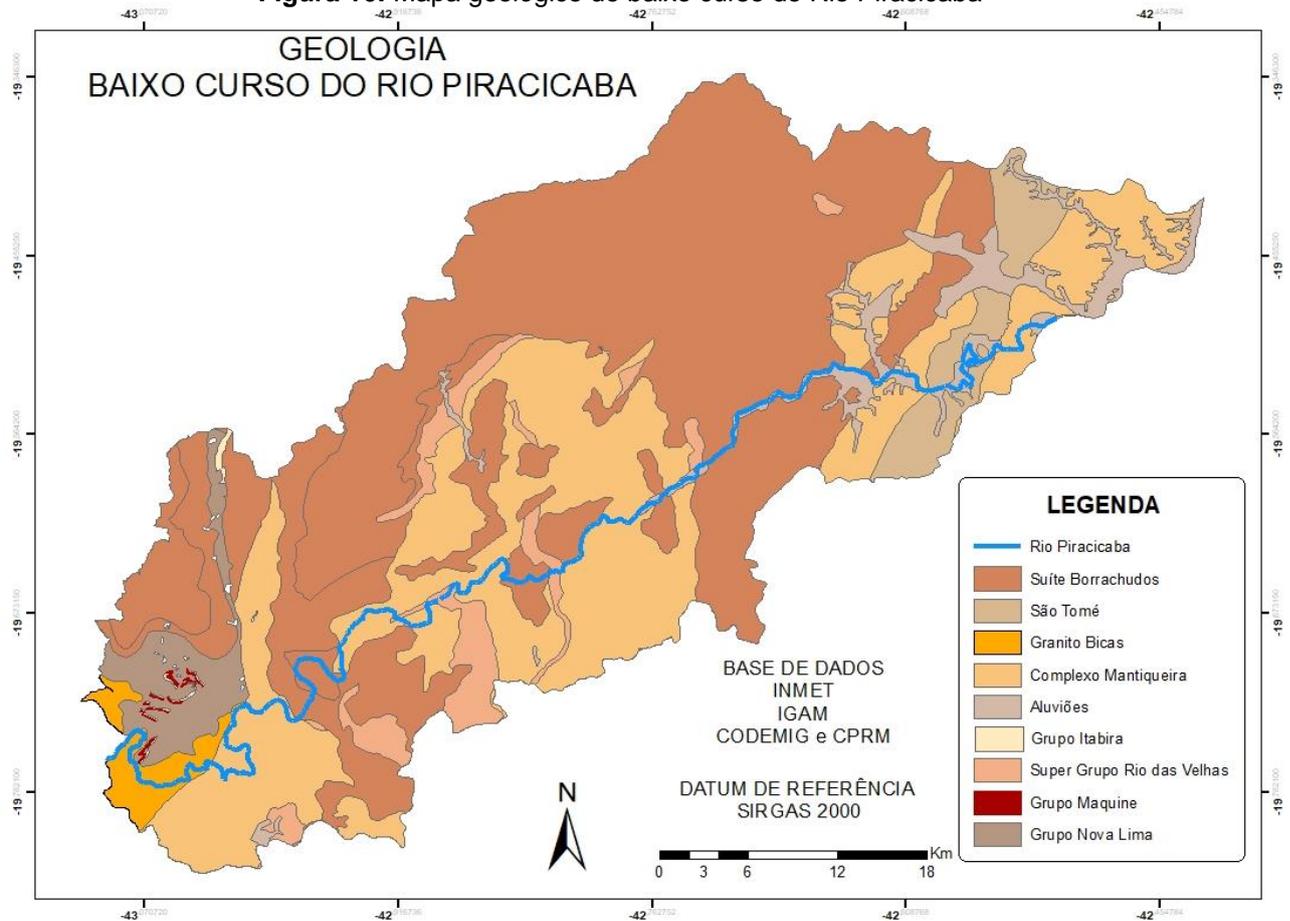
O supergrupo Rio das Velhas constitui-se de sequência metavulcanossedimentar com similaridade ao quadrilátero ferrífero, porém com metamorfismo em fácies anfibolito. São representados por formação ferrífera, quartzito, xistos e paragnaisses (OLIVEIRA *et. al.*, 2000). O supergrupo abrange o Grupo Nova Lima, composto por xistos metassedimentare e Grupo Maquiné, constituído de quartzitos e rochas metassedimentares, presentes na área de estudo (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010).

A formação São Tomé faz parte do Grupo Rio Doce. O grupo é uma unidade metassedimentar representada por xistos e quartzitos e seus afloramentos são ricos em manganês. Os quartzitos estão interligados a xistos quartzosos; os xistos variam de biotita xistos, de ocorrência restrita e constituintes de zona de cisalhamento metabásica, e quartzo xistos com coloração avermelhada e porções esbranquiçadas. É constituída de biotita muscovita-xisto (transicionando para gnaisses xistosos), formando um importante pacote. Contém grandes filões de quartzo e notáveis corpos pegmatíticos de importância econômica (OLIVEIRA *et. al.* 2000).

As aluviões são depósitos sedimentos recentes, inconsolidados, constituídos por areias quartzosas de granulação fina, cascalho fluvial, argilas e siltes com ou sem contribuição orgânica, depositados em ambiente fluvial ao longo de calhas, planícies de inundação e terraços (OLIVEIRA, 2005).

O Grupo Itabira está presente em pequenas porções da área de estudo, composto predominantemente por sedimentos químicos, compreendendo itabiritos, itabiritos dolomíticos e anfibolíticos (ROSSI, 2014). A Figura 16 a seguir apresenta as formações geológicas da área de estudo.

Figura 16: Mapa geológico do baixo curso do Rio Piracicaba

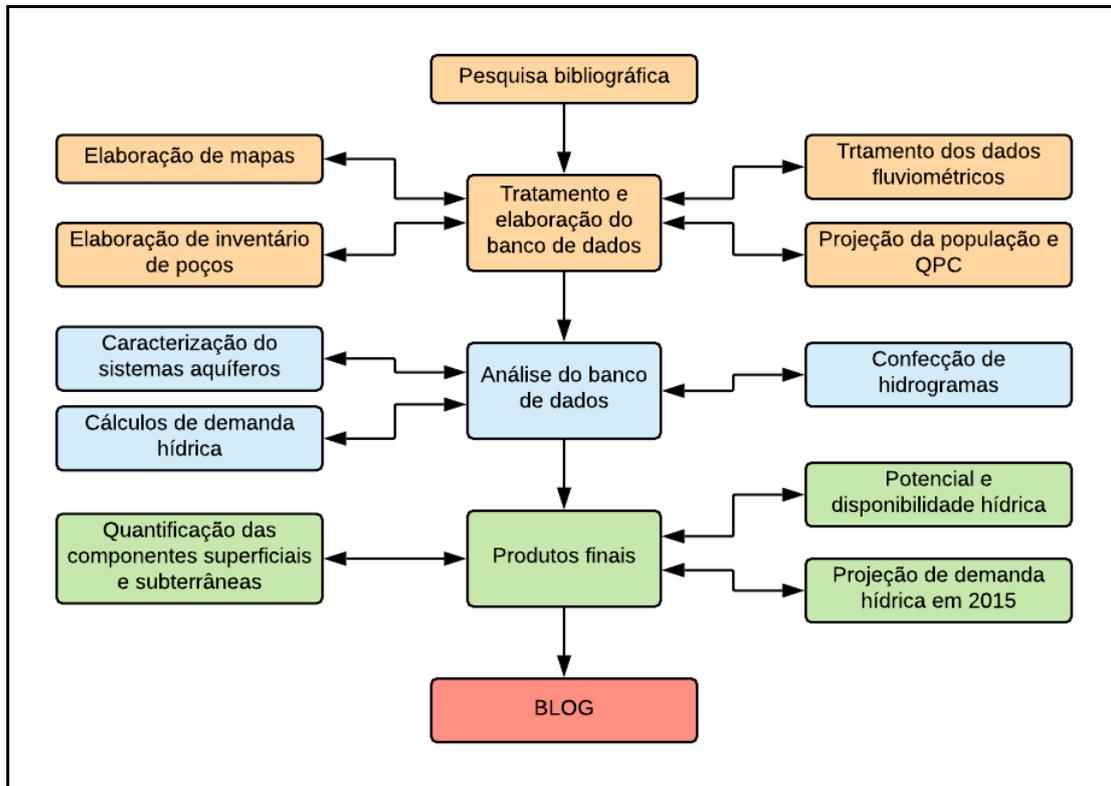


Fonte: Autora – Base de dados IGAM/INMET/CODEMIG e CPRM (2020).

7 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de realizar a avaliação e caracterização do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do rio Piracicaba, onde a capacidade reguladora dos aquíferos sobre a descarga natural dos rios auxilia na estimativa das reservas exploráveis, a metodologia do trabalho foi dividida em etapas, como mostra o fluxograma, Figura 17.

