

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DE  
OSASCO/CARAPICUIBA E SUA RELAÇÃO COM O USO E OCUPAÇÃO DO  
SOLO**

**MONOGRAFIA**

**Trabalho de Formatura: 21/14**

Giovanna Naomi Della Nina

Orientadora: Prof. Dra. Veridiana Teixeira de Souza Martins

Co-orientador: Dr. Roberto Kirchheim

SÃO PAULO

2021

## RESUMO

A crescente urbanização e a mudança nos regimes de chuvas na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), agrava o cenário da disponibilidade e vulnerabilidade hídrica. Importante para uma gestão adequada e sustentável dos recursos hídricos, o reconhecimento das vulnerabilidades dos aquíferos é uma ferramenta ainda pouco empregada em escala municipal. A região estudada engloba os municípios de Osasco e Carapicuíba, geologicamente inseridos no contexto do Rift Continental do Sudeste do Brasil e da Bacia Sedimentar de São Paulo (BSP). Hidrogeologicamente, na região estão presentes os sistemas aquíferos Sedimentar e Cristalino. O objetivo principal deste trabalho é elaborar um mapa de vulnerabilidade de aquífero dos municípios de Osasco e Carapicuíba.

O mapa de vulnerabilidade dos municípios estudados foi elaborado utilizando o método DRASTIC, que compreende a sobreposição de 7 parâmetros (nível d'água, recarga do aquífero, meio aquífero, solo, topografia, impacto à zona vadosa e condutividade hidráulica) específicos à região de estudo com diferentes pesos. Para obtenção das informações necessárias foi realizada uma revisão bibliográfica não somente do contexto regional em que a área está inserida, como também sobre o método utilizado. Além disso, o DAEE disponibilizou informações sobre poços instalados nos municípios de Osasco e Carapicuíba e *shapefiles* da área foram obtidos a partir de plataformas *online*. Os mapas foram elaborados no software QGIS.

A vulnerabilidade de aquíferos está diretamente relacionada com as características físicas da região, tais como geologia local, solo, tipo de aquífero, topografia, recarga do aquífero, entre outras. Por meio da sobreposição dessas informações locais à região de estudo foi possível entender quais locais possuem maior vulnerabilidade e quais suas características. A região onde se encontram as formações sedimentares da BSP e depósitos aluvionares, por exemplo, se mostrou mais vulnerável à uma possível contaminação.

A análise de vulnerabilidade de aquíferos em relação com o uso e ocupação do solo em Osasco/Carapicuíba, realizada neste trabalho, se mostrou uma ferramenta útil de auxílio na gestão da exploração das águas subterrâneas. As atividades desenvolvidas em determinado território, se não forem realizadas de maneira correta, podem aumentar a vulnerabilidade do aquífero. Dessa forma, o entendimento de quais locais do território são mais vulneráveis é um fator essencial para proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Este trabalho destaca como um local com maior vulnerabilidade pode se tornar mais ameaçado pelas atividades nele desenvolvidas.

## ABSTRACT

The growing urbanization and the change in rainfall patterns in the Metropolitan Region of São Paulo (RMSP), aggravates the scenario of water availability and vulnerability. Important for an adequate and sustainable management of water resources, the recognition of aquifer vulnerabilities is a tool that is still little used at the municipal scale. The studied region encompasses the municipalities of Osasco and Carapicuíba, geologically inserted in the context of the Continental Rift of Southeastern Brazil and the Sedimentary Basin of São Paulo (BSP). Hydrogeologically, the sedimentary and crystalline aquifer systems are present in the region. The main objective of this work is to elaborate an aquifer vulnerability map of the municipalities of Osasco and Carapicuíba.

The vulnerability map of the studied municipalities was prepared using the DRASTIC method, which comprises the superposition of 7 parameters (depth to groundwater, net recharge, aquifer media, soil, topography, impact to the vadose zone, and hydraulic conductivity) specific to the study region with different weights. To obtain the necessary information, a bibliographic review was carried out not only on the regional context in which the area is located, but also on the method used. In addition, DAEE provided information on wells installed in the municipalities of Osasco and Carapicuíba and shapefiles in the area were obtained from online platforms. The maps were created in QGIS software.

Aquifer vulnerability is directly related to the physical characteristics of the region, such as local geology, soil, aquifer environment, topography, aquifer recharge, among others. By superimposing this local information on the study region, it was possible to understand which places are more vulnerable and what their characteristics are. The region where the BSP sedimentary formations and alluvial deposits are located, for example, proved to be more vulnerable to possible contamination.

The analysis of aquifer vulnerability in relation to land use and occupation in Osasco/Carapicuíba, carried out in this work, proved to be a useful tool to aid in the management of groundwater exploration. The activities carried out in a certain territory, if not carried out correctly, can increase the aquifer's vulnerability. Thus, understanding which parts of the territory are most vulnerable is an essential factor in protecting groundwater resources. This work highlights how a place with greater vulnerability can become more threatened by the activities carried out there.

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	5
<b>2. METAS E OBJETIVOS</b> .....	7
<b>3. TRABALHOS PRÉVIOS</b> .....	7
3.1. Trabalhos semelhantes.....	7
3.2. Vulnerabilidade de Aquíferos .....	8
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	10
4.1. DRASTIC .....	11
<b>5. RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	14
5.1. Contexto Geológico Regional .....	14
5.1.1. Rift Continental do Sudeste do Brasil .....	14
5.1.2. Bacia Sedimentar de São Paulo.....	16
5.2. Contexto Geológico Local.....	20
5.3. Contexto Hidrogeológico Regional.....	22
5.4. Contexto Hidrogeológico Local .....	25
5.5. Hidrografia, Clima e Uso e Ocupação do Solo .....	26
5.6. Modelo de Vulnerabilidade da Área de Estudo .....	29
5.6.1. Nível d'água.....	30
5.6.2. Recarga do Aquífero .....	31
5.6.3. Meio Aquífero .....	32
5.6.4. Solo.....	32
5.6.5. Topografia.....	33
5.6.6. Impacto à zona vadosa .....	34
5.6.7. Condutividade hidráulica.....	35
5.6.8. Mapa de Vulnerabilidade .....	35
<b>6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	36
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	37
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	38

## 1. INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) compreende 39 municípios, dentre eles, Osasco e Carapicuíba (Figura 1); e está situada no curso superior do rio Tietê (Rodriguez, 1998), área denominada como Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. As regiões metropolitanas normalmente apresentam problemas de abastecimento de água e tratamento de esgotos, uma vez que são áreas que possuem uma maior diversificação dos usos dos recursos hídricos (Cunha & Borges, 2015). Além disso, o crescimento da população urbana aumenta exponencialmente a demanda hídrica.

O município de Osasco possui aproximadamente 698 mil habitantes, enquanto Carapicuíba possui 401 mil habitantes, sendo que 100% da população é urbana em ambos os municípios, segundo o site do Instituto Água e Saneamento. Carapicuíba possui uma densidade demográfica de cerca de 10.700 hab/km<sup>2</sup>, enquanto Osasco possui 10.300 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Segundo o site do Instituto de Água e Saneamento, o acesso aos serviços de água é garantido à 100% da população em toda a região estudada, sendo que a média do estado de São Paulo é 96,2%. Em relação ao esgotamento sanitário, 1,5% da população de Osasco não possui acesso à saneamento básico, sendo que 24,4% do esgoto gerado no município não é coletado e nem tratado. Em Carapicuíba, 16,7% da população não tem acesso à esgoto, sendo que 25,7% do esgoto gerado não é coletado e nem tratado.

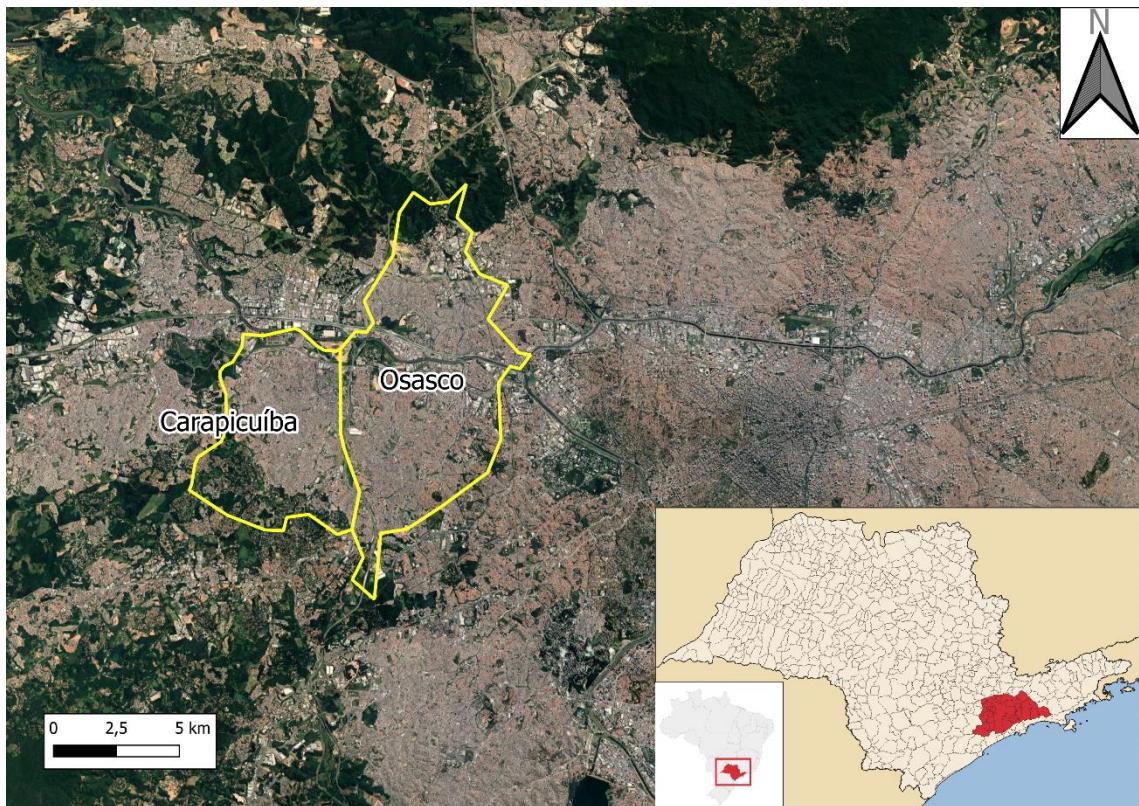


Figura 1: Localização da área de estudo

A água subterrânea é uma das fontes mais importantes (30%) de água doce disponível para a sociedade. Com o cenário de urbanização acelerada, crescentes interferências humanas no meio ambiente, exploração descontrolada do recurso e mudanças climáticas, a qualidade das águas subterrâneas fica ameaçada (Sarkar & Pal, 2021). A análise da vulnerabilidade de determinadas águas subterrâneas é uma das formas de protegê-las de possível contaminação e exploração exagerada, o que pode causar seu esgotamento ou danos à saúde da população que depende do recurso (Sarkar & Pal, 2021)

Diante destas colocações, gerar novos conhecimentos e interpretações sobre os recursos hídricos subterrâneos da Região de Osasco e Carapicuíba, é de fundamental importância para uma melhor gestão ambiental e social desses recursos nos municípios e na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê.

Este trabalho irá elaborar um mapa de vulnerabilidade do aquífero na região de estudo, utilizando o método DRASTIC, que compreende a sobreposição de diferentes parâmetros específicos ao local estudado, sendo que cada parâmetro possui um peso associado.

## **2. METAS E OBJETIVOS**

O objetivo principal do trabalho em questão é realizar uma análise da vulnerabilidade de aquíferos na região dos municípios de Osasco e Carapicuíba, com base em dados de poços instalados na região estudada, e estabelecer uma relação entre a vulnerabilidade do aquífero e o uso e ocupação do solo na área. O produto final do trabalho é um mapa de vulnerabilidade de aquífero, distribuídos nessas localidades.

A importância da avaliação realizada neste trabalho é gerar dados que possam ser utilizados para ajudar a gestão de recursos hídricos subterrâneos. Determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, e sua relação com o uso e ocupação do solo em dada região, permite que sejam definidos fatores de grande importância para uma boa gestão dos recursos hídricos, como por exemplo, a alocação de poços de captação de água de maneira mais eficiente e segura, a definição de áreas de proteção e locais onde se deve alterar o uso e ocupação do solo, além de estabelecer quais atividades podem ser desenvolvidas em quais regiões e quais apresentam maior risco de contaminação das águas subterrâneas. Ao atingir uma boa e eficiente gestão, é possível garantir um uso sustentável dos recursos hídricos e manutenção da vida nos diferentes ecossistemas que existem nesses municípios, incluindo o ser-humano. A relação estabelecida neste trabalho não será de uso apenas para a região estudada. Os resultados obtidos poderão ser aplicados a diferentes áreas.

## **3. TRABALHOS PRÉVIOS**

### **3.1. Trabalhos semelhantes**

Procel (2011) analisou a contaminação por nitrato e sua relação com o crescimento urbano no sistema aquífero Bauru em Presidente Prudente (SP). Uma das potenciais fontes de contaminação por nitrato é o sistema de saneamento e suas redes coletoras mal projetadas, sobretudo em regiões de alta densidade populacional (Procel, 2011). Presidente Prudente sofreu um acelerado processo de urbanização, onde inicialmente não existiam instalações de rede de esgoto, sendo o mesmo lançado diretamente no solo, em fossas (Procel, 2011). Em seu trabalho, Procel (2011) buscou relações entre as principais fontes de contaminação por Nitrato e o histórico de ocupação do solo. Os resultados indicaram uma contaminação antrópica e multipontual, do tipo fossas negras, e as maiores concentrações foram observadas nas porções mais rasas do aquífero, em localidades onde a densidade de fossas era maior (Procel, 2011).

