

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LAVÍNIA AGUIAR PEREIRA

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no
município de São Carlos – Escala 1:50.000.

São Carlos
2025

LAVÍNIA AGUIAR PEREIRA

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação
no município de São Carlos – Escala 1:50.000.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette.

VERSÃO FINAL

São Carlos
2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Pereira, Lavínia Aguiar
P436h Hierarquização das áreas de recarga das águas
subterrâneas e fontes de contaminação no município de
São Carlos - Escala 1:50.000. / Lavínia Aguiar Pereira;
orientador Lázaro Valentin Zuquette. São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2025.

1. Hidrogeologia. 2. Vulnerabilidade Ambiental. 3.
Geoprocessamento. 4. Análise Multicritério. 5. Gestão
de Recursos Hídricos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Lavínia Aguiar Pereira**

Data da Defesa: 06/11/2025

Comissão Julgadora:

Lázaro Valentim Zuquette (Orientador(a))

Dra Jacqueline Zanin Lima

Dra. Claudia Marisse dos Santos Rotta

Resultado:

Aprovado
Aprovado
Aprovada


Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Lázaro Valentin Zuquette, pela orientação atenciosa, pelas valiosas contribuições e, principalmente, pela confiança e paciência ao longo de toda esta jornada. Sua dedicação, disponibilidade e entusiasmo pela pesquisa foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço também à minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos — especialmente nas etapas mais desafiadoras, em que me ensinaram a persistir com coragem e serenidade.

Aos meus amigos, que estiveram presentes compartilhando aprendizados, risadas e companheirismo, meu sincero agradecimento por tornarem o caminho mais leve e inspirador.

A realização deste trabalho contou com o apoio do **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)**, cujo suporte foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

*“Líderes são mestres em encontrar o sentido e
aprendizado em todo tipo de experiência de vida.”*

(Jucá, 2014, p. 94)

RESUMO

PEREIRA, A. L. Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no município de São Carlos – Escala 1:50.000. 2025. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

A identificação e a hierarquização das áreas de recarga e das potenciais fontes de contaminação são fundamentais para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos. Este trabalho teve como objetivo hierarquizar as áreas de recarga das águas subterrâneas e avaliar as fontes difusas e pontuais de contaminação no município de São Carlos (SP), com base na integração de atributos físico-naturais e antrópicos em ambiente SIG (QGIS). Foram utilizadas cartas temáticas representando fatores condicionantes da infiltração, como conteúdo inicial de água, uso e ocupação do solo, litologia, relevo, precipitação e evapotranspiração. A integração e ponderação dos atributos foi realizada por meio do método de Análise Multicritério, empregando a combinação linear ponderada, resultando em mapas de magnitude de infiltração, recarga nas zonas saturadas e potencial de recarga total. Posteriormente, foram mapeadas as fontes de contaminação difusas e pontuais, considerando parâmetros como uso agrícola, áreas urbanas, disposição de resíduos e continuidade temporal das atividades. Os resultados indicaram que as classes de potencial de recarga **alta** e **muito alta** abrangem aproximadamente **58% da área total**, destacando setores centrais e norte do município como zonas prioritárias para conservação e recarga. As classes de potencial de contaminação **alta** e **muito alta** se concentraram nas áreas urbanizadas e agrícolas intensivas, refletindo maior pressão antrópica e risco de degradação da qualidade das águas subterrâneas. A integração dos mapas permitiu identificar regiões com **alto potencial de recarga e elevada vulnerabilidade à contaminação**, evidenciando a necessidade de manejo diferenciado e ações preventivas. Conclui-se que o método aplicado se mostrou eficiente para a análise espacial integrada da recarga e da contaminação, fornecendo subsídios técnicos relevantes para o planejamento ambiental e a gestão de aquíferos no município de São Carlos.

Palavras-chave: hidrogeologia; vulnerabilidade ambiental; geoprocessamento; análise multicritério; gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

PEREIRA, L. A. **Hierarchization of groundwater recharge areas and contamination sources in the municipality of São Carlos – Scale 1:50.000.** 2025. Monograph (Undergraduate Final Project) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

The identification and hierarchization of groundwater recharge areas and potential contamination sources are essential for sustainable water resources management and environmental planning. This study aimed to hierarchize groundwater recharge areas and evaluate diffuse and point contamination sources in the municipality of São Carlos (São Paulo State, Brazil) through the integration of physical, geological, and anthropogenic attributes using a Geographic Information System (GIS). The analysis considered thematic maps representing factors influencing infiltration, such as initial water content, land use and cover, lithology, relief, precipitation, and evapotranspiration. Attribute weighting and integration were performed using the Multicriteria Analysis method through Weighted Linear Combination, resulting in maps of infiltration magnitude, recharge in saturated zones, and total recharge potential. Subsequently, diffuse and point contamination sources were mapped considering parameters such as agricultural land use, urban areas, waste disposal practices, and temporal continuity of activities. The results showed that the **high** and **very high** recharge potential classes covered approximately **58% of the total area**, highlighting central and northern sectors as priority zones for groundwater conservation and recharge. Conversely, **high** and **very high** contamination potential areas were concentrated in urban and intensive agricultural zones, indicating stronger anthropogenic pressures and higher risks to groundwater quality. The integration of recharge and contamination maps allowed the identification of regions with **high recharge potential and high contamination susceptibility**, emphasizing the need for differentiated management and preventive actions. Overall, the adopted method proved effective for integrated spatial analysis of recharge and contamination, providing valuable technical support for groundwater management and sustainable territorial planning in São Carlos.

Keywords: hydrogeology; environmental vulnerability; geoprocessing; multicriteria analysis; water resources management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	Ciclo Hidrológico	18
2.2	Balanço Hídrico.....	19
2.3	Interações entre precipitação, infiltração e escoamento superficial	20
2.4	Fases constituintes dos materiais geológicos	21
2.5	INTERAÇÕES ENTRE A ÁGUA E O MEIO POROSO	22
2.5.1	Tensão superficial.....	22
2.5.2	Capilaridade.....	22
2.5.3	Adsorção.....	23
2.5.4	Potenciais da água no material poroso	24
2.5.5	Retenção de água.....	25
2.6	Condutividade hidráulica	25
2.6.1	Métodos para determinação da condutividade hidráulica saturada em campo	26
2.6.2	Métodos para determinação da condutividade hidráulica não saturada em campo ...	27
2.7	Infiltração	29
2.7.1	Aspectos gerais.....	29
2.7.2	Classificação dos Modelos de Infiltração.....	31
2.8	Recarga.....	33
2.8.1	Estimativas de recarga.....	34
2.9	Fontes de Poluição.....	39
2.9.1	Classificação quanto ao tipo de fonte.....	39
2.9.2	Classificação quanto ao tipo de resíduos.....	40
2.9.3	Mecanismos de transporte de poluentes	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	Materiais	43
3.2	Métodos	43
3.2.1	Definição da área e da escala de estudo	44
3.2.2	Levantamento bibliográfico e modelo conceitual	45
3.2.3	Definição de classes e atribuição de pesos	55
3.2.4	Obtenção dos atributos e dados	55
3.2.5	Integração e processamento no QGIS	57
3.2.6	Hierarquização das áreas de recarga	59

