

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**DIAGNÓSTICO DO USO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO
CORUMBATAÍ: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL**

Gabriela Barbosa de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Co-orientador: Prof. Msc. Lucas Vituri Santarosa

Rio Claro (SP)

2019

GABRIELA BARBOSA DE CARVALHO

**DIAGNÓSTICO DO USO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS NA BACIA DO RIO
CORUMBATAÍ: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A
GESTÃO SUSTENTÁVEL**

*Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.*

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Co-orientador: Prof. Msc. Lucas Vituri Santarosa

Rio Claro - SP
2019

C331d Carvalho, Gabriela Barbosa de
 Diagnóstico do uso de águas subterrâneas na bacia do rio
Corumbataí : Uma contribuição para a gestão sustentável /
Gabriela Barbosa de Carvalho. -- Rio Claro, 2019
48 f. : il., tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado –
Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro
Orientador: Didier Gastmans
Coorientador: Lucas Vituri Santarosa

1. Água conservação. 2. Água consumo. 3. Bacias
hidrográficas. 4. Águas subterrâneas. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

GABRIELA BARBOSA DE CARVALHO

**DIAGNÓSTICO DO USO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
BACIA DO RIO CORUMBATAÍ: UMA CONTRIBUIÇÃO
PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL**

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Didier Gastmans (orientador)

MSc. Vinícius Rosa Rodrigues

MSc. Ludmila Vianna Batista

Rio Claro, 01 de julho de 2019.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Manoel e à minha mãe Luzia, por serem sempre a minha base de tudo, me apoiando e me amando quando eu mais precisei. Eu sei que vocês fizeram o possível e o impossível para me fazer chegar aonde eu estou.

À minha irmã Flora, meu irmão Rafael, minha avó Rosa, minha prima Alíria e toda a minha família que sempre me deu apoio, suporte e amor. Ao Caio Wolf por me apoiar e cuidar de mim.

Ao meu orientador Didier e co-orientador Lucas, pela paciência e prestatividade que tornaram esse trabalho realidade.

Aos funcionários do DAEE de Rio Claro e da Geoinform Ambiental, onde estagiei, por todo o aprendizado e amizade.

Às minhas amigas de infância Danielle, Daniela e Natália, por todos os anos de amizade, carinho e suporte mesmo com a distância.

Aos amigos da turma de Engenharia Ambiental, Beatriz Pereira, Beatriz Leite, Lia Nunes, Caio Simões, Daniel Guerrero, Bruno Comunale e Filipi Cardoso, por todos os momentos juntos, risadas, viagens e festas.

À República Quebra-Cadeira e todas as suas moradoras, Aninha, Carolzinha, Isa, Buteco, Fer, Danoninho, Arroto, Olla, Lívia, Donzela, Chicota e bixetes, por se tornarem a minha família em Rio Claro. Por todos os anos de amizade, conversas, companheirismo, brigas, conselhos e aprendizados.

RESUMO

O aumento na demanda de água decorrente do aumento populacional e expressivo desenvolvimento econômico nas Bacias Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), vem causando uma pressão excessiva sobre os recursos hídricos. O consumo desenfreado de água junto com o aumento na demanda hídrica necessita de estratégias de gestão adequadas, para que não se estabeleça uma crise hídrica. Apesar da importância das águas subterrâneas no contexto das Bacias PCJ, seja na manutenção das vazões dos cursos d'água, seja como fonte de abastecimento alternativo, o desconhecimento e desinteresse com esse recurso faz com que a sua gestão seja limitada, apresentando falhas. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta um diagnóstico da utilização das águas subterrâneas na bacia do rio Corumbataí, por meio da quantificação dos volumes de água subterrânea outorgados comparados com vazões de referência estabelecidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Os dados de outorga e as vazões de referência foram obtidas junto aos bancos de dados públicos do DAEE. Os resultados indicam que a água subterrânea representa apenas 11% de todas as captações outorgadas na bacia do Rio Corumbataí, com a maior parte dos poços captando águas subterrâneas no Sistema Aquífero Tubarão (SAT). A partir dos dados de outorga foi possível estimar os volumes explorados e identificar as áreas críticas da bacia. Em alguns pontos, o volume extraído chega a 170% da vazão específica de referência ($Q_{7,10}$), revelando uma situação bastante crítica. Essa concentração de poços de extração está localizada na área urbana dos municípios de Rio Claro, Santa Gertrudes e Cordeirópolis, onde cerca de 54% da água subterrânea é destinada ao uso industrial e 40% ao uso urbano, não necessariamente ao abastecimento público. Para não comprometer a sustentabilidade dos recursos subterrâneos, recomenda-se que algumas medidas sejam tomadas, como o monitoramento de vazão e nível d'água, análise da interferência entre os poços e fiscalização.

Palavras-chave: Disponibilidade Hídrica, águas subterrâneas, gestão de recursos hídricos, Rio Corumbataí.

ABSTRACT

The increase of water demand due to the population growth and the significant economic development in the Piracicaba, Capivari and Jundiaí Rivers (PCJ) watershed has been causing excessive pressure on water resources. The excessive consumption of water along with the increase of its demand requires management strategies to avoid a crisis situation. Besides the groundwater importance in the PCJ watershed, whether in the watercourse flow maintenance or in the water supply, the lack of groundwater knowledge and interest makes its management limited, presenting failures. In this context, this graduation study presents the diagnostic of the PCJ watershed groundwater use through the groundwater volume quantification from the grant permits data compared to the reference flow statistics established by the water management agency of the state of São Paulo, Brazil. All the data about the water licenses and the values of the reference flow statistics was taken from the state agency public database. The results show that the groundwater represents only 11% from the total water abstraction in the Corumbataí River watershed, in which most of the groundwater is collected from the Tubarão Aquifer System (SAT). From this data it was possible to estimate the volume pumped and to identify the critical areas in the watershed. In a few places, the volume pumped represents almost 170% of the specific low-flow statistic $Q_{7,10}$, revealing a critical situation. This large concentration of pumping wells is located in the urban area of the Rio Claro, Santa Gertrudes and Cordeiropolis cities, where approximately 54% of the groundwater is used for industrial purposes and 40% is assigned to urban uses, not necessarily to public supply. In order to preserve the sustainability of the groundwater resources, it is recommended a few maintenance measures, such as the flow and water level monitoring, the interaction between pumping wells and their inspection.

Key words: Water availability, groundwater, water management, Corumbataí River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da sub-bacia do rio Corumbataí	17
Figura 2. Porcentagens de uso e ocupação do solo na bacia do rio Corumbataí	18
Figura 3. Distribuição da precipitação na bacia do rio Corumbataí	19
Figura 4. Modelo digital de elevação da bacia do rio Corumbataí.....	20
Figura 5. Características litológicas da sub-bacia do rio Corumbataí	21
Figura 6. Aquíferos da bacia do rio Corumbataí	22
Figura 7. Características pedológicas da bacia do rio Corumbataí	23
Figura 8. Localização das estações fluviométricas escolhidas	25
Figura 9. Fluxograma de etapas de seleção dos dados	28
Figura 10. Hidrograma da estação 4D-023.....	29
Figura 11. Hidrograma da estação 4D-021.....	30
Figura 12. Curvas de permanência das estações fluviométricas	31
Figura 13. Quantidade de outorgas e volume de água subterrânea e superficial extraída na bacia do rio Corumbataí	32
Figura 14. À esquerda o número absoluto poços outorgados e à direita o volume de água extraída (m ³ /s) de acordo com a situação administrativa	33
Figura 15. À esquerda o número absoluto de poços outorgados à direita o volume (m ³ /s) de água captada de acordo com a finalidade	34
Figura 16. Mapa dos poços outorgados de acordo com a finalidade.....	35
Figura 17. À esquerda o número absoluto de poços e à direita o volume de água subterrânea extraído (m ³ /s) por município	35
Figura 18. Número absoluto de poços outorgados poços conforme o aquífero	36
Figura 19. Volume extraído outorgado (m ³ /s) conforme o aquífero	37
Figura 20. Captações subterrâneas de acordo com o volume.....	38
Figura 21. Mapa de densidade dos volumes subterrâneos extraídos.....	39
Figura 22. Relação da densidade do volume d'água extraído com a vazão Q _{7,10} específica	40

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo Geral.....	10
2.2. Objetivos Específicos	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1. Ciclo hidrológico	10
3.2. Disponibilidade hídrica	13
3.3. Outorga e Utilização de Águas Subterrâneas.....	14
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1. Caracterização da Área de Estudo.....	16
4.2. Análise Hidrológica.....	23
4.2.1. Critérios para a escolha das estações	24
4.2.2. Vazão $Q_{7,10}$	25
4.2.3. Curva e Vazões de Permanência	26
4.2.4. Seleção de dados dos poços	27
4.2.5. Tratamento dos dados	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.2. Exploração de águas subterrâneas	32
5.3. Extração de águas subterrâneas	37
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1. INTRODUÇÃO

Diversas são as motivações para o estudo da hidrologia, e a principal está relacionada a importância da água como recurso indispensável ao desenvolvimento humano e econômico de uma determinada região (MARGULIS, 2016), sendo clara a necessidade de um gerenciamento adequado da água para a sua preservação.

Apesar do Brasil ser um dos países com maior reserva de água doce do planeta, vários fatores afetam a disponibilidade hídrica do país, como a significativa variação climática anual e sazonal em território brasileiro, sendo essa considerada uma das maiores condicionantes de disponibilidade hídrica (TUCCI, 2001).

Além das características climáticas, outro fator a ser considerado diz respeito ao impacto das mudanças nos padrões climáticos global, que segundo Wu *et al* (2010), resultam em grandes mudanças no ciclo hidrológico.

As águas subterrâneas, superficiais e meteóricas compõem juntas o ciclo hidrológico da água, onde cada elemento tem relação contínua com os outros elementos do ciclo (WINTER *et al*, 1998). A análise do ciclo hidrológico em uma bacia hidrológica deve ser entendida como uma combinação das águas subterrâneas e superficiais que a abastecem. Durante os períodos de estiagem, por exemplo, a água de rios e lagos é assegurada pelo fluxo de base, ou seja, descarga de água oriunda dos aquíferos (HIRATA *et al*, 2019).

É através do balanço hídrico que se pode verificar a quantidade de água envolvida nas fases do ciclo hidrológico, de forma que os valores de fluxo de entrada idealmente se igualam aos valores de fluxo de saída. Além disso, por meio de um balanço hídrico também é possível descrever o comportamento do regime hidrológico da bacia (FREEZE & CHERRY, 1979).

No entanto, alguns fatores influenciam diretamente o ciclo hidrológico, como as atividades antrópicas. A captação de água para diferentes finalidades retira água da bacia hidrográfica e nem sempre essa água retorna ao ciclo. O sistema então sofre perdas significativas e entra em desequilíbrio, afetando a disponibilidade dos recursos hídricos.

Nesse contexto, a bacia do rio Corumbataí, inserida na UGRHI 05 – Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ), apresenta um comprometimento da disponibilidade hídrica de sua região. Os setores produtivos, industriais e rurais são atraídos para a região das bacias PCJ visando novos empreendimentos, o que influencia no crescimento populacional e, conseqüentemente, no crescimento da demanda local (CBH-PCJ, 2018).

O crescimento da demanda de água, o planejamento inadequado do gerenciamento dos recursos hídricos e a ausência de consciência coletiva dos consumidores para o uso racional da água leva a uma escassez hídrica. Foi o que aconteceu na crise hídrica de 2014 e 2015 que atingiu o Estado de São Paulo. Considerada a maior seca ocorrida na região Sudeste dos últimos 70 anos (INPE, 2015), esse período de estiagem prolongada gerou impactos consideráveis como o transtorno no abastecimento público, falhas no fornecimento de energia elétrica e rebaixamento do nível d'água nos rios e aquíferos (MARENGO *et al*, 2015; OLIVEIRA FILHO, 2015).

Apesar do governo de São Paulo ter justificado a crise decorrida baseando-se essencialmente em eventos meteorológicos, a crise hídrica que atingiu São Paulo confirmou algumas falhas no gerenciamento de recursos hídricos no Brasil (LE MONDE, 2014). Embora existam instrumentos legais e normativos relacionados a recursos hídricos, alguns conceitos importantes ainda são desconsiderados.

Além da insuficiência na implementação de mecanismos de gestão integrada, há também uma deficiência quanto ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos. Não existe um critério de referência adequado para a extração dessas águas, o que afeta suas reservas devido à superexploração. Se os limites das reservas forem ultrapassados, podem surgir vários impactos negativos como o rebaixamento do nível d'água, alteração no escoamento básico dos rios, a seca das nascentes, expansão da contaminação dos aquíferos, desequilíbrio ambiental, entre outros (ANA, 2011).

Deste modo, a bacia do rio Corumbataí foi selecionada como objeto de estudo para avaliação do volume extraído dos recursos hídricos subterrâneos em relação aos valores de referência utilizados para a emissão de outorga. A intenção é gerar um diagnóstico do uso das águas subterrâneas, com uma melhor identificação das áreas críticas no balanço hídrico e dos impactos na disponibilidade hídrica, a fim de auxiliar os responsáveis na tomada de decisão.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente estudo teve como objetivo principal o levantamento das captações subterrâneas cadastradas e outorgadas pelo DAEE e a quantificação dos volumes de água subterrânea extraídos na bacia do rio Corumbataí. Assim como a comparação com a vazão $Q_{7,10}$, valor de referência para a emissão de outorga.

2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos temos:

- Avaliar a sustentabilidade do modelo de exploração de águas subterrâneas atuais
- Apresentar o perfil do uso das águas subterrâneas
- Proposição de medidas de gestão face a exploração

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é um fenômeno de circulação fechada da água, cuja fonte de energia é o sol. A energia solar resulta no aquecimento do ar, solo e água superficial, além de ser responsável pela evaporação e evapotranspiração da água – através das plantas. A evaporação que ocorre nos oceanos é a maior fonte de vapor para a atmosfera, mas existe também a contribuição da evaporação de água dos solos, corpos hídricos e a transpiração vegetal (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

A evaporação é o processo de transferência de água líquida da superfície em água atmosférica, como vapor. A evaporação é um processo importante, pois ocasiona perdas de água, além de influenciar na quantidade de precipitação. A água presente na atmosfera é transportada pelo ar, podendo condensar e formar nuvens. Quando condensado, o vapor se transforma em microgotículas que ficam suspensas na atmosfera, podendo crescer e atingir tamanho e peso consideráveis, causando a formação de nuvens. Em condições específicas, o vapor condensado pode retornar à superfície na forma de precipitação (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

A precipitação pode ocorrer como chuva, granizo, neve ou neblina. No Brasil, a chuva é a forma mais importante de precipitação e principal fonte de entrada de água na bacia. Esta abastece os cursos d'água, tanto pelo escoamento superficial aos canais tributários, como pelas rotas de fluxo subterrâneo, pelo interfluxo e escoamento após a infiltração no solo (FREEZE & CHERRY, 1979).