Figura 17: Metodologia



Fonte: Autora (2020).

A etapa de elaboração do banco de dados constou da pesquisa bibliográfica, incluindo a revisão de literatura, a caracterização dos aspectos fisiográficos da área de estudo. A confecção de mapas se deu por meio do software ArcGis versão 10.5 e utilização das bases de dados disponíveis na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema). A série histórica de dados fluviométricos tem como base duas estações situadas na área de trabalho obtidas pelo banco de informações do Hidroweb. A escolha das estações tomou como princípio a disponibilidade e maior período dos dados necessários, sendo elas apresentadas pela Tabela 5.

Tabela 5: Identificação e localização das estações fluviométricas

CÓDIGO	NOME	LATITUDE	LONGITUDE
56674000	Guilman Amorim Nova Era	-19,7686	-43,0358
56696000	Mario de Carvalho	--19,5247	-42,6408

Fonte: SNIRH (2019).

O inventário de poços tubulares foi obtido da base de dados do IGAM, disponível na Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-Sisema), onde tem-se os dados quantitativos sobre os poços perfurados em toda região de estudo.

Foram contabilizados 1275 pontos de captações de água subterrânea, e analisados os aspectos de profundidade e vazão desses. A partir da análise do banco de dados, os poços tubulares foram categorizados de acordo com o aspecto geológico e hidrogeológico em que se encontram e representados por mapas.

A confecção dos hidrogramas se deu por base de dados das estações fluviométricas e dados de produção dos poços tubulares controlados pelo serviço geológico do Brasil – CPRM, na base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS.

Além dos dados de produção dos poços, que fornecem a capacidade de extração de água, foram utilizados métodos indiretos que consideram a relação das reservas subterrâneas e do regime fluvial. Os cursos hídricos de regime de escoamento permanente recebem águas subterrâneas, essas podem ser consideradas o escoamento de base ou o componente subterrâneo do escoamento superficial total.

Quanto aos sistemas aquíferos, os volumes de água de entrada são iguais aos de saída, estabelecendo um equilíbrio de fluxo das águas; então, quando se tem conhecimento do quanto é restituído das águas subterrâneas aos rios, é possível determinar a participação das águas subterrâneas no escoamento superficial total, o que possibilita o conhecimento da capacidade de armazenamento subterrâneo (CASTANY, 1975).

O armazenamento subterrâneo fora obtido com base no deflúvio do período de esgotamento da região estudada, que é a diminuição da água armazenada nos vários sistemas aquíferos da bacia, em período de déficit pluviométrico.

Nos hidrogramas, a curva de esgotamento estabelece a relação entre a carga hidráulica e a vazão transportada, e representa o período de esgotamento dos aquíferos das bacias pela redução da água armazenada. A carga hidráulica relaciona-se ao deslocamento da água entre os depósitos subterrâneos e os canais fluviais.

A equação de Maillet (CASTANY, 1975), foi utilizada para a resolução da curva de esgotamento, onde:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha(t - t_0)}$$

sendo:

Q_t = vazão do curso hídrico no instante t em m^3/s ;

Q_0 = vazão do curso hídrico no instante inicial do esgotamento t_0 , em m^3/s ;

α = coeficiente de esgotamento;

t = período desde o início do esgotamento, em dias;

e = base dos logaritmos neperianos (2,71828).

A expressão logarítma dos dois membros da equação tem-se o coeficiente de esgotamento (α) em:

$$\alpha = \frac{\log Q_0 - \log Q_t}{0,4343 t}$$

Por meio desta expressão, é possível calcular os coeficientes de esgotamento do trecho. A Expressão 3 a seguir determina a capacidade de armazenamento, o volume de água subterrânea armazenado no instante t_0 , onde a curva de esgotamento se calcula em dias:

$$V = \frac{86400 Q_0}{\alpha}$$

O potencial e disponibilidade hídrica se dão a partir da quantificação das componentes superficiais e subterrâneas, onde Gonçalves *et al.* (2005) dizem que, a análise de hidrogramas para estabelecer a relação entre águas superficiais e subterrâneas possibilita a quantificação das componentes superficiais e subterrâneas pelo método gráfico, onde os hidrogramas são representativos do escoamento total.

Por fim, foi possível estabelecer as demandas futuras de águas subterrâneas para os municípios cujo abastecimento urbano se dá exclusivamente por meio poços. Para determinar a demanda hídrica foi utilizada a projeção de população urbana para 2035 com base no Atlas Esgoto (ANA); e quanto ao quantitativo de água previsto para consumo, foi tomado como base Von Sperling (1996) que diz que o consumo de água per capita (QPC) varia de acordo com a característica da comunidade e população local; seguindo os dados da Tabela 6 a seguir.

Tabela 6: Consumo de água per capita

PORTE DA COMUNIDADE	FAIXA POPULACIONAL	CONSUMO PER CAPITA (L/HAB.D)
Povoado rural	< 5.000	90 – 140
Vila	5.000 – 10.000	100 – 160
Pequena localidade	10.000 – 50.000	110 -180
Cidade média	50.000 – 250.000	120 – 220
Cidade grande	>250.000	150 – 300

Fonte: Von Sperling (1996).

A partir dos dados supracitados na tabela, foi realizado o cálculo de demanda hídrica proveniente de fonte subterrânea para a população projetada em 2035.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os municípios abrangidos pelo baixo curso do rio Piracicaba presente neste estudo, (Antônio Dias, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Timóteo), são atendidas pela empresa concessionária estatal COPASA; em Jaguaraçu e Nova Era, o abastecimento é realizado pelo Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) das prefeituras municipais, sendo estas responsáveis pela prestação de serviços.

Na Tabela 7 é apresentado os tipos de captação do recurso hídrico para abastecimento da população da área urbana, em cada cidade da área de estudo. Vale ainda ressaltar que, além dessas prospecções, o uso da água subterrânea por meio de poços e cisternas é utilizado nas áreas rurais de todos os municípios estudados, que são áreas de carência de água superficial, seja em termos de quantidade, seja pela qualidade.

Tabela 7: Origem da captação do recurso hídrico por cidade

MUNICÍPIO	TIPO DE CAPTAÇÃO
Antônio Dias	Poço Tubular (Água Subterrânea)
Coronel Fabriciano	Poço Tubular (Água Subterrânea)
Ipatinga	Poço Tubular (Água Subterrânea)
Jaguaraçu	Água Superficial
Nova Era	Poço Tubular (Água Subterrânea/Água Superficial)
Santana do Paraíso	Poço Tubular (Água Subterrânea)
Timóteo	Poço Tubular (Água Subterrânea)

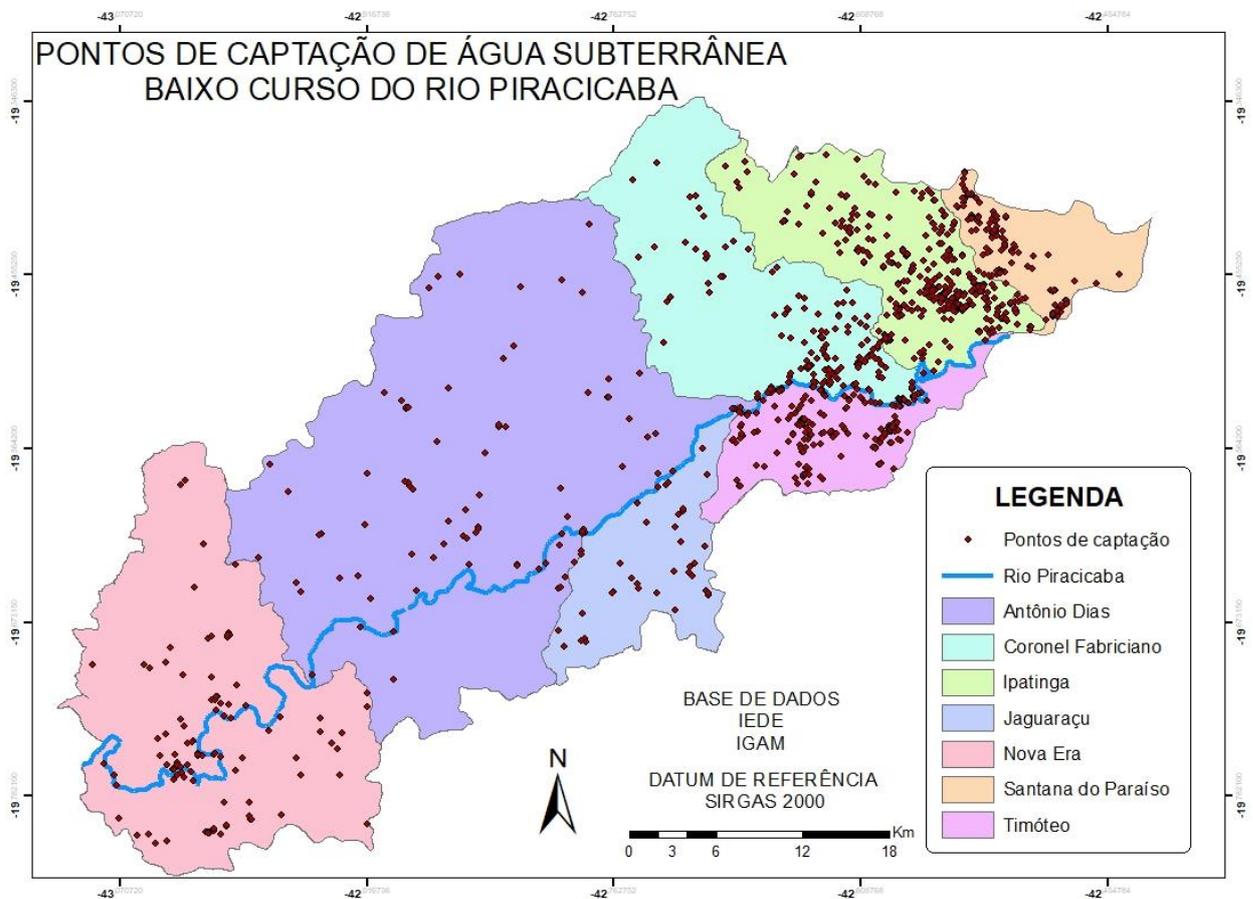
Fonte: Autora (2021)