3.2.7	Mapa de potencial de uso	59
3.2.8	Mapeamento das fontes potenciais de contaminação.....	59
3.2.9	Tratamento e classificação das unidades.....	61
3.2.10	Hierarquização das unidades quanto ao potencial de recarga e de contaminação.	61
4	Resultados	62
4.1	Básicos.....	62
4.1.1	Características gerais da área de estudo	62
4.1.2	Descrição e Características Geológico-Geotécnicas da Áreas	69
4.1.3	Contextualização do meio antrópico: uso do solo e áreas contaminadas.....	77
4.2	DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS Finais	85
4.2.1	Grupo de climáticos.....	85
4.2.2	Grupo de Materiais Inconsolidados.....	90
4.2.3	Grupo do Substrato Rochoso.....	108
4.2.4	Grupo Geomorfológico	120
4.2.5	Grupo das Águas Subterrâneas e Superficiais.....	122
4.2.6	Grupo de Fontes Pontuais de Contaminação.....	128
4.2.7	Grupo de Fontes Difusas de Contaminação	146
4.2.8	Cartas integradas e mapas síntese	156
4.3	Integração dos Resultados	184
4.4	Limitações do estudo.....	186
5	CONCLUSÕES.....	187
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	189

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Hidrológico	18
Figura 2 - Forças nas moléculas de um líquido.	22
Figura 3 - Permeâmetro de Guelph.	28
Figura 4 - Perfil típico de umidade do solo.	30
Figura 5 - Fluxograma geral do estudo.....	44
Figura 6 - Modelo conceitual adotado no estudo.	46
Figura 7 - Localização da área de estudo.	63
Figura 8 - Mapa pedológico.....	65
Figura 9 - Mapa topográfico.....	70
Figura 10. Carta de declividade.....	71
Figura 11. Mapa de substrato rochoso.....	73
Figura 12 - Mapa de material inconsolidado.	75
Figura 13 - Uso e Ocupação no município de São Carlos (SP).....	79
Figura 14 - Áreas contaminadas e reabilitadas no município de São Carlos segundo o banco de dados da CETESB (2019).....	81
Figura 15 - Carta do volume total anual de chuva (mm/ano).	87
Figura 16 - Carta do volume total anual de evapotranspiração (mm/ano).	89
Figura 17 - Distribuição em área (% da unidade).....	91
Figura 18 - Carta de macroporosidade (% de volume total).....	93
Figura 19 - Carta da taxa de infiltração (mm/h).	95
Figura 20 - Condutividade hidráulica do material inconsolidado (cm/s).	97
Figura 21 - Capacidade de Campo (%)	99
Figura 22 - Espessura do material inconsolidado (m).	101
Figura 23 - Distribuição em profundidade (Sequência de Materiais)..	103
Figura 24 - Porosidade do material inconsolidado (%).	105
Figura 25 - Textura do material inconsolidado.	107
Figura 26 - Litologia do substrato rochoso.....	109
Figura 27 - Continuidade do substrato rochoso (distribuição em área, % da unidade).....	111
Figura 28 - Condutividade hidráulica do substrato rochoso (cm/s).....	113
Figura 29 - Porosidade do substrato rochoso (%)	115
Figura 30 - Descontinuidades do substrato rochoso (famílias, frequência, abertura e continuidade)	117

Figura 31 - Características das paredes das descontinuidades (grau de alteração e preenchimento) do substrato rochoso	119
Figura 32 - Declividade	121
Figura 33 - Profundidade do topo da zona saturada	123
Figura 34 - Número de poços de bombeamento por unidade	125
Figura 35 - Número de fontes por unidade	127
Figura 36 - volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (m ³)	130
Figura 37 - Tempo de exposição (anos)	133
Figura 38 - Técnicas de disposição.....	136
Figura 39 - Tipos de Resíduos	139
Figura 40 - Material geológico de base	142
Figura 41 - Conteúdo inicial de água (%).....	145
Figura 42 - Áreas urbanas.....	147
Figura 43 - Tipos de Uso e Ocupação do Solo	149
Figura 44 - Diversidade de Produtos	151
Figura 45 - Condição de Disposição.....	153
Figura 46 - Continuidade Temporal.	155
Figura 47 - Carta da magnitude de infiltração	159
Figura 48 - Carta de recarga zona saturada acima do substrato rochoso.....	162
Figura 49 - Carta de recarga zona saturada abaixo do substrato rochoso.....	165
Figura 50 - Mapa de zoneamento da recarga das águas subterrâneas.	168
Figura 51. Carta de uso potencial.	171
Figura 52 - Potencial de Contaminação por Fontes Difusas sem Recarga	174
Figura 53 - Potencial de Contaminação por Fontes Difusas com Recarga	177
Figura 54 - Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais sem Recarga	180
Figura 55 - Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais com Recarga	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos métodos para a estimativa de recarga	36
Tabela 2 - Resumo dos principais Mecanismos de transporte de poluentes.	42
Tabela 3 - Atributos, classes e graduação da importância para a recarga.	47
Tabela 4 - Modo de obtenção dos atributos.....	56
Tabela 5 - Propriedades dos postos pluviométricos dos bancos de dados.....	64
Tabela 6 - Áreas contaminadas e reabilitadas no município de São Carlos segundo o banco de dados da CETESB (2019).....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Padrões de Chuvas Mensais (2010-2020) dos postos 2147031, D5-076 e 2247109.

..... 79.

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam um recurso estratégico para a humanidade, pois constituem a maior parte da água doce em estado líquido do planeta. Estima-se que aproximadamente 97 a 99% desse volume esteja armazenado em aquíferos (HIRATA *et al.*, 2019; UNESCO, 2022). Armazenadas nos poros das rochas e sedimentos, essas reservas — denominadas aquíferos — desempenham papel fundamental no abastecimento público e agrícola, na manutenção da umidade do solo e na sustentação do fluxo de base dos rios, garantindo a perenidade hídrica mesmo em períodos de estiagem (HIRATA *et al.*, 2019).

Apesar de sua relevância, as águas subterrâneas são frequentemente tratadas como um recurso “invisível”, o que compromete a sua gestão (HIRATA *et al.*, 2019). A ausência de monitoramento adequado e o desconhecimento da sociedade quanto à sua importância favorecem riscos de exploração descontrolada e contaminação. Embora os aquíferos apresentem menor vulnerabilidade que as águas superficiais, uma vez contaminados, sua recuperação pode demandar décadas ou até mesmo se tornar inviável economicamente (FEITOSA *et al.*, 2008). Em áreas urbanizadas e industrializadas, como o município de São Carlos (SP), a pressão sobre esses recursos é ainda maior, seja pelo aumento da demanda hídrica, seja pela potencialidade de fontes de poluição difusa e pontual (FAGUNDES, 2011).