No entanto, a água proveniente da precipitação pode ser interceptada antes que atinja o solo. A retenção de água ocorre na cobertura vegetal e em parcelas impermeáveis do solo (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

A água da atmosfera que de fato atinge a superfície fica suscetível a certos processos, como infiltração e escoamento. O escoamento superficial é a porção de água que não infiltra no solo, e ocorre quando o solo é impermeável ou impermeabilizado, ou quando o solo já se encontra saturado (TUCCI, 2001). Já a infiltração pode ser definida como a penetração da água no solo, a partir da superfície. O estudo da infiltração e da dinâmica de água no solo são importantes nas análises de quantificação do escoamento superficial, uma vez que a água que infiltra no solo deixa de escoar superficialmente. Desta forma, a redução da infiltração resulta no aumento do escoamento superficial, o que contribui para possíveis cheias (HEALY, 2010; COLLISCHONN & DORNELLES, 2013)

A água infiltrada equivale a uma recarga potencial, que pode se tornar recarga aquífera de fato se o deslocamento vertical até a zona freática for mantido. A recarga da água subterrânea pode ser definida como o movimento da água da superfície para um aquífero, sendo que a taxa de recarga representa a quantidade de água que contribui para o aumento ou reposição das reservas dos aquíferos. Normalmente, a taxa de recarga depende de certas variáveis hidrogeológicas, como o regime e quantidade de precipitação que efetivamente infiltra, além das propriedades hidráulicas do substrato rochoso, topografia e características geológicas. Áreas com o relevo plano tendem a apresentar processos de infiltração mais intensos, enquanto áreas com o relevo acentuado tendem a sofrer processos de escoamento superficial (SOPHOCLEOUS, 2002; HEALY, 2010).

Parte da água infiltrada nas áreas de recarga é destinada para recarga potencial direta (RPD), ou seja, infiltra e chega efetivamente nos aquíferos livres, onde parte alimenta o escoamento de base dos rios. Dessa porção de água de RPD, uma parte se torna reserva renovável (aquíferos livres); uma segunda parte mantém o fluxo de base, que sustenta rios,

lagos e água superficial em geral; e uma parcela pequena é destinada a recarga profunda e se torna reserva permanente (PRANDI, 2010; ANA, 2016).

As reservas renováveis levam em conta as características dinâmicas dos aquíferos, principalmente a capacidade de recarga e armazenamento e possuem recarga direta, ou seja, o nível de água varia de acordo com a quantidade de precipitação. A capacidade de armazenamento dessas reservas é baixa, mas o tempo de recarga é conveniente, o que torna seu rendimento relevante (PROFILL-RHAMA, 2018).

Por outro lado, apesar de conter grandes dimensões, as reservas permanentes possuem recarga indireta, ou seja, o tempo de recarga é ínfimo. É importante ressaltar que as reservas permanentes não foram estabelecidas para as bacias PCJ, em razão à falta de conhecimento sobre aquíferos fraturados e à baixa disponibilidade de informações sobre aquíferos confinados (PROFILL-RHAMA, 2018).

Os recursos hídricos subterrâneos, abastecidos pelas áreas de recarga, podem ser divididos em dois grupos. O primeiro, referente à água do solo, ocorre em uma região mais próxima da superfície, onde os poros se encontram parcialmente ocupados por ar (zona não saturada). A água subsuperficial em si ocorre em uma zona mais profunda, onde a água ocupa completamente os poros do solo (zona saturada) (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013)

A água subterrânea fica contida nas formações geológicas denominadas aquíferos. A porosidade do aquífero indica a sua capacidade de conter água, representada pela relação entre o volume de vazios sobre o volume total. Existem dois tipos de aquíferos, o confinado, que se localiza entre duas camadas impermeáveis (aquiclude); e o não confinado, ou livre, no qual não há camadas impermeáveis e seu acesso pode ser realizado diretamente da superfície (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

Considerando que as águas superficiais, subterrâneas e atmosféricas fazem parte do mesmo ciclo hidrológico, as águas subterrâneas e superficiais não podem ser tratadas como componentes isolados do sistema hidrológico, pois há entre elas uma complexa interação. Durante períodos de estiagem, a vazão dos rios é abastecida pelo fluxo de base, mantido pela água dos aquíferos. O processo hidrológico subterrâneo é tão importante quanto o processo superficial, pois o tipo de material subterrâneo é responsável por controlar as taxas de infiltração, que por sua vez influenciam no tempo e distribuição espacial do escoamento superficial (SOPHOCLEOUS, 2002; COLLISCHONN & DORNELLES, 2013)

3.2. Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica indica a fração de água que pode ser utilizada pela sociedade sem comprometer o meio ambiente. O conceito de disponibilidade está vinculado com o balanço hídrico e se relaciona com o desenvolvimento econômico e social, assim como o aumento de qualidade de vida e bem-estar da população.

Pode ser caracterizada a partir dos volumes de precipitação, do tempo de retenção, estado e qualidade das águas de um sistema, entre outros. Também pode ser quantificada exclusivamente a partir das vazões naturais fluviométricas associadas a uma área de drenagem, ou na contabilização das vazões de um determinado sistema hídrico, que pode ser interpretado como todo o planeta, um continente inteiro, apenas uma bacia hidrográfica, ou até mesmo um pequeno trecho de rio (SILVA, 2015).

As mudanças climáticas afetam diretamente o ciclo hidrológico e consequentemente a disponibilidade hídrica, pois referem-se a alterações significativas no regime de chuvas, temperatura, evaporação e umidade. O aumento da temperatura causa mudanças na intensidade e variabilidade da precipitação, afetando significativamente a disponibilidade e distribuição hídrica. Isso significa que alguns eventos hidrológicos críticos, secas e enchentes tendem a se tornar mais frequentes (ANA, 2010; HIRATA *et al*, 2019).

Normalmente é possível renovar uma certa quantidade de água das reservas hídricas através dos efluentes lançados e evidentemente da precipitação, no entanto, a exploração excessiva de águas superficiais e subterrâneas pode comprometer a capacidade de armazenamento de água. Estima-se que desde 1900, em torno de 64% e 71% das zonas úmidas de todo o mundo foram perdidas devido às atividades humanas, o que gerou impactos negativos na hidrologia em escala local, regional e mundial (ONU, 2018).

Além disso, o crescimento populacional associado com o desenvolvimento econômico aumenta o consumo de água. Algumas grandes concentrações urbanas já se encontram em condições críticas em períodos de estiagem devido ao uso intensivo de água (TUCCI *et al*, 2000). A demanda mundial por água tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% por ano e continuará a aumentar de maneira significativa nos próximos anos (ONU, 2018). O mundo inteiro é atingido pelas condições de exploração excessiva dos recursos hídricos, visto que quase metade da população mundial vive em áreas que apresentam uma potencial escassez de água por pelo menos um mês por ano (ONU, 2018).

A crise de água afeta diversos setores da economia e sociedade. A maioria da energia elétrica produzida no Brasil provém de usinas hidrelétricas, que dependem diretamente dos recursos hídricos. Por conta disso, alterações na disponibilidade hídrica tendem a afetar o fornecimento de energia elétrica. Há também um impacto na indústria, no qual os empreendimentos são submetidos a mudanças de procedimentos; e na agricultura, que depende integralmente de irrigação (MARENGO *et al*, 2015).

Essa situação de escassez hídrica provoca um aumento de perfuração de poços tubulares em todo o país em razão das necessidades de saneamento. Somente no período de 2010 a 2015, a quantidade de concessões de outorga aumentou cerca de 9 vezes no Brasil (ANA, 2016 *apud* HIRATA *et al*, 2019). São Paulo é um dos Estados brasileiros que mais depende desse recurso, sofrendo grande risco da diminuição da produção ou perda de poços devido à superexploração do aquífero ou à interferência no fluxo subterrâneo devido à presença de outras captações subterrâneas próximas (HIRATA *et al*, 2019).

O Estado de São Paulo também foi afetado pela escassez hídrica nos anos de 2014 e 2015, considerado o maior período de estiagem dos últimos 70 anos da região Sudeste (INPE, 2015). Como os mananciais não foram capazes de suprir a demanda, a água subterrânea se tornou a fonte principal de suplementação de água para abastecimento urbano e atividades industriais (CBH-PCJ, 2018).

Com intenção de realizar o planejamento e gestão adequados dos recursos hídricos e evitar situações de escassez, o uso das águas subterrâneas deve estar condicionado ao cumprimento de requisitos legais, como o monitoramento da qualidade da água, a cobrança pelo uso do recurso hídrico e a licença, registro ou outorga.

3.3. Outorga e Utilização de Águas Subterrâneas

O uso dos recursos hídricos está vinculado com o cumprimento de requisitos legais, como a licença, registro ou outorga da captação. A outorga é um dos principais instrumentos de gestão de recursos hídricos, sendo a ferramenta responsável pelo controle quantitativo dos usos de água, garantindo o direito de uso ou interferência ao usuário. A Portaria DAEE nº 1.630/2017, reti-ratificada em 21/03/2018, define outorga como:

“Ato administrativo, que pode ser por meio de autorização ou de concessão, com prazo determinado, mediante o qual o DAEE defere a

utilização ou interferência em recursos hídricos, após solicitação formal do requerente, nos termos e nas condições expressas em Portaria específica, considerando aspectos técnicos e legais previstos em regulamento (DAEE, 2018, p.2)”

A Constituição Federal de 1988 define que o poder de outorga pertence ao Poder Público, ou seja, à União, ao Estado ou ao Distrito Federal. A gestão da água subterrânea é sempre de competência do Estado, no entanto, a entidade outorgante das águas superficiais depende do domínio do recurso hídrico. Corpos d'água que ultrapassem os limites do Estado ou até mesmo do país são recursos hídricos de domínio da União, sendo a ANA (Agência Nacional das Águas) a responsável pela outorga. Nos corpos d'água restantes, o domínio das águas pertence aos Estados. Em São Paulo, o órgão outorgante das águas superficiais e subterrâneas é o DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), por intermédio da Lei Estadual 7.663/1991 e pelo Decreto Estadual nº 41.258/1996 (TUCCI, 2001; ANA, 2011; COBRAPE, 2011).

O sistema de outorga é importante, pois visa monitorar os volumes e usos da água. Além disso, obtém informações de maneira organizada através de um banco de dados, auxiliando no processo de gestão de recursos hídricos. Segundo Cruz (2001), essas informações são essenciais para o conhecimento da disponibilidade hídrica, pois os usos e interferências em recursos hídricos afetam as séries hidrológicas.

Para proporcionar segurança e proteção aos recursos hídricos é necessário o estabelecimento de um critério de outorga de direito de uso, ou seja, a escolha de uma variável associada com a disponibilidade hídrica. Assim, entende-se que o mais importante critério de outorga é a vazão de referência, pois esta estabelece um valor de vazão que representa o limite de utilização da água, reduzindo as possibilidades de riscos e impactos de situações hidrológicas adversas (RIBEIRO, 2000 *apud* CRUZ, 2001; PROFILL-RHAMA, 2018).

De acordo o Art 13º da Lei Nº 9.034/94, os regulamentos e decisões a respeito da outorga ou licenciamento do uso de recursos hídricos deverão seguir orientação estabelecida pelo plano de bacia. Diante disso, a vazão de referência adotada na bacia Piracicaba, Corumbataí e Jundiá – PCJ é a $Q_{7,10}$. Esse é o critério utilizado pelos órgãos responsáveis pela gestão ambiental e dos recursos hídricos para determinar a disponibilidade hídrica e

auxiliar a análise de outorga de direito de uso, pois representa a vazão mínima para que os processos ecológicos no curso d'água não sejam afetados (COBRAPE, 2011).

Como o Art 14º da Lei Estadual Nº 9.034/94, estabelece que “quando a soma das vazões captadas em uma determinada bacia hidrográfica, ou em parte desta, superar 50% (cinquenta por cento) da respectiva vazão de referência, a mesma será considerada crítica”, a vazão utilizada para outorga no DAEE é, na verdade, apenas 50% da vazão $Q_{7,10}$. Esse valor equivale à vazão outorgável, isto é, digna de outorga. Qualquer valor que exceda 50% da $Q_{7,10}$ é passível de indeferimento.

No entanto, a vazão $Q_{7,10}$ só é utilizada para águas superficiais. Para águas subterrâneas, não há critérios específicos. Em suma, os critérios para a outorga de direito de uso dos recursos hídricos são muito vagos, sendo considerado apenas o conceito de disponibilidade hídrica superficial e o regime de racionamento, além de desconsiderar as águas subterrâneas e a integração entre os recursos (PROFILL-RHAMA, 2018).

A gestão dos recursos hídricos necessita ser reforçada, de forma a evitar o prolongamento ou agravamento da situação de déficit hídrico. Na concessão de outorga de direito de uso da água, é necessário aprimorar e conhecer a disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica antes de novos aproveitamentos e usos de água.

É importante que as águas subterrâneas estejam inclusas nesse aprimoramento nos critérios de emissão de outorga. Assim, será possível desenvolver a gestão sustentável desse recurso, no sentido de assegurar o direito do acesso a água e a sua qualidade adequada, alinhados com a viabilidade econômica. Além de garantir a disponibilidade dos recursos hídricos para os ecossistemas e organismos que dependem da água, incluindo os seres humanos, visando o desenvolvimento sustentável atual e para futuras gerações (SILVA, 2015).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A bacia do rio Corumbataí, inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGHRI) 05 – Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), é uma sub-bacia do rio Piracicaba, um dos maiores e mais importantes corpos hídricos de São Paulo, ocupando áreas totais ou parciais dos municípios de Analândia, Charqueada, Cordeirópolis, Corumbataí,

Ipeúna, Itirapina, Piracicaba, Rio Claro, Santa Gertrudes e São Pedro (PROFILL-RHAMA, 2018) (Figura 1).