A finalidade do uso da água no baixo curso do rio Piracicaba, é predominantemente industrial, sendo esta atividade responsável por 51% do total captado. O segundo maior uso consuntivo é o abastecimento humano, correspondendo a 44% da demanda total. Os volumes captados para a irrigação e dessedentação animal, são pouco expressivos na bacia, com 5% da demanda (CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010). Esses números apresentados denotam a realidade da Região Metropolitana do Vale do Aço, que se destaca pela característica urbano-industrial da região da foz do rio Piracicaba.

8.1 Quantificação de poços perfurados e outorgados

A partir dos dados obtidos pelo IGAM, constatou-se que o número de poços perfurados cujo registro de outorga perante o órgão está vigente, ao longo dos 7 municípios estudados no baixo curso do rio Piracicaba, é de 1275 poços de captações de água. A Figura 18 apresenta a disposição dos poços de captação de água subterrânea por município.

Figura 18: Poços outorgados por município



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/IEDE (2020).

Quantitativamente, as maiores concentrações de poços perfurados estão nas cidades de maior aglomeração urbana e as que possuem a empresa COPASA responsável pelo abastecimento de água, concentradas na região do Vale do aço, Ipatinga, Santana do Paraíso, Coronel Fabriciano e Timóteo. A Tabela 8 apresenta a relação de poços perfurados por cidade, com base no total de poços do baixo curso do rio Piracicaba.

Tabela 8: Quantitativos de poços outorgador por cidade em relação a área estudada

CIDADE	NÚMERO DE POÇOS	PORCENTAGEM
Antônio Dias	91	7,1%
Coronel Fabriciano	209	16,4%
Ipatinga	415	32,5%
Jaguaraçu	41	3,2%
Nova Era	122	9,6%
Santana do Paraíso	159	12,5%
Timóteo	238	18,7%

Fonte: Autora – Base de dados IGAM (2020).

A Tabela 9 apresenta a relação das vazões outorgadas totais de poços perfurados por cidade.

Tabela 9: Vazões outorgadas por cidade

CIDADE	VAZÃO OUTORGADA (m ³ /h)
Antônio Dias	51.071,10
Coronel Fabriciano	277.352,54
Ipatinga	1.453,49
Jaguaraçu	62,7
Nova Era	429,52
Santana do Paraíso	316,13
Timóteo	378.810,02

Fonte: Autora – Base de dados IGAM (2020).

As cidades da região metropolitana do Vale do Aço apresentam os maiores índices de poços outorgados para captação de água subterrânea, respondendo por 80,1% de todos os poços perfurados na região de estudo, onde Ipatinga responde sozinha por 32,5% deste total. Da vazão captada na região, em Coronel Fabriciano e Timóteo tem-se a prospecção de maiores volumes conforme apresentado na Tabela 8, sendo 277.352,54 m³/h e 378.810,02 m³/h respectivamente. Nestes locais os poços da

empresa COPASA, responsável pelo abastecimento de água das cidades de Timóteo, Coronel Fabriciano, Ipatinga e Santana do Paraíso; as vazões captadas em Santana do Paraíso e Ipatinga são menores, 316,13 m³/h e 1.453,492 m³/h respectivamente, correspondendo a captações de pequenas vazões, de poços domiciliares ou comerciais.

A região é totalmente dependente de fontes de água subterrânea visto que é uma região densamente urbanizada e que o curso hídrico principal, Rio Piracicaba, não apresenta qualidade favorável para consumo humano e usos mais exigentes, e diante da oferta de águas subterrâneas, o tratamento das águas superficiais não são também economicamente viáveis.

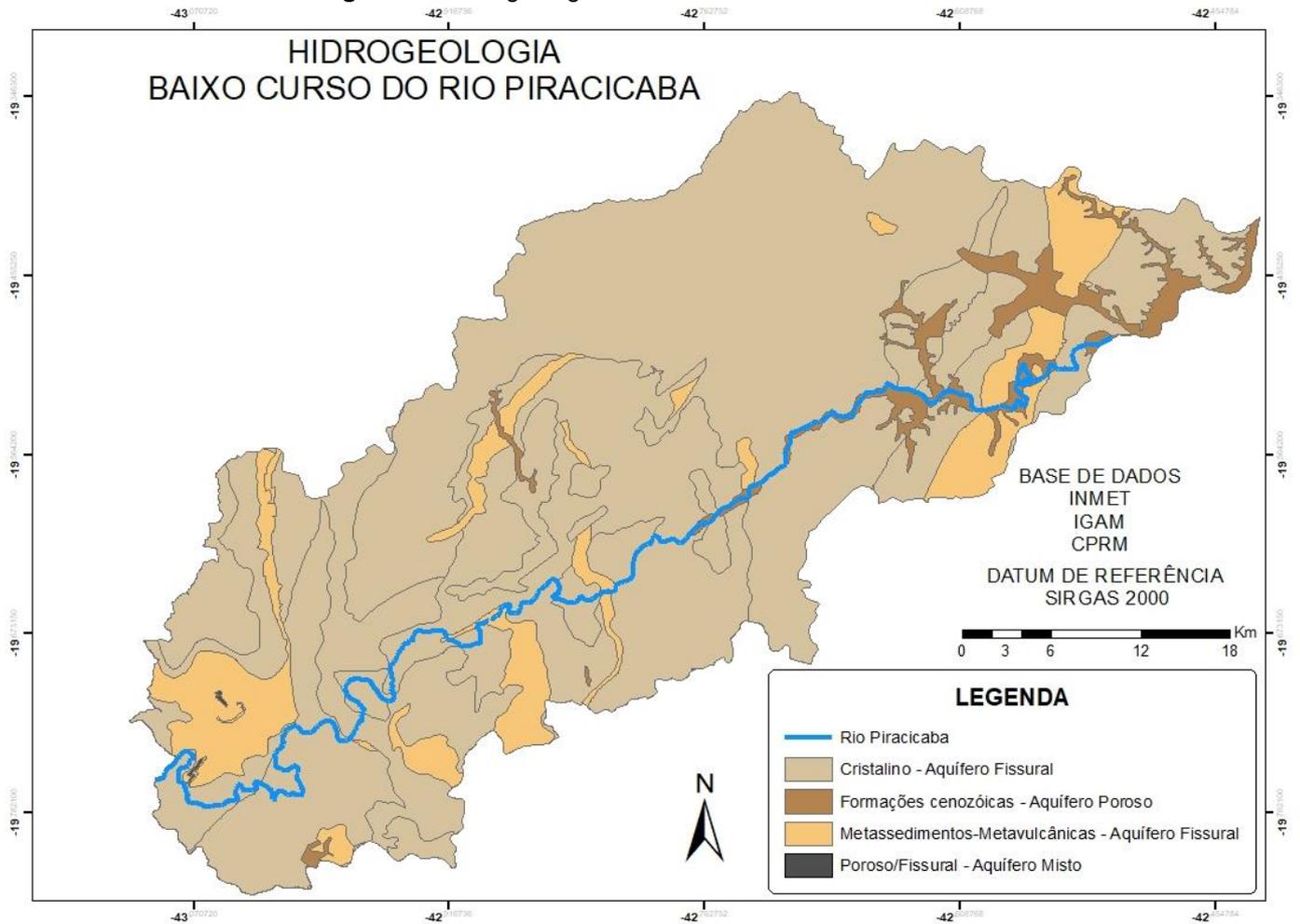
A cidade de Antônio Dias possui grande área territorial, e em quase totalidade de área rural e comunidades cujo abastecimento de água é por captação em nascentes ou poços perfurados respondendo por 7,1% das captações totais, e com vazão prospectada de 51.071,10 m³/h; nota-se que a COPASA, também responsável pelo abastecimento urbano local realiza a prospecção por meio de poços, o que justifica o valor da vazão prospectada.