Safa et al. (2020) realizou uma análise do impacto na vulnerabilidade de águas subterrâneas pela urbanização em regiões áridas, no caso do aquífero Sidi Bouzid, Tunísia central, onde as águas subterrâneas são a única fonte de água para consumo da população. Segundo Safa et al. (2020), a região compreendida pelo aquífero Sidi Bouzid sofre sérios problemas relacionados à poluição de suas águas devido à crescente atividade humana. A análise foi feita utilizando o método DRASTIC, considerando um ambiente urbano de uso do solo e adaptando-o para as especificações da região estudada (Safa et al., 2020). O índice DRASTICO (ID), resultado da utilização do método, foi validado utilizando a distribuição das concentrações de nitrato (Safa et al., 2020). O resultado do estudo exibiu IDs de valores altos, indicando vulnerabilidades altas, muito altas e extremas (Safa et al., 2020).

A vulnerabilidade de um aquífero em Koradi, Índia, à poluição foi analisada utilizando o método DRASTIC em conjunto com software GIS por Janipella et al. (2020). O contexto geológico da área estudada compreende as rochas do Grupo Sausar (quartzitos, mármore, xistos e gnaisses), além de formações sedimentares (arenitos, folhelhos e argilitos). Hidrogeologicamente, a área é caracterizada por aquíferos não confinados a semi-confinados (Janipella et al., 2020). Os parâmetros utilizados para aplicação do modelo DRASTIC foram o nível d'água, nível de recarga do aquífero, característica do aquífero, característica do solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica; e diferentes pesos foram aplicados a cada um dos parâmetros de acordo com sua importância no contexto estudado. Além da ferramenta DRASTIC, outras ferramentas de confecção de mapas no software ArcGIS também foram utilizadas. Janipella et al. concluiu que as zonas de vulnerabilidade baixa a moderada, constituem 33% a 67% da área. Nota-se que a área não apresentou zonas de vulnerabilidade muito altas, provavelmente devido à grande presença de solo argiloso (Janipella et al., 2020). O estudo sugeriu que o modelo DRASTIC é uma ferramenta rápida e efetiva em análises de vulnerabilidade em todo e qualquer estudo ambiental; e que o método pode ser utilizado de modo a priorizar áreas mais vulneráveis para que uma futura poluição do aquífero seja evitada e políticas públicas possam ser adotadas para um bom planejamento do uso e ocupação do solo na região (Janipella et al., 2020).

### **3.2. Vulnerabilidade de Aquíferos**

Em todo o mundo, os aquíferos têm se tornado cada vez mais importantes quando o assunto é distribuição de água para a sociedade. No Brasil, mais de 50% do abastecimento público é feito a partir da exploração de corpos d'água subterrâneos, enquanto no Estado de São Paulo, aproximadamente 70% dos municípios são total ou

parcialmente abastecidos por este recurso (Conicelli, 2014). A grande dependência da sociedade para com os recursos hídricos subterrâneos faz com que, no caso de má gestão, estes recursos fiquem ameaçados.

É comum que os órgãos públicos, responsáveis pela gestão dos recursos hídricos e proteção do meio ambiente, tenham pouco conhecimento técnico e percepção distorcida sobre a importância das águas subterrâneas ao crescimento e desenvolvimento da sociedade (Conicelli, 2014), fazendo com que os aquíferos fiquem vulneráveis à uma série de questões. Conicelli (2014) descreve alguns problemas relacionados à má gestão das águas subterrâneas, sendo eles: (1) Superexploração, uma intensiva extração da água subterrânea, que pode causar redução localizada nos níveis de aquíferos; redução dos fluxos de base em corpos d'água superficiais, causando danos ao ecossistema local; incremento nos custos de exploração das águas; problemas sociais de escassez de água; entre outros; muitas vezes, está relacionada com poços instalados ilegalmente; e (2) Poluição de aquíferos, causada por atividades antrópicas mal operadas, como disposição incorreta de efluentes líquidos e resíduos industriais. Assim, para garantir a segurança e sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário conhecer as áreas mais vulneráveis, mapear as fontes possíveis de contaminação e estabelecer rotinas de monitoramento (Maia & Cruz, 2011).

Segundo Guiguer & Kohnke (2002), a vulnerabilidade das águas subterrâneas diz respeito à facilidade com a qual um contaminante pode migrar para as águas subterrâneas, ou para um aquífero de interesse em determinadas situações de uso do solo, características do contaminante e condições da área. Dessa forma, a vulnerabilidade de um aquífero, depende de fatores físicos intrínsecos ao aquífero (porosidade, litologia etc.), da ocupação da área que está sobre o aquífero (uso do solo, topografia etc.), do contaminante (mobilidade, densidade etc.). São fatores naturais que caracterizam a vulnerabilidade de um aquífero: (a) acessibilidade da zona natural à penetração de poluentes; (b) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação ao poluente na zona não saturada e; (c) diluição e a remobilização dos contaminantes (Maia & Cruz, 2011). Além disso, a vulnerabilidade também depende da sensibilidade do aquífero à impactos antrópicos (Guiguer & Kohnke, 2002).

Na área de estudo, atividades humanas de inúmeros tipos são desenvolvidas, fazendo com que a influência antrópica no meio ambiente seja expressiva. Para que haja proteção dos recursos hídricos em uma dada região, é necessário definir quais atividades desenvolvidas apresentam maiores perigos à contaminação de aquíferos (Hirata & Ferreira, 2001). Na região da Bacia do Alto Tietê, as atividades desenvolvidas

que representam maiores perigos à contaminação de aquíferos são: atividade industrial, área de destinação final de resíduo sólido domiciliar e de outras origens, posto de serviço com estocagem subterrânea de combustível e área urbanizada com rede de coleta de esgoto (Hirata & Ferreira, 2001).

Segundo Hirata & Ferreira (2001), a vulnerabilidade de aquíferos à contaminação pode ser definida como a probabilidade de que as águas subterrâneas sejam degradadas em concentrações acima do padrão de qualidade considerado para uma água potável, estabelecido pela GMS 888/2021 do Ministério da Saúde. Na Figura 2 é possível observar os índices de vulnerabilidade das unidades da Bacia do Alto Tietê.

Aquífero	Zona Não-Saturada	Vulnerabilidade Intrínseca		Valor da Água		Classificação da Vulnerabilidade
		Acesso Hidráulico	Atenuação	Importância do recurso (densidade de usuários)	Potencialidade Hídrica	
Unidade Neo-Cenozóica Livre, porosidade primária	Predominantemente areno-argilosas, subordinadamente com intercalações de cascalhos	*** Alta	*** Baixa	* Baixa	* Baixa	Alta vulnerabilidade (soriente para captações rasas)
Aquífero Resende Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de lamitos arenosos a argilos com seixos e intercalações de até 1 m de areias e cascalhos	*** Alto	** Média	*** Alta	** Média	Alta vulnerabilidade
Aquífero de Rochas Graníticas Livre e fraturado	Alteração de rochas metassedimentares, incluindo quartzitos, xistos, metassilitos, metacarbonáticas e suas correspondentes sãs em profundidade	** Médio	** Média	** Média	** Média	Média vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta. Em rochas metacarbonáticas, alta vulnerabilidade
Aquífero São Paulo Livre a semi-confinado, porosidade primária	Predominância de camadas de cascalhos e areias	** Médio	** Média	*** Alta	** Média	Média vulnerabilidade
Aquífero de Rochas Metassedimentares Livre e fraturado	Alteração de rochas ígneas e metamórficas, incluindo granitos, gnaisses e filitos e suas correspondentes sãs em profundidade	** Médio	*** Baixa	** Média	* Baixa	Média-baixa vulnerabilidade quando o manto de alteração for espesso (>20 m), caso contrário, alta

\*\*\* → \* maior para menor influência na elevação do índice de vulnerabilidade do aquífero

Figura 2: Índices de Vulnerabilidade das unidades hidrogeológicas da Bacia do Alto Tietê (Hirata & Ferreira, 2001).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Dentre os métodos que foram utilizados para a elaboração deste trabalho estão a pesquisa bibliográfica e a elaboração de mapas em software GIS. A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir de plataformas digitais como o acervo da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, além de ferramentas de pesquisa como o Google Scholar, Scopus, Science Direct, entre outros. O principal objetivo do levantamento bibliográfico foi compilar as informações já existentes a respeito da geologia regional, hidrogeologia, bem como das teorias envolvendo o conceito de Vulnerabilidade de Aquíferos e metodologias.

Foram confeccionados mapas da região de estudo correlacionando dados geológicos, hidrogeológicos, de uso e ocupação do solo, entre outros. Para a confecção dos mapas foram utilizados os softwares QGIS e Google Earth. Os dados necessários para elaboração dos produtos foram obtidos por meio de plataformas *online* como o IBGE e a GeoSGB. Adicionalmente, foram obtidos dados hidráulicos e químicos dos poços existentes na área de estudo por meio de plataformas digitais públicas, como o DAEE, SIAGAS e SigRH, também para a elaboração dos mapas. Consultas aos processos de outorga foram feitas, para complementar as informações disponíveis na internet. A ferramenta que foi utilizada para a elaboração do mapa de vulnerabilidade é a DRASTIC.

#### **4.1. DRASTIC**

Os parâmetros hidrogeológicos e o sistema de ranking relativos são dois dos aspectos mais importantes da ferramenta DRASTIC. O modelo utiliza sete parâmetros hidrogeológicos para realizar uma análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas, sendo eles: nível d'água, recarga do aquífero, características do aquífero, características do solo, topografia, impacto da zona vadosa, e condutividade hidráulica do aquífero (Figura 3). Estes são os parâmetros utilizados, uma vez que são estes os responsáveis por regular o movimento da água subterrânea em uma determinada área de estudo. São designados pesos aos parâmetros de acordo com sua relação aos contaminantes presentes (Kumar et al., 2020).

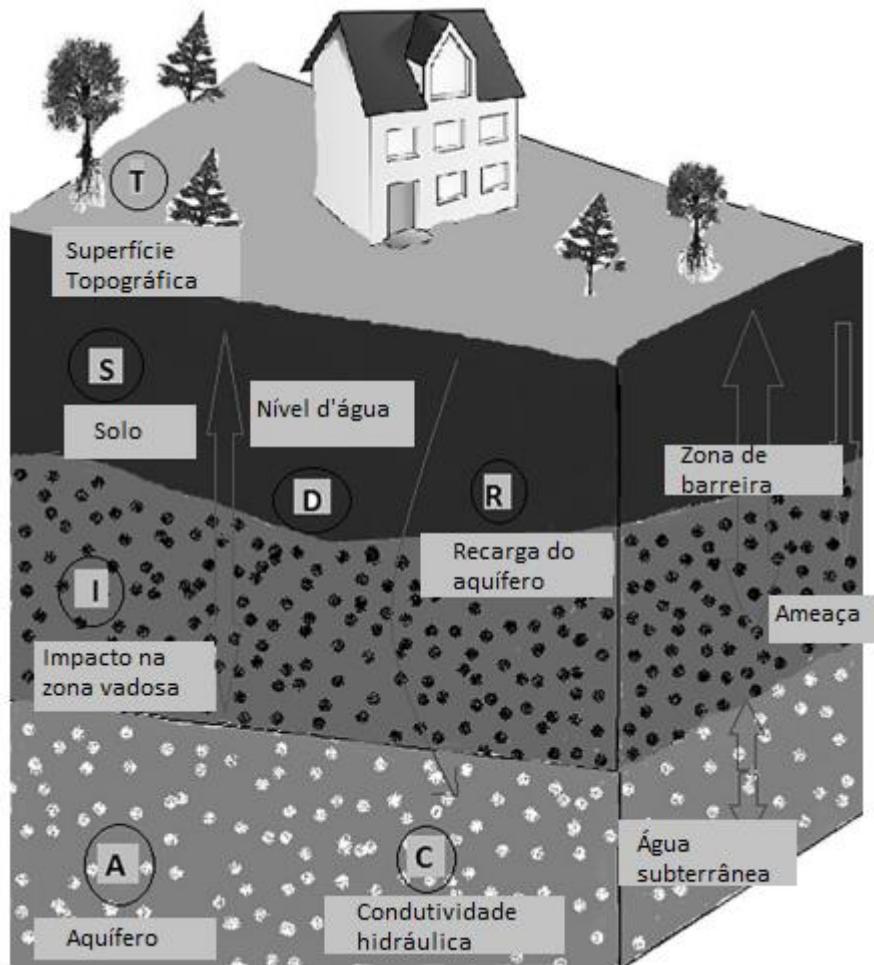


Figura 3: Parâmetros hidrogeológicos utilizados pelo modelo DRASTIC (Kumar et al., 2020).

Sobre os parâmetros utilizados, Kumar et.al. (2020) explica:

- Nível d'água: deve ser analisado e categorizado de acordo com momentos de cheia e seca, ou seja, maiores e menores níveis d'água;
- Recarga do aquífero: é a água que chega à zona saturada, ou aquífero; as fontes desta água podem ser naturais, como a chuva, contribuição de rios, lagos, ou antrópicas, como irrigação, vazamento da rede de abastecimento e de esgoto. A recarga do aquífero é calculado por meio da soma entre todas as fontes responsáveis em um determinado local, sendo que a magnitude de cada fonte pode variar ao longo do tempo de acordo com períodos de cheia e seca;
- Características do aquífero: em conjunto com a condutividade hidráulica possui grande influência no índice de vulnerabilidade determinado pelo modelo DRASTIC. A porosidade do aquífero interfere diretamente na

vulnerabilidade do mesmo, sendo que quanto maior a porosidade/abertura de fraturas, maior será o potencial de poluição;

- d. Características do solo: o solo compreende os primeiros dois metros, aproximadamente, do meio estudado. A estrutura e composição do solo possui grande influência no transporte de um contaminante, da zona vadosa ao aquífero. O modelo DRASTIC depende do tamanho médio dos grãos que compõem o solo;
- e. Topografia: áreas de maior declividade possuem menor grau de infiltração no solo em comparação a áreas planas, de modo que o risco de contaminação em áreas de maior declividade é menor.