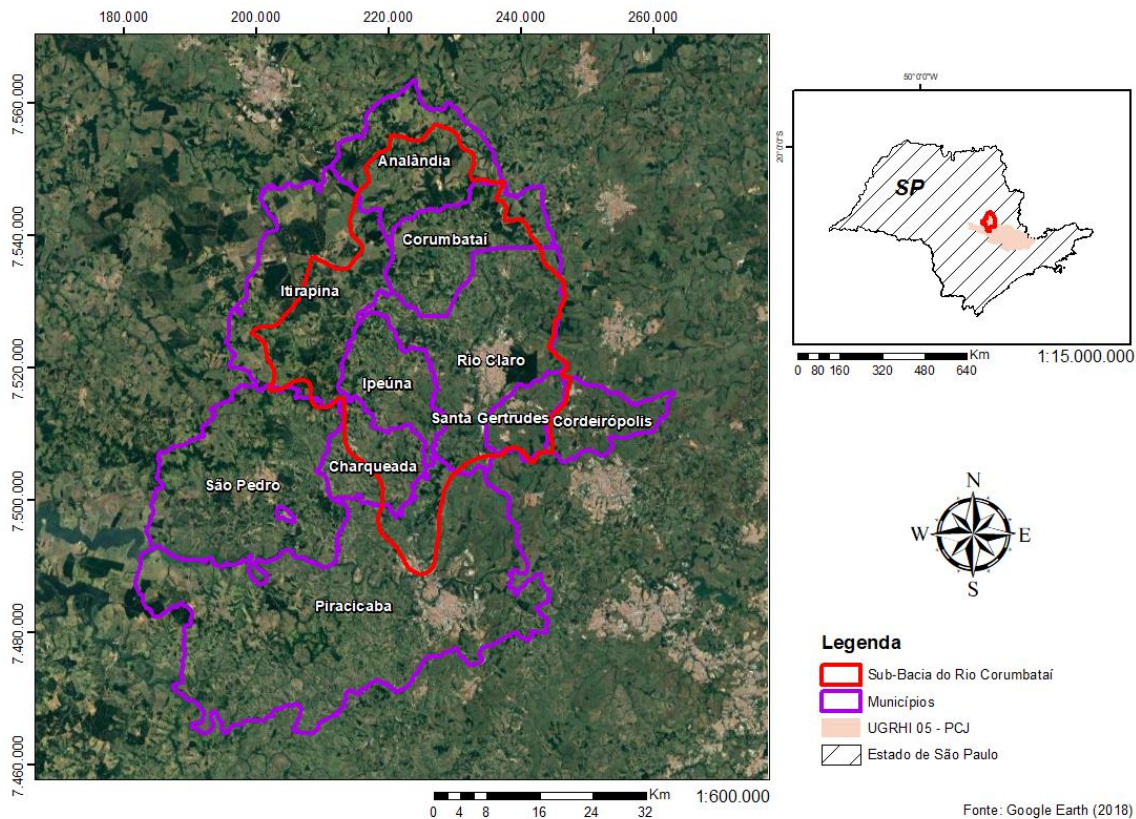


Figura 1. Localização da sub-bacia do rio Corumbataí

O rio Corumbataí drena uma área total de 1682 km², com uma população total de aproximadamente 600.000 habitantes. Apesar de ocupar a menor porção territorial da bacia, a cidade de Piracicaba, com cerca de 400.000 habitantes, depende integralmente das águas do rio Corumbataí para abastecimento hídrico. Rio Claro e Analândia são as cidades que mais demandam água da bacia depois de Piracicaba. A soma do total demandado por essas três cidades representa 94,13% da demanda geral da sub-bacia (SHS, 2006; IBGE, 2010)

A maior parte da bacia é ocupada por áreas agrícolas com extensa produção de cana-de-açúcar. Com cerca de 43,96% da área total, a atividade agrícola concentra-se principalmente nos municípios de Rio Claro, Corumbataí, Charqueada, Ipeúna e Santa Gertrudes (COBRAPE, 2011).

As áreas de mata nativa representam 22,7% de áreas distribuídas entre Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente (APP) e Áreas de Proteção Ambientais

(APA). Parte da área da bacia compreende a APA Piracicaba e Juqueri-Mirim e a APA Corumbataí, Botucatu e Tejuapá – Perímetro Corumbataí. Em certas áreas, uma APA sobrepõe a outra, aumentando ainda mais a fragilidade da região. Em seguida, conforme a Figura 2, encontram-se as áreas de campo, onde predomina o rebanho bovino e lavoura permanente, na qual destaca-se o cultivo de laranja (SHS, 2006; COBRAPE, 2011).

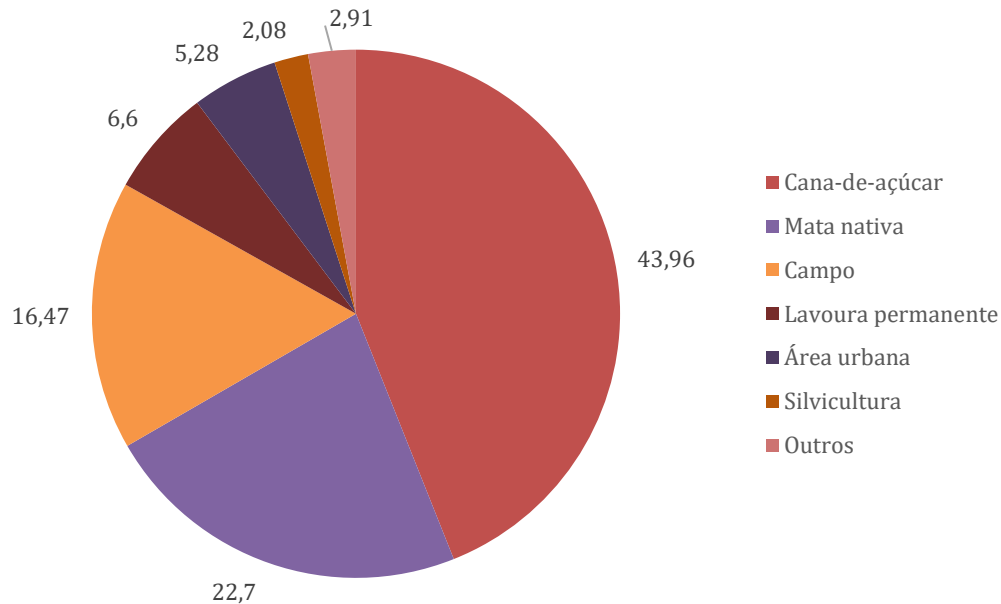


Figura 2. Porcentagens de uso e ocupação do solo na bacia do rio Corumbataí. Fonte: Adaptado de PROFILL-RHAMA (2018)

A precipitação anual média varia de 1.501 a 1.526 mm/ano, sendo que a porção sudoeste possui menor precipitação quando comparada às porções centro e nordeste da bacia (Figura 3). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da área de estudo é classificado como Cwa, ou seja, subtropical com inverno seco (mês mais seco com precipitação menor que 40 mm) e verão quente (temperatura média no verão maior que 22 °C) (PROFILL-RHAMA, 2018).

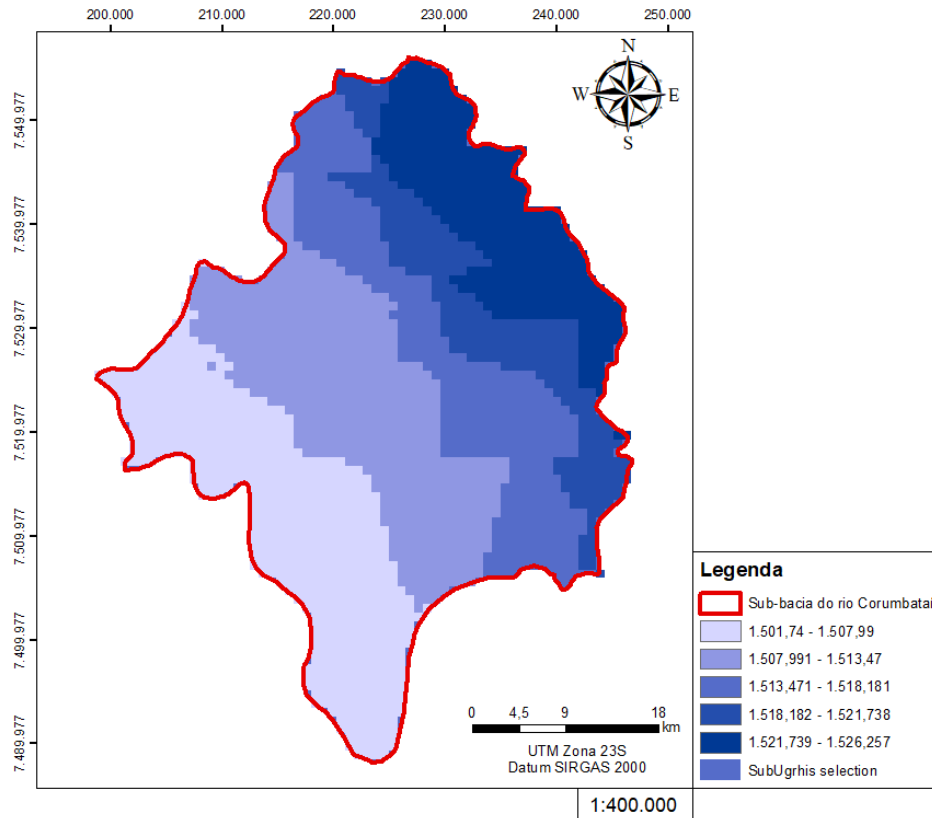


Figura 3. Distribuição da precipitação na bacia do rio Corumbataí. Fonte: Dados de precipitação do satélite TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) de 1998 a 2016 com resolução espacial de 0,25° disponibilizadas pela NASA (National Aeronautic and Space Administration)

As altitudes na bacia hidrográfica do rio Corumbataí variam de 468 a 1071 metros (Figura 4). Em sua porção oeste, localiza-se nos Planaltos Residuais Cuestiformes da Bacia do rio Paraná, as quais referem-se a plataformas estruturais caracterizadas pelo relevo escarpado no contato com a Depressão Periférica Paulista – presente em toda a região central, sul e leste da bacia. É caracterizada pela predominância de colinas de topos amplos ou convexas, recoberta por uma rede de drenagem densa, que apresenta potencial erosivo elevado (IPT, 2012 *apud* PROFILL-RHAMA, 2018).

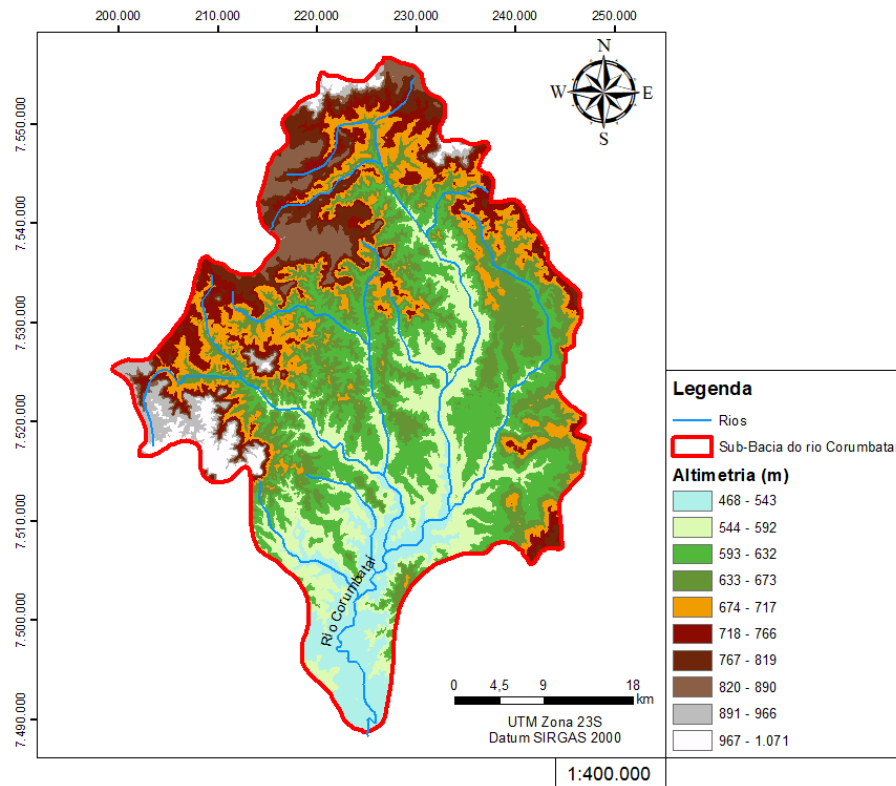


Figura 4. Modelo digital de elevação da bacia do rio Corumbataí. Fonte: Dados da superfície do terreno SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução espacial de 30 metros disponibilizadas pela NASA (National Aeronautic and Space Administration)

O arcabouço geológico da área de estudos é formado na sua parcela oeste pelas Formações Piramboia e Botucatu e leste pela bacia sedimentar das Formações Tatuí e Itararé pertencentes ao Grupo Tubarão, além da Formação Corumbataí do Grupo Passa Dois. Em partes, essas formações são sobrepostas pelo grupo vulcânico da Formação Serra Geral e de depósitos colúvio-aluvionares distribuídos ao longo de drenagens (Formação Rio Claro).

Apesar de estar inserida na Bacia PCJ, a qual apresenta predomínio de afloramentos de rochas de embasamento cristalino, a bacia do rio Corumbataí apresenta ocorrência praticamente nula desse tipo de embasamento. De acordo com a Figura 5, os estratos referentes às formações Piramboia e Botucatu ocupam quase 50% da área de estudo, seguido de estratos pertencentes ao Grupo Passa Dois. A distribuição espacial das litologias é um fator determinante na circulação da água no sistema, pois as unidades aquíferas presentes na bacia são resultado das unidades geológicas existentes (PROFILL-RHAMA, 2018).

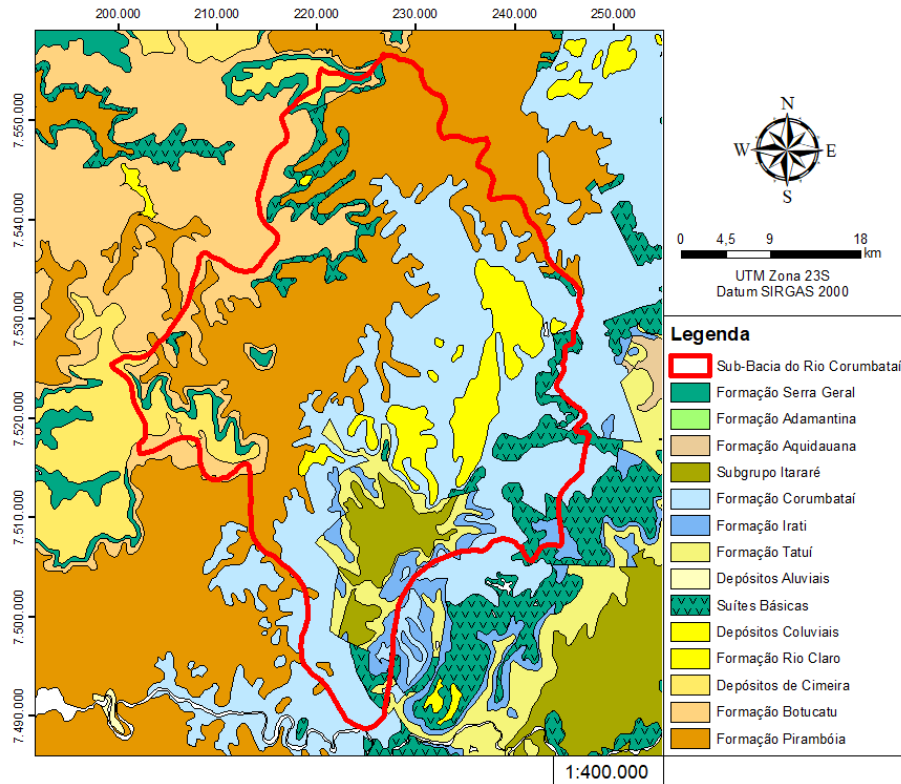


Figura 5. Características litológicas da sub-bacia do rio Corumbataí. Fonte: DAEE, 2006

Nas áreas das Formações Piramboa e Botucatu – que ao mesmo tempo referem-se às áreas de maior altitude – encontra-se o Sistema Aquífero Guarani (SAG) na sua parcela aflorante, apresentando características homogêneas e livres. Esta porção constitui a zona de recarga do aquífero, o que demanda maior atenção no que diz respeito ao gerenciamento adequado de uso e ocupação do solo na região (Figura 6).