O município de Jaguaraçu, que possui área rural em quase toda área de estudo, e abastecimento de água urbano é realizado por captação superficial, são prospectados de fontes subterrâneas no município 62,7 m³/h correspondendo a 3,2% dos poços perfurados em toda área de estudo.

Nova Era responde por 9,6% dos poços perfurados de toda a área, e a população possui abastecimento de água por meio de fontes superficiais e poços, a vazão de água subterrânea outorgada de 429,52 m³/h. Lembrando que estes dados são apenas as outorgas vigentes, tendo ainda todas as captações que não possuem registro legal perante o órgão ou que estão com invalidas aguardando renovação.

8.2 Caracterização dos sistemas aquíferos

Ao analisar a área de estudo identifica-se a ocorrência de aquíferos porosos e fissurais, conforme mostra a Figura 19. Os aquíferos fissurais se fazem presente na maior parte da área de estudo, estando relacionados a domínio cristalino, domínio metassedimentos/metavulcânicas e entre os próprios aquíferos porosos.

Figura 19: Hidrogeologia do baixo curso do Rio Piracicaba

Fonte: Autora – Base de dados IGAM/INMET/CPRM (2020).

A Tabela 10 apresenta a proposição e sistematização dos sistemas aquíferos e sua relação com as unidades lito-estratigráficas identificadas.

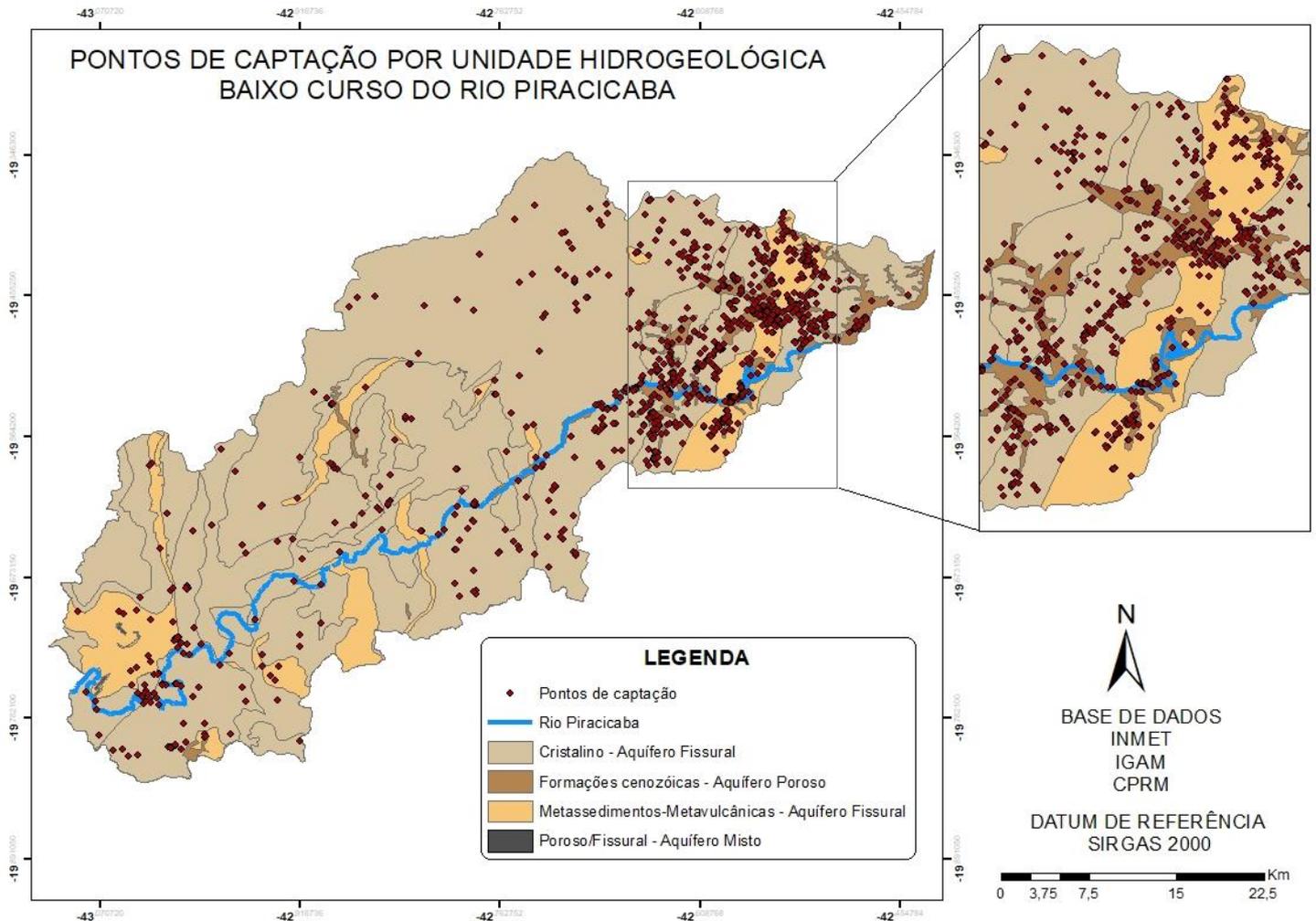
Tabela 10: Aquíferos / Unidades lito-estratigráficas

SISTEMA AQUÍFERO	DOMÍNIO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA
Aquífero Fissural	Cristalino	Suíte Borrachudos Granito Bicas Complexo Mantiqueira	Granitoides, gnaisses, migmatitos e granulitos.
Aquífero Poroso	Formações Cenozóicas	Aluviões	Rochas sedimentares, como areias e demais formações de coberturas residuais.
Aquífero Fissural	Metassedimentos/ Metavulcânicas	Grupo Nova Lima Super grupo Rio das Velhas Formação São Tomé Grupo Maquiné Grupo Itabira	Xistos, filitos, metarenitos, anfibolitos, quartzitos.
Aquífero Misto	Poroso/Fissural	-	Litologias arenosas com pelitos e carbonatos

Fonte: Autora (2020).

A Figura 20 apresenta a disposição espacial dos poços perfurados e outorgados na área de estudo correlacionando-os com seus respectivos aquíferos de prospecção.

Figura 20: Poços outorgados por unidade hidrogeológica



Fonte: Autora – Base de dados IGAM/INMET/CPRM (2020).

8.2.1 Sistema Aquífero Fissural de Domínio Cristalino

O aquífero fissural de domínio cristalino predominante na área, ocorre nos granitoides, gnaisses, migmatitos e granulitos. Neste sistema, de porosidade secundária, a ocorrência das águas subterrâneas está condicionada por fraturas e fendas, que se traduz por reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão (BOMFIM, 2002). A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Dados de produção de poços

SISTEMA AQUÍFERO	DOMÍNIO	QUANTIFICAÇÃO DE POÇOS	PROFUNDIDADE (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Fissural	Cristalino	619	1,8 ≤ P ≤ 180,0 Média: 27,53	0,0003 ≤ Q ≤ 800,0 Média: 4,03

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

Com valores variados, estando relacionada às fraturas, que são atingidas, a vazão obtida varia entre 0,0003 m³/h e 800,0 m³/h, e profundidade de perfuração entre 1,8 m a 180,0 m. A frequência das vazões específicas com o número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 51,3 % dos poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 12.

Tabela 12: Frequência de poços por produção

Q (m ³ /h)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 0,1	6,6
0,11 a 1,0	51,3
1,1 a 10,0	37,0
≤ 10,1	3,3

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 43,9 % dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 13: Frequência de poços por profundidade

PROFUNDIDADE (m)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 10,0	32,4
10,1 a 20,0	43,9
20,1 a 99,9	17,1
≤ 100,0	6,5

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

8.2.2 Sistema Aquífero Fissural de Domínio Metassedimentos/Metavulcânicas

Os aquíferos fissurais de domínio metassedimentos/metavulcânicas reúnem litotipos como xistos, filitos, metarenitos, anfíbolitos, quartzitos e outros. Neste também quase não existe porosidade, e a ocorrência da água subterrânea se dá por meio de

fraturas e fendas, apresentando reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, assim como o aquífero fissural de domínio cristalino, o que diferenciam os dois é o fato dos litotipos presentes serem diferentes, que irá ocasionar uma estruturação e competência distinta, assim como irão reagir diferentemente aos esforços causadores das fendas e fraturas, e apresenta uma maior favorabilidade hidrogeológica (BOMFIM, 2002). A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Dados de produção de poços

SISTEMA AQUÍFERO	DOMÍNIO	QUANTIFICAÇÃO DE POÇOS	PROFUNDIDADE (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Fissural	Metassedimentos/ Metavulcânicas	208	1,5 ≤ P ≤ 180,0 Média: 29,35	0,001 ≤ Q ≤ 180,0 Média: 6,17

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

A frequência das vazões específicas com o número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 48,8 % dos poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 15.