O modelo DRASTIC pode ser utilizado para classificar áreas vulneráveis do aquífero, para que haja uma melhor administração do recurso; entretanto, o modelo deve ser modificado para atender a diferentes fatores. A modificação do modelo é feita por meio de omissão e adição de diferentes camadas, como por exemplo, o uso e ocupação do solo, para que possa ser melhor estimado o risco aos diferentes poluentes presentes na região estudada (Sarkar & Pal, 2021).

O método DRASTIC foi desenvolvido nos Estados Unidos, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) e a Natural Water Well Association (NWWA) (Janipella et al., 2020). Algumas suposições são feitas para aplicação do método, dentre elas: (1) a contaminação ocorre no nível do solo; (2) a contaminação atinge a zona saturada quando a chuva cai na superfície e percola pelo substrato; (3) a contaminação se desloca com a água, na mesma velocidade; e (4) a região analisada tem 100 ou mais acres (Janipella et al., 2020).

Um índice numérico, chamado índice DRASTICO (ID) é produzido pelo método, levando em consideração diferentes parâmetros hidrogeológicos e seus pesos de acordo com a situação local analisada. O modelo estabelece pesos padrões para cada um dos parâmetros (Tabela 1), entretanto estes pesos podem ser alterados de acordo com as características da área de estudo. Quanto maior for o ID, maior a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição. O mapa de vulnerabilidade é obtido a partir da soma e sobreposição dos diferentes parâmetros. Dentre os parâmetros utilizados estão: nível de recarga do aquífero, características do aquífero, características do solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica (Janipella et al., 2020). Segundo Kumar et al. (2020), a recarga do aquífero pode ocorrer a partir de diversas fontes, sendo elas chuva, rios, irrigação, lagos, entre outras. O nível de recarga do aquífero pode ser calculado por meio da soma entre todas as fontes responsáveis por realizar recarga do

aquífero presente na área estudada. Portanto, se em determinado local estudado, a recarga do aquífero for realizada a partir de rios e chuva, o nível de recarga deste aquífero será calculado pela soma entre a taxa de recarga dos rios e a taxa de recarga da chuva (Kumar et al., 2020). Segundo Janipella et al. (2020), o nível de recarga do aquífero representa a quantidade de água por unidade de área que penetra a superfície do solo e alcança o nível freático. A água responsável pela recarga também pode ser responsável por transportar o contaminante da superfície do solo, para o corpo d'água subterrâneo (Janipella et al., 2020).

Tabela 1: Pesos padrões estabelecidos pelo modelo DRASTIC. Fonte: Janipella et al., 2020.

Parâmetro	Peso padrão
D – Nível d'água	5
R – Recarga do Aquífero	4
A – Meio Aquífero	3
S – Solo	2
T – Topografia	1
I – Impacto à zona vadosa	5
C – Condutividade Hidráulica	3

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

### 5.1. Contexto Geológico Regional

#### 5.1.1. Rift Continental do Sudeste do Brasil

O Rift Continental do Sudeste do Brasil (RCSB), feição tectônica de idade paleógena, é caracterizado por uma faixa estreita, alongada segundo a direção ENE com cerca de 900 km de comprimento, seguindo a linha da costa atual. Está localizado entre as cidades de Curitiba (estado do Paraná) e Barra de São João (estado do Rio de Janeiro) (Riccomini et al., 2004).

Atualmente, o RCSB pode ser dividido em três diferentes segmentos. O segmento ocidental compreende a Bacia Sedimentar de Curitiba e área de ocorrência da Formação Alexandra, grábens de Guaraqueçaba, Sete Barras e Cananéia (números 8, 9, 10, 11 e 12 na Figura 4). O segmento central, por sua vez, engloba as bacias Sedimentares de São Paulo, Taubaté, Resende e Volta Redonda (números 7, 5, 6 e 4 na Figura 4). Por último, o segmento oriental abrange as áreas do Gráben de Guanabara, bacias sedimentares do Macacu e Itaboraí, e o Gráben de Barra de São João (números 3, 2 e 1 na Figura 4) (Riccomini et al., 2004).

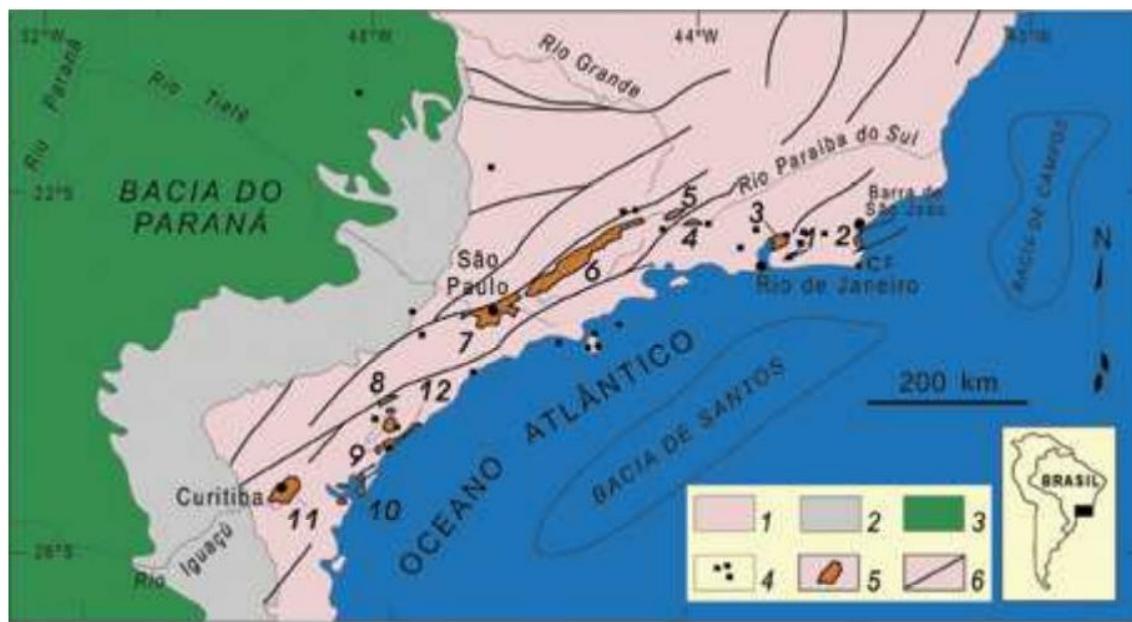


Figura 4: Contexto geológico do Rift Continental Sudeste do Brasil (RSCB): (1) embasamento pré-cambriano; (2) rochas sedimentares paleozóicas da Bacia do Paraná; (3) rochas da Formação Serra Geral; (4) rochas relacionadas ao magmatismo alcalino mesozóico-cenozóico; (5) bacias cenozóicas do RSCB; (6) zonas de cisalhamento pré-cambrianas (Riccomini et al., 2004)

Quanto ao embasamento cristalino do RCSB, este é composto por rochas supracrustais, de baixo a médio grau metamórfico, além de rochas predominantemente gnáissico-migmatíticas e corpos graníticos intrusivos. As rochas que compõem este embasamento foram deformadas e metamorfizadas pelos vários ciclos geotectônicos que afetaram o sudeste brasileiro (Sant'Anna, 1999). O embasamento do RCSB está inserido regionalmente no contexto do Cinturão Ribeira. As bacias sedimentares de Taubaté, Resende, Volta Redonda e São Paulo constituem a área mais expressiva do RCSB, já que possuem a maior área de exposição dos sedimentos terciários (Sant'Anna, 1999). A Figura 5 apresenta a litosestratigrafia do Rift Continental do Sudeste do Brasil.

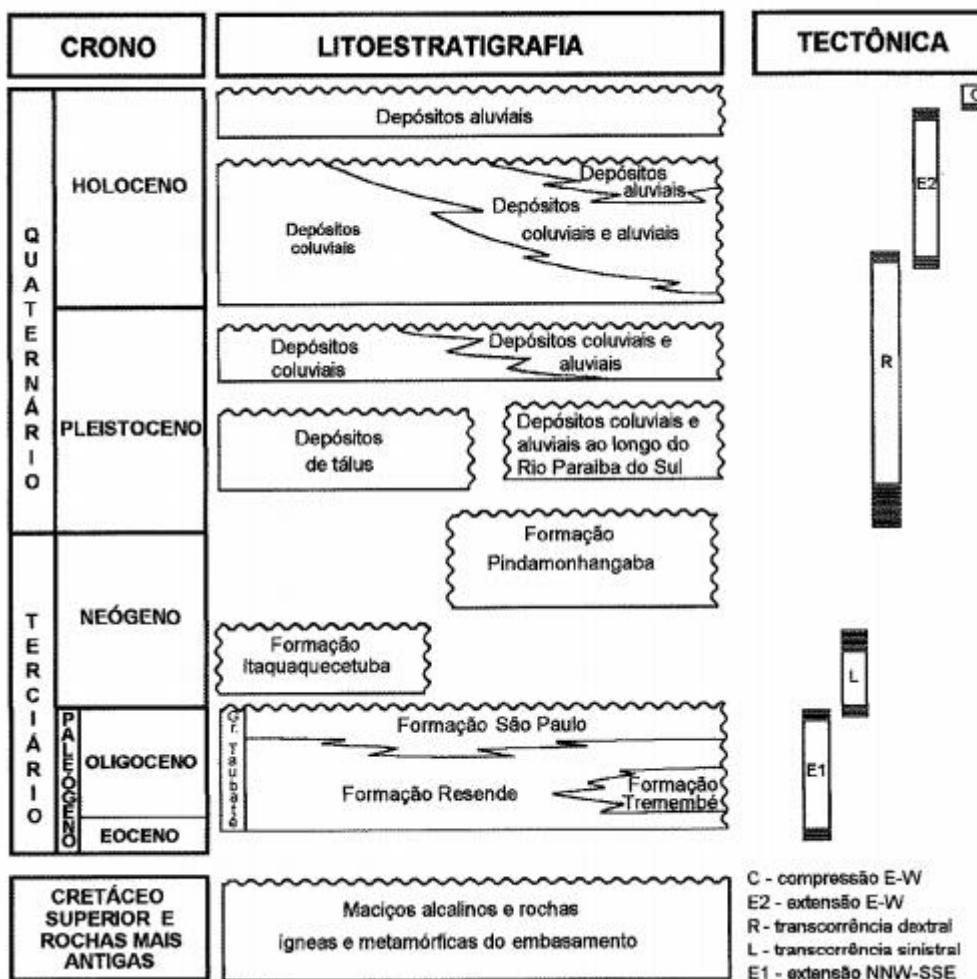


Figura 5: Litoestratigrafia do Rift Continental do Sudeste do Brasil. (Sant'Anna, 1999)

### 5.1.2. Bacia Sedimentar de São Paulo

A área ocupada pelos sedimentos terciários que constituem a Bacia Sedimentar de São Paulo (BSP) é de aproximadamente 1000 km<sup>2</sup>, coincidentes com a região do município de São Paulo e arredores (Campos et al., 2002). Falhas pós-sedimentação causaram soerguimentos e abatimentos em diferentes áreas da bacia. Devido ao formato e distribuição das fácies sedimentares presentes, a BSP pode ser considerada como originalmente um hemigráben (Riccomini et al., 2004), com basculamento NNW (Migliorini, 1994).

Estratigraficamente, a BSP é composta por quatro principais formações: Resende, Tremembé, São Paulo e Itaquaquecetuba, posicionadas acima de um embasamento cristalino. Além disso, também estão presentes coberturas aluvionares e coluvionares quaternárias, que ocupam as planícies dos rios que pertencem à Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (Campos et al., 2002).

#### 5.1.2.1. Embasamento Cristalino

O embasamento cristalino da Bacia Sedimentar de São Paulo faz parte do contexto geológico da Província Mantiqueira, unidade resultante da orogenia neoproterozoica, Brasiliano-Panafricana, que também foi responsável pela formação do paleocontinente Gondwana Ocidental (Gurgueira, 2013). É composto principalmente por rochas metamórficas e ígneas, associadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra Itaberaba, além de corpos graníticos intrusivos. Ocorrem em menor expressividade o Complexo Costeiro, Complexo Pico do Papagaio, Nappe Socorro-Guaxupé e Grupo Votuverava (Gurgueira, 2013). A Figura 6 apresenta o mapa geológico da RMSP, com destaque para o embasamento cristalino.