O SAG é considerado um dos principais aquíferos de São Paulo, em razão do volume de água e sua produtividade. Suas vazões podem variar até 80 m³/h no Estado. No entanto, a vazão explorável do aquífero pode conter vazões mais baixas nas áreas mais próximas ao Grupo Passa Dois, pois nessa área o aquífero apresenta menores espessuras saturadas. Este corresponde às áreas de relevo mais baixos da bacia, inserido sobre a Formação Corumbataí. Pode também ser denominado um aquíclude, pois apresenta permeabilidade extremamente baixa. Além disso, costuma apresentar baixa permeabilidade e características de heterogeneidade (SÃO PAULO, 2005 e 2013; PROFILL-RHAMA, 2018).

A partir das informações da Figura 6, nota-se que há uma dificuldade na divisão espacial da área de gestão dos recursos hídricos, que é inteiramente baseada em uma área de

abrangência que se relaciona apenas com as águas superficiais: a bacia hidrográfica. No entanto, todas as informações de águas subterrâneas são produzidas e tratadas conforme os domínios hidrogeológicos, que não correspondem com a delimitação da bacia (PROFILL-RHAMA, 2018).

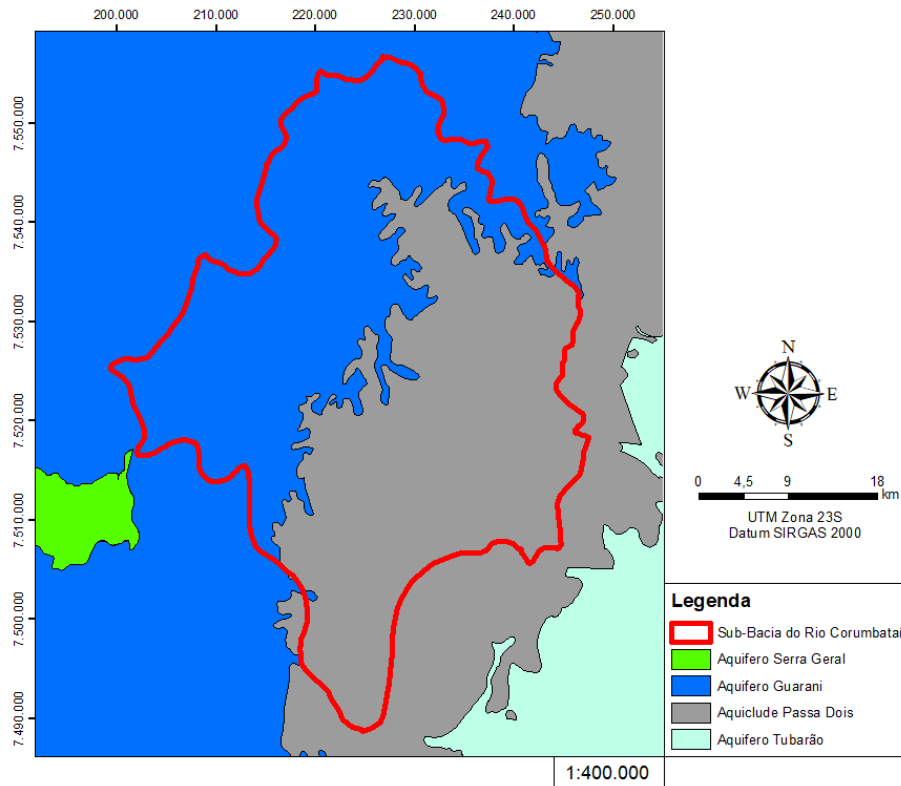


Figura 6. Aquíferos da bacia do rio Corumbataí. Fonte: DAEE (2006)

Os principais tipos de solo na sub-bacia são respectivamente argissolos, latossolos e neossolos. Os latossolos ocorrem principalmente na área de afloramento das unidades constituintes do SAG (Figura 5), sendo constituídos por argilas de baixa atividade, boa permeabilidade, apesar de baixa retenção de umidade. É também um solo com alta suscetibilidade à erosão (EMBRAPA, 2005 e 2006; ROSSI, 2017).

Nas áreas de afloramento das unidades geológicas associadas ao Aquíclode Passa Dois, há o predomínio de argissolos, solos de baixa atividade da argila, baixa fertilidade, acidez, altos teores de alumínio e suscetibilidade à erosão (EMBRAPA, 2005 e 2006).

Em função desse arcabouço geológico, as principais nascentes dos rios da bacia Corumbataí dependem da descarga das águas subterrâneas do SAG (SÃO PAULO, 2005).

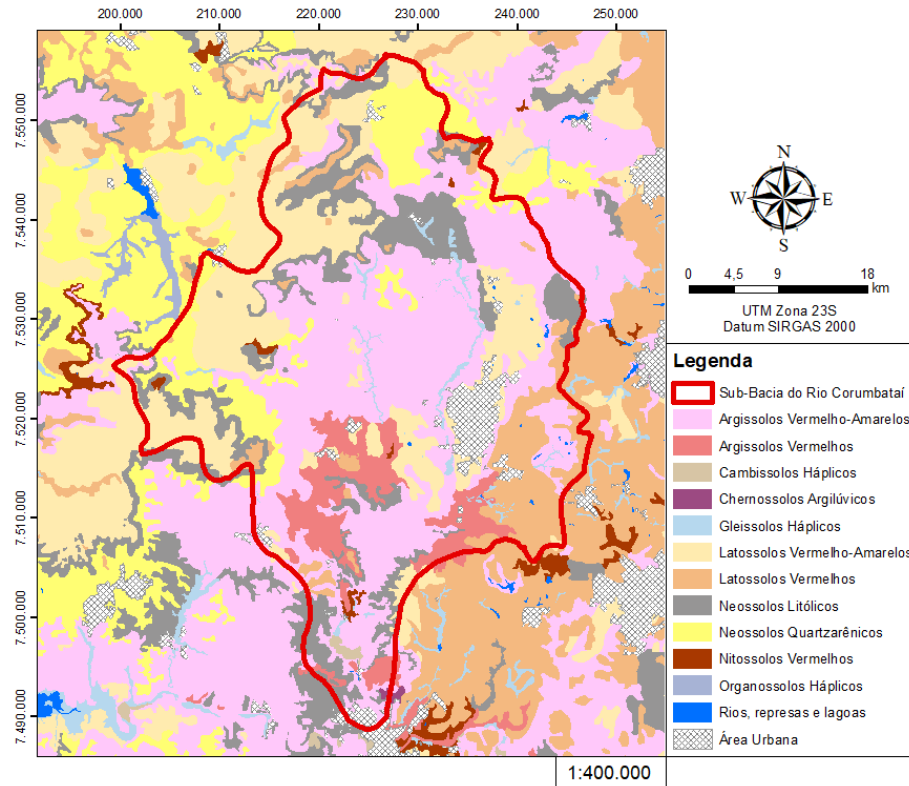


Figura 7. Características pedológicas da bacia do rio Corumbataí. Fonte: ROSSI (2017)

4.2. Análise Hidrológica

A execução de estudos hidrológicos de uma bacia fornece informações sobre as condições de quantidade e qualidade dos recursos hídricos. Nesse contexto, a disponibilidade de água representa um indicador de sustentabilidade – pois está relacionada com a quantidade de água e a conservação da bacia –, podendo ser quantificada pelo balanço hídrico (ANA, 2011). Assim, é possível verificar a eficácia do atual sistema de gestão de recursos hídricos.

Apesar da Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas PCJ 2010 a 2020 (PROFILL-RHAMA, 2018) apresentar alguns cálculos de disponibilidade hídrica e parâmetros hidrológicos, não foi utilizada nenhuma estação fluviométrica dentro da área da bacia do rio Corumbataí. A metodologia empregada pela Revisão do Plano das Bacias PCJ foi a de regionalização geral, utilizando valores de estações da sub-bacia mais próxima, no caso, foram utilizados apenas os dados da bacia do rio Piracicaba (PROFILL-RHAMA, 2018). Desta forma, foram realizados estudos hidrológicos com dados fluviométricos das estações que se encontram dentro da bacia do rio Corumbataí, para resultados mais adequados.

4.2.1. Critérios para a escolha das estações

A utilização de séries hidrológicas é necessária para que a análise indique a real situação de disponibilidade hídrica (ANA, 2010). No Estado de São Paulo, o órgão responsável pelo monitoramento quantitativo da água superficial é o DAEE, por meio de uma rede de estações fluviométricas, que medem a vazão dos cursos d'água; e de estações pluviométricas, responsáveis pelo monitoramento da precipitação. De acordo com o Banco de Dados Hidrológicos (<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>) disponibilizado pelo DAEE, existem 6 estações fluviométricas e 18 estações pluviométricas na bacia do rio Corumbataí. Portanto, para este estudo, a seleção das estações fluviométricas baseou-se em algumas premissas:

- a) Localização da estação. Buscou-se uma estação à montante e uma à jusante na bacia do rio Corumbataí;
- b) Dados de vazão disponíveis: séries com mínimo de 10 anos de registro contínuo, o que permitiu uma análise considerando-se o tempo mínimo de recorrência para eventos hidrológicos.

Com base nessas premissas foram escolhidas as estações 4D-021 e 4D-023, localizadas respectivamente à jusante e à montante do rio Corumbataí (Figura 8).

Quadro 1. Informações das estações fluviométricas escolhidas. Fonte: Dados do Banco Hidrológico do DAEE

Prefixo	Nome	Curso d'Água	Latitude	Longitude	Município	Área (km²)	Ano Inicial	Ano Final
4D-021	Recreio	Rio Corumbataí	22°34'53"	47° 41' 01"	Piracicaba	1.581,00	1973	2018
4D-023	Analândia	Rio Corumbataí	22°07' 43"	47° 40' 05"	Analândia	59,00	1990	2018

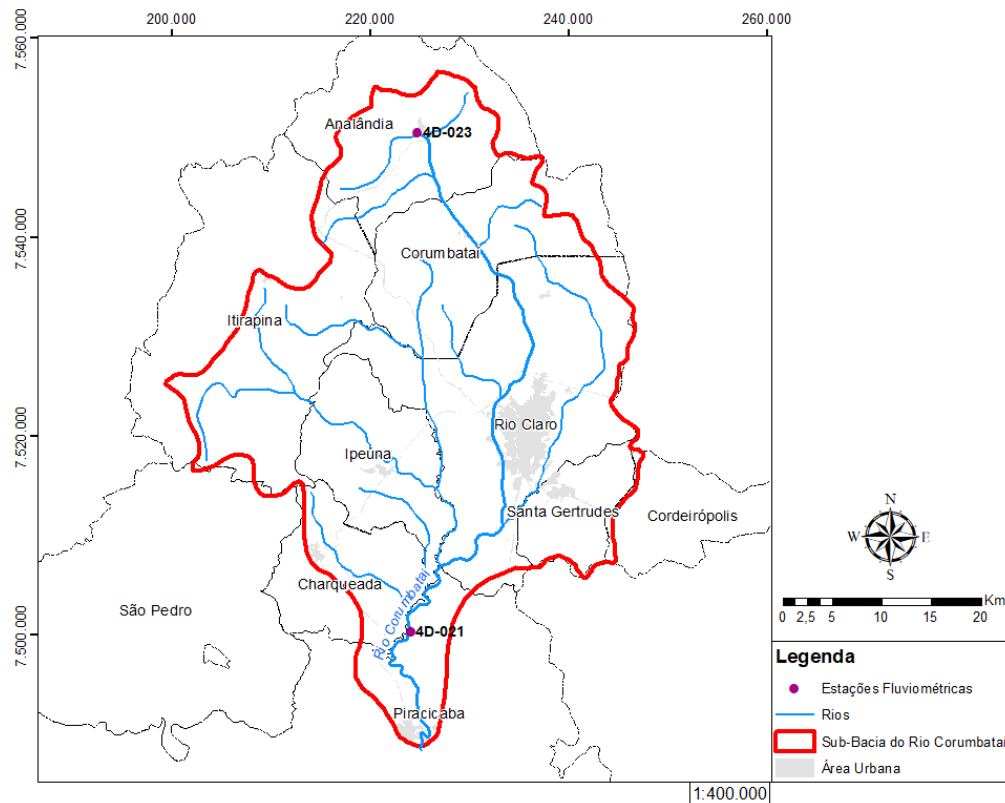


Figura 8. Localização das estações fluviométricas escolhidas

4.2.2. Vazão $Q_{7,10}$

A vazão $Q_{7,10}$ representa a “menor vazão média consecutiva de sete dias que ocorreria com um período de retorno de uma vez em cada 10 anos” (ANA, 2011). É considerada a vazão de referência para a emissão de outorgas no Estado de São Paulo e, do ponto de vista hidrológico, reflete a contribuição das águas subterrâneas.

Há diversos métodos para o cálculo da $Q_{7,10}$, no entanto, para esta análise foi empregado o método de distribuição de Gumbel para vazões mínimas. Inicialmente, calculou-se a mínima vazão média de 7 dias consecutivos para cada ano da série histórica de vazões de cada estação fluviométrica. Os anos que apresentaram muitas falhas – principalmente nos períodos secos – foram descartados. Desta forma, foram descartados os anos de 1996, 1998 e 1999 para a estação 4D-023 e 1990, 1999, 2005 e 2007 para a estação 4D-021, o que resultou em 9.211 e 15.120 dados de vazões diárias para os cálculos, respectivamente.