Nesse contexto, a compreensão do processo de recarga dos aquíferos — definida como a parcela da água que infiltra no solo até atingir a zona saturada — é essencial para subsidiar políticas públicas de uso e ocupação do solo, conservação ambiental e planejamento do abastecimento hídrico (FAGUNDES, 2011). Entretanto, a recarga de água subterrânea é um dos componentes mais difíceis de determinar no ciclo hidrológico. Suas estimativas apresentam elevado grau de incerteza devido, principalmente, às limitações na aplicação de metodologias que permitam a medição direta da recarga, bem como à influência do uso e ocupação do solo e às intervenções antrópicas que afetam sua taxa (HEALY, 2010; WENDLAND; GOMES; TROEGER, 2015). Além disso, influem também fatores como a complexidade do meio não saturado e a limitação de dados disponíveis (FAGUNDES, 2011).

Considerando esses desafios, o presente trabalho tem como objetivo geral hierarquizar as áreas de recarga de águas subterrâneas no município de São Carlos, em escala 1:50.000, levando em conta as características geológicas e geotécnicas dos materiais presentes. Como objetivos específicos, busca-se:

- Levantar e sistematizar dados geológicos, hidrológicos e ambientais da área de estudo;
- Aplicar o método dos pesos diretos para atribuição de importância relativa aos atributos considerados;
- Elaborar cartas temáticas representando os fatores condicionantes da recarga e as fontes potenciais de contaminação (pontuais e difusas);
- Realizar o cruzamento espacial e a análise multicritério dos atributos em ambiente SIG (QGIS), resultando em cartas de potencial de recarga, de uso potencial e de contaminação com e sem influência da recarga.

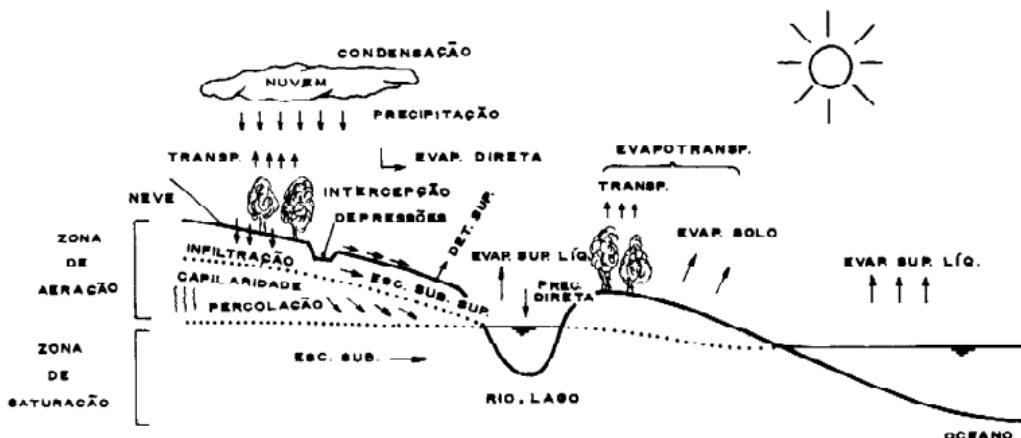
A pesquisa fundamenta-se em estudos prévios desenvolvidos no Departamento de Geotecnica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e utiliza ferramentas de geoprocessamento (QGIS) para integração e análise dos dados. Espera-se, com isso, contribuir para o entendimento da dinâmica de recarga de aquíferos em São Carlos e fornecer subsídios técnicos para o planejamento do uso do solo, conservação ambiental e gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Além disso, reforçar a importância do uso de ferramentas de geoprocessamento e análise multicritério como instrumentos de apoio à tomada de decisão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

A hidrosfera terrestre é constituída por água em seus diferentes estados físicos, o que pressupõe a contínua transferência entre as fases sólida, líquida e gasosa. Essa dinâmica integra o fenômeno denominado ciclo hidrológico, responsável pela troca permanente de água entre a superfície terrestre e a atmosfera. A radiação solar, a gravidade e a rotação da Terra são os principais fatores que impulsionam esse processo, o qual envolve mecanismos como precipitação, evaporação, transpiração vegetal, infiltração, percolação, escoamento superficial e subsuperficial, conforme ilustrado na Figura 1 (SILVEIRA, A.1997; FEITOSA *et al.*, 2008).

Figura 1 - Ciclo Hidrológico



Fonte: Silveira, A. (1997).

O ciclo hidrológico pode ser descrito a partir da evaporação da água dos oceanos, onde a água evapora e é transportada por massas de ar, condensando-se posteriormente em nuvens que podem gerar precipitação. Ao alcançar a superfície terrestre, parte da precipitação é interceptada pela vegetação ou pelas superfícies do solo, retornando à atmosfera por evaporação ou evapotranspiração. A evapotranspiração compreende a soma da evaporação proveniente do solo e dos corpos d'água com a transpiração das plantas (SILVEIRA, A.1997).

A parcela da precipitação que não retorna à atmosfera pode seguir dois caminhos distintos: a **infiltração**, em que a água penetra no solo por ação combinada da gravidade e da capilaridade, ou o **escoamento superficial**, correspondente ao volume que não infiltra nem evapora e é direcionado para cursos d'água. No caso da infiltração, a água pode ser

posteriormente evapotranspirada ou percolar para camadas mais profundas do solo, atingindo a zona saturada e configurando a recarga dos aquíferos. Parte da água infiltrada que não alcança a zona saturada pode ainda movimentar-se lateralmente, caracterizando o **escoamento subsuperficial**, o qual contribui para a alimentação dos corpos hídricos superficiais (FAGUNDES, 2011; SILVEIRA, A.1997).

2.2 BALANÇO HÍDRICO

Com base no princípio da conservação de massa, o balanço hídrico consiste na análise quantitativa das entradas e saídas de água em um determinado sistema hidrológico. Essa abordagem permite compreender o funcionamento do ciclo hidrológico em diferentes escalas espaciais e temporais, seja por meio da quantificação direta dos fluxos ou por modelagens mais complexas dos processos envolvidos (DE VILLA *et al.*, 2022).

O balanço hídrico constitui uma ferramenta essencial para avaliar o comportamento das bacias hidrográficas, identificar os efeitos das mudanças climáticas e do uso e ocupação do solo, bem como estimar a relação entre oferta e demanda hídrica (TUCCI; CLARKE, 1997). Sua formulação geral pode ser representada pela seguinte equação:

$$\Delta S = P - [ES + ET] \quad (1)$$

Onde:

P = Precipitação;

ES = Escoamento superficial;

ET = Evapotranspiração;

ΔS = Variação do armazenamento de água na bacia.