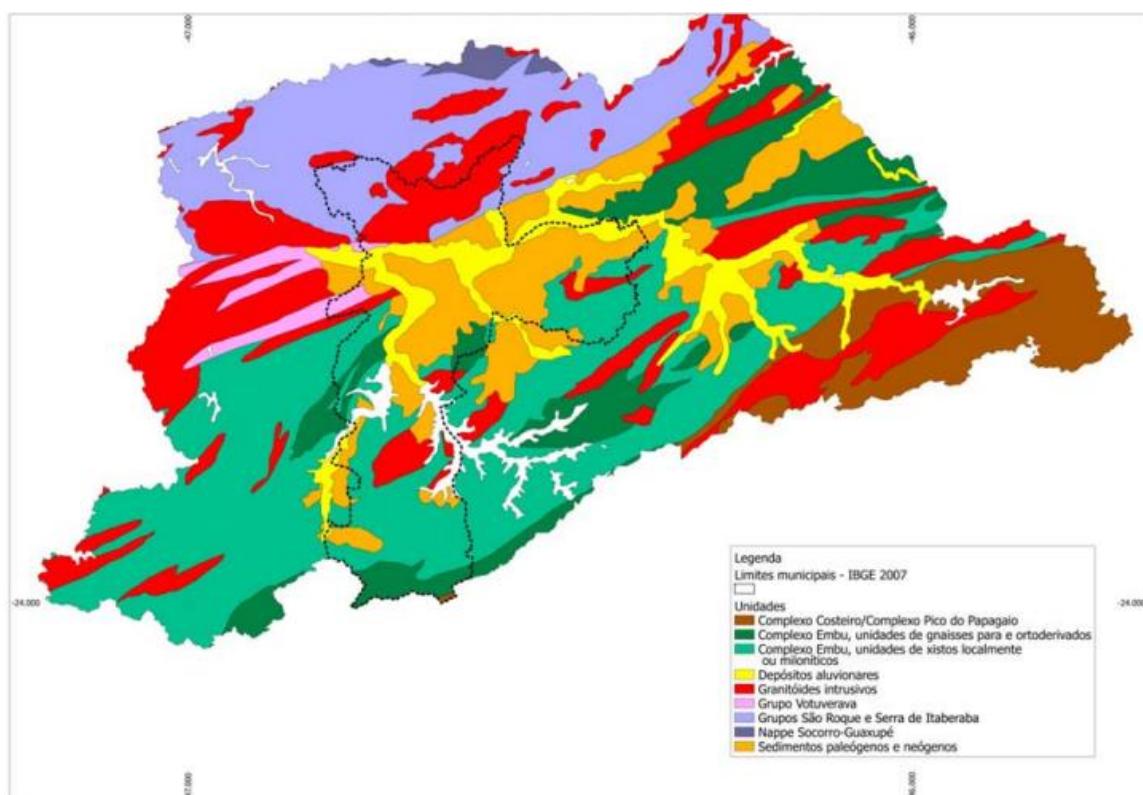


Figura 6: Mapa Geológico da RMSP, com destaque para o embasamento (Gurgueira, 2013).

O Complexo Embu, unidade de maior expressão no embasamento da BSP, é constituído por xistos, filitos, migmatitos, gnaisses migmatizados e corpos lenticulares de quartzitos, anfibolitos e rochas calciosilicatadas, alinhados em corpos com direção NE-SW. É limitado pelo sistema de falhas Taxaquara e do Rio Jaguari, ao norte, e pela Falha de Cubatão, ao sul (Gurgueira, 2013).

Os Grupos São Roque e Itaberaba, área norte da RMSP, são constituídos por rochas metassedimentares e metavulcânicas, representadas por filitos, metarenitos e

quartzitos. Secundariamente, ocorrem anfibolitos, metacalcários, dolomitos, xistas porfiroblásticos e rochas calciosilicatadas (Gurgueira, 2013).

Afloram na RMSP uma grande quantidade de corpos graníticos intrusivos. Estes corpos são sin-tectônicos ou pós-tectônicos aos terrenos metamórficos também presentes no embasamento cristalino da BSP. Os granitos representantes destes corpos podem ser descritos como homogêneos e porfiróides, finos a muito grossos, de colorações cinza-claro a cinza-escuro ou avermelhados, com composição mineralógica variando de tonalítica a granítica (Gurgueira, 2013).

#### *5.1.2.2. Formação Resende*

A Formação Resende é a unidade basal e lateral do grupo Taubaté e foi depositada em um ambiente de leques aluviais associados à planície fluvial de rios entrelaçados (Gurgueira, 2013). Esta Formação apresenta grande expressão, podendo chegar a 80% do preenchimento sedimentar da bacia. Sua espessura estimada é de 256 m (Gurgueira, 2013).

Segundo Sant'Anna (1999), cinco litofácies são observadas na Formação Resende, sendo estas:

- 1- diamictitos e conglomerados polimíticos, com presença de seixos e matações angulosos a subarredondados, matriz lamítica e arenosa, de coloração esverdeada. Os sedimentos desta litofácie foram depositados em sistema de leques aluviais proximais;
- 2- corpos tabulares de lamitos arenosos a argilosos, de coloração esverdeada, associados à deposição na porção distal dos leques aluviais;
- 3- arenitos grossos a médios, mal selecionados, com presença de estratificação cruzada acanalada de médio porte. Constituem corpos tabulares de espessuras métricas a decimétricas. São representativos de sedimentação em ambiente de planície aluvial de rios entrelaçados;
- 4- sedimentos siltítico-argilosos, laminados, com alta quantidade de matéria orgânica, de coloração cinza-escura, representantes de sedimentação em pequenos lagos interlobos de leques aluviais;
- 5- calcários calcíticos, com presença de nódulos, posicionados em camadas de espessuras métricas a decimétricas, ou em preenchimentos de fraturas e rachaduras.

#### 5.1.2.3. Formação Tremembé

A Formação Tremembé, localizada na porção centro-norte da BSP possui baixa ocorrência e expressividade, em comparação com as outras formações aqui citadas. Compreende um sistema lacustre do tipo *playa-lake* (Sant'Anna, 1999).

Segundo Sant'Anna (1999), a formação é composta por:

- 1- Argilitos, de coloração verde, maciços, com conteúdo fossilífero e presença de gretas de contração e concreções calcíferas;
- 2- Folhelhos, em alguns locais fossilíferos e pirobetuminosos, representantes de um ambiente de sedimentação lacustre;
- 3- Corpos tabulares decimétricos contínuos, de dolomitos com textura microesparítica;
- 4- Ritmitos com alternância entre camadas de folhelhos e margas, formadas em águas rasas e salinas;
- 5- Arenitos grossos, arcoseanos e conglomeráticos. Por vezes constituem conglomerados polimíticos. Apresentam gradação para arenitos quartzosos finos, com presença de estratificação cruzada.

#### 5.1.2.4. Formação São Paulo

A Formação São Paulo, última constituinte do Grupo Taubaté, juntamente às formações Resende e Tremembé, comprehende um sistema fluvial meandrante. Está presente nas bacias de São Paulo, Resende e na porção sudoeste da Bacia de Taubaté. Dentre as rochas que constituem esta formação estão: (1) arenitos grossos, conglomeráticos, com presença de estratificações cruzadas, representantes de depósitos em canais meandrantes; (2) siltitos e argilitos laminados, por vezes com conteúdo fossilífero, depositados em meandros abandonados; (3) arenitos médios a grossos que gradam para sedimentos finos, rítmicos e laminados, representantes de depósitos de planície de inundação (Sant'Anna, 1999).

#### 5.1.2.5. Formação Itaquaquecetuba

A Formação Itaquaquecetuba é característica de um sistema fluvial entrelaçado e é restrita à área geográfica da Bacia Sedimentar de São Paulo. Seus depósitos sedimentares estão posicionados diretamente sobre as rochas do embasamento cristalino pré-cambriano da bacia. A deposição deste sistema foi controlada por falhas de direção ENE e NNW (Gurgueira, 2013).

Constituem a Formação Itaquaquecetuba, uma sequência de arenitos grossos, que exibem estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, fruto de um sistema deposicional fluvial entrelaçado, associado a leques aluviais. Podem estar presentes níveis argilo-siltosos, por vezes arenosos, ricos em matéria orgânica (Campos et al., 2002).

## 5.2. Contexto Geológico Local

O mapa geológico dos municípios de Osasco e Carapicuíba foi produzido a partir de dados do mapeamento de geodiversidade realizado pela CPRM em 2009 em escala 1:750.000 (Figura 7). Os representantes do embasamento cristalino observados na área de estudo são os Grupos São Roque e Votuverava, além dos corpos graníticos/granitóides. Já as unidades sedimentares da Bacia de São Paulo observadas na região são as Formações São Paulo e Resende. Adicionalmente são observados os depósitos aluvionares. Nota-se que o município de Carapicuíba se insere quase que totalmente em área de afloramento do embasamento cristalino (Grupo Votuverava) da Bacia de São Paulo, tendo apenas uma pequena porção do corpo de depósito aluvionar. Já o município de Osasco possui uma maior diversidade geológica e além de rochas do embasamento (Grupo São Roque), apresenta rochas das Formações Resende e São Paulo.

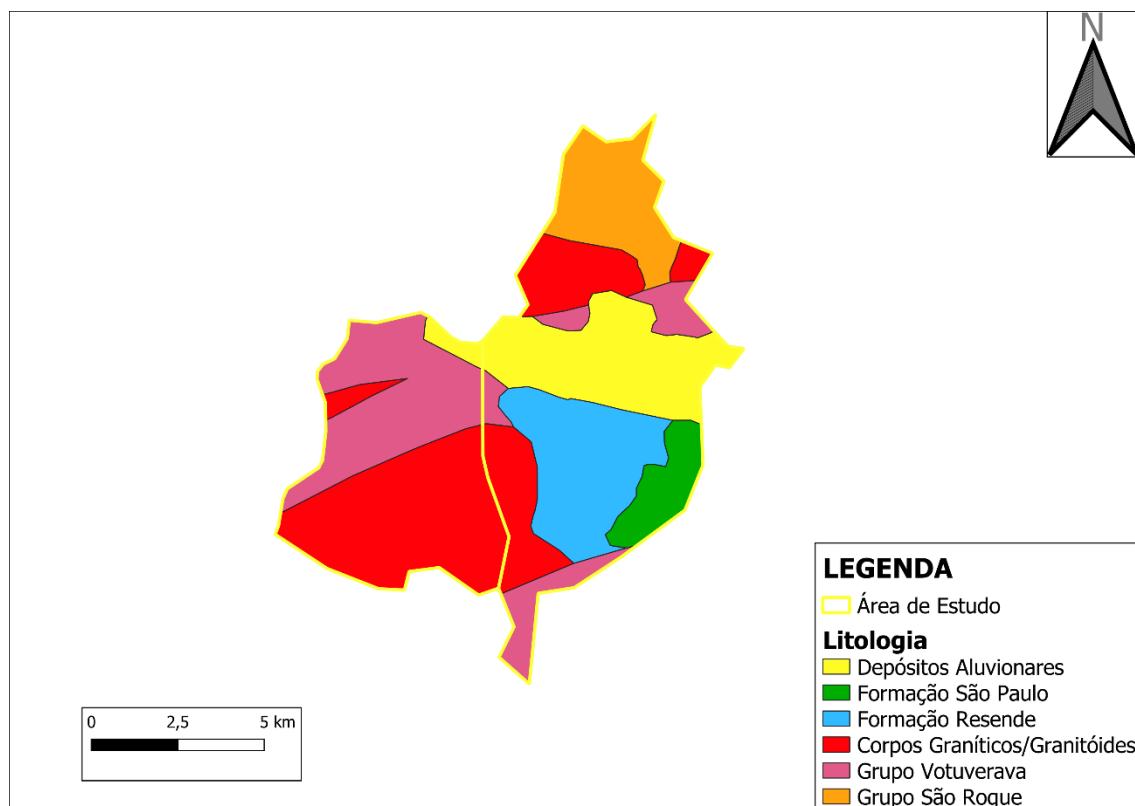


Figura 7: Mapa Geológico da área de estudo.

A partir dos dados disponibilizados pelo DAEE de poços de diferentes funções instalados nos municípios estudados foi possível entender melhor o contexto geológico local. Para o município de Carapicuíba, os pontos localizados sob o domínio do Grupo Votuverava, representativo do embasamento cristalino da BSP, as descrições litológicas dos poços indicam a presença de solos de alteração argilosos, com presença de micas e coloração vermelha a amarelada; sob rochas gnáissicas. A descrição litológica dos poços localizados sob o domínio dos Corpos Graníticos/Granitóides, por sua vez, indica a presença também de um solo argiloso avermelhado, rochas graníticas alteradas e granitos leucocráticos a melanocráticos.

Já para o município de Osasco, as descrições dos domínios representantes do embasamento cristalino (Grupo Votuverava e Corpos Graníticos/Granitóides) são as mesmas, mas adicionalmente estão presentes os outros domínios. Para a Formação São Paulo e Resende são descritas intercalações de areia grossa acinzentada a bege e argila. O Grupo São Roque é descrito como uma camada superior de argila plástica avermelhada sob rochas gnáissicas enriquecidas em biotita.

Os dados de pedologia da área de estudo, assim como os geológicos, foram obtidos a partir do mapeamento de geodiversidade da CPRM no Estado de São Paulo (2009). Toda a área compreendida pelos municípios de Osasco e Carapicuíba está localizada no domínio dos Latossolos (Figura 8).

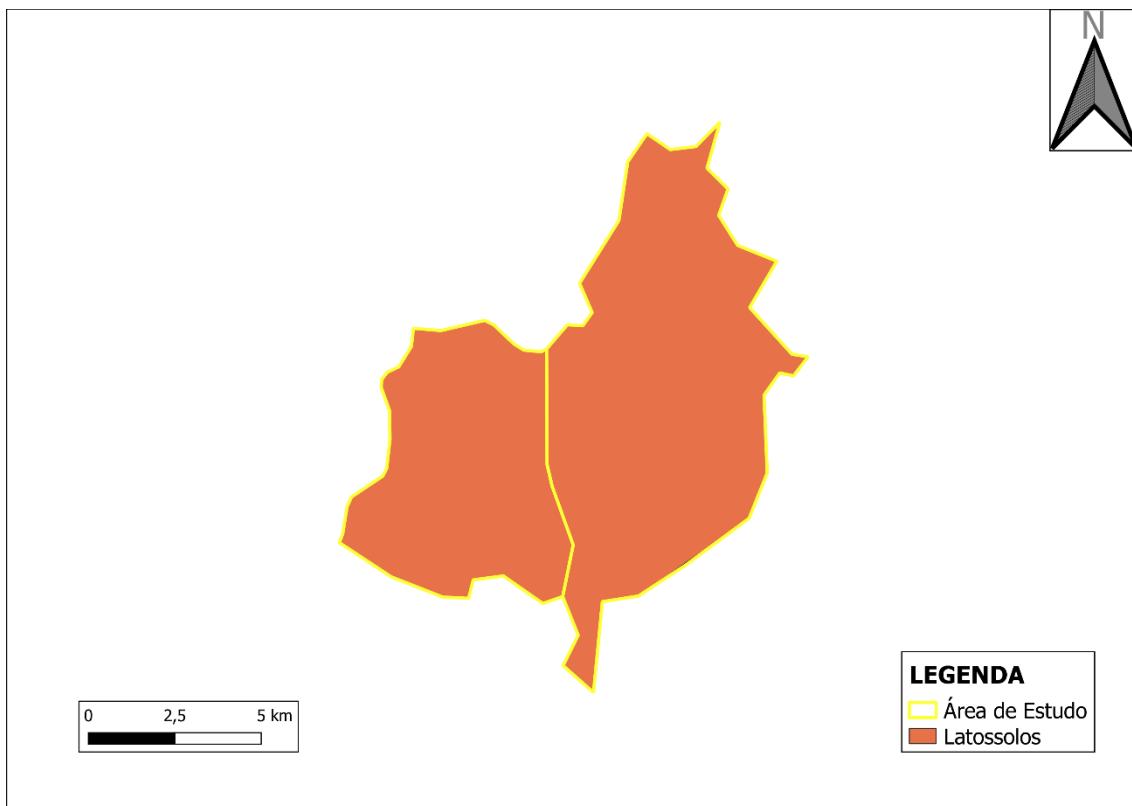


Figura 8: Mapa Pedológico da área de estudo.