Para cada ano, encontrou-se o menor valor de vazão média de 7 dias. A partir desses valores, foi aplicada função inversa da função acumulada de probabilidades (FAP) de Gumbel (NAGHETTINI; PINTO, 2007) conforme a Equação 1.

$$x = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{Tr} \right) \right] \quad \text{Equação (1)}$$

Os parâmetros β e α (Equação 2 e 3) são definidos pelo método de momentos (MOM) da distribuição de Gumbel (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

$$\alpha = 0,7797s \quad \text{Equação (2)}$$

$$\beta = \bar{x} + 0,45s \quad \text{Equação (3)}$$

Para tal, foi necessário o cálculo da vazão média ($\bar{x}$) e desvio padrão amostral (s), calculados pelas funções MÉDIA e DESVPAD.A do Excel. O valor de probabilidade é equivalente ao tempo de recorrência (TR), que neste caso é 10 anos.

A vazão $Q_{7,10}$ foi calculada para cada estação e posteriormente, foi calculada a regionalização dos valores considerando as áreas de contribuição das duas estações, de acordo com a Equação 4.

$$\frac{Q_{7,10 (1)} \cdot A_1 + Q_{7,10 (2)} \cdot A_2}{(A_1 + A_2)} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde A se refere à área de drenagem da estação. Com base na área total de drenagem da bacia e a vazão $Q_{7,10}$ absoluta, é possível determinar a $Q_{7,10}$ específica em $m^3/s/km^2$.

4.2.3. Curva e Vazões de Permanência

A curva de permanência representa graficamente a relação da vazão com a frequência – em porcentagem – com que esta é igualada ou superada ao longo do período. Existem diferentes técnicas para o cálculo da curva de permanência, no entanto, a mais frequente e portanto, utilizada nesse estudo é o método empírico.

Para cada estação fluviométrica, os registros diários de vazão foram ordenados em ordem decrescente e associados a uma frequência de excedência, utilizando uma plotagem empírica correspondente à ordem do valor ordenado sobre o número total de valores de vazão. A frequência de igualdade ou excedência pode ser interpretada como a probabilidade

de ocorrência das vazões em um cenário de planejamento dos recursos hídricos (JACOBS; VOGUEL, 1998 *apud* CRUZ; TUCCI, 2008; ANA, 2014).

As vazões Q50, Q70 e Q95 também são vazões de permanência, ou seja, correspondem às vazões que são igualadas ou superadas em 50%, 70% e 95% do tempo, respectivamente.

Nos relatórios de situação dos recursos hídricos de São Paulo, o DAEE adota a vazão Q95 para a determinação da disponibilidade mínima geral (água superficial e subterrânea). Além disso, a Q95 constitui um importante parâmetro de análise, pois é a vazão disponível na bacia em 95% do tempo, representando a vazão natural da bacia, sem interferências. Normalmente, os valores de vazão de períodos de grande estiagem ocorrem em probabilidades superiores a 95%. Para o cálculo dessas vazões foi utilizada a metodologia de curva de permanência, produzida através da função percentil do Excel, para encontrar os valores dos quantis de 1 a 99%. Desta forma, as vazões Q50, Q70 e Q95 correspondem aos percentis 50%, 30% e 5%, respectivamente (SÃO PAULO, 2013; CBH-PCJ, 2018).

4.2.4. Seleção de dados dos poços

Visando realizar a análise e diagnóstico das outorgas vigentes, foi consultado o banco de dados públicos e disponibilizados no Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE (<http://www.aplicacoes.dae.sp.gov.br/usuarios/fchweb.html>) em busca de informações dos recursos hídricos cadastrados e outorgados dos municípios da bacia Corumbataí.

Como o DAEE não disponibiliza os dados por bacia, a consulta foi realizada em todos os municípios da bacia do rio Corumbataí. As etapas para a seleção dos poços são apresentadas na Figura 9.

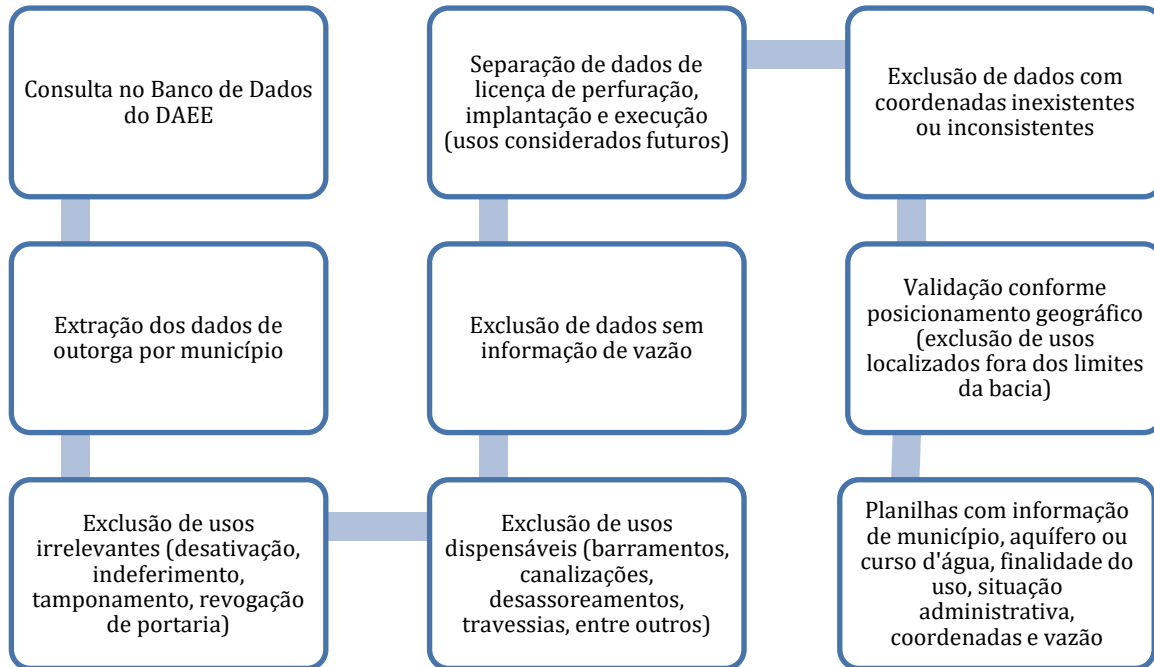


Figura 9. Fluxograma de etapas de seleção dos dados

A triagem dos poços resultou em um total de 392 captações subterrâneas e 166 captações superficiais. A partir dessas informações, foi possível realizar análises espaciais utilizando um Sistema de Informação Geográfica (SIG) e análises estatísticas por meio do programa Excel, com o intuito de estabelecer um comparativo do que ocorre no balanço hídrico e o impacto das outorgas na bacia do rio Corumbataí. Nesse estudo foi utilizado o software ArcGIS.

4.2.5. Tratamento dos dados

A fim de realizar uma análise espacial, estimou-se a densidade dos volumes de água subterrânea extraídos dentro da área da bacia aplicando a ferramenta Kernel Density do ArcGIS 10.3. Essa ferramenta calcula, por meio de interpolação, a intensidade de pontos e valores sobre a região de estudo. O resultado é um mapa da densidade dos volumes, com a unidade $\text{m}^3/\text{s} / \text{km}^2$. Para este estudo, o valor utilizado para o raio de influência das captações foi de 5 km.

Com a ferramenta Raster Calculator – que cria e executa uma expressão algébrica no mapa, resultando em um outro arquivo raster –, o raster de densidade dos volumes foi

dividido pelo valor da vazão $Q_{7,10}$ específica, gerando um mapa de referência das extrações de água subterrânea em porcentagem.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise Hidrológica

A partir do banco de dados do Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE, foi possível realizar o estudo hidrológico da bacia. As figuras 10 e 11 mostram os hidrogramas das estações 4D-023 e 4D-021, à montante e à jusante respectivamente. Observa-se uma variação no valor das vazões de acordo com a localização da estação, pois a estação à jusante recebe mais contribuições dos afluentes ao longo da bacia. Apesar de ambas as estações apresentarem ciclos sazonais de cheias e estiagens, a estação 4D-021 possui maior amplitude, as vazões neste ponto variam de 1,09 a 440,97 m³/s, com média linear de 24,58 m³/s. Já as vazões da estação 4D-023 variam de 0,36 a 12,05 m³/s, com média linear de 1,06 m³/s. É importante salientar que esta última possui uma disponibilidade inicial de dados menor.

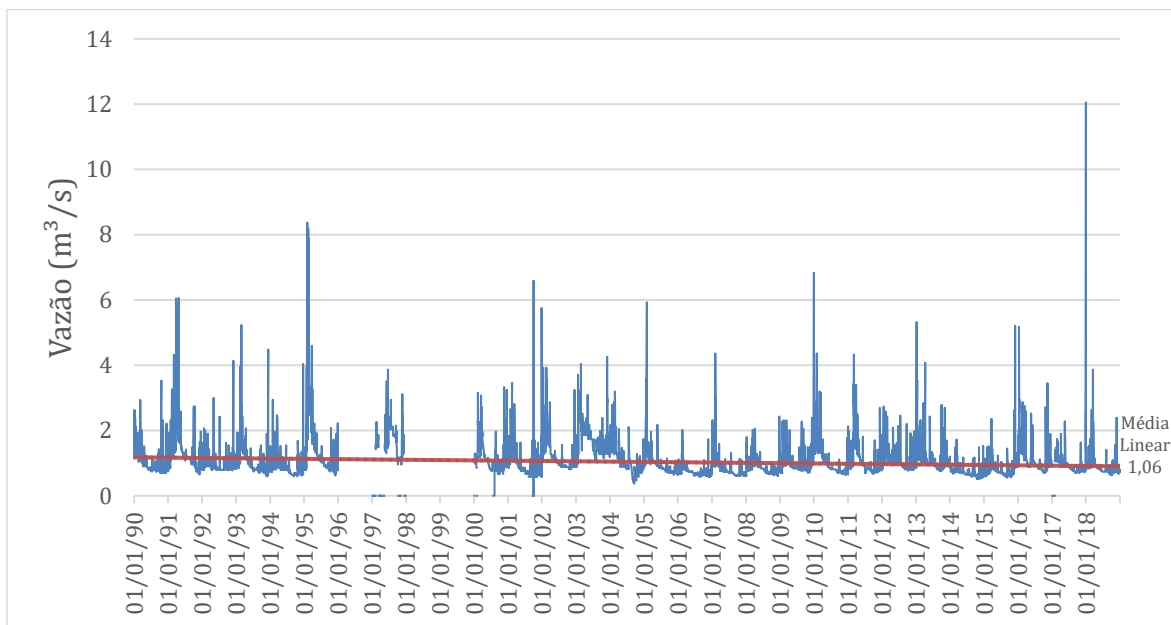


Figura 10. Hidrograma da estação 4D-023. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

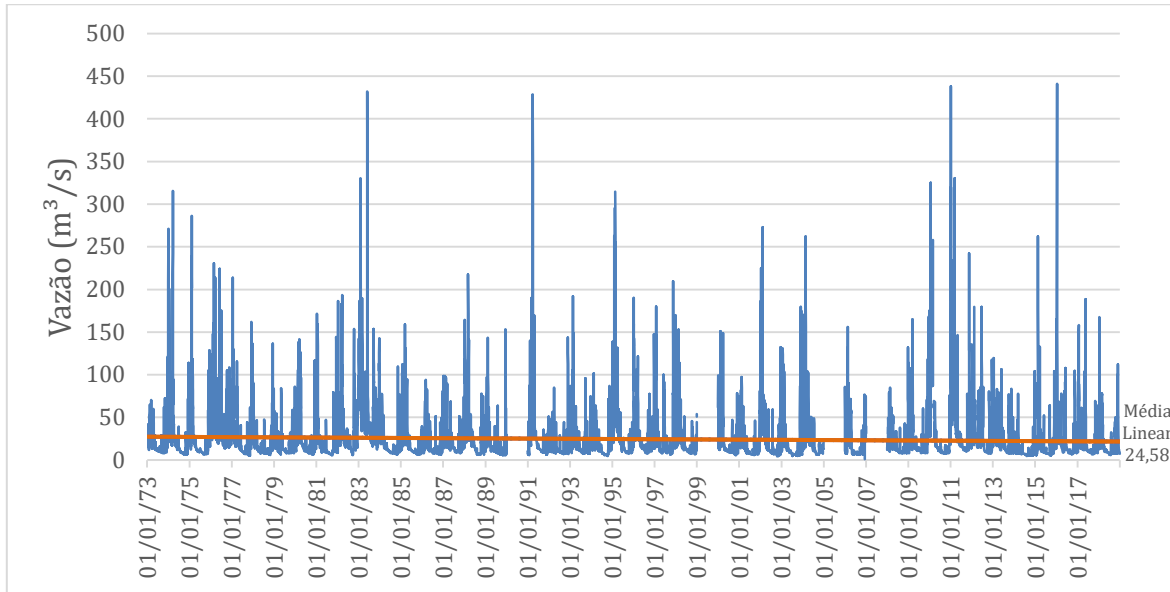


Figura 11. Hidrograma da estação 4D-021. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

As curvas de permanência estão apresentadas em escala logarítmica para facilitar a leitura das vazões mais próximas a 100% de frequência (Figura 12). Nota-se que as vazões das duas estações estiveram acima da média histórica em cerca de 30% do tempo.

As características hidrológicas da área de drenagem também definem o formato da curva de permanência. A estação 4D-021 apresenta alta variabilidade, o que aumenta a dispersão das vazões na curva de permanência, indicando uma influência maior de precipitação e escoamento superficial. Já a estação 4D-023 apresenta maior regularização natural, ou seja, suas vazões são supridas fundamentalmente pelos recursos hídricos subterrâneos.

As vazões de mais baixas – relativas às porcentagens de excedência ou igualdade mais altas – correspondem aos períodos de estiagem, o que indica baixa contribuição de precipitação e escoamento superficial e revela a dependência das reservas de água subterrânea (SOPHOCLEOUS, 2002).