Tabela 15: Frequência de poços por produção

Q (m ³ /h)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 0,1	7,8
0,11 a 1,0	48,8
1,1 a 10,0	37,6
≤ 10,1	5,9

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 53,6 % dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 16.

Tabela 16: Frequência de poços por profundidade

PROFUNDIDADE (m)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 10,0	22,4
10,1 a 20,0	53,6
20,1 a 99,9	16,8
≤ 100,0	7,2

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

8.2.3 Sistema Aquífero Poroso de Formações Cenozoicas

Os aquíferos porosos de formações cenozoicas são formados por rochas sedimentares de naturezas e espessuras variadas. Possui uma porosidade primária e nas áreas arenosas uma elevada permeabilidade. De acordo com a espessura das camadas de areia/argila, os poços podem produzir vazões significativas. Este domínio está relacionado a depósitos como aluviões, coluviões, areia litorâneas e demais formações de coberturas residuais (BOMFIM, 2002). A produção dos poços perfurados e profundidade nesta região é apresentada na Tabela 17.

Tabela 17: Dados de produção de poços

SISTEMA AQUÍFERO	DOMÍNIO	QUANTIFICAÇÃO DE POÇOS	PROFUNDIDADE (m)	Q (m ³ /h)
Aquífero Poroso	Formações Cenozóicas	448	2,0 ≤ P ≤ 210,0 Média: 28,78	0,011 ≤ Q ≤ 306 Média: 6,02

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

A frequência das vazões específicas com o número de poços correspondentes para cada domínio hidrogeológico, mostra que 51,3 % dos poços possuem vazão entre 0,11 m³/h a 1,0 m³/h, conforme mostra a Tabela 18.

Tabela 18: Frequência de poços por produção

Q (m ³ /h)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 0,1	6,4
0,11 a 1,0	51,3
1,1 a 10,0	38,3
≤ 10,1	4,0

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

E a frequência das profundidades com o número de poços correspondentes mostra que 48,5 % dos poços possuem profundidade entre 10,1 m e 20,0 m conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19: Frequência de poços por profundidade

PROFUNDIDADE (m)	FREQUÊNCIA (%)
≥ 10,0	28,6
10,1 a 20,0	48,5
20,1 a 99,9	15,4
≤ 100,0	7,5

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2020).

8.2.4 Sistema Aquífero Misto

Em menor parcela na área de estudo, temos os aquíferos mistos poroso/fissural, onde ocorrem litologias arenosas com pelitos e carbonatos. São caracterizados por litificação acentuada, forte compactação e faturamento acentuado, apresentando então comportamento de aquífero granular com porosidade primária baixa/média, e um comportamento fissural acentuado com porosidade secundária de fendas e fraturas, o que lhe confere caracterização de aquífero misto, com baixa favorabilidade hidrogeológica (BOMFIM, 2002). Não possui poços perfurados e outorgados na ocorrência deste tipo de aquífero na região estudada.

8.2.5 Discussão sobre a caracterização dos sistemas aquíferos

O baixo curso do rio Piracicaba apresenta poços perfurados outorgados de produtividade baixa, 0,0003 m³/h, a alta, 800,00 m³/h. A maior quantidade de poços perfurados está localizada no aglomerado urbano do Vale do Aço, cuja principal fonte de abastecimento urbano de água e industrial é realizada por meio de aquíferos apesar de se localizar em meio aos rios Doce e Piracicaba.

A maioria dos poços perfurados (609), sobre o sistema aquífero fissural de domínio cristalino, cujas formações são as Suítes Borrachudos, Granito Bicas e Complexo Mantiqueira, e quanto as litologias presentes tem-se granitóides, gnaisses, migmatitos e granulitos. Outros 448 poços perfurados, se encontram sobre o Sistema Aquífero Poroso cujo domínio são as Formações Cenozoicas Aluvionares, constituídas por litologias de rochas sedimentares como areais e formações de cobertura detríticas. Em menor quantidade, 208 poços perfurados sobre o Sistema Aquífero Fissural de domínio metassedimentar/metavulcânico, com formações do Grupo Nova Lima, Super Grupo Rio das Velhas, Formação São Tomé, Grupo Maquiné e Grupo Itabira; cujas litologias presentes são xistos, filitos, metarenitos, anfíbolitos e quartizitos.

Quanto a produtividade dos poços estudados, Oliveira (2018) diz que de unidades de metassedimentos-metavulcânicos espera-se maior favorabilidade hidrogeológica em relação ao cristalino, entretanto na região, pelos dados apresentados se destaca os poços perfurados em aquíferos fissurais cristalinos, este fato é embasado na provável contribuição do aquífero granular localizado nos aluviões do Rio Piracicaba, e ainda pelos reservatórios desse tipo de aquífero ocorrer em meio as fraturas e fendas, em reservatórios aleatórios, o que faz que, ao perfurar um poço e este atingir um

reservatório maior, sua vazão será mais elevada; desse modo, os poços perfurados em aquíferos fissurais de domínio cristalino chegaram a apresentar vazão de 800,0 m³/h.

Já nos aquíferos porosos, a maior vazão registrada foi de 306,0 m³/h. E os aquíferos fissurais de domínio metassedimentar/metavulcânico, são a menor quantidade na área de estudo, e apesar da maior favorabilidade hidrogeológica apresentada quanto aos de domínio cristalino, tem o menor valor de vazão da área de estudo, 180,0 m³/h. Entretanto, quando calculada a média das vazões de todos os poços perfurados, este domínio apresenta o maior valor, 6,17 m³/h, o que pode ser explicado pelo fato do número de poços ser menor e os reservatórios dispostos aleatoriamente nas formações geológicas, não terem sido perfurados poços em áreas de maior produtividade do domínio em questão.

Quanto a profundidade dos poços, os perfurados em aquíferos porosos apresentaram maiores valores, 210 metros; enquanto os aquíferos fissurais, tanto de domínio cristalino quanto metassedimentar/metavulcânico, o maior valor registrado foi de 180 metros. Com base na geometria do aquífero da região do Vale do Aço, onde está localizada a maior quantidade de poços perfurados da região estudada, realizada por Oliveira (2018), tem-se abaixo da elevação do terreno uma camada de material argiloso de cerca de 7 metros de espessura, seguida por uma camada de 28 metros de material arenoso; os dados apresentados anteriormente mostram que a maior frequência de poços se encontram nesta faixa de profundidade, o que explica a maior produtividade dos poços no trecho de 10,1 metros a 20,0 metros de profundidade; quando o aquífero se faz por material inconsolidado, não tendo presença de rochas, apenas material de alta permeabilidade tornando-se assim um bom reservatório de água.

8.3 Potencial e disponibilidades hídricas

O estudo do potencial hídrico subterrâneo na área trabalhada se deu com base no período de recessão hidrológica, quando o deflúvio é constituído basicamente do escoamento subterrâneo, responsável pela alimentação dos cursos d'água durante o período de estiagem.