Os Latossolos são o grupo de solos de maior e mais ampla expressão geográfica no território brasileiro (Ferreira et al., 1999). O conceito de “latossolo” implica um solo relacionado diretamente com as transformações causadas pelo intemperismo e lixiviação intensa, possuindo baixas atividade de argilas, capacidade de troca de cátions e relações moleculares sílica/alumínio e sílica/óxidos de ferro e alumínio (Ker, 1997).. Possuem grande profundidade, coloração relativamente homogênea vermelha-amarelada, distribuição uniforme de argila, alta estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte (Ker, 1997).

### 5.3. Contexto Hidrogeológico Regional

A região estudada está inserida no contexto hidrológico da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT). A BAT está localizada na região sudeste do Brasil, e sua rede hidrográfica é composta por rios pequenos e curtos de forte gradiente, além de rios alongados, perenes e relativamente volumosos (Conicelli, 2014). A Figura 9 apresenta a localização da BAT e todas as sub-bacias que a compõem. As águas disponíveis nos corpos d’água superficiais e subterrâneos da BAT são responsáveis pelo abastecimento da população que vive em seu território, além dos complexos industriais e regiões agrícolas (Conicelli, 2014). Como observado na Figura 9, os municípios de Osasco e Carapicuíba fazem parte da Sub-região Pinheiros-Pirapora.

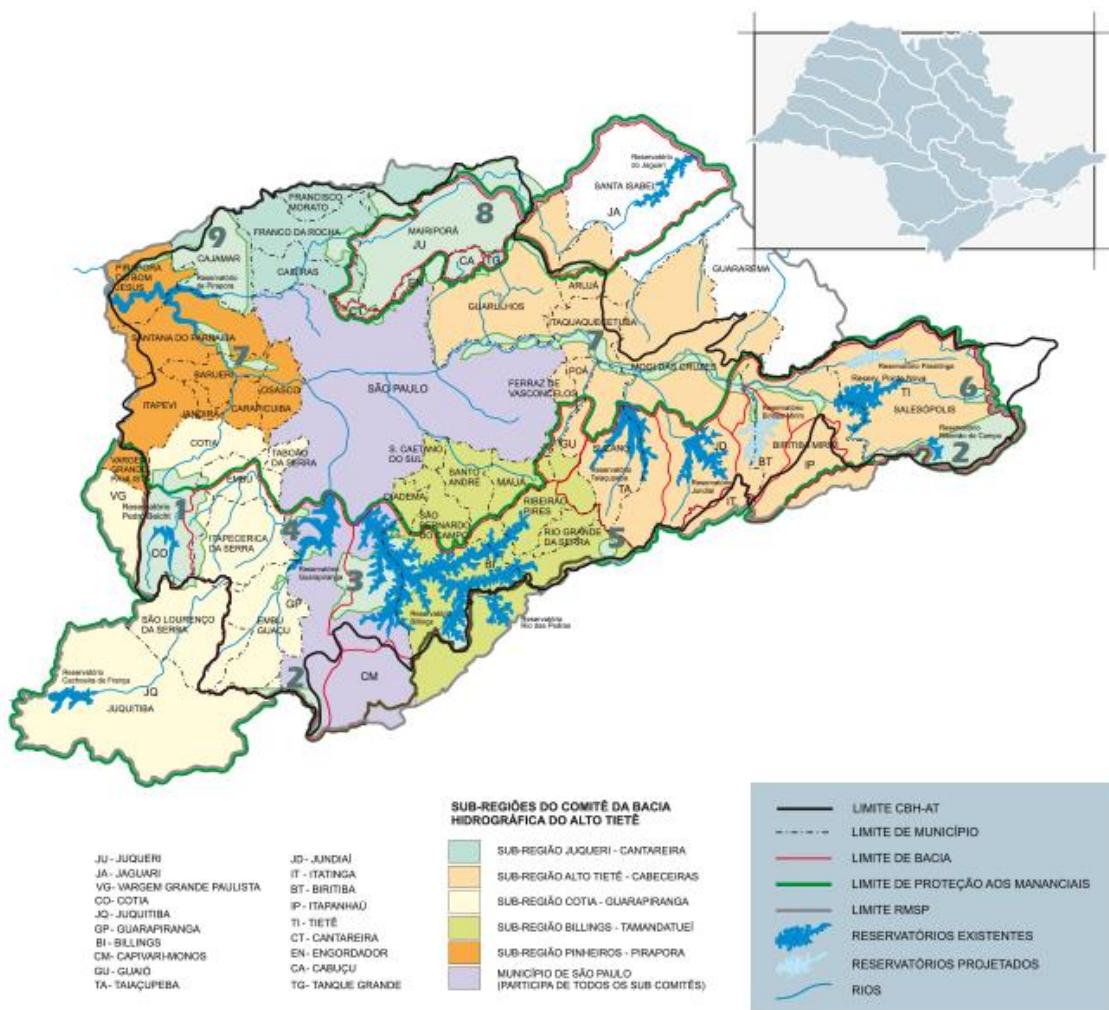


Figura 9: Território da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e das sub-bacias que a compõem.

Fonte: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhat/apresentacao>

O grande desenvolvimento da BAT está ligado ao abastecimento de água para a rede industrial, na região central da bacia (região metropolitana de São Paulo e arredores), e para a rede agrícola, nas regiões periféricas (Conicelli, 2014). Três principais tipos de usos e ocupação do território são descritos por Conicelli (2014): (1) Uso Urbano (residencial, industrial, aterros sanitários e lixões etc.); (2) Uso vegetação (mata, campos e vegetação de várzea) e; (3) Demais usos (reflorestamento, mineração etc.).

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê é uma unidade hidrológica que engloba, tanto os domínios da Bacia Sedimentar de São Paulo, quanto as rochas pré-cambrianas do embasamento cristalino (Hirata & Ferreira, 2001). Tal contexto geológico define duas principais unidades aquíferas: o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS).

O Sistema Aquífero Cristalino compreende cerca de 75% da Bacia Hidrográfica Alto Tietê e é composto pelas rochas graníticas, gnáissicas e metassedimentares do embasamento cristalino pré-cambriano. Segundo Hirata & Ferreira (2001), no SAC é possível distinguir duas unidades com características hidráulicas distintas: a primeira é composta pela camada superior de rochas intemperizadas e forma um aquífero de porosidade granular heterogêneo; a segunda unidade é compreendida pelas rochas cristalinas não intemperizadas e muitas vezes está conectada hidráulicamente à primeira unidade. Na primeira unidade, o fluxo de água se dá de forma livre, devido à porosidade da camada. Já na segunda unidade, o fluxo se dá por meio de falhas e fraturas. A unidade aquífera SAC possui caráter livre, semilivre, por vezes confinado por sedimentos sotopostos, heterogêneo e anisotrópico (Conicelli, 2014). A Figura 10 apresenta o modelo conceitual de circulação de água do SAC.

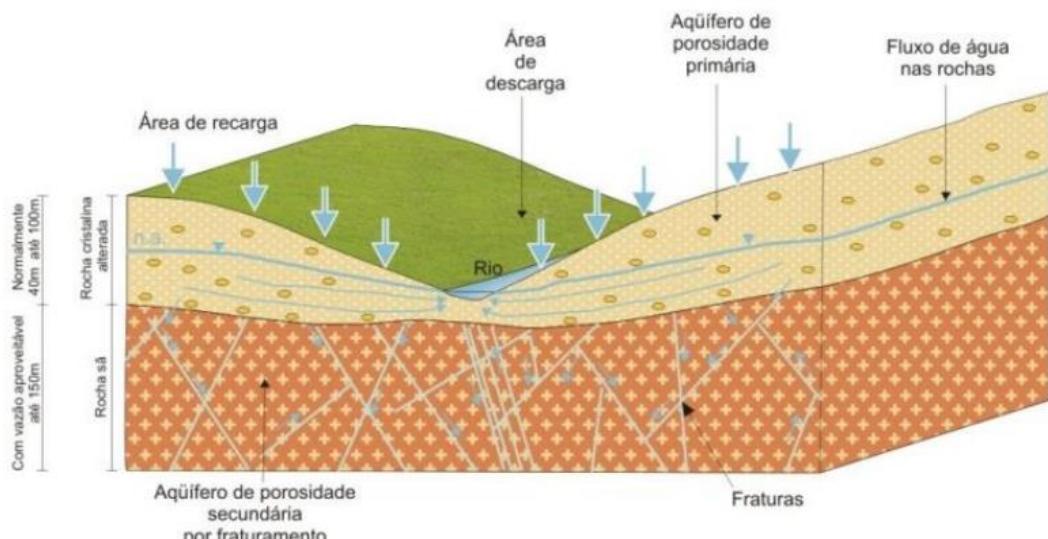


Figura 10: Modelo Conceitual de circulação de água no Sistema Aquífero Cristalino (Conicelli, 2014).

O Sistema Aquífero Sedimentar, apesar de compreender a menor parte da Bacia Hidrográfica Alto Tietê (25%), é mais intensamente explorado do que o SAC. Este sistema compreende as rochas sedimentares pertencentes à Bacia Sedimentar de São Paulo, principalmente das Formações São Paulo e Resende (Hirata & Ferreira, 2001; Conicelli, 2014). Esta unidade aquífera possui caráter livre a semiconfinado, de porosidade primária e de grande heterogeneidade. Sua recarga ocorre principalmente por meio de infiltração de águas pluviais, mas também por perdas da rede pública de abastecimento na área urbanizada da BAT. Em geral, o SAS apresenta espessura média de 100 metros e então o fluxo de água se dá de forma local, possuindo relação

direta com fontes de contaminação primárias e secundárias (Conicelli, 2014). A Figura 11 apresenta o modelo conceitual de circulação de água no SAS.

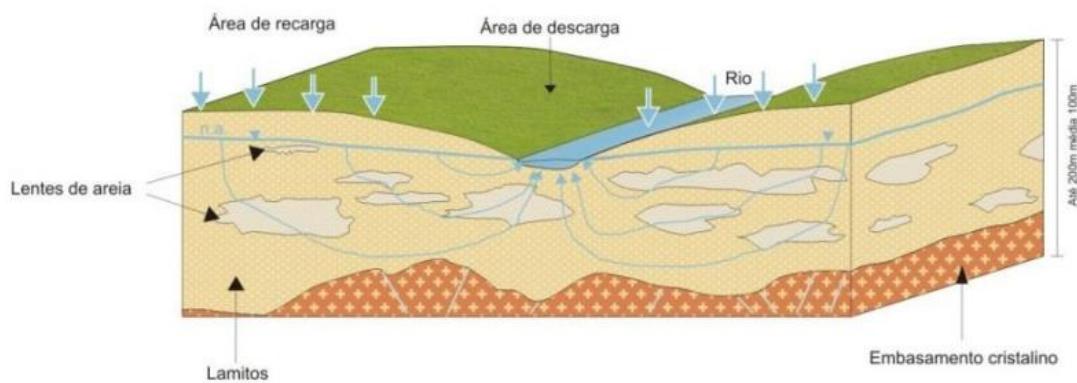


Figura 11: Modelo Conceitual de circulação de água no Sistema Aquífero Sedimentar (Conicelli, 2014).

#### 5.4. Contexto Hidrogeológico Local

Sobre o contexto hidrogeológico local (Figura 12), conclui-se que tanto o Aquífero Cristalino quanto o Aquífero Sedimentar possuem presença expressiva. O município de Carapicuíba está localizado quase que totalmente no domínio do Sistema Aquífero Cristalino. Já no município de Osasco, o território é dividido entre os dois domínios aquíferos.