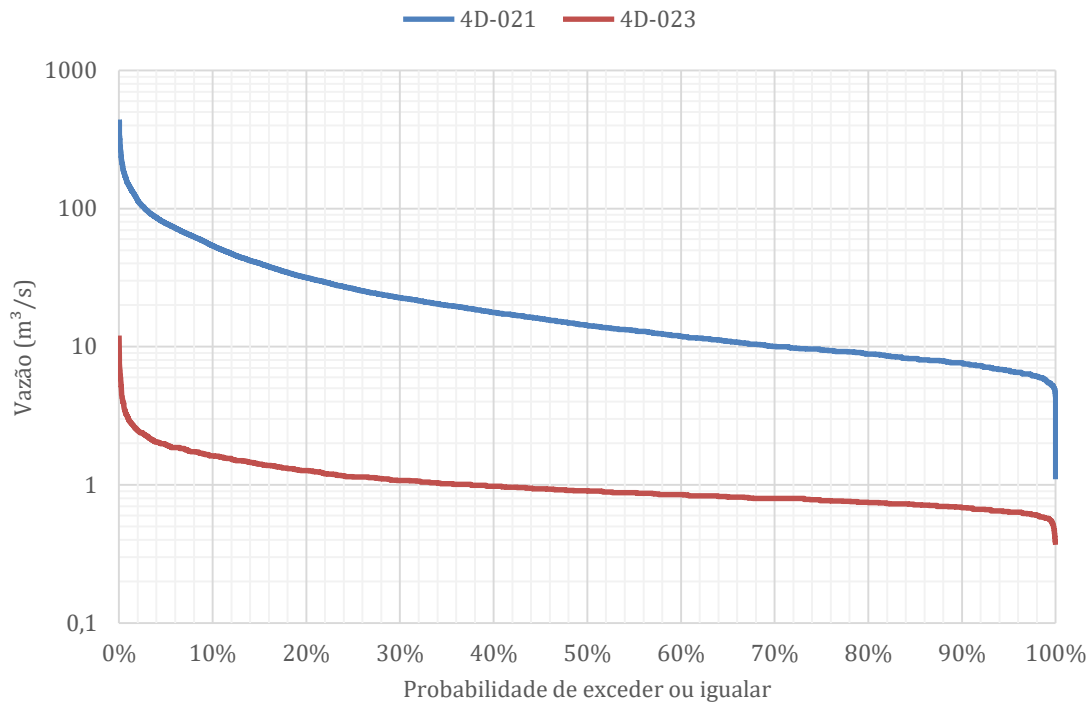


Figura 12. Curvas de permanência das estações fluviométricas. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

A Tabela 1 apresenta as vazões de referência calculadas, conforme a Equação 1, 2, 3 e 4 já apresentadas e do método empírico para vazões de permanência. Nota-se que em razão de maiores contribuições dos afluentes, os resultados de análise hidrológica da estação 4D-021 – que se encontra à jusante – são maiores se comparados aos da estação 4D-023 – à montante. É importante salientar que as áreas urbanas da bacia se encontram mais próximas da estação 4D-021, à jusante, onde há maior disponibilidade.

Ressalta-se também que nos cálculos de disponibilidade da Revisão Plano das Bacias Hidrográficas PCJ 2010 a 2020, que não utiliza nenhuma estação fluviométrica situada na bacia do rio Corumbataí, a vazão $Q_{7,10}$ foi estimada de $4,97 \text{ m}^3/\text{s}$, valor maior ao encontrado neste estudo (Figura 1) considerando as estações que de fato estão na bacia (PROFILL-RHAMA, 2018).

Tabela 1. Vazões de referência calculadas

Prefixo	Q _{7,10} (m³/s)	Q _{7,10} regionalizada (m³/s)	Q _{7,10} esp (m³/s/km²)	Q ₅₀ (m³/s)	Q ₇₀ (m³/s)	Q ₉₅ (m³/s)	Q mínima (m³/s)	Q média (m³/s)	Q máxima (m³/s)
4D-021	4,57	4,42	0,0026	14,29	10,04	6,72	1,10	24,59	440,97
4D-023	0,53			0,90	0,80	0,62	0,37	1,06	12,06

5.2. Exploração de águas subterrâneas

De todo o volume de água captado na área de estudo, apenas 11% é proveniente das reservas subterrâneas (Figura 13). Ainda que representem o menor volume extraído, o número absoluto das captações subterrâneas é muito maior do que das captações superficiais, cerca de 70% (Figura 13). Este fato pode afetar diretamente o sistema de outorga, visto que há um número maior de processos relacionados às captações subterrâneas, e, portanto, seria necessária uma quantidade maior de técnicos para analisar esses processos. No entanto, a análise de recursos hídricos superficiais recebe maior ênfase, diferentemente dos recursos hídricos subterrâneos. Além disso, visto que há uma falta de conhecimento e de informações disponíveis sobre a água subterrânea, nota-se que essas questões foram negligenciadas no processo administrativo de outorga.

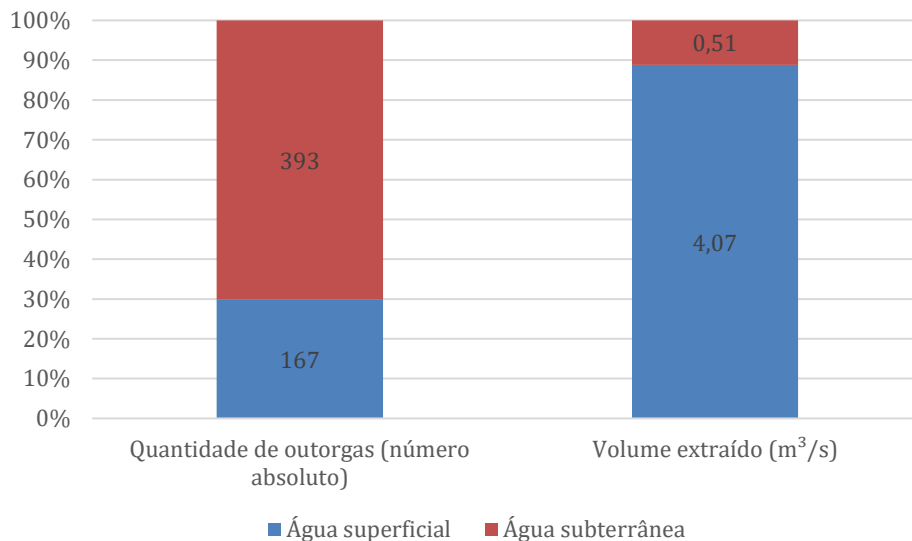


Figura 13. Número absoluto das captações outorgadas (esquerda) e volume de água extraída (direita) na bacia do rio Corumbataí. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

A Figura 14 apresenta os dados do volume e número absoluto das outorgas de águas subterrâneas conforme a situação administrativa. Pode-se observar que a maior parte dos poços regularizados correspondem a Portaria de Outorga, assim como os volumes extraídos.

Ressalta-se que os poços passíveis de dispensa de outorga de acordo com a Portaria DAEE nº 1.631/2017 correspondem às extrações de águas subterrâneas com volumes iguais ou inferiores a 15 m³/dia; e de acordo com o Decreto Estadual nº 63.262/2018, também independem da outorga os usos de recursos hídricos destinados às necessidades domésticas de propriedades rurais. Todas as outras captações subterrâneas que não se enquadram nas características de dispensa estão sujeitas à outorga.

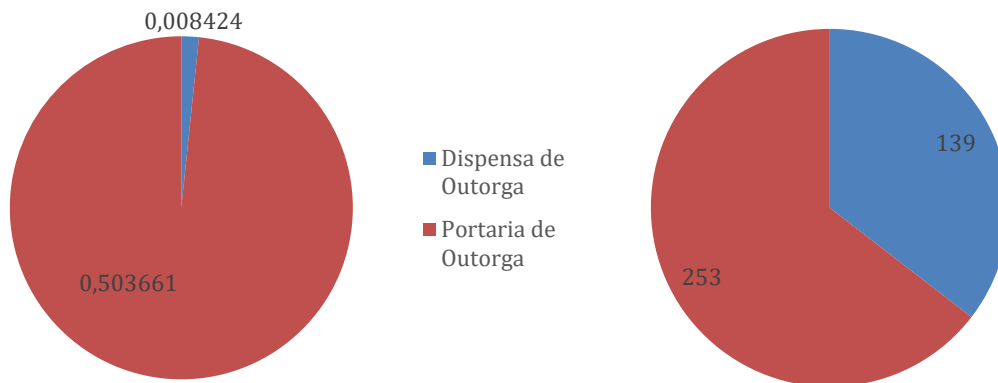


Figura 14. Número absoluto poços outorgados (esquerda) e volume de água extraída (direita) em m³/s de acordo com a situação administrativa. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

O maior número absoluto de captações subterrâneas corresponde às finalidades industriais e urbanas, seguido da finalidade rural. No entanto, em termos de volume de água, as maiores vazões captadas são destinadas para usos industriais e urbanos, que juntos correspondem a mais de 90% do volume extraído, conforme a Figura 15. Conclui-se também que os usos rurais, apesar de representarem 26% do número absoluto de captações, são outorgados com vazões baixas.

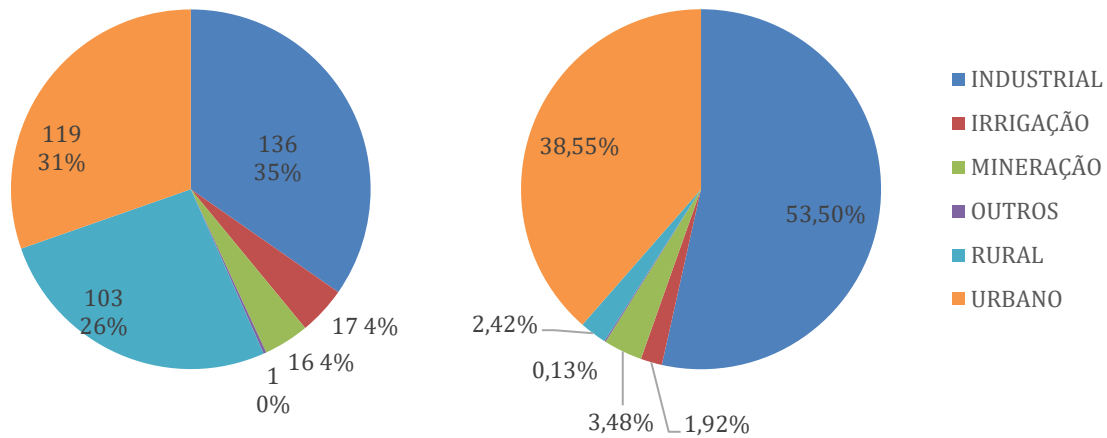


Figura 15. Número absoluto de poços outorgados (esquerda) e o volume em m³/s (direita) de água captada de acordo com a finalidade. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

Em relação à localização, nota-se uma distribuição inadequada das captações pela área da bacia (Figura 16). Há uma superconcentração de poços na região urbana da bacia, nos municípios de Rio Claro, Santa Gertrudes e Cordeirópolis, enquanto o resto da bacia encontra com baixa concentração. De acordo com a Figura 17, cerca de 56% dos poços estão situados no município de Rio Claro, seguido de Cordeirópolis e Ipeúna.

Na área de maior concentração de captações, as finalidades predominantes são industriais e urbanas, sendo que os maiores volumes de água também se concentram nesses municípios. O volume de água captado no município de Rio Claro representa 38% do total extraído, seguido de Santa Gertrudes, com 25% do total.

Sabe-se que grandes aglomerados urbanos implicam em maior demanda hídrica, no entanto, a grande concentração de poços alinhada com a superexploração de água pode trazer condições de redução da disponibilidade hídrica, além de rebaixamento do nível d'água e esgotamento das unidades aquíferas.

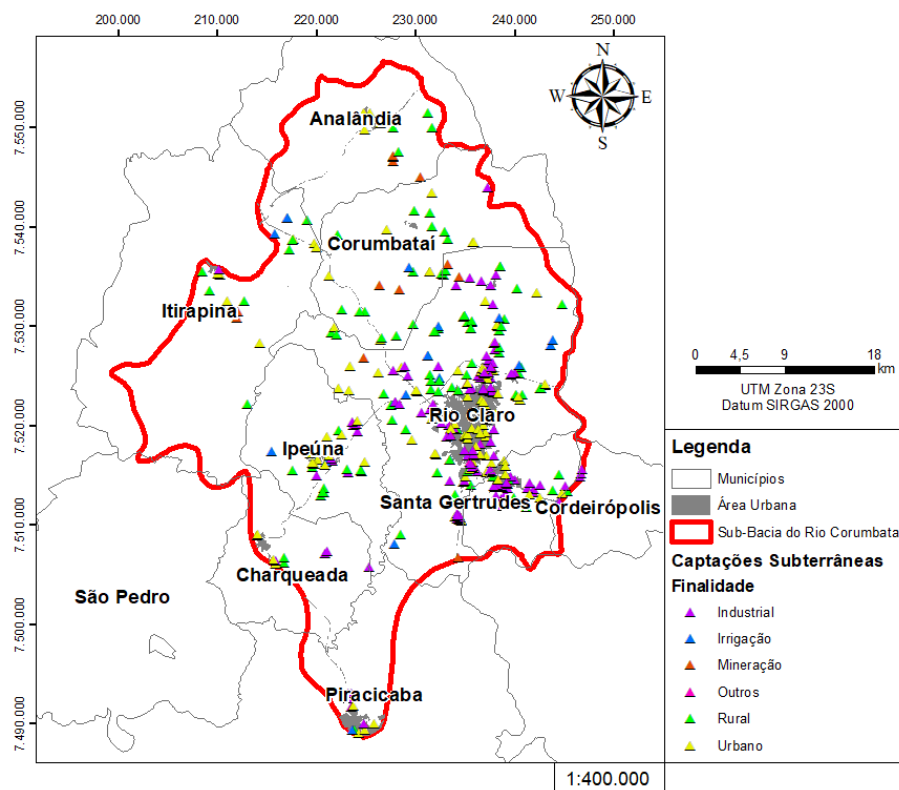


Figura 16. Mapa dos poços outorgados de acordo com a finalidade. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

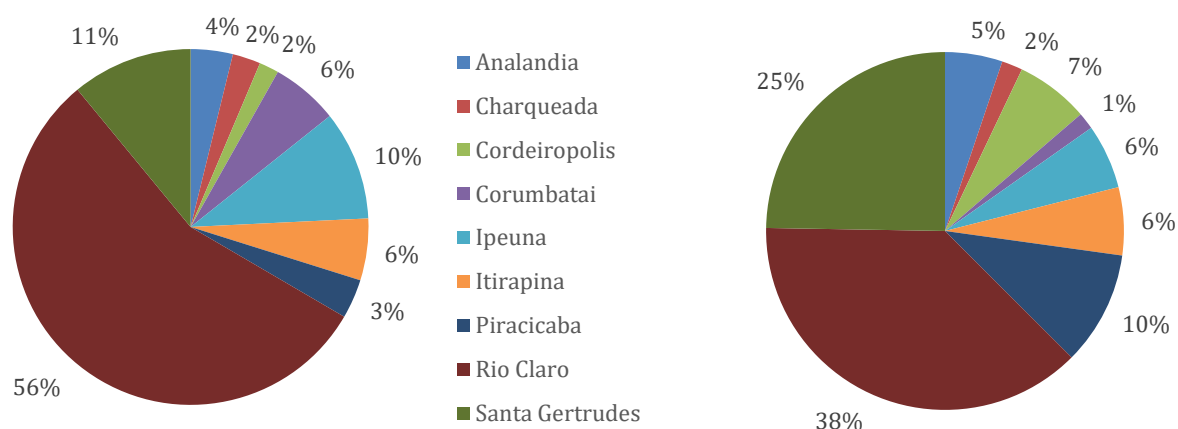


Figura 17. Porcentagem do número absoluto de poços (esquerda) e porcentagem do volume de água subterrânea extraído em m³/s (direita) por município. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

Quanto às unidades aquíferas, apesar de o SAG apresentar recursos hídricos abundantes, o seu afloramento não se estende até a região urbana de Rio Claro, onde são verificadas as maiores captações subterrâneas, o que justifica a pouca quantidade de poços e volumes outorgados.