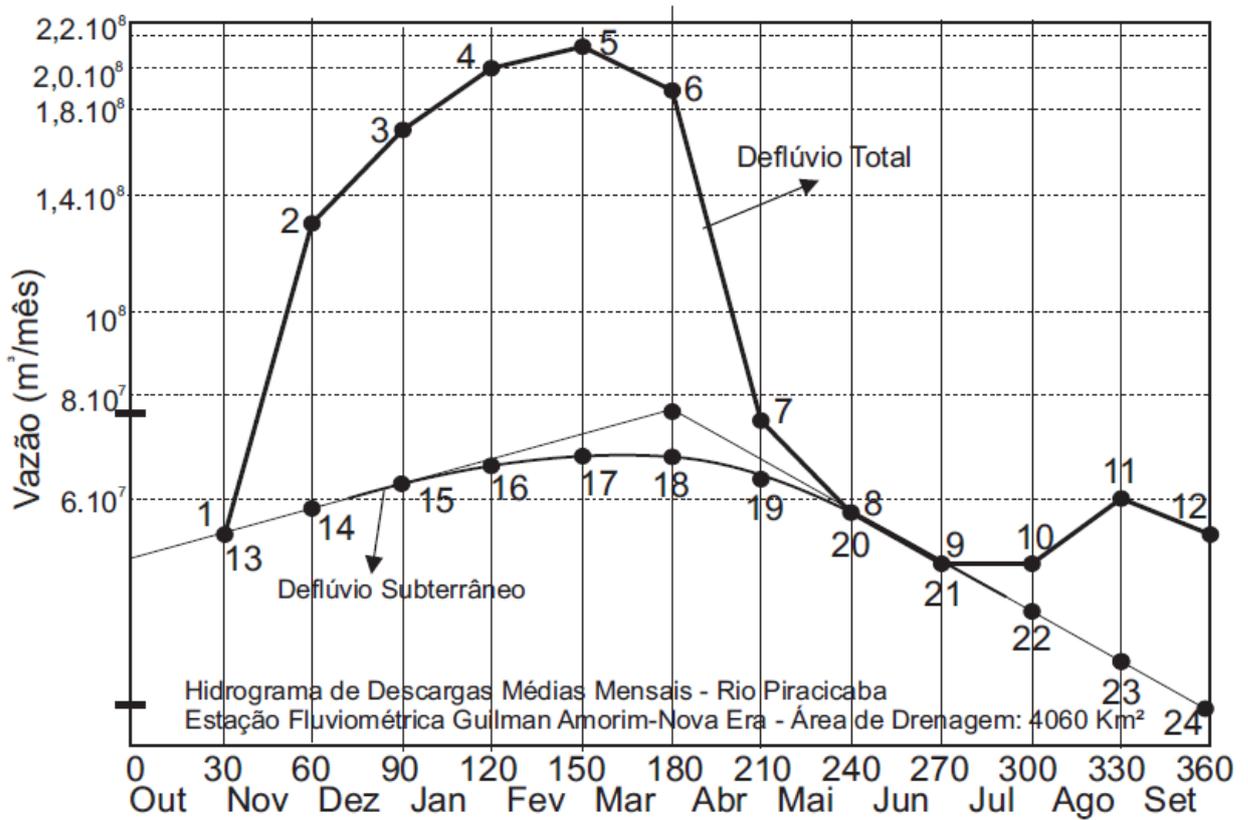
Os hidrogramas construídos, utilizaram dados de duas estações fluviométricas do rio Piracicaba, que permitiram a quantificação das componentes superficiais e subterrâneas de escoamento. A Figura 21 mostra o deflúvio total e o deflúvio subterrâneo da estação fluviométrica Guilman Amorim no município de Nova Era,

presente no Rio Piracicaba; enquanto a Figura 22 corresponde a estação fluviométrica Mário Carvalho no município de Timóteo, também no rio Piracicaba.

As análises dos hidrogramas permitiram observar a boa correlação entre os regimes pluviométrico e fluviométrico da área estudada, assim como a relação do deflúvio total e o deflúvio subterrâneo. A interação das águas subterrâneas e superficiais são expressas por meio dos cálculos e dos valores dos deflúvios totais e os valores da contribuição dos deflúvios subterrâneos.

O esgotamento corresponde ao período que ocorre a diminuição da água armazenada nos sistemas aquíferos da bacia, indicando o período de déficit pluviométrico do curso hídrico. Os hidrogramas apontam que o período estiagem acontece entre os meses de abril (início do período de esgotamento) a setembro (fim do período de esgotamento), e o período úmido vai do mês de outubro a março, que concorda com o período de alta pluviometria na região, registrando as maiores vazões do rio.

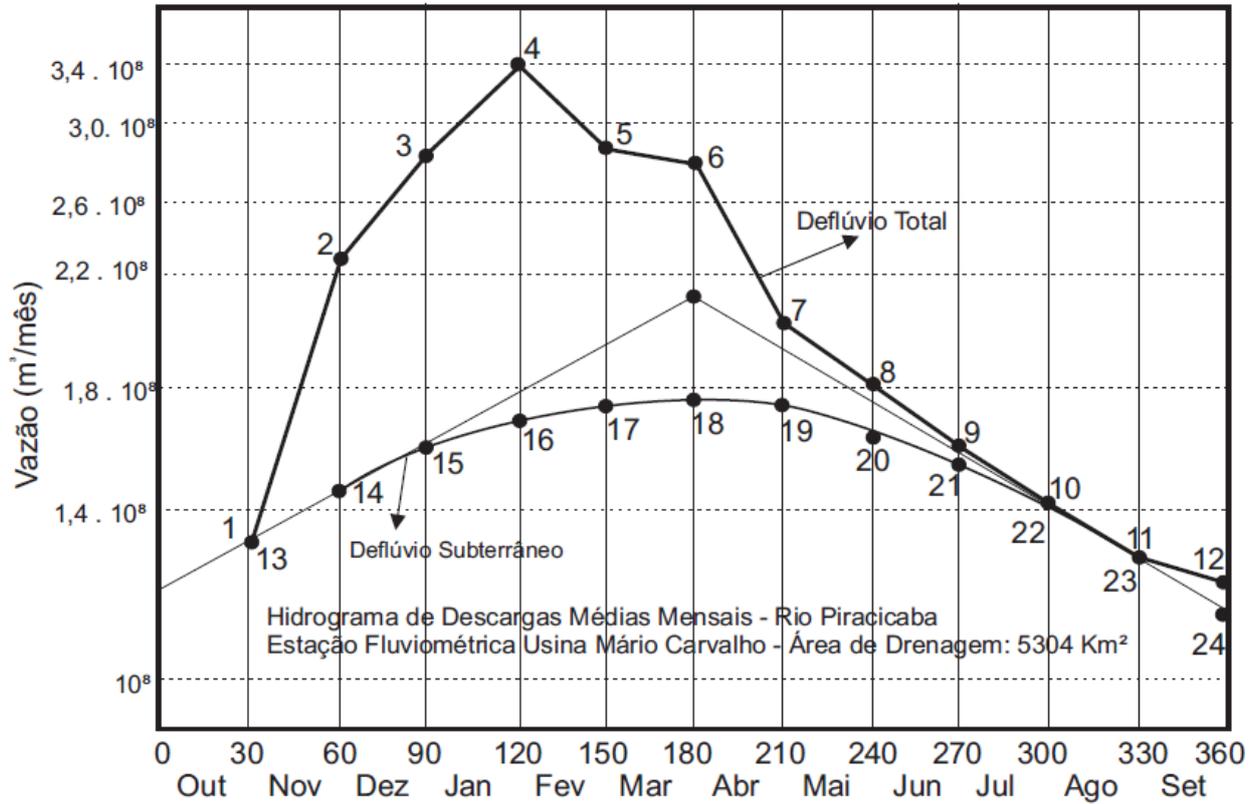
Figura 21: Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Guilman-Amorim



Deflúvio Total (m³)	Deflúvio Subterrâneo (m³)
1 - $5,35 \cdot 10^7$	13 - $5,35 \cdot 10^7$
2 - $1,30 \cdot 10^8$	14 - $5,95 \cdot 10^7$
3 - $1,69 \cdot 10^8$	15 - $6,15 \cdot 10^7$
4 - $2,01 \cdot 10^8$	16 - $6,88 \cdot 10^7$
5 - $2,13 \cdot 10^8$	17 - $7,17 \cdot 10^7$
6 - $1,89 \cdot 10^8$	18 - $7,18 \cdot 10^7$
7 - $7,50 \cdot 10^7$	19 - $6,15 \cdot 10^7$
8 - $5,76 \cdot 10^7$	20 - $5,76 \cdot 10^7$
9 - $5,01 \cdot 10^7$	21 - $5,01 \cdot 10^7$
10 - $5,02 \cdot 10^7$	22 - $4,06 \cdot 10^7$
11 - $6,01 \cdot 10^7$	23 - $3,62 \cdot 10^7$
12 - $5,46 \cdot 10^7$	24 - $2,80 \cdot 10^7$

Fonte: Autora (2020).

Figura 22: Hidrograma de descargas médias mensais - Estação Fluviométrica Mário Carvalho



Deflúvio Total (m ³)	Deflúvio Subterrâneo (m ³)
1 - 1,31 . 10 ⁸	13 - 1,31 . 10 ⁸
2 - 2,26 . 10 ⁸	14 - 1,43 . 10 ⁸
3 - 2,83 . 10 ⁸	15 - 1,49 . 10 ⁸
4 - 3,34 . 10 ⁸	16 - 1,53 . 10 ⁸
5 - 2,85 . 10 ⁸	17 - 1,66 . 10 ⁸
6 - 2,77 . 10 ⁸	18 - 1,77 . 10 ⁸
7 - 2,03 . 10 ⁸	19 - 1,66 . 10 ⁸
8 - 1,79 . 10 ⁸	20 - 1,50 . 10 ⁸
9 - 1,57 . 10 ⁸	21 - 1,43 . 10 ⁸
10 - 1,40 . 10 ⁸	22 - 1,40 . 10 ⁸
11 - 1,27 . 10 ⁸	23 - 1,27 . 10 ⁸
12 - 1,20 . 10 ⁸	24 - 1,15 . 10 ⁸

Fonte: Autora (2020).