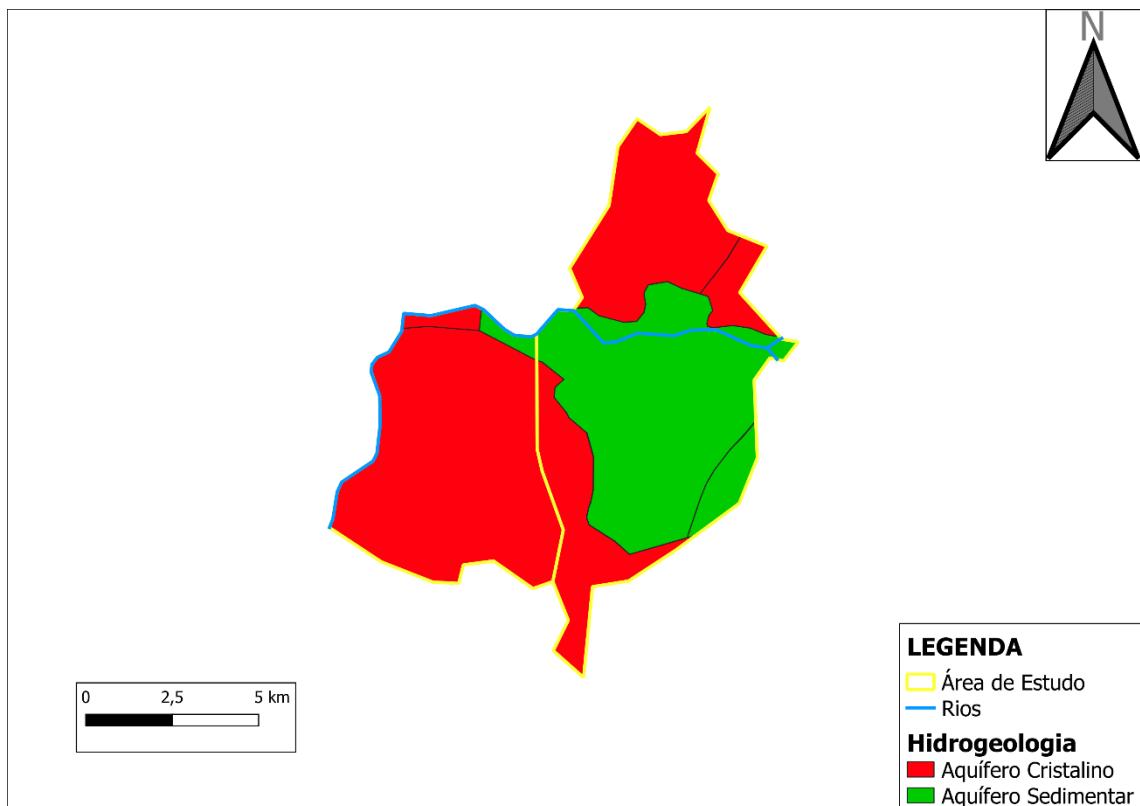


Figura 12: Mapa hidrogeológico da área de estudo.

A partir dos dados dos poços existentes na região dos municípios estudados, disponibilizados pelo DAEE foi possível obter informações sobre o nível d'água. A profundidade dos poços no município de Osasco varia de 60 a 350 metros, enquanto em Carapicuíba varia de 114 a 300 metros. Em Osasco, o nível d'água varia entre 3 e 57 metros, aproximadamente, enquanto em Carapicuíba varia entre 9 e 120 metros, aproximadamente.

### 5.5. Hidrografia, Clima e Uso e Ocupação do Solo

A partir do mapeamento de geodiversidade realizado pela CPRM em 2009, foram obtidos os dados hidrográficos locais assim como os dados de uso e ocupação do solo. Com relação à hidrografia da área de estudo, o Rio Tietê é o único rio localizado entre os dois municípios. O mapa hidrográfico da área está apresentado na Figura 13.

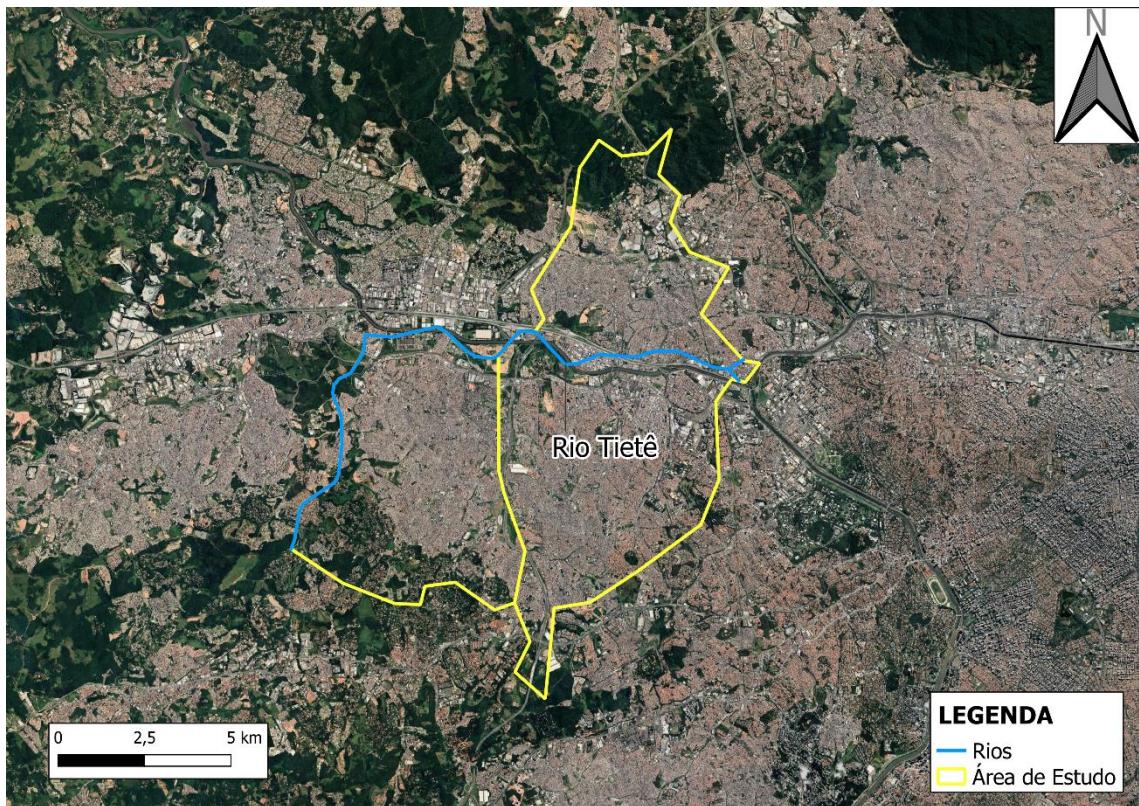


Figura 13: Mapa hidrográfico da área de estudo.

O rio Tietê é um dos rios de maior importância econômica para a região Sudeste do país, principalmente para o estado de São Paulo, uma vez que tem grande capacidade de escoar produções industriais e agrícolas, possibilitando a exportação de riquezas por meio de sua malha fluvial (König De Oliveira, 2014). Historicamente, o rio Tietê era a principal via de acesso dos bandeirantes ao interior de São Paulo (König De Oliveira, 2014), sendo, portanto, de muita importância para a urbanização da região. O crescimento populacional em São Paulo aconteceu de forma descontrolada e desorganizada. O esgoto das indústrias era depositado no canal do rio, causando a poluição e contaminação das águas. Além disso, o desmatamento e substituição da vegetação por superfícies impermeabilizadas (König De Oliveira, 2014), potencializou a ocorrência de enchentes e, consequentemente, poluição.

Em termos de clima e pluviosidade, os municípios de Osasco e Carapicuíba apresentam características muito semelhantes. Para ambos, a temperatura média ao longo do ano é de 19,4°C e a pluviosidade média anual é de 1356 mm. O clima na região pode ser descrito como quente e temperado, sendo fevereiro o mês mais quente do ano, com uma temperatura média de 22,3°C, e julho o mês mais frio, com uma temperatura média de 16,1°C. O mês de agosto é o mais seco, com uma média de 40 mm de precipitação, enquanto janeiro é o mês de maior precipitação, com uma média de 228

mm. A Figura 14 apresenta os gráficos de pluviosidade e temperatura média, para os municípios de Osasco e Carapicuíba.

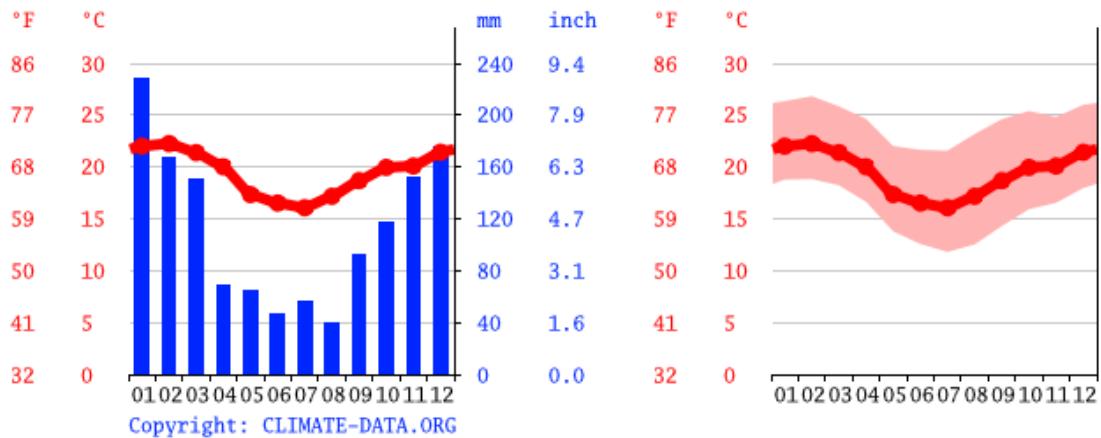


Figura 14: Gráficos de Pluviosidade e Temperatura média, respectivamente, para os municípios de Osasco e Carapicuíba. Fonte: climate-data.org

Segundo ao censo de 2010 realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o município de Osasco possui 89,3% do território com esgotamento sanitário adequado, enquanto o município de Carapicuíba apresenta 87%.

Sobre o uso e ocupação do solo da área de estudo (Figura 15), nota-se que a grande maioria do território corresponde à área edificada, ou seja, área urbanizada. A nordeste da área, está presente o Parque Estadual do Jaraguá, única unidade de conservação da região. Ferrovias e rodovias possuem grande expressividade na ocupação da área de estudo. Além disso, estão presentes um oleoduto, minas de areia e usinas termelétricas de três tipos (Biogás, Gás Natural e Óleo Diesel). Todos estes fatores podem interferir diretamente na vulnerabilidade das águas subterrâneas da região, sendo de grande importância para a análise realizada neste trabalho.

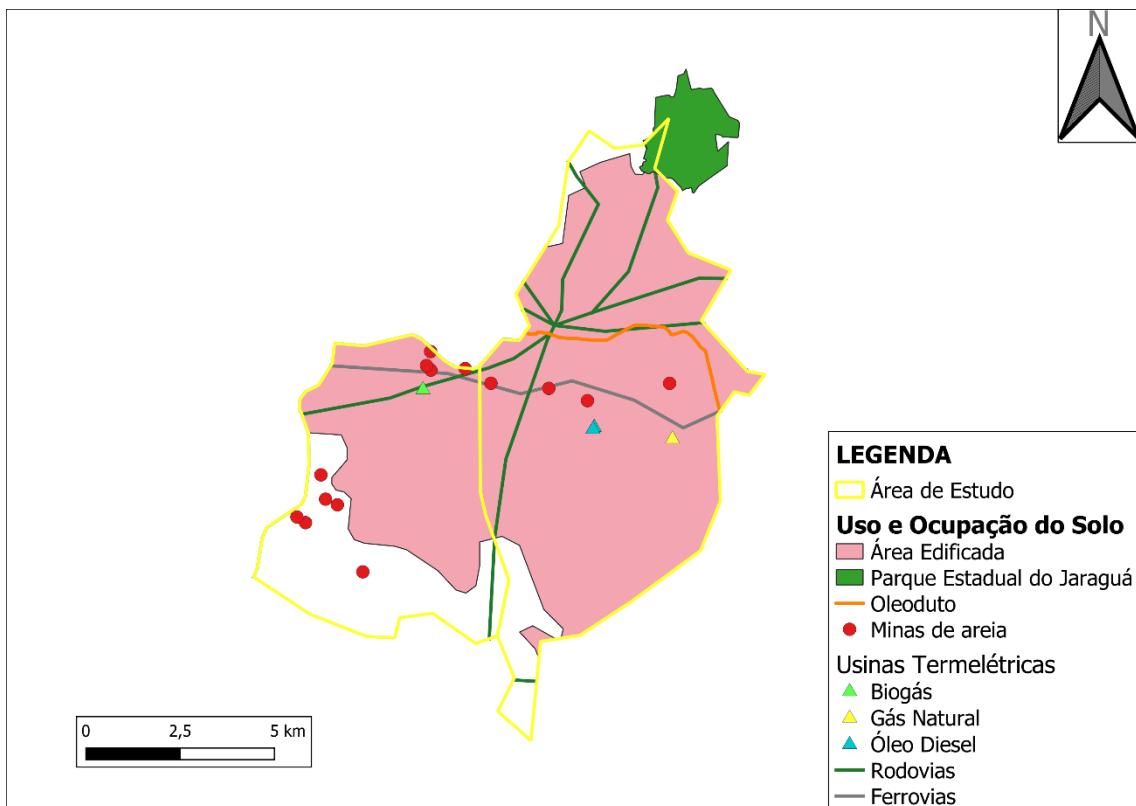


Figura 15: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da área de estudo.

### 5.6. Modelo de Vulnerabilidade da Área de Estudo

Para obtenção dos parâmetros e elaboração do mapa de vulnerabilidade de aquíferos para a região estudada foram utilizados dados de 100 poços instalados na área e disponibilizados pelo DAEE, além de outras fontes de informação. O mapa de pontos utilizados para a análise é apresentado na Figura 16. As informações de cada parâmetro foram sobrepostas com diferentes pesos, conforme estabelece o modelo DRASTIC, para a obtenção de um mapa final.