Foi constatado também a existência de captações na zona freática. Esses poços possuem profundidades na ordem de até 20 metros e são chamados de rasos, cacimbas ou cisternas. Possuem grande diâmetro (cerca de um metro) e são manualmente escavados revestidos com tijolo ou concreto. Geralmente, um poço cacimba não é capaz de captar grandes volumes e portanto, sua regularização geralmente se enquadra como dispensa de outorga (ABAS, 2005).

No entanto, a observação mais relevante em relação aos aquíferos é em relação ao Sistema Aquífero Tubarão (SAT). O maior número absoluto e volume extraído referem-se ao SAT (Figuras 18 e 19). Cerca de 220 poços outorgados captam água desse sistema aquífero, chegando a extrair cerca de 70% da água total captada da bacia. Desta forma, entende-se que este aquífero constitui a principal fonte de abastecimento de água subterrânea da bacia do rio Corumbataí, o que atribui grande importância a este aquífero, que apresenta baixa produtividade (ODA *et al*, 2005).

É fundamental que haja conhecimento aprofundado sobre o SAT, como estudos de hidrogeologia e de quantificação das reservas exploráveis, de forma a aprimorar o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

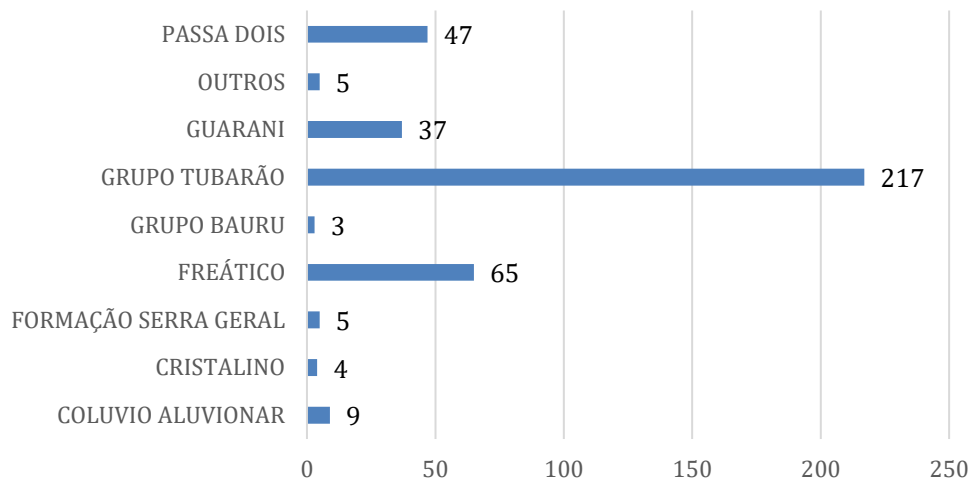


Figura 18. Número absoluto de poços outorgados poços conforme o aquífero. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

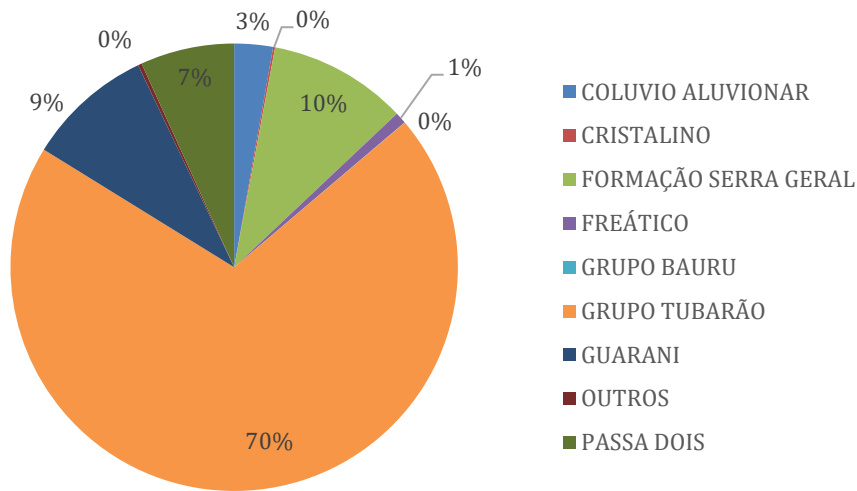


Figura 19. Volume extraído outorgado (m^3/s) conforme o aquífero. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

5.3. Extração de águas subterrâneas

Os poços estão outorgados para extrair vazões que vão de $0,000001 \text{ m}^3/\text{s}$ ($0,086400 \text{ m}^3/\text{d}$) a $0,044444 \text{ m}^3/\text{s}$ ($3.839,961600 \text{ m}^3/\text{d}$). A Figura 20 apresenta os volumes de captação distribuídos pela área da bacia, as vazões foram transformadas para m^3/dia para melhor visualização. Nota-se que os maiores volumes captados, juntamente com a densidade de captações, localizam-se nas áreas próximas às zonas urbanas. Essa grande concentração de poços e superexploração pode comprometer os recursos hídricos subterrâneos nessa área, já que diminui a disponibilidade hídrica.

Observou-se também que os valores de vazão de até $80 \text{ m}^3/\text{dia}$ se encontram bem distribuídos pela bacia em zonas rurais, onde há um número absoluto relativamente alto de captações, mas volumes baixos.

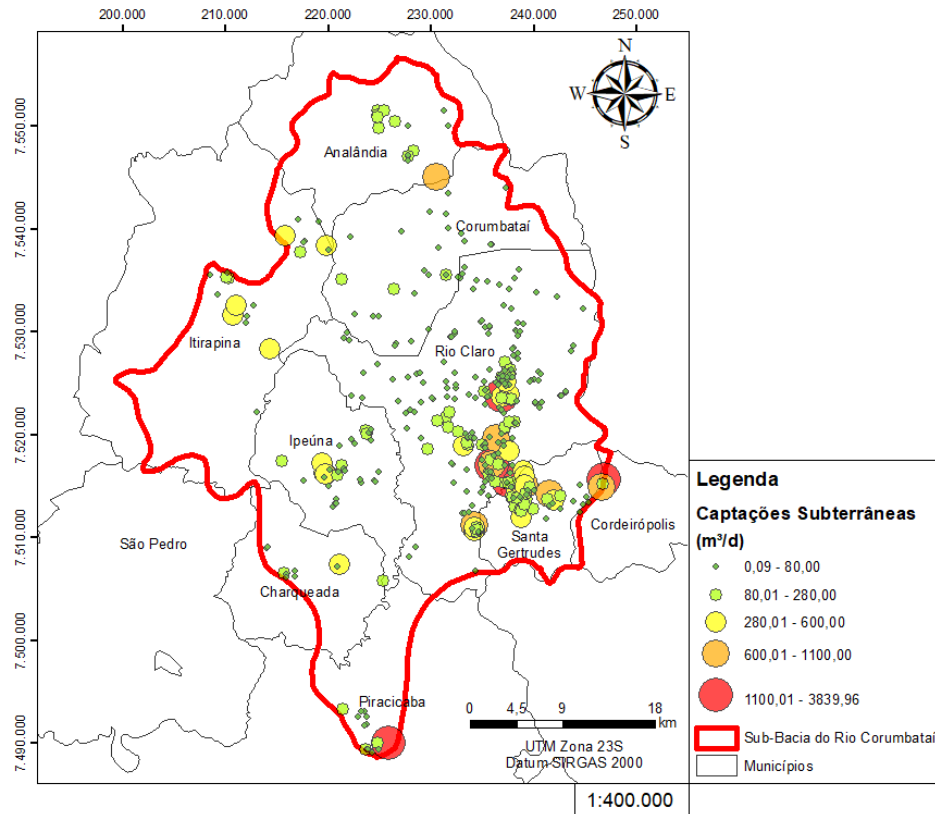


Figura 20. Captações subterrâneas de acordo com o volume. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

A Figura 21 apresenta o mapa de densidade dos volumes. Esse tipo de análise considera a área, ou seja, mostra como as informações dos poços se distribui pela área, possibilitando a visualização de áreas pontuais de maior captação de água. Assim é possível avaliar áreas críticas que comprometem a disponibilidade hídrica da bacia. É o caso da zona urbana de Rio Claro e uma pequena área do município de Piracicaba, áreas que possuem as maiores vazões extraídas da bacia.

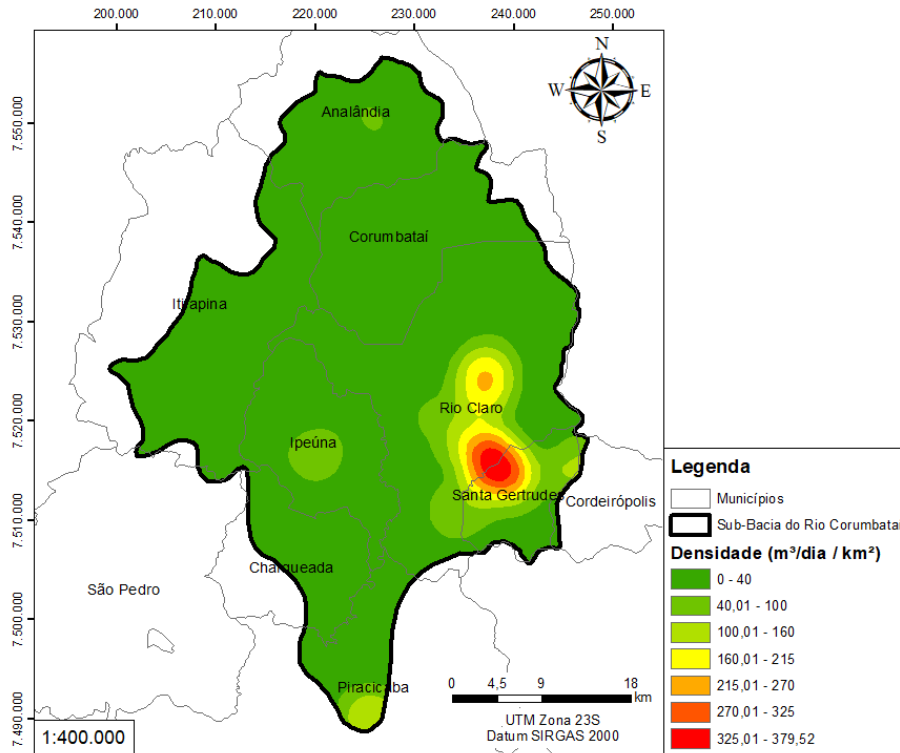


Figura 21. Mapa de densidade dos volumes subterrâneos extraídos. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

A Figura 22 apresenta a relação da densidade do volume de água subterrânea extraído ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$) sobre a vazão $Q_{7,10}$ específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$), com os resultados expressos em porcentagem. Nota-se que, assim como as vazões outorgadas, esses resultados apresentam grande variabilidade. Essa figura aponta regiões de uso intensivo de água que apresentam condições bastante críticas, nas quais a capacidade de extração específica da bacia ($Q_{7,10}$ esp) é ultrapassada, podendo chegar a quase 170%.

A superexploração afeta a sustentabilidade da bacia, prejudicando os usuários dos poços, as descargas de base das águas superficiais, o equilíbrio do meio ambiente. Isso porque as captações excessivas de água trazem diversas consequências, como o prejuízo nos volumes de fluxo de base e intrusão salina. O principal efeito é a superação da capacidade de recarga natural dos aquíferos, o que pode reduzir os volumes de água e provocar a exaustão das reservas (PRANDI, 2010).

A distribuição dos poços altera a regularização natural das águas subterrâneas (SOPHOCLEOUS, 2002). Nesse sentido, a interferência entre as captações em áreas com grandes concentrações de poços pode levar a um rebaixamento do nível d'água dos aquíferos.

Consequentemente, a construção de novos poços alteraria as características hidrogeológicas da região, agravando a situação (PROFILL-RHAMA, 2018). Outra consequência do rebaixamento dos aquíferos é a necessidade de se perfurar poços cada vez mais profundos devido à redução da produtividade.

Assim, a gestão dos recursos hídricos deve planejar a disposição das extrações de água, prevendo a distribuição de poços em áreas de maior disponibilidade das águas subterrâneas, assim como limitar a quantidade de poços e altos volumes de captação em regiões onde a disponibilidade hídrica é reduzida.

Apesar das áreas urbanas demandarem mais água, devido aos efeitos da superexploração é inviável que novas captações subterrâneas sejam implantadas nessas áreas. Nas regiões com maior demanda hídrica, uma alternativa seria a reorganização espacial de poços, com a criação de uma distância mínima de perfuração, além de um zoneamento que permita captação de água em certas áreas de oferta hídrica e restrinja novas captações em regiões que se apresentam críticas.

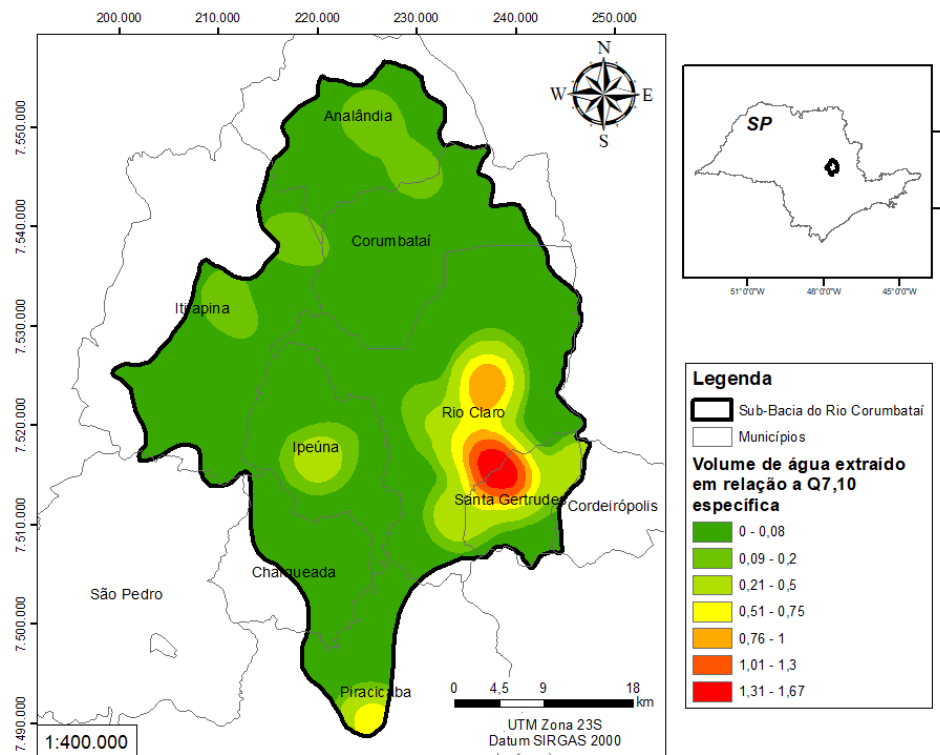


Figura 22. Relação da densidade do volume d'água extraído com a vazão $Q_{7,10}$ específica. Fonte: Relatório de Recursos Hídricos cadastrados e outorgados pelo DAEE

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A água subterrânea é um recurso essencial para o suporte urbano, econômico e ecológico que, no entanto, acaba sendo exposta a situações de vulnerabilidade, devido a uma série de dificuldades quanto à sua gestão. Uma dessas questões é a desconsideração da relação entre as águas subterrâneas e superficiais, que as leva serem analisadas de maneira isolada. Há também a dificuldade em encontrar uma unidade de gerenciamento que inclua as águas superficiais e subterrâneas, visto que a gestão de recursos hídricos está estabelecida de acordo com a bacia hidrográfica.