8.3.1 Discussão sobre o potencial e disponibilidades hídricas

Durante o período úmido, a rede de drenagem da área de estudo é responsável pela recarga dos aquíferos. E, para o período de estiagem, os rios perenes demonstram que seu escoamento se mantém pela contribuição dos aquíferos.

Os resultados dos estudos dos hidrogramas permitiram avaliar os dados referentes aos deflúvios total e subterrâneo; onde no período de abril a setembro os valores do deflúvio subterrâneo chegam a se igualar ao deflúvio total, mostrando que a vazão do rio no período é totalmente dependente do fluxo de água subterrânea. Isto ocorre para a estação Guilman Amorim nos meses de maio e junho, $5,76 \times 10^7$ e $5,01 \times 10^7$ respectivamente; e para Mário Carvalho nos meses de julho e agosto, $1,40 \times 10^8$ e $1,27 \times 10^8$ respectivamente.

Além disso, o percentual do deflúvio subterrâneo com relação ao deflúvio total, dentro da área de estudo, apresenta valores superiores a 34% para a estação Guilman Amorim, sendo este o menor valor referente ao mês de fevereiro, que corresponde ao maior pico de cheia do período. Quanto a estação de Mário Carvalho, temos valores superiores a 46% de contribuição, este correspondendo ao mês de janeiro, que apresenta o pico de cheia.

A capacidade de restituição subterrânea dos aquíferos é configurada pela descarga subterrânea, caracterizando a potencialidade dos aquíferos que correm na bacia. Dentro desse propósito, observamos que na área drenada para o rio Piracicaba, as contribuições crescem de montante para jusante. A região de maior contribuição com base na estação fluviométrica Mário Carvalho, encontra-se em suas proximidades sobre aquíferos porosos e aquíferos fissurais de domínio metassedimentar/metavulcânico, onde esses apresentam maior favorabilidade hidrogeológica, permitindo a maior capacidade de infiltração e armazenamento na região.

8.4 Uso das águas subterrâneas e estimativas de demandas futuras

Foi levantado a finalidade e uso das águas subterrâneas prospectadas por município, com base nos poços outorgados estudados. A distribuição por tipo de uso segue abaixo na Tabela 20:

Tabela 20: Distribuição de poços quanto ao tipo de uso, em porcentagem

CIDADE	TIPO DE USO	%
Antônio Dias	Consumo Humano	66,0
	Serviços	34,0
Coronel Fabriciano	Consumo Humano	41,4
	Serviços	58,6
Ipatinga	Consumo Humano	52,4
	Serviços	47,6
Jaguaraçu	Consumo Humano	78,0
	Serviços	22,0
Nova Era	Consumo Humano	57,0
	Serviços	43,0
Santana do Paraíso	Consumo Humano	55,0
	Serviços	45,0
Timóteo	Consumo Humano	47,9
	Serviços	52,1

Fonte: Autora - Base de dados IGAM (2021).

Nota-se que para as cidades do Vale do Aço, Coronel Fabriciano e Timóteo apresenta maior uso dos poços para a prestação de serviços, 58,6% e 52,1% respectivamente; enquanto Ipatinga e Santana do Paraíso, são utilizados para consumo humano em sua maioria, 52,4% e 55,0% respectivamente; em Jaguaraçu o maior quantitativo de poços é para consumo humano, 78,0%; assim como em Nova Era, 57,0%, e em Antônio Dias, 66,0%.

Nos municípios que utilizam apenas água subterrânea por meio de poços para abastecimento urbano, é possível estimar as demandas futuras de água a serem extraídas de aquífero. Para isto, foi utilizado a estimativa populacional urbana com base no Atlas Esgoto (ANA), para a cidade de Antônio Dias, e para as cidades da região do Vale do Aço. A partir da população estimada, e os valores de referência segundo Von Sperling (1996); é apresentada na Tabela 21, a demanda hídrica subterrânea projetada, para abastecimento urbano das cidades por meio de poços, a partir da projeção populacional urbana para 2035.

Tabela 21: Projeção da população urbana em 2035 / Demanda hídrica prevista para 2035, para abastecimento urbano das cidades

CIDADE	POPULAÇÃO URBANA EM 2020	POPULAÇÃO URBANA EM 2035	DEMANDA HÍDRICA PREVISTA (L/DIA)
Antônio Dias	4.757	5.474	$8,76 \times 10^5$
Coronel Fabriciano	106.945	113.646	$2,5 \times 10^7$
Ipatinga	250.456	278.802	$8,36 \times 10^7$
Santana do Paraíso	28.020	37.749	$6,79 \times 10^6$
Timóteo	85.888	95.863	$2,11 \times 10^7$

Fonte: Autora - Base de dados ANA (2021).

8.4.1 Discussão sobre o uso das águas subterrâneas e estimativas de demandas futuras

Os dados analisados sinalizam que os municípios que apresentam valores de referência para consumo humano dos quantitativos de finalidade de uso dos poços, cujo valor para este é bem maior quando comparado ao utilizado para serviços, são os municípios que possuem área rural maior; sendo eles Antônio Dias, Jaguaráçu e Nova Era.

As cidades de Santana do Paraíso, Timóteo, Coronel Fabriciano e Ipatinga, são abastecidas exclusivamente por poços perfurados da empresa COPASA, e possuem área rural pequena. Os quantitativos de finalidade de uso da água prospectada nestes municípios ficaram bem divididos entre consumo humano e o utilizado para serviços.

A partir da estimativa populacional do Atlas Esgoto (ANA) e base de consumo de água per capita segundo Von Sperling (1996), foi previsto o consumo de água a ser prospectada dos poços para o abastecimento urbano dos municípios. A empresa COPASA é responsável pelo abastecimento urbano das cidades em que foi realizada a estimativa.

Os poços locados na estação de tratamento da COPASA do Amaro Lanari, em Coronel Fabriciano, opera atualmente com 26 poços tubulares perfurados no aquífero aluvionar (ALVARENGA, 2008), é responsável pelo principal sistema de abastecimento de água da região do Vale do Aço; o aquífero em questão é caracterizado pela maior capacidade de infiltração e armazenamento na região; o que favorece no abastecimento da região, e ao atendimento da demanda futura estimada, cujo valor $1,37 \times 10^8$ litros por dia a serem prospectados.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região estudada faz uso das águas subterrâneas para desenvolvimento de todas as atividades antropizadas locais. A prospecção da água subterrânea se dá em aquíferos fissurais cristalinos, aquíferos porosos e aquíferos fissurais metassedimentares/metavulcânicos; e a maioria dos poços estudados estão locados na região do aglomerado urbano do Vale do Aço. Quanto a favorabilidade hidrogeológica, o destaque é dos poços perfurados em aquíferos fissurais cristalinos; e quanto a profundidade dos poços, cerca de 80,0% desses apresentam profundidade pequena (menor que 20,0 metros); fatos explicados pelo caráter aluvionar da região em questão.

A manutenção da vazão do rio Piracicaba nos períodos de seca (abril a setembro), é dependente do deflúvio subterrâneo, em alguns momentos os valores de deflúvio total e subterrâneo chegam a se igualar, meses de maio e junho para a estação Guilman Amorim, e meses de julho e agosto para a estação Mário Carvalho; conforme foi demonstrado nos hidrogramas. A relação do deflúvio subterrâneo e o deflúvio total apresenta valores maiores que 34% dentro de toda área de estudo, e mostra que os índices de contribuição são crescentes de montante a jusante. A região com maior percentual de contribuição, jusante, desenvolve-se sob região de aquíferos de maior favorabilidade hidrogeológica, que permite maior capacidade de infiltração e armazenamento de água.

O uso das águas procedentes de fontes subterrâneas para consumo humano é maior nos municípios que possuem população rural notável - Antônio Dias, Jaguaráçu e Nova Era. Já as cidades do Vale do Aço (Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Timóteo) são abastecidas em sua totalidade, por poços artesianos, seja para consumo humano ou para prestação de serviços, apresentando esta distribuição equiparada nos quatro municípios.