Alguns parâmetros podem ser determinados de maneira relativamente simples, como a precipitação. No entanto, outros, como escoamento superficial e evapotranspiração, apresentam maior complexidade e demandam técnicas específicas de estimativa, como o uso de lisímetros ou a aplicação de métodos climatológicos (BALBINOT *et al.*, 2008).

A depender dos objetivos da análise e da disponibilidade de dados, a equação do balanço hídrico pode ser desmembrada em componentes adicionais, possibilitando maior detalhamento. Além disso, sua aplicação pode ocorrer em diferentes unidades de cálculo, como volume de água por tempo ou lâmina de água por área.

As estimativas de balanço hídrico podem ser realizadas em intervalos de tempo reduzidos (minutos, horas ou dias) com alta resolução espacial (escala local), ou em intervalos

mais longos (meses, anos ou décadas) em escalas regionais ou globais, de acordo com o nível de detalhamento requerido (DE VILLA *et al.*, 2022).

2.3 INTERAÇÕES ENTRE PRECIPITAÇÃO, INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial corresponde ao movimento da água sobre a superfície do terreno, resultante do excedente de precipitação que não consegue infiltrar no solo. Esse processo ocorre, principalmente, após eventos de chuvas intensas, sendo responsável pelo transporte de água até os cursos d'água e pelo aumento da vazão fluvial (FONSECA DE CARVALHO; DUARTE, 2006).

A precipitação constitui o ponto de partida desse processo e apresenta fatores condicionantes, como **intensidade, duração e ocorrência de chuvas antecedentes**. Chuvas de alta intensidade tendem a superar rapidamente a capacidade de infiltração do solo, favorecendo o escoamento superficial. De forma análoga, precipitações de longa duração mantêm o solo saturado por mais tempo, ampliando o volume escoado. A umidade prévia do solo, resultante de chuvas anteriores, também influencia, uma vez que solos já úmidos possuem menor capacidade de absorção (TUCCI; CLARKE, 1997).

A infiltração, por sua vez, é condicionada pelas propriedades físicas do solo, em especial a **permeabilidade**. Solos mais permeáveis apresentam maior potencial de absorção, reduzindo a ocorrência de escoamento superficial e favorecendo a recarga subterrânea (BALBINOT *et al.*, 2008). O processo ocorre na camada **não saturada**, onde a água percola em direção à zona saturada, responsável pelo armazenamento e circulação subterrânea.

Entre os modelos de escoamento, destaca-se o chamado **escoamento Hortoniano**, caracterizado pela formação de escoamento superficial quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo. Em outras condições, o escoamento pode ocorrer de forma predominantemente **subsuperficial**, em que a água infiltra e se desloca lateralmente até atingir cursos d'água, ressurgindo por meio de fontes e contribuindo para a vazão fluvial (FONSECA DE CARVALHO; DUARTE, 2006).

O escoamento nos rios pode se organizar em diferentes padrões de leito. O **leito menor** é aquele ocupado pela maior parte do escoamento anual, enquanto o **leito maior** é preenchido em situações de cheias e enchentes. Em canais não rochosos, os leitos podem ser remodelados ao longo do tempo, de acordo com a frequência e a intensidade das vazões, bem como com

características físicas como declividade, rugosidade e presença de obstáculos ao fluxo (SILVEIRA, 1997).

2.4 FASES CONSTITUINTES DOS MATERIAIS GEOLÓGICOS

Os materiais geológicos podem ser definidos como meios porosos formados por um arranjo de partículas sólidas, espaços preenchidos por fluidos (água e ar) e interfaces entre essas fases. Em termos gerais, distinguem-se três constituintes principais: **sólidos, água e ar**, cuja proporção e distribuição determinam as propriedades físicas e hidráulicas do solo e da rocha (FEITOSA *et al.*, 2008; DAS, 2011).

A caracterização das fases e de suas relações volumétricas é fundamental para a compreensão do comportamento hidrogeológico de um meio poroso, especialmente no que se refere à infiltração e à recarga subterrânea. Alguns parâmetros são comumente utilizados para essa avaliação, conforme apresentado por Fagundes (2010):

Índice de vazios (e): expressa a relação entre o volume de vazios (água + ar) (Vv) e o volume de sólidos (Vs), representado por:

$$e = Vs/Vv \quad (2)$$

Porosidade (n): corresponde à relação entre o volume de vazios (Vv) e o volume total do solo ou rocha (Vt). Pode ser relacionada ao índice de vazios pela expressão:

$$n = \frac{Vt}{Vv} = \frac{e}{1 + e} \quad (3)$$

Grau de saturação (S): indica a proporção do volume de vazios (Vv) efetivamente preenchida pelo volume de água (Vw), variando de 0 (solo seco) a 1 (solo totalmente saturado):

$$S = Vv/Vw \quad (4)$$

Umidade gravimétrica (w): relação entre o peso da água (Pw) e o peso dos sólidos (Ps), expressa por:

$$w = Ps/Pw \quad (5)$$

Umidade volumétrica (θ): representa a razão entre o volume de água (Vw) e o volume total (Vt), podendo ser calculada por:

$$\theta = Vt/Vw = n \cdot S \quad (6)$$

Essas propriedades, amplamente discutidas na literatura de mecânica dos solos e hidrogeologia, constituem a base para o entendimento dos processos de fluxo de água em meios porosos. Sua determinação é essencial em estudos que envolvem **permeabilidade**,

condutividade hidráulica, recarga de aquíferos e vulnerabilidade à contaminação (CRAIG, 2004; FEITOSA *et al.*, 2008).

2.5 INTERAÇÕES ENTRE A ÁGUA E O MEIO POROSO

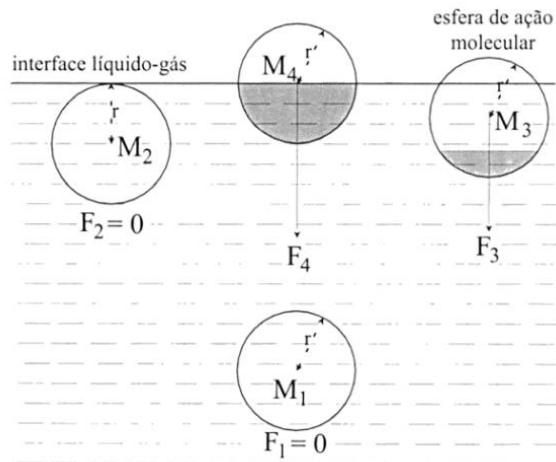
2.5.1 Tensão superficial

A compreensão do processo de retenção de água no solo exige o entendimento do fenômeno da **tensão superficial**. Esse fenômeno pode ser descrito como a tendência espontânea de contração da superfície de um líquido, decorrente das interações de **coesão** entre moléculas de água e de **adesão** entre a água e o ar. Essas forças antagônicas geram uma interface água-ar, na qual se estabelece um estado de tensão (LIBARDI ,2005).