Apesar das captações superficiais apresentarem maior volume de extração de água, as captações subterrâneas são maiores em número absoluto. Essa situação indica a necessidade de maior quantidade de técnicos para a análise dos processos de água subterrânea. A falta de conhecimento sobre os recursos hídricos subterrâneos também afeta o processo administrativo de outorga, visto que não existe material sobre as reservas e recargas dos aquíferos da bacia, fundamentais para conhecer o comportamento e a capacidade de extração, de modo a não comprometer os aquíferos.

Entretanto, o maior impacto é a exploração excessiva desses recursos. As maiores captações de água subterrânea encontram-se nas zonas urbanas da bacia – município de Rio Claro, Santa Gertrudes e Cordeirópolis –, onde os usos predominantes são industriais e urbanos. Os maiores volumes extraídos podem chegar a quase 4000 m³/dia, valor 1700% maior que vazão $Q_{7,10\text{ esp}}$, que é a capacidade de extração da bacia.

Isso indica que a bacia do rio Corumbataí se encontra em situação crítica. Nota-se que o atual sistema de outorga é limitado e apresenta graves falhas. O modelo atual de exploração de águas subterrâneas – poço como solução para abastecimento localizado – não é sustentável e não funciona mais. É necessário rever a distribuição das captações pela bacia, identificando áreas de oferta hídrica e regiões críticas, buscando uma condição de equilíbrio.

Desta forma, a gestão de recursos hídricos deve ser modificada, intensificando as políticas relacionadas a gestão da demanda da água e disponibilidade hídrica, com o intuito do aproveitamento sustentável. A quantidade de água extraída não pode ultrapassar as recargas dos aquíferos.

Algumas propostas de melhoria incluem a difusão de conhecimento técnico sobre os recursos hídricos subterrâneos, estudos técnicos e novos requisitos legais, como:

- a) Planejamento da disposição espacial de captações em áreas com maior disponibilidade hídrica dos recursos hídricos, aliviando regiões de maior estresse hídrico. Criação de uma distância mínima de perfuração de poços;
- b) Análise e consideração de uma nova divisão de unidade de gerenciamento dos recursos hídricos que considere a relação entre as águas subterrâneas e superficiais;
- c) Estabelecimento de um novo método de referência de disponibilidade hídrica, com um critério específico de quantificação para os volumes passíveis de extração e que considere a integração entre as águas subterrâneas e superficiais;
- d) O aprimoramento do Sistema de Suporte à Decisão (SSD), aplicativo de cálculo do balanço hídrico destinado aos técnicos do DAEE, que atualmente só considera as águas superficiais;
- e) Elaboração de um banco de dados hidrogeológicos, com características quantitativas e qualitativas, a fim de facilitar novos estudos de estimativa de recarga dos aquíferos, vulnerabilidade natural dos aquíferos, balanço e disponibilidade hídrica;
- f) Identificação de áreas críticas, que apresentam possível risco à quantidade ou qualidade das águas, para que sejam efetuadas medidas de proteção e recuperação dos aquíferos;
- g) Elaboração de um plano de cadastramento das captações, para trazer conhecimento e conscientização para a sociedade e para os usuários de recursos hídricos, de forma a compreender a importância da regularização do poço;
- h) Divulgação do tema águas subterrâneas para professores, universitários e técnicos com o intuito de promover uma possível evolução em políticas públicas de gestão urbana e de recursos hídricos;
- i) Elaboração de uma lei que atribua penalidades às empresas e técnicos que realizem a perfuração de poços não regularizados junto ao DAEE, juntamente com a aproximação com o CREA;

Em relação ao mapa de referência de extração de águas subterrâneas, recomenda-se algumas intervenções de acordo com a área, conforme o Quadro 2.

Quadro 2. Recomendações para as captações subterrâneas existentes de acordo com a porcentagem da vazão $Q_{7,10}$ esp

Classe	Muito baixo	Baixo	Médio		Alto	Muito alto	Excessivo
Porcentagem	0,0 – 0,08	0,09 – 0,20	0,21 – 0,50	0,51 – 0,75	0,76 – 1,00	1,01 – 1,30	1,31 – 1,67
Controlar e fiscalizar poços	x	x	x	x	x	x	x
Moderar construção de novos poços na região			x	x	x	x	x
Monitorar interferência entre poços			x	x	x	x	x
Declaração mensal da vazão captada					x	x	x
Monitorar vazão e nível d'água					x	x	x
Controlar vazão e regime de funcionamento dos poços						x	x
Limitar o funcionamento dos poços							x

Entende-se que esses tópicos estão relacionados principalmente a questões legais, financeiras e geográficas, e que a efetividade dessas ações de planejamento depende do interesse das autoridades. No entanto, são estudos na área que irão trazer conhecimento e visibilidade para as águas subterrâneas, aspectos fundamentais para orientar o gerenciamento adequado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (Brasil). Orientações para a Utilização de Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo. 2005. Disponível em: <<http://www.abas.org/arquivos/aguasf.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2019.

ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Avaliação Disponibilidade Hídrica Subterrânea na Bacia do Rio Paraguai. Cuiabá: 2016. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/gestao-da-agua/planejamento-dos-recursos-hidricos/plano-de-recursos-hidricos-rio-paraguai/grupo-de-acompanhamento/7a-reuniao-do-gap/ana_aguassubterraneas2-anexo3.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2019.

_____. Lista de Termos para o Thesaurus de Recursos Hídricos. Brasília: 2014. 43 p. Disponível em:

<http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/noticias/20150406034300_Portaria_149-2015.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2019.

_____. Os efeitos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos: desafios para a gestão / Agência Nacional de Águas. Brasília: 2010. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/>>. Acesso em: 05 out. 2018.

_____. Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos / Agência Nacional de Águas. Brasília: SAG, 2011. 50 p., il. - (Cadernos de capacitação em recursos hídricos; v.1 vol. 6). Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/OutorgaDeDireitoDeUsoDeRecursosHidricos.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

ARCGIS. Kernel Density. [201-]. ArcGIS for Desktop: ArcMAP. Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/kerneldensity.htm>>. Acesso em: 05. jun. 2019.

CBH-PCJ. COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Relatório da Situação dos Recursos Hídricos – UGRHI 05 – Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Ano Base 2017. Piracicaba, 2018.

CHOW, V. T. Applied Hydrology. 1988. Singapura: McGraw-Hill, 572p.

COBRAPE. COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS. Plano das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 a 2020: Relatório Síntese. Piracicaba: 2011. Disponível em <<http://www.agenciapcj.org.br/novo/instrumentos-de-gestao/plano-de-bacias>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. 350 p

CRUZ, J. C. Disponibilidade Hídrica Para Outorga: Avaliação de Aspectos Técnicos e Conceituais. 169 f. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 1, p.111-124, jan/mar. 2008. Bimestral. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/15/d10e0ca961a111adf95ca28c21078539_a24fb6762c28e81794b336c73d4e5121.pdf>. Acesso em: 27 maio 2019.

DAEE. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Portaria nº 1630, de 30 de maio de 2017, reti-ratificada em 21/03/2018. Dispõe sobre procedimentos de natureza técnica e administrativa para obtenção de manifestação e outorga de direito de uso e de interferência em recursos hídricos de domínio do Estado de São Paulo. SÃO PAULO. Disponível em:

<<http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/outorgaefiscalizacao/portaria1630.pdf>>. Acesso em: 05 set. 2018.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Argissolos. In: Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. cap. 5, p. 101-118. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Capitulo5_000h96xz37s02wx7ha0yrm6rgb9l3wtd.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2019.

_____. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Latossolos. In: Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. cap. 10, p. 161-175. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Capitulo10_000h970ia8d02wx7ha0yrm6rgsugcu5x.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2019.

_____. Árvore do Conhecimento – Solos Tropicais. Barão Geraldo: 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/Abertura.html>. Acesso em: 19 jan. 2019.

FREEZE, R. A; CHERRY, J. A. Groundwater. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1979.

HEALY, R. W. 2010. Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 224p.

HIRATA, R. *et al.* A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. 35 p.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Populacional 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 28 Set. 2018.

_____. Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira: 2018 / IBGE, Coordenação de População e Indicadores Sociais. - Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Déficit de chuvas no Brasil vem aumentando nas últimas décadas. 2015. Elaborado por Elton Alisson. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/deficit-de-chuvas-no-brasil-vem-aumentando-nas-ultimas-decadas/>>. Acesso em: 25 Set. 2018.

IPEF. INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Projeto Corumbataí. Plano Diretor: Conservação dos recursos hídricos por meio da recuperação e a conservação da cobertura florestal da bacia do rio Corumbataí. Piracicaba, SP. 2002.

JACOBS, J. M.; VOGUEL, R. M. Optimal allocation of water withdrawals in a river basin. In: Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 124, nº 6, p. 357-363. Nov/Dec., 1998.

LE MONDE DIPLOMATIQUE BRASIL. A crise é maior que a chuva. 2014. Disponível em: <<https://diplomatique.org.br/a-crise-e-maior-do-que-a-chuva/>>. Acesso em: 28 set. 2018.

MARENGO, J. A. NOBRE, C. A. SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A Seca e a Crise Hídrica de 2014-2015 em São Paulo. Revista USP. São Paulo. n. 106, p. 31-44, Jul./Ago./Set., 2015.

MARGULIS, S. A. Introduction to Hidrology. 2016.

MENDES, L.A. Análise dos Critérios de Outorga de Direito de Usos Consuntivos dos Recursos Hídricos Baseados em Vazões Mínimas e em Vazões de Permanência. 187 f. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MORI, G. B., et al. Bacia do rio Corumbataí: uso do solo e características limnológicas. In: MORAES, MEB., and LORANDI, R., Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 219-239. Disponível em: <<http://books.scielo.org>>. Acesso em: 28 set. 2018.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. Hidrologia Estatística. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NASA. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Goddard Space Flight Center. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), 1998-2006.

PRANDI, E. C. Gestão Integrada das Águas do Sistema Aquífero Bauru nas Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí e Peixe (SP). 192 f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2010.

PROFILL-RHAMA. Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2010 a 2020: Relatório Final. Revisão 05. Piracicaba: 2018. Disponível em: <<https://plano.agencia.baciaspcj.org.br/documentos/etapa-1-plano-vigente>>. Acesso em: 10 out. 2018.

RIBEIRO, M. M. R. Alternativas para Outorga e a Cobrança pelo Uso da Água: Simulação de um Caso. Porto Alegre: IPH, UFRGS, 2000. 200 p. Tese de doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do IPH/UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

ROSSI, M. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

SÃO PAULO (Estado). Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Lei nº 7663, de 30 de dezembro de 1991. Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos bem como ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo, SP, 1991. Disponível em:

<<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1991/lei-7663-30.12.1991.html>>.
Acesso em: 05 mai. 2018.

_____. Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. Lei nº 9035, de 27 de dezembro de 1994. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei 7663, de 30/12/91, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. São Paulo, SP, 1994. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1994/lei-9034-27.12.1994.html>>.

Acesso em: 05 mai. 2018.

_____. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG - Instituto Geológico, IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2005.

_____. Portal do Governo. Interior de SP abriga pólos especializados. São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/na-imprensa/interior-de-sp-abriga-polos-especializados/>>. Acesso em: 02. jun. 2019.

_____. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos de São Paulo. Ano Base 2016. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Coordenadoria de Recursos Hídricos. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/relatoriosituacaodosrecursoshidricos>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

_____. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Universidade Estadual Paulista. Águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Diretrizes de Utilização e Proteção / Departamento de Águas e Energia Elétrica, Instituto Geociências e Ciências Exatas. Laboratório de Estudo de Bacias. - São Paulo: DAEE/LEBAC, 2013.

SEARCY, J. K. Flow-Duration Curves. Manual of Hidrology: Part 2. Low-Flow Techniques. United States Government Printing Office: Washington, 1969.

SHS – Consultoria e Projetos de Engenharia LTDA. Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Relatório Final. 2006. Disponível em: <http://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=339:plano-de-bacias-pcj-2004-2007&catid=148>. Acesso em: 09 out. 2018.

SILVA, L. P. Hidrologia: engenharia e meio ambiente. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SOPHOCLEOUS, M. 2002. Interactions between Groundwater and Surface Water: The State of the Science. Hydrogeology Journal. 10(1):52-67.

TUCCI, C. E. M. Gestão da água no Brasil. Brasília: UNESCO, 2001. 156p.

_____. Hidrologia: ciência e aplicação. 2 ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 2001.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. Cenários para a Gestão da Água no Brasil: Uma contribuição para a "visão mundial da água". RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 5, n. 3, p.31-43, jul/set. 2000.

TUNDISI, J. G. Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez. São Carlos: Rima, 2009.

ODA, G. H. et al. Proposta Metodológica para Exploração Racional do Sistema Aquífero Tubarão no Estado de São Paulo. XIV ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste, 2005. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23216/15327>>. Acesso em: 24 jun. 2019.

OLIVEIRA FILHO, G. R. A crise da água na região metropolitana de São Paulo em 2014 e a ineficiente gestão dos recursos hídricos. In: CES REVISTA, Juiz de Fora, v. 29, n. 1. p. 5-20, jan./jul. 2015.

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos: Soluções Baseadas na Natureza para a Gestão da Água. 2018. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002615/261594por.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2018.

WINTER, T. C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. Ground Water and Surface Water: A Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, 1998.

WU, P *et al.* Temporary acceleration of the hydrological cycle in response to a CO2 rampdown. Geophysical Research Letters, [s.l], v. 37, n. 12, Jun. 2010.