Estabelecendo relação entre projeção populacional para 2035 e a demanda hídrica necessária para o abastecimento integral dos municípios que utilizam água subterrânea para manutenção de suas atividades, infere-se que o volume calculado e as características referentes a capacidade de armazenamento e infiltração do aquífero local, configura um cenário em que o volume hídrico disponível irá atender a projeção populacional proposta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, J. A.; GONÇALVES, J. A. C. **Estudo da vulnerabilidade do aquífero aluvionar de Amaro Lanari, principal fonte de abastecimento d`água das cidades do Vale do Aço, Minas Gerais.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2008.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas.** Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>. Acesso em: 04 mar. 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no brasil.** Brasília: Agência Nacional de Águas. 134 p. 2005. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 23 março. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano integrado de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Doce: relatório executivo.** Brasília: 2013.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Situação da água no mundo.** Disponível em: <https://www.ana.gov.br/textos-das-paginas-do-portal/agua-no-mundo/agua-no-mundo>. Acesso em: 3 mar. 2020.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil.** Brasília: 2019. Disponível em: www.ana.gov.br. Acesso em: 1 nov. 2019.

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Águas Subterrâneas: o que são?.** Disponível em: <https://www.abas.org/aguas-subterraneas-o-que-sao/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

BARBOSA, C.M.S.; MATTOS, A. **Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos.** XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas: 2008.

Bicudo, C.E.M.; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B. **Águas do Brasil: análises estratégicas.** São Paulo, Instituto de Botânica, 2010.

BOMFIM, L. F. C. **Conceituação de domínio hidrogeológico: grupo de unidades geológicas com afinidades hidrogeológicas, tendo como base principalmente as características litológicas das rochas.** CPRM: 2002. Acesso em: 23 mar. 2020.

BRASIL. **Lei nº 9433, 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: 1 nov. 2019.

IBGE. **Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro, IBGE, 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html> Acesso em: 1 nov. 2019.

CARVALHO, Y. M. C. *et al.* **A legislação brasileira de recursos hídricos como instrumentalização à gestão compartilhada.** Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária, São Paulo, p. 112-134. 2008.

CASTANY, G. **Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas.** Editora Omega S. A.Barcelona. Espanha. 1975.

CLIMATE DATA. **Clima: Minas Gerais.** Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/ipatinga-2884/>. Acesso em: 23 mar. 2020.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Brasil). Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos. **RESOLUÇÃO no 16, DE 8 DE MAIO DE 2001.** 8 de maio 2001. Disponível em: <http://www.sema.df.gov.br/wp-content/uploads/2017/09/Resolu%C3%A7%C3%A3o-CNRH-n%C2%BA-162001.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2019.

CNMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **RESOLUÇÃO CONAMA no 396 de 3 de abril de 2008.** DOU,

n. 66, p. 64-68, 7 abr. 2008. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Acesso em: 1 nov. 2019.

CNRH - CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Brasil). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Resolução N° 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. 17 mar. 2005. Disponível em: http://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 1 nov. 2019.

COLLINS, J. & HUSSEY, R. **Pesquisa em Administração: um guia prático para alunos de Graduação e Pós-Graduação**, Bookman. 2005.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA); Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CBH-DOCE). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce: plano de ação de recursos hídricos da unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos piracicaba parh piracicaba**. CBH-DOCE. 1 v. 2010. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2016/12/PARH_Piracicaba.pdf. Acesso em: 30 nov. 2019.

CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME. Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM); Instituto Estadual de Meio Ambiente (IEMA); Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce (CBH-DOCE). **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce: Relatório Final**. CBH-DOCE. 1 v. 2010a. Disponível em: http://www.cbhdoce.org.br/wpcontent/uploads/2014/10/PIRH_Doce_Volume_I.pdf. Acesso em: 30 nov. 2019.

COSTA, W. D. **Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos**. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (ANAIS), São Paulo, 1998.

Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/22276/14619>. Acesso em: 23 abr. 2020.

CUNHA, A. L. **Aspectos Metodológicos Do Processo De Enquadramento Dos Corpos De Água Da Bacia Hidrográfica Do Rio Piracicaba**. 44 f. Monografia (Especialização) - Curso de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Ufmg, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9C5J9X>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrologia subterrânea**. 2ed. Barcelona: Omega, 2 v. 1983.

DEWANDEL, B.; LACHASSAGNE, P.; BAKALOWICZ, M.; WENG, P.H.; ALMAKI, A. **Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer**. Journal of hydrology, 274, p. 248-269, 2002.

DORA, A. S. **Quantificação de reservas renováveis de água subterrânea em bacias hidrográficas a partir de séries históricas de vazão: uma ferramenta para a gestão de bacias**. 84 f. UFRGS, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114546/000930617.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 19 março. 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília. 306 p. 2006. ISBN 85-85864-19-2.

FARIA, M. M. **Compartimentação Geomorfológica e Morfometria da Bacia do Rio Pomba, MG/ RJ**. 58 f. Monografia, UFV, Viçosa, 2009. Disponível em: <<http://www.novoscursos.ufv.br/graduacao/ufv/geo/www/wp-content/uploads/2013/08/Maola-Monique-de-Faria.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

FEITOSA, F. A. C. *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 812 p.

FITTS, C. R. **Águas Subterrâneas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. 2015. ISBN 978-85-352-7744-9.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Água subterrânea**. São Paulo: Instituto Água Sustentável, 2017. Traduzido de Groundwater.

GONÇALVES, J. A. C., SCUDINO, P. C. B., SOBREIRA, F. G. **Reservas renováveis e caracterização dos aquíferos fissurais do Leste da Zona da Mata de Minas Gerais e adjacências**. Geologia USP. Série Científica, 5(1), 19-27. 2005.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Legislação Aplicável**. 2021. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/component/content/article/16-duvidas/2161-legislacao-aplicavel>. Acesso em: 12 mar. 2021.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **2º Relatório de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos em Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM, 2014. 259 p.

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas; **Relatório Anual: Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais**. Edição. Belo Horizonte, 2017. p. 58-59.

LERNER, D.; ISSAR, A.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge**. International Association of Hydrogeologists. Vol 8. Heise. Hannover.1990. 345p.

LUZ, A. M.; SANT, R. **Gestão e saneamento ambiental**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016.

Minas Gerais. **Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999**. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5309>. Acesso em: 24 abril. 2020.

Minas Gerais. **Lei nº 13.771, de 11 de dezembro de 2000**. Dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do

Estado e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=549>. Acesso em: 24 abril. 2020.

MMA- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE *et al.* **Águas Subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido.** Brasília: 2007. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/167/_publicacao/167_publicacao28012009044356.pdf. Acesso em: 31 out. 2019.

NOGUEIRA, I. G. **Base Legal de Águas Subterrâneas e Identificação das Áreas Potenciais de Conflito para Uso em Minas Gerais.** 2010. 53 f. Monografia, UFMG, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, D. A. **Estudo Hidrogeológico do Aquífero no Bairro Amaro Lanari, em Ipatinga/MG.** 2018. 68 f. Monografia, UFOP, Ouro Preto.

OLIVEIRA, F. C. **Técnica para o Estabelecimento de Plataforma Genética Utilizando Geoprocessamento.** 77f. Monografia, São José dos Campos. 2005. Disponível em: http://www.civil.ita.br/graduacao/tgs/resumos/2005/TGIEI008_2005_Fabiola.pdf. Acesso em: 31 out. 2019

OLIVEIRA *et. al.* CPRM. **Projeto Leste: Ipatinga.** 20. ed. Belo Horizonte: CPRM. 67 p. 2000. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/8650/14/Relat%c3%b3rio_ipatinga.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.

REBOITA, M. S., RODRIGUES, M., SILVA, L. F., ALVES, M. A. **Aspectos Climáticos do Estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 17, p. 206-226. 2015.

TEIXEIRA, W., TOLEDO, M. C. M., FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra.** São Paulo: USP. 2000.

REBOUÇAS, A. C. **A política nacional de recursos hídricos e as águas subterrâneas.** Revista Águas Subterrâneas nº. 16. 2002.

ROSSI, C. H. A. **Fundamentos de geologia**. 1. ed. Editora Pearson. 2017.

ROSSI, D. Q. **Estratigrafia e Arcabouço Estrutural da Região De Fábrica Nova, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. UFOP, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/4083>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SNIRH - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS. **Séries Históricas de Estações**. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 4 nov. 2019.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. Hydrogeology Journal 10: 18-39. 2002.

SCHILLING, K. Investigating **local variation in groundwater recharge along a topographic gradiente, Walnut Creek, Iowa, USA**. Hydrogeology Journal 17: 397-407. 2009.

VASCONCELOS, S. G. **Geomorfologia e urbanização no Vale do Aço as planícies e a cidade de Ipatinga**. 126 f. Dissertação de Mestrado. UFMG, Belo Horizonte, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9XQG8D>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade de águas e ao tratamento de esgotos**. 2. Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1996.

WICANDER, R.; MONROE, J. S. **Fundamentos da Geologia**. 1. ed. 2009.