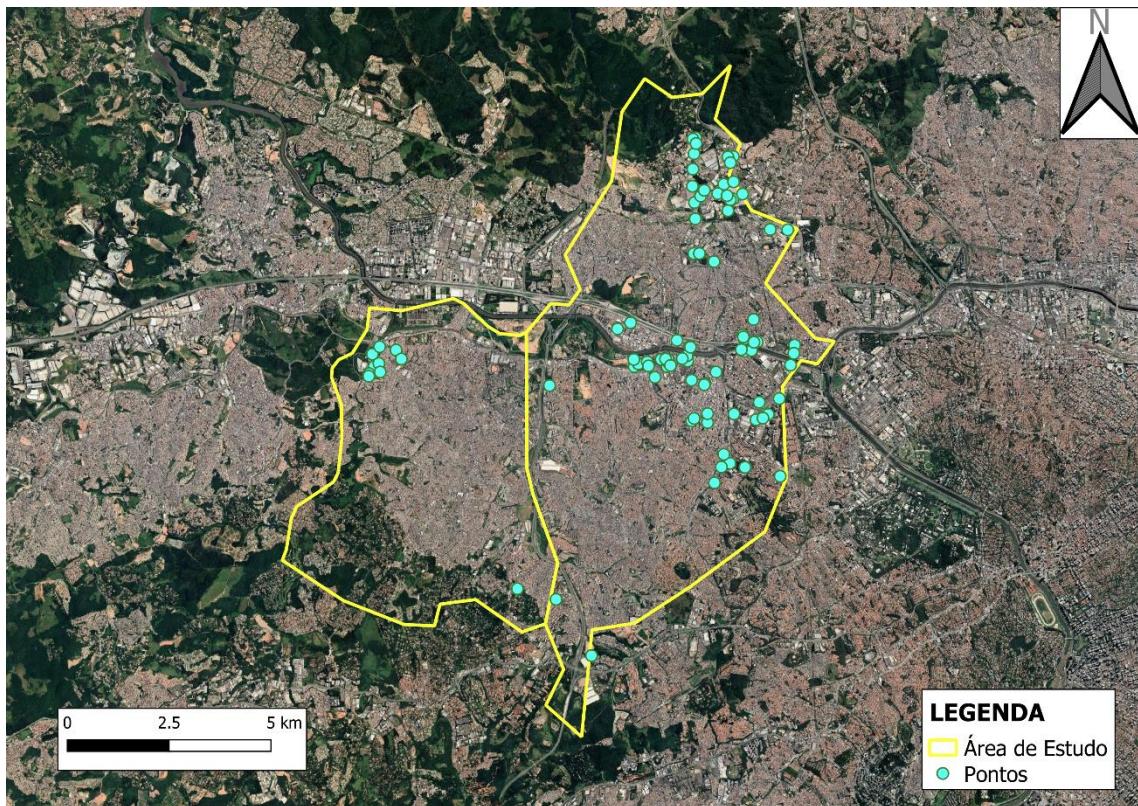


Figura 16: Mapa dos pontos utilizados na análise.

#### 5.6.1. Nível d'água

O nível d'água foi obtido a partir das informações disponibilizadas pelo DAEE sobre os poços já instalados na área de estudo. Um shapefile de pontos foi criado a partir destas informações e depois foi realizada uma interpolação destes pontos para a obtenção de um raster (Figura 17). Após a obtenção do raster, a camada foi reclassificada de acordo com o peso para cada intervalo de valores, conforme estabelece o modelo DRASTIC. O peso estabelecido à camada nível d'água foi 5, peso padrão estabelecido no modelo (Janipella et al., 2020).

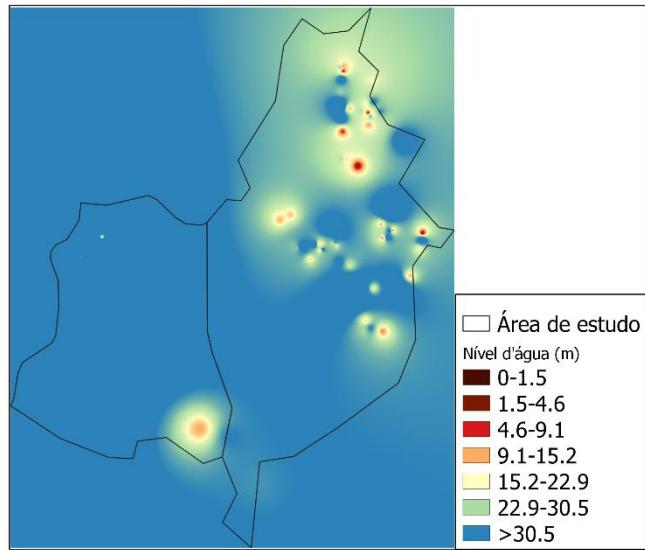


Figura 17: Raster criado para o parâmetro "nível d'água".

#### 5.6.2. Recarga do Aquífero

A partir das informações disponibilizadas pelo DAEE e informações obtidas a partir da pesquisa bibliográfica não foi possível coletar dados suficientes para o cálculo da recarga do aquífero na região de estudo. Segundo Hirata & Ferreira (2001), a média anual de recarga do aquífero na região da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê é de 355 mm/ano em uma situação de não ocupação do solo, entretanto este valor diminui para 60 mm/ano em regiões ocupadas e de solo impermeabilizado. Considerando que a maior parte da região de estudo é constituída por área edificada, o valor de 60 mm/ano foi considerado para estabelecimento do nível de recarga na área de estudo.

Um *shapefile* de pontos foi criado e depois interpolado, da mesma forma que o parâmetro anterior, para obtenção de um raster (Figura 18), que foi reclassificado de acordo com o que estabelece o modelo DRASTIC. O valor padrão para o peso deste parâmetro é 4 (Janipella et al., 2020), entretanto o estabelecido foi 1, devido à homogeneidade da área de estudo.



Figura 18: Raster criado para o parâmetro "recarga do aquífero".

#### 5.6.3. Meio Aquífero

O meio aquífero na região estudada foi dividido de acordo com o mapa hidrogeológico local (Figura 19), sendo que as informações para elaboração deste mapa foram obtidas a partir do mapeamento de geodiversidade da CPRM 2009. Dessa forma, a área foi dividida entre o aquífero cristalino e o aquífero sedimentar. O mesmo processo de interpolação de pontos e criação do raster foi realizado para este parâmetro. O peso padrão estabelecido pelo modelo DRASTIC (3) foi utilizado para este parâmetro (Janipella et al., 2020).

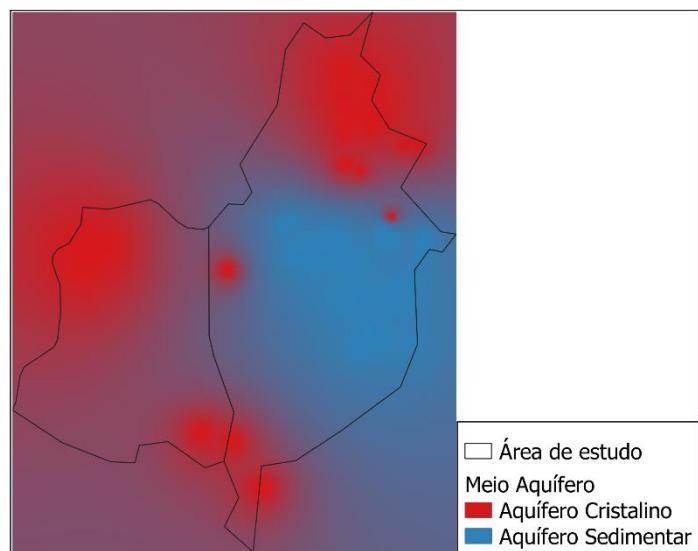


Figura 19: Raster criado para o parâmetro "meio aquífero".

#### 5.6.4. Solo

A partir das informações disponibilizadas pelo DAEE quanto à descrição litológica dos poços já presentes na área foi possível determinar o tipo de solo em cada

ponto de análise. Majoritariamente o solo era composto por material arenoso ou argiloso. Assim como os parâmetros anteriores, um raster foi elaborado a partir da interpolação dos pontos com informações (Figura 20). O peso padrão estabelecido pelo modelo DRASTIC (2) foi utilizado para este parâmetro (Janipella et al., 2020).

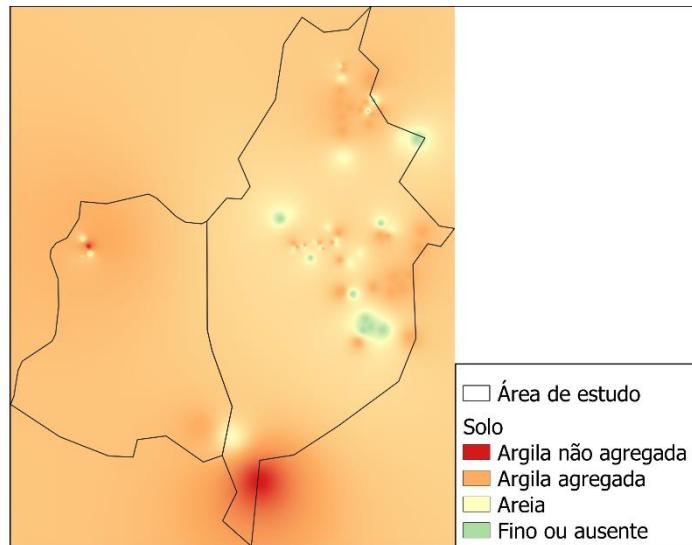


Figura 20: Raster criado para o parâmetro "solo".

#### 5.6.5. Topografia

O parâmetro da topografia foi obtido a partir do download do SRTM do Brasil, no banco de dados do EMBRAPA. Este SRTM foi recortado para apenas a área de estudo e depois, com uma ferramenta do QGIS, foi obtido um mapa de declividade do mesmo (Figura 21). O mapa de declividade foi elaborado em porcentagem (%), como estabelece o modelo DRASTIC. O peso estabelecido para este parâmetro foi 1, peso padrão estabelecido pelo modelo (Janipella et al., 2020).

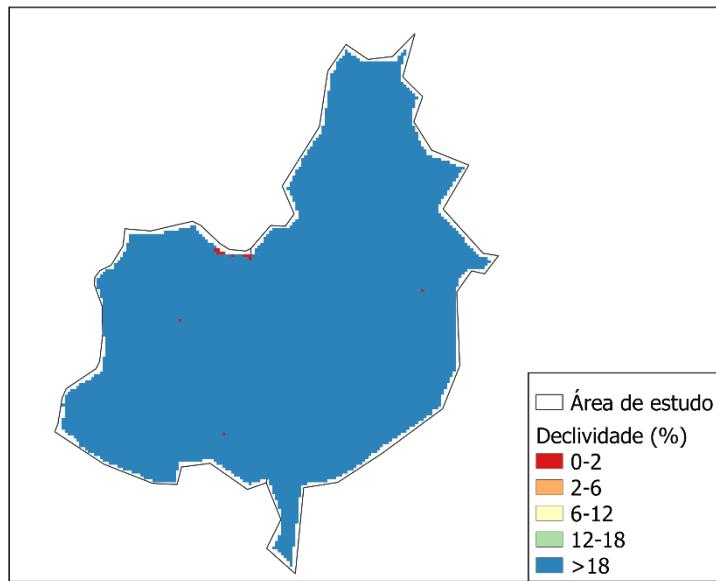


Figura 21: Raster criado para o parâmetro "topografia".

#### 5.6.6. Impacto à zona vadosa

A análise de impacto à zona vadosa foi realizada a partir das informações geológicas locais de cada ponto de análise. Para tal foram utilizadas as descrições litológicas dos poços já existentes na área, bem como o mapa geológico local (Figura 7), elaborado a partir do mapeamento de geodiversidade da CPRM em 2009. O raster elaborado a partir destas informações (Figura 22) foi classificado de acordo com os pesos estabelecidos pelo modelo DRASTIC. O peso padrão estabelecido pelo modelo DRASTIC (5) foi utilizado para este parâmetro (Janipella et al., 2020)

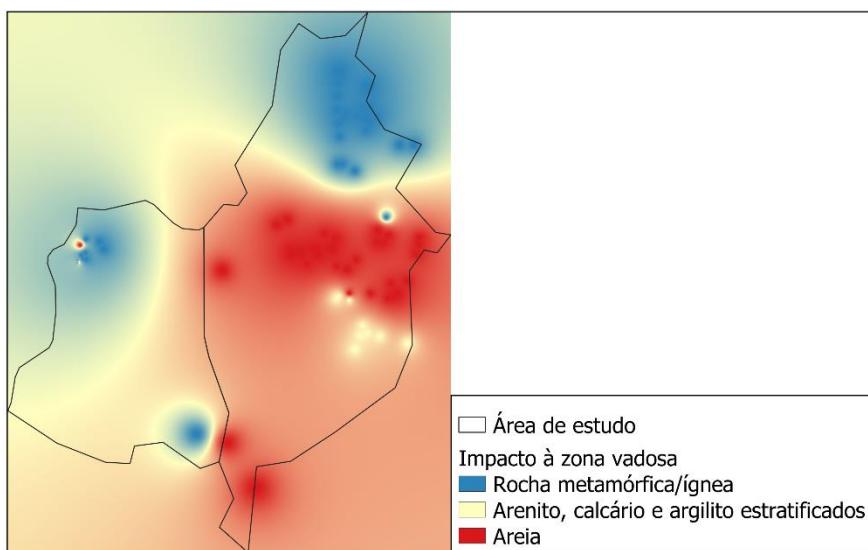


Figura 22: Raster criado para o parâmetro "impacto à zona vadosa".

#### 5.6.7. Condutividade hidráulica

Assim como o parâmetro “recarga do aquífero”, não foram obtidas informações locais suficientes para o cálculo da condutividade hidráulica específica da área de estudo. Dessa forma, escolheu-se utilizar um valor de referência obtido por meio de pesquisa bibliográfica. Pede (2004) realizou uma caracterização da condutividade hidráulica do embasamento cristalino alterado saturado na RMSP e concluiu, a partir do método de Hvorslev que a condutividade hidráulica média em rochas granítóides alteradas é de  $7,5 \times 10^{-4}$  cm/s. Como a grande maioria dos poços instalados na região foram instalados no embasamento cristalino, esse valor foi utilizado como referência para a condutividade hidráulica da área de estudo.

Um raster foi criado a partir da interpolação dos dados de condutividade hidráulica (Figura 23) e o valor utilizado foi classificado de acordo com o que estabelece o modelo DRASTIC (peso 1). O valor padrão para o peso deste parâmetro é 3 (Janipella et al., 2020), entretanto o estabelecido foi 1, devido à homogeneidade da área de estudo.