Devido à diferença de energia existente nessa interface, o sistema tende a realizar trabalho para deslocar moléculas da região de maior energia para a de menor energia, buscando maior estabilidade. Assim, a tensão superficial pode ser definida como o trabalho realizado por unidade de área necessário para distender a superfície de um líquido (LIBARDI ,2005).

Do ponto de vista molecular, admite-se a existência de uma distância crítica, denominada **raio da esfera de ação molecular**, a partir da qual a atração entre moléculas torna-se nula. Em outras palavras, trata-se da distância limite em que cada molécula exerce forças de atração sobre as demais (LIBARDI ,2005). Esse conceito, bem como a representação das forças moleculares atuantes, pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Forças nas moléculas de um líquido.



Fonte: Libardi, L. (2005).

2.5.2 Capilaridade

O fenômeno da **capilaridade** corresponde à ascensão ou descida da água em tubos de pequeno diâmetro, denominados capilares, até que se estabeleça uma condição de equilíbrio. Esse comportamento resulta da combinação entre a **tensão superficial** da água e a tendência dos líquidos de aderirem às paredes sólidas do capilar (LIBARDI, 2005; CRAIG, 2004).

Ao ascender pela superfície do tubo, a água tende a curvar sua interface, formando um **menisco**. Nesse ponto, a pressão imediatamente abaixo do menisco é inferior à pressão atmosférica, o que provoca a ascensão capilar até uma altura h_c , suficiente para equilibrar as forças atuantes. Por convenção, a curvatura do menisco é considerada negativa quando o raio de curvatura se encontra fora da fase líquida. Além da ascensão, pode ocorrer a **depressão capilar**, quando o raio do menisco está voltado para o interior da fase líquida, como observado no caso do mercúrio em contato com vidro (LIBARDI, 2005; CRAIG, 2004).

A altura de ascensão capilar pode ser estimada pela **equação de Laplace**, apresentada por Fagundes, 2010:

$$h_c = \frac{2T_S \cos\alpha}{\rho g r} \quad (7)$$

Onde:

T_S : tensão superficial

ρ : massa específica do líquido

g : aceleração da gravidade

r : raio do tubo capilar

α : ângulo de contato sólido-líquido

De maneira análoga, no solo a água ocupa poros que se comportam como um emaranhado de capilares de diferentes formas, tamanhos e arranjos. Nesse contexto, o **ângulo de contato** e a intensidade da ascensão capilar dependem diretamente das propriedades do material e da adsorção entre as moléculas de água e as partículas sólidas (LIBARDI, 2005; FAGUNDES, 2010).

2.5.3 Adsorção

A adsorção é um fenômeno físico-químico caracterizado pela aderência de moléculas ou íons presentes em uma fase (líquida ou gasosa) à superfície de um material sólido. O componente retido é denominado **adsorvato**, enquanto o material que o retém corresponde ao **adsorvente** (LIBARDI, 2005).

Esse processo ocorre em função de gradientes de concentração entre o fluido e a superfície sólida, sendo a eficiência da adsorção diretamente proporcional à área superficial disponível. Assim, materiais com elevada área específica apresentam maior capacidade de retenção (LIBARDI, 2005).

No contexto do solo, a adsorção de moléculas de água às partículas minerais e orgânicas, associada às forças capilares que atuam nos poros, resulta na formação do chamado **potencial mátrico**. Esse potencial é responsável por parte significativa da retenção de água no solo, influenciando a sua disponibilidade para as plantas e os processos de recarga subterrânea (FEITOSA et al., 2008; HILLEL, 1998).

2.5.4 Potenciais da água no material poroso

O movimento da água em meios porosos é controlado por diferenças de energia, expressas sob a forma de potenciais. Esses potenciais determinam a direção e a intensidade do fluxo, sendo fundamentais para compreender tanto a dinâmica da retenção hídrica no solo quanto os processos de recarga subterrânea (FEITOSA et al., 2008; HILLEL, 1998).

O potencial total da água no solo resulta da soma de quatro componentes principais (FEITOSA et al., 2008; HILLEL, 1998) :

- **Potencial de pressão (ou pneumático):** refere-se à pressão exercida pela água em um ponto localizado abaixo da superfície freática ou piezométrica, sendo relevante em condições de saturação.
- **Potencial gravitacional:** corresponde à energia potencial associada à posição vertical da molécula de água em relação a um referencial, representando a tendência de movimentação em direção a cotas mais baixas.
- **Potencial osmótico:** relaciona-se às diferenças de concentração de sais dissolvidos na solução do solo. Essas diferenças promovem o movimento da água em busca do equilíbrio osmótico, gerando uma succção adicional.
- **Potencial mátrico:** resulta das forças de adsorção e capilaridade exercidas pela matriz sólida do solo sobre a água, manifestando-se, em geral, como uma pressão negativa em solos não saturados.

De forma simplificada, o potencial total da água (Ψ_t) pode ser expresso pela seguinte relação:

$$\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m \quad (8)$$

Onde:

Ψ_p = potencial de pressão;

Ψ_g = potencial gravitacional;

Ψ_o = potencial osmótico;

Ψ_m = potencial mátrico.

Essa representação constitui a base para análises de movimento de água em meios porosos, sendo amplamente utilizada em estudos de irrigação, recarga de aquíferos e modelagem hidrogeológica (FEITOSA et al., 2008; HILLEL, 1998).

2.5.5 Retenção de água

O solo, por ser um material natural, sólido e poroso, apresenta uma matriz formada por partículas minerais e matéria orgânica, entre as quais se distribuem espaços vazios denominados **poros**. Esses poros constituem um sistema interconectado capaz de armazenar tanto soluções aquosas — contendo sais como Na^+ , H^+ e Ca^{2+} , denominadas **solução do solo** — quanto gases como N_2 , O_2 , vapor d'água e CO_2 , que compõem o **ar do solo**. (FAGUNDES, 2010; HILLEL, 1998; FEITOSA et al., 2008).

Quanto ao preenchimento desses poros, distinguem-se duas condições (FAGUNDES, 2010):

- **Solo saturado**, quando todo o espaço poroso está ocupado por água;
- **Solo insaturado**, quando parte da água é drenada e substituída por ar, formando uma interface ar-água.

A retenção da água no solo pode ser explicada por dois processos principais (FAGUNDES, 2010):

- **Capilaridade**, responsável pela retenção da água nos microporos do solo;
- **Adsorção**, que mantém uma película de moléculas de água aderida às superfícies sólidas.

Devido à irregularidade na forma e na distribuição dos poros, a descrição do estado da água no solo torna-se complexa. Entretanto, sabe-se que a combinação entre as forças capilares e as forças de adsorção origina as chamadas **forças mátricas**, que atuam na matriz do solo e resultam no **potencial mátrico**. Esse potencial é determinante para a disponibilidade de água às plantas, para os processos de infiltração e para a dinâmica de recarga de aquíferos (LIBARDI, 2005; FEITOSA et al., 2008; HILLEL, 1998).

2.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A **condutividade hidráulica** do solo é definida como a medida de sua capacidade de transmitir água através de seus poros. Já a **capacidade de armazenamento** de água está representada pela curva característica do solo, que descreve a relação entre a umidade e o potencial mátrico. Ambos os parâmetros são fundamentais para compreender o movimento da água em meios porosos (FEITOSA et al., 2008).

A primeira formulação matemática do fluxo em meios porosos foi apresentada por **Henry Darcy (1856)**, com base em experimentos em colunas de areia saturada. A denominada **Lei de Darcy** estabelece que a vazão de água que atravessa uma seção do meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade a condutividade hidráulica (FEITOSA et al., 2008; CRAIG, 2004):

$$K = k \frac{\rho}{\mu} g \quad (9)$$

Onde:

k : permeabilidade intrínseca (m^2);

ρ : massa específica do fluido (kg/m^3);

μ : viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$);

g : aceleração da gravidade (m/s^2);

A **permeabilidade intrínseca** está relacionada ao arranjo geométrico das partículas, ao tamanho e à conectividade dos poros, sendo uma propriedade exclusiva do meio. Já a condutividade hidráulica varia em função das propriedades do fluido, como massa específica e viscosidade, que são influenciadas por temperatura, pressão e concentração de sais dissolvidos (CARVALHO, 2002; LISBOA, 2006).

A diferença entre escoamento em meio saturado e insaturado é particularmente relevante. Em condições **saturadas**, todos os poros estão preenchidos por água, resultando em condutividade máxima. Em contrapartida, no **meio insaturado**, a drenagem reduz progressivamente a quantidade de água disponível, ocupando os poros com ar, o que causa uma queda significativa da condutividade. Assim, a quantificação da condutividade hidráulica em solos insaturados é mais complexa, pois depende da permeabilidade intrínseca, da distribuição do tamanho de poros, da tortuosidade e das propriedades físico-químicas do fluido (CARVALHO, 2002; LISBOA, 2006).

2.6.1 Métodos para determinação da condutividade hidráulica saturada em campo

Diversos ensaios de campo podem ser utilizados para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica dos solos. Esses métodos baseiam-se no monitoramento da variação

do nível d'água ao longo do tempo, permitindo a estimativa da velocidade de fluxo em meios porosos, expressa em unidades de comprimento por tempo (FAGUNDES, 2010).

De forma geral, os ensaios podem ser realizados por meio de **furos de sondagem em poços ou cavas**, utilizando-se piezômetros e infiltrômetros. Entre os mais empregados, destacam-se os **ensaios em furos de sondagem**, os **testes com piezômetros** e o **infiltrômetro de anel** (FEITOSA et al., 2008; FAGUNDES, 2010).

Ensaios em poços e furos de sondagem: amplamente utilizados na Geologia de Engenharia, podem ser conduzidos sob condições de **carga constante ou variável**, permitindo avaliar tanto a infiltração quanto o bombeamento de água (FAGUNDES, 2010).

Método de Hvorslev: realizado com piezômetros, consiste na adição ou remoção de água no equipamento e no registro da variação do nível piezométrico em função do tempo. O ensaio prossegue até que o equilíbrio seja alcançado, possibilitando a estimativa da condutividade hidráulica saturada (FEITOSA et al., 2008; FAGUNDES, 2010).

Infiltrômetro de anel duplo: constitui um dos métodos mais tradicionais para ensaios em campo. Utilizam-se dois cilindros metálicos concêntricos, de 30 e 50 cm de diâmetro, 30 cm de altura e 3 mm de espessura, cravados no solo por percussão. Mantêm-se lâminas de água de aproximadamente 7,5 cm no anel interno e 5 cm entre os anéis interno e externo. A partir do monitoramento da infiltração ao longo do tempo, obtém-se a **curva de infiltração**, que permite calcular a condutividade hidráulica (FEITOSA et al., 2008; FAGUNDES, 2010).

Câmara de fluxo: semelhante ao infiltrômetro, mas com apenas um cilindro metálico de aço inox, de 80 cm de diâmetro, 1 mm de espessura e 80 cm de altura. O cilindro é cravado no solo por meio de pressão hidráulica, com auxílio de contrapesos e mesa de cravação. Esse método também possibilita a obtenção da condutividade hidráulica por meio da medição da vazão infiltrada (FEITOSA et al., 2008; FAGUNDES, 2010).

Cada método apresenta vantagens e limitações relacionadas às condições do solo, ao grau de saturação e à escala de análise. A escolha do procedimento mais adequado depende dos objetivos do estudo, da profundidade investigada e da disponibilidade de equipamentos (CARVALHO, 2002; LISBOA, 2006; FEITOSA et al., 2008).

2.6.2 Métodos para determinação da condutividade hidráulica não saturada em campo

A condutividade hidráulica em condições não saturadas pode ser determinada por diferentes técnicas de campo, entre as quais se destacam o **Permeômetro de Guelph**, o **perfil instantâneo** e o **método de Libardi**. De modo geral, esses métodos envolvem a aplicação de

água em áreas pré-definidas e o monitoramento da resposta do solo quanto ao armazenamento e à condução do fluxo.

2.6.2.1 Permeâmetro de Guelph

O **permeâmetro de Guelph** consiste em um tubo de acrílico graduado, cravado em um furo no solo, no qual a água é introduzida sob carga constante. O sistema conta ainda com um tripé que permite ajustes em terrenos irregulares e um reservatório de água para o controle da vazão de saída durante o ensaio, conforme ilustra a Figura 3 (FAGUNDES, 2010).

Figura 3 - Permeâmetro de Guelph.



Fonte: Fagundes, J. (2010).

Esse método possibilita estimar tanto a **condutividade hidráulica saturada** quanto o **potencial mátrico de fluxo**, que, por meio da função empírica proposta por Gardner (1958), permite o cálculo da condutividade hidráulica não saturada.

$$K(\psi) = K_{sat} e^{\alpha \cdot (\psi - \psi_e)} \quad (10)$$

Onde:

$K(\psi)$ = condutividade hidráulica não saturada;

K_{sat} = condutividade hidráulica saturada;

α = parâmetro empírico dependente da textura do material;

ψ = potencial matricial (sucção);

ψ_e = pressão de entrada de ar – obtida a partir da curva de retenção.

Entre as principais **vantagens** do método estão o baixo consumo de água e a relativa simplicidade de execução. Contudo, o ensaio é limitado por representar apenas pequenas áreas, o que pode não contemplar a variabilidade espacial do solo.

2.6.2.2 Perfil instantâneo

O método do **perfil instantâneo**, inicialmente proposto por Watson (1966), baseia-se na infiltração de água no solo até a saturação, seguida pela interrupção do aporte e pelo monitoramento periódico da umidade ao longo do tempo e da profundidade. Para tal, podem ser empregados instrumentos como sondas de nêutrons, TDR (Time Domain Reflectometer) ou tensiômetros.

Os dados coletados permitem calcular a condutividade hidráulica a partir da equação de Richards, considerando tanto a variação do armazenamento de água no solo quanto o gradiente de potencial total. Apesar de fornecer resultados mais precisos e representativos, esse método apresenta como **desvantagens** o elevado consumo de água, a necessidade de equipe durante todas as etapas e o longo tempo de execução (PALMA, 2004; FAGUNDES, 2010).

Posteriormente, Hillel et al. (1972) aperfeiçoaram o método, tornando-o mais realista e aplicável em condições de campo, ao enfatizar a relação entre conteúdo de água e potenciais matriciais ao longo do perfil.

2.6.2.3 Método de Libardi

Como alternativa às limitações dos métodos anteriores, Libardi et al. (1980) propuseram uma abordagem simplificada baseada na solução da equação de Richards com funções que descrevem o conteúdo de água no perfil do solo.

Nesse método, após a saturação do perfil até uma determinada profundidade, a infiltração é interrompida e são registradas variações de umidade em diferentes profundidades e tempos. A partir desses dados, calcula-se a condutividade hidráulica não saturada para cada camada investigada, reduzindo a complexidade do ensaio e evitando interferências de evaporação (LIBARDI et al., 1980).

2.7 INFILTRAÇÃO

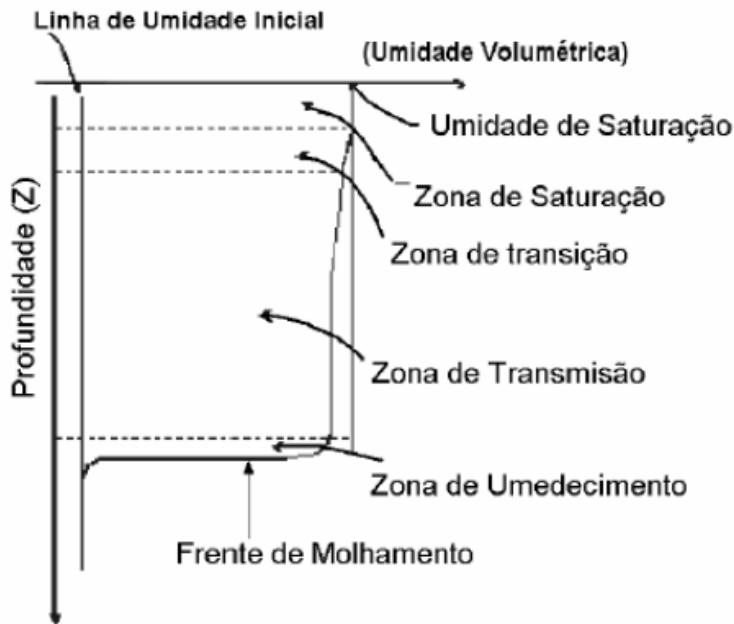
2.7.1 Aspectos gerais

A infiltração pode ser definida como o processo de penetração da água através da superfície do solo, movimento que depende de diversos fatores, tais como intensidade, duração e frequência da precipitação, condições de umidade e temperatura, velocidade do vento, cobertura vegetal, relevo, uso e ocupação do solo, além das propriedades físicas e da espessura do perfil do solo (MEMON, 1995)

O parâmetro mais utilizado para mensurar esse processo é a **capacidade de infiltração**, ou seja, a quantidade máxima de água que o solo consegue absorver em determinado intervalo de tempo. Esse parâmetro pode ser expresso em termos de taxa ou velocidade de infiltração e é fortemente condicionado pelas características das camadas superficiais e subsuperficiais do solo (FAGUNDES, 2010).

Segundo EPA (1998) perfil de umidade no solo durante a infiltração pode ser subdividido em diferentes zonas, conforme ilustra a Figura 4:

Figura 4 - Perfil típico de umidade do solo.



Fonte: Fagundes (2010).

Zona de saturação: camada superficial de cerca de 1,5 cm, onde o teor de umidade é equivalente ao teor de saturação;

Zona de transição: camada média de 5 cm, na qual a umidade decresce rapidamente com a profundidade;

Zona de transmissão: região intermediária, caracterizada por pequenas variações espaciais e temporais de umidade;

Zona de umedecimento: camada mais profunda, onde predominam as forças gravitacionais responsáveis pelo movimento descendente da água;

Frente de umedecimento: limite móvel que indica a progressão da água no perfil do solo, evidenciado por forte gradiente hidráulico.

A relação entre infiltração e escoamento superficial é direta: quando a intensidade da chuva é inferior à capacidade de infiltração, toda a água precipitada tende a infiltrar. Por outro lado, quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração, o excedente resulta em escoamento superficial ou acúmulo na superfície (HORTON, 1940; HILLEL, 1998).

Devido à sua complexidade, a infiltração tem sido objeto de inúmeros estudos, resultando em diferentes **modelos matemáticos e conceituais** que buscam representar o processo em função do tempo, das condições climáticas e das características do solo. Tais modelos são fundamentais para aplicações em **hidrologia, engenharia agrícola, geotecnia e gestão de recursos hídricos**, especialmente em estudos de recarga de aquíferos e controle de enchentes (FAGUNDES, 2010).

2.7.2 Classificação dos Modelos de Infiltração

Os modelos de infiltração podem ser classificados em duas grandes categorias: **teóricos** e **empíricos**. Os primeiros são fundamentados em leis físicas do fluxo em meios porosos, enquanto os segundos resultam de ajustes matemáticos a dados experimentais de campo. Essa distinção não é apenas conceitual, mas também prática, visto que cada grupo possui aplicações específicas de acordo com o objetivo do estudo, as condições de contorno adotadas e a natureza do sistema superficial analisado.

2.7.2.1 Modelos de Base Teórica

Os modelos teóricos derivam de princípios físicos, principalmente da **equação de Darcy** e da **equação de Richards**, que descrevem o movimento da água em meios porosos. Entre os mais aplicados destacam-se os modelos de **Green-Ampt, Philip e Richards** (FAGUNDES, 2010).

2.7.2.1.1 Equação de Green-Ampt

Este modelo é considerado pioneiro no estudo da infiltração, sendo amplamente utilizado devido à facilidade de obtenção de parâmetros e à versatilidade em diferentes cenários. Parte das seguintes premissas: (i) fluxo governado pela Lei de Darcy; (ii) succção constante na frente de molhamento; (iii) altura de lâmina d'água constante na superfície (FAGUNDES, 2010).

Apesar dessas simplificações, o modelo não considera solos heterogêneos, assumindo o movimento da água como o avanço de um pistão, o que implica em uma transição brusca entre zonas de umidade. Essa limitação pode ser vantajosa em materiais com alta condutividade hidráulica, onde a frente de molhamento é bem definida (FAGUNDES, 2010).

2.7.2.1.2 Equação de Philip

A equação simplificada por Philip (1957) descreve o fluxo unidimensional de infiltração acumulada no tempo ($I(t)$), sendo expressa como:

$$I(t) = St^{1/2} + At \quad (11)$$

Onde:

t = tempo de infiltração

S = sorptividade

A = taxa de infiltração constante

Esse modelo é vantajoso pois permite ajustes experimentais para representar diferentes condições de solo (PHILIP, 1957).

2.7.2.1.3 Equação de Richards

A equação de Richards resulta da combinação das equações de Darcy e da continuidade, sendo considerada a formulação mais completa para descrever fluxos em meios porosos. Trata-se de uma equação diferencial não linear, de difícil solução analítica, o que justifica o uso de técnicas numéricas (diferenças finitas, elementos finitos) em softwares de simulação hidrológica. É amplamente aplicada em estudos que demandam maior detalhamento do movimento da água no perfil do solo (FAGUNDES, 2010).

2.7.2.2 Modelos de Base Empírica

Os modelos empíricos têm como fundamento o ajuste de funções matemáticas a dados de infiltração obtidos em campo, geralmente a partir de infiltrômetros. Embora muitos parâmetros não possuam significado físico direto, esses modelos apresentam a vantagem de já incorporar, nas suas constantes, efeitos de difícil mensuração, como a estrutura e compactação do solo. Entretanto, apresentam limitações, como a dificuldade de extração para outras condições de contorno e a ausência de descrição da redistribuição da água no perfil do solo (FAGUNDES, 2010).

Os principais modelos empíricos incluem:

Kostiakov (1932): Descreve a taxa de infiltração como decrescente no tempo, porém sem tender a um valor constante (não atinge a condutividade hidráulica saturada). Essa deficiência motivou aperfeiçoamentos posteriores na equação.

Horton (1940): Apresenta a taxa de infiltração tendendo a um valor constante, inferior à condutividade hidráulica saturada, devido à presença de ar ocluso e à saturação incompleta em campo. O modelo considera ainda fenômenos como compactação natural e variações de expansão e contração do solo.

Holtan (1961): Explicitamente dependente da umidade do solo, relaciona a infiltração com a caracterização do solo e da vegetação. Sua limitação está na necessidade de estimar a profundidade da zona de controle para definir o volume de água armazenada.

2.8 RECARGA

De acordo com Lerner et al. (1990), a recarga pode ser definida como “*o fluxo de água que atravessa a zona não saturada do solo, alcança o nível freático e se incorpora ao reservatório subterrâneo*”. Em outras palavras, corresponde a toda a fração da água infiltrada que percola pelo material geológico até atingir efetivamente um aquífero. A recarga constitui, portanto, o principal parâmetro a ser determinado em estudos de disponibilidade hídrica subterrânea.

A **precipitação** é o fator de maior influência sobre a recarga, mas a quantidade efetivamente infiltrada depende de uma série de variáveis: propriedades dos materiais inconsolidados e do substrato rochoso, relevo, cobertura vegetal e uso do solo. Essas interações tornam o processo um dos mais complexos de quantificar dentro do ciclo hidrológico (FAGUNDES, 2010).

O **material geológico superficial** desempenha papel fundamental, pois condiciona o destino da água da chuva: infiltração ou escoamento superficial. Já a **topografia** interfere

diretamente na distribuição espacial: em regiões úmidas, a recarga tende a ocorrer em áreas de maior altitude, enquanto a descarga ocorre em áreas baixas. Em regiões áridas, o padrão é inverso, sendo a recarga mais frequente em leitos de rios efêmeros e canais (FAGUNDES, 2010).

A **vegetação** também exerce influência decisiva por meio da **evapotranspiração**. Parte da água infiltrada retorna à atmosfera em função da demanda hídrica das espécies. Estudos na Austrália, por exemplo, demonstraram que a substituição de eucaliptos (raízes profundas) por espécies de menor porte quase dobrou os volumes de recarga, evidenciando a relevância da cobertura vegetal no balanço hídrico (FAGUNDES, 2010).

Segundo Lerner et al. (1990), a recarga pode ser classificada em diferentes formas:

Direta: proveniente da precipitação ou irrigação, distribuída de modo relativamente uniforme em grandes áreas.

Indireta: resultante da infiltração a partir de rios, lagos ou reservatórios.

Localizada: associada ao acúmulo e concentração de água em depressões ou fluxos horizontais superficiais.

Rushton (1997) acrescenta a distinção entre **recarga real**, que corresponde à água que efetivamente atinge a zona saturada, e **recarga potencial**, que representa a parcela infiltrada, mas que pode ser parcialmente perdida por evaporação ou interfluxo na zona não saturada, sobretudo em áreas com lençol freático raso.

Segundo Balek (1987), do ponto de vista temporal, a recarga pode ser:

De curta duração: ocorre logo após eventos intensos de chuva em climas irregulares.

Sazonal: apresenta periodicidade conforme as estações, típica de climas temperados ou regiões com período úmido definido.

Perene: caracteriza-se por fluxo descendente contínuo, comum em regiões tropicais úmidas.

Histórica: responsável pela formação de aquíferos e cursos subterrâneos em períodos geológicos passados.

Dada a complexidade do processo, a **estimativa da recarga** deve considerar a escala de trabalho e as heterogeneidades naturais. Uma abordagem recomendada é a delimitação da área de estudo em blocos homogêneos, definidos por atributos de geologia, geomorfologia, solos, clima, chuva e vegetação, de forma a integrar e mapear os fatores determinantes da recarga (LERNER et al., 1990)

2.8.1 Estimativas de recarga

A gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos depende diretamente da compreensão do processo de recarga, uma vez que este controla tanto a renovação das reservas aquíferas quanto a diluição e o transporte de poluentes. Dessa forma, a estimativa da recarga constitui um aspecto essencial para prevenir a exploração insustentável de aquíferos e mitigar riscos de contaminação, estabelecendo um elo entre águas subterrâneas e superficiais (FAGUNDES, 2010).

Tradicionalmente, muitos estudos em hidrogeologia adotam valores fixos de recarga, sem considerar as variabilidades climáticas, geológicas, geomorfológicas e de uso do solo que influenciam o processo. Esse tipo de simplificação, embora prática, pode levar a avaliações imprecisas. Assim, torna-se necessário utilizar métodos que incorporem a dinâmica espacial e temporal da recarga, compatíveis com a escala de análise e com os objetivos do estudo (FAGUNDES, 2010).

A escolha do método deve considerar as escalas espaciais (local, regional ou global) e temporais (eventos, sazonal, anual ou de longo prazo), além do nível de precisão requerido. A aplicação de técnicas locais em estudos regionais, por exemplo, pode gerar inconsistências, seja por limitações de representatividade, seja pelo aumento dos custos e pela necessidade de corpo técnico especializado (FAGUNDES, 2010).

Segundo Lerner et al. (1990) métodos de estimativa de recarga podem ser agrupados em quatro grandes categorias:

- Balanço hídrico – fundamenta-se na contabilização das