Figura 23: Raster criado para o parâmetro "condutividade hidráulica".

#### 5.6.8. Mapa de Vulnerabilidade

Para obtenção do mapa de vulnerabilidade da área de estudo, todos os rasters, correspondentes a cada um dos parâmetros, foram sobrepostos e somados de acordo com os pesos estabelecidos. Os valores obtidos, chamados de ÍNDICE DRASTICO (ID), foram divididos igualmente entre três intervalos para classificação dos três níveis de vulnerabilidade. Vale destacar que segundo o modelo, zonas de baixa vulnerabilidade possuem ID entre 26 e 120, zonas de média vulnerabilidade possuem ID entre 121 e 160, zonas de alta vulnerabilidade possuem ID entre 161 e 200 e zonas de altíssima

vulnerabilidade possuem ID entre 200 e 226, fazendo com que a área de estudo possua áreas apenas de baixa e média vulnerabilidade. A divisão entre as três áreas de vulnerabilidade foi realizada apenas para melhor visualização do mapa. O mapa final de vulnerabilidade da área de estudo se encontra na Figura 24.

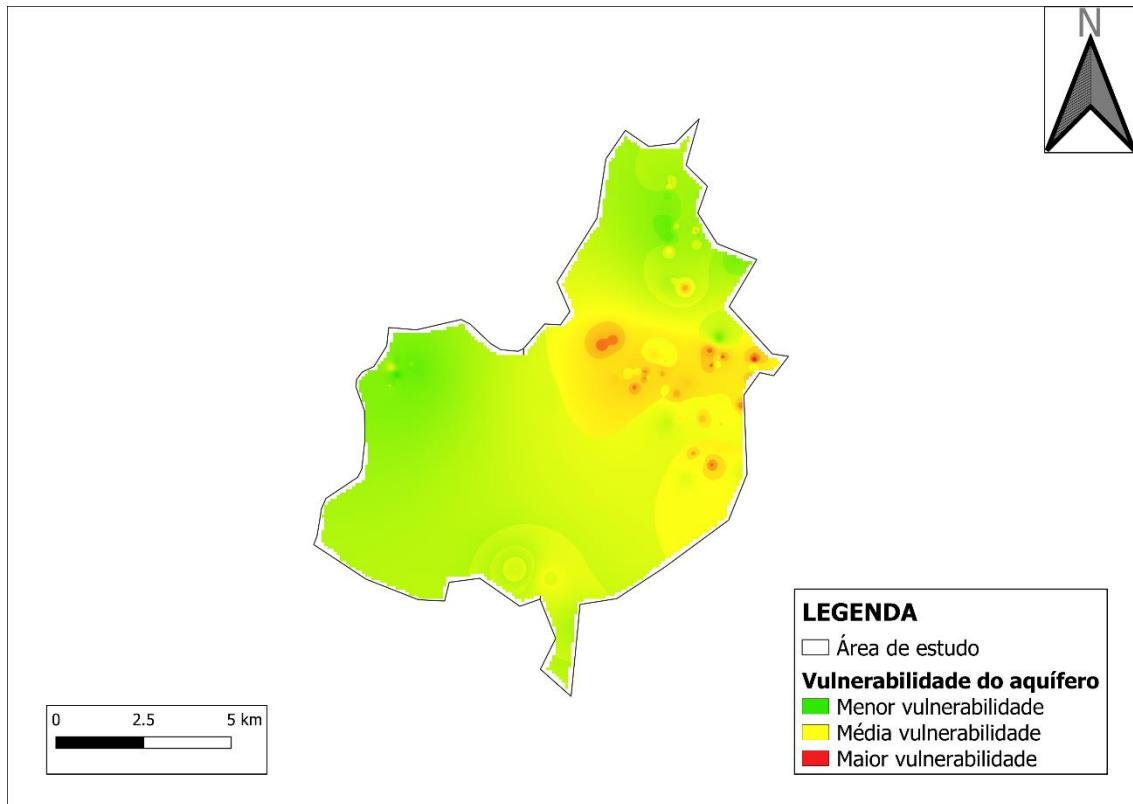


Figura 24: Mapa de vulnerabilidade do aquífero.

## 6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como pode ser observado na Figura 24, a área de estudo possui majoritariamente áreas de baixa vulnerabilidade do aquífero. Comparando o mapa de vulnerabilidade do aquífero ao mapa geológico local (Figura 7), nota-se que as áreas de maior vulnerabilidade estão associadas às regiões de domínio dos Depósitos Aluvionares e Formações Sedimentares da Bacia Sedimentar de São Paulo, sendo que as regiões dominadas pelo Embasamento Cristalino ou Rochas Granitóides possuem menor vulnerabilidade associada.

A expressiva presença de áreas de menor vulnerabilidade na região de estudo também se devem à homogeneidade da topografia do terreno. Além disso, os parâmetros “recarga do aquífero” e “condutividade hidráulica”, tiveram seus pesos padrões, 4 e 3, respectivamente, alterados para 1, devido também à homogeneidade do terreno, não exercendo grande efeito no resultado.

Nota-se que a densidade de poços também teve efeito no grau de vulnerabilidade do aquífero, sendo que regiões com maior densidade de poços resultaram em áreas com maior vulnerabilidade. Uma vez que os pontos de análise utilizados correspondem à poços já instalados na área, cujas informações foram disponibilizadas pelo DAEE, não foi possível obter uma malha de pontos regular. Idealmente, deve ser utilizada para a análise uma malha de pontos regular.

Ao comparar o mapa de vulnerabilidade da área de estudo com o mapa de uso e ocupação do solo (Figura 15), observa-se que na região onde estão localizadas as áreas de maior vulnerabilidade, também estão presentes minas de areia, usinas termelétricas, rodovias, ferrovias e oleodutos. Essas diferentes ocupações da área podem aumentar ainda mais a vulnerabilidade do aquífero, se forem atividades mal operadas, com disposição incorreta de efluentes líquidos e resíduos (Maia & Cruz, 2011).

## 7. CONCLUSÕES

A urbanização acelerada de uma região, aliada à questão de mudança do regime de chuvas na região pode agravar o cenário de disponibilidade hídrica (Leite-filho et al., 2021). Os recursos hídricos subterrâneos passam a ser explorados a partir do momento que os recursos hídricos superficiais não são mais suficientes para abastecer a população, podendo causar uma superexploração de tais, e consequente aumento de vulnerabilidade à contaminação e escassez. Além disso, pode ser estabelecida uma relação de dependência com os recursos hídricos subterrâneos, o que faz com que estes fiquem mais ameaçados em casos de má gestão. No Brasil, mais de 50% do abastecimento público de água é feito a partir da exploração de corpos d'água subterrâneos, enquanto no Estado de São Paulo, aproximadamente 70% dos municípios são totalmente ou parcialmente abastecidos por este recurso (Conicelli, 2014).

As características do meio físico da região também podem afetar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, de modo que também devem ser considerados na hora de planejar a exploração de tais. A partir da análise de vulnerabilidade de aquífero na região de Osasco e Carapicuíba, realizada neste trabalho, é possível concluir que regiões em torno de corpos hídricos superficiais possuem maior vulnerabilidade, devido ao tipo de material que compõem o solo (arenoso e não compactado). Além disso, conclui-se que regiões topograficamente homogêneas e com níveis de recarga do aquífero e condutividade hidráulica homogêneos, possuem menor vulnerabilidade.

Na região estudada percebeu-se a presença de atividades como a mineração de areia em áreas de vulnerabilidade maior do aquífero. Isso evidencia a necessidade de planejamento no desenvolvimento de atividades que podem aumentar a vulnerabilidade à poluição de um aquífero. Adicionalmente, o potencial da análise de vulnerabilidade de aquíferos para gestão dos recursos hídricos é destacado, uma vez que pode ajudar a delimitar áreas onde a fiscalização das atividades deve ser maior, evitando assim, a contaminação do aquífero.

Apesar de ser possível identificar o grande potencial da ferramenta no auxílio da gestão dos recursos hídricos, é necessário destacar que ela possui algumas limitações e erros associados. A suposição de parâmetros como a recarga do aquífero e a condutividade hidráulica, no caso deste estudo, traz para a área uma homogeneidade que resulta em áreas de menor vulnerabilidade. Além disso, a disposição dos pontos de análise em uma malha não regular também afeta o resultado, sendo que locais com maior densidade de pontos resultam em áreas de maior vulnerabilidade.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Campos, J.E., Ferreira, L.M.R., Luiz, J., Filho, A., and Kakazu, M.C., 2002, Síntese do Conhecimento Hidrogeológico da Bacia Sedimentar de São Paulo: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 1–14.
- Carlos Ker, J. Latossolos do Brasil: uma revisão: GEONOMOS, v. 5, p. 17–40.
- Conicelli, B.P., 2014, Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP). Tese de Doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 163 p.
- Cunha, D.F. da, & Borges, E.D.M., 2015, Urbanização Acelerada: Risco Para O Abastecimento De Água Na Região Metropolitana De Goiânia: Geo UERJ, v. 0, p. 226–244, doi:10.12957/geouerj.2015.13816.
- Ferreira, M.M., Fernandes, B., and Curi, N., 1999, Mineralogia da Fração Argila e Estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil: R. Bras. Ci. Solo, v. 23, p. 507–514.
- Guiguer, N., and Kohnke, M.W., 2002, Métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p. 13.
- Gurgueira, M.D., 2013, Correlação de Dados Geológicos e Geotécnicos na Bacia de São Paulo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 80 p.
- Hirata, R.C.A., & Ferreira, L.M.R., 2001, Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição: Revista Brasileira de Geociências, v. 31, p. 43–50.
- Janipella, R., Quamar, R., Sanam, R., Jangam, C., Pandurang, Balwant, Jyothi, V., Padmakar, C., and Pujari, P.R., 2020, Evaluation of Groundwater Vulnerability to

- Pollution using GIS Based DRASTIC Method in Koradi, India — A Case Study: Journal of the Geological Society of India, v. 96, p. 292–297, doi:10.1007/s12594-020-1549-2.
- König De Oliveira, A.B., 2014, O Rio Tietê: o Processo Histórico e sua Importância para São Paulo: I Simpósio Mineiro de Geografia, p. 271–285.
- Kumar, P., Thakur, P.K., and Debnath, S.K., 2020, Groundwater Vulnerability Assessment and Mapping using DRASTIC Model: v. 148, 121 p.
- Leite-filho, A.T., Soares-filho, B.S., Abrahão, G.M., Börner, J., and Davis, J.L., 2021, Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon: Nature Communications, p. 1–7, doi:10.1038/s41467-021-22840-7.
- Maia, P.H.P., and Cruz, M.J.M., 2011, Um novo método para Avaliar a Vulnerabilidade de Aquíferos: Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology, v. 15, p. 29–40.
- Migliorini, R.B., 1994, Cemitérios como Fonte de Poluição em Aquíferos. Estudo do cemitério Vila Formosa na Bacia Sedimentar de São Paulo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 77 p.
- Pede, M.A.Z., 2004, Caracterização da Condutividade Hidráulica do Embasamento Cristalino Alterado Saturado na Região Metropolitana de São Paulo:
- Procel, S., 2011, Contaminação por Nitrato e sua Relação com o Crescimento Urbano no Sistema Aquífero Bauru em Presidente Prudente (SP). Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 132 p.
- Riccomini, C., Sant'Anna, L., and Ferrari, A.L., 2004, Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil, in p. 383–405.
- Rodriguez, S.K., 1998, Geologia Urbana da Região Metropolitana de São Paulo: , p. 171 p.
- Safa, G., Najiba, C., el Houda, B.N., Monji, H., Soumaya, A., and Kamel, Z., 2020, Assessment of urban groundwater vulnerability in arid areas: Case of Sidi Bouzid aquifer (central Tunisia): Journal of African Earth Sciences, v. 168, p. 1–17, doi:10.1016/j.jafrearsci.2020.103849.
- Sant'Anna, L., 1999, Geologia, Mineralogia e Gênese das Esmectitas dos Depósitos Paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, 366 p, mapas.
- Sarkar, M., & Pal, S.C., 2021, Application of DRASTIC and Modified DRASTIC Models for Modeling Groundwater Vulnerability of Malda District in West Bengal: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, v. 49, p. 1201–1219, doi:10.1007/s12524-020-01176-7.

<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/osasco-747/>> Acesso em: 07 de set. de 2021.

<<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/sao-paulo/carapicuiba-4215/>> Acesso em: 07 de set. de 2021.

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/osasco/panorama>> Acesso em: 07 de set. de 2021.

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/carapicuiba/panorama>> Acesso em: 07 de set. de 2021.

<[https://www.google.com/search?q=regi%C3%A3o+metropolitana+de+s%C3%A3o+pa%C3%ADlo+mapa&rlz=1C1FCXM\\_pt-](https://www.google.com/search?q=regi%C3%A3o+metropolitana+de+s%C3%A3o+pa%C3%ADlo+mapa&rlz=1C1FCXM_pt-)

[PTBR974BR975&sxsrf=AOaemvlafBOomE8ShjncDLcPBoD46\\_aRSw:1636910195315&source=lnms&tbo=isch&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwjW1OHVrZj0AhUcrJUCHVgoBpkQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgrc=0rSwqFpNFOAtmM">Acesso em 17 de nov de 2021.](https://www.google.com/search?q=regi%C3%A3o+metropolitana+de+s%C3%A3o+pa%C3%ADlo+mapa&rlz=1C1FCXM_pt-)

<<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/sp/sf-23-y-c.htm>> Acesso em 12 de nov de 2021.

<<https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/sp/osasco#:~:text=100%25%20da%20popula%C3%A7%C3%A3o%20total%20de,p%C3%ADa%C3%ADs%2C%2083%2C71%25>> Acesso em 17 de nov de 2021.

<<https://www.aguaesaneamento.org.br/municipios-e-saneamento/sp/carapicuiba>> Acesso em 17 de nov de 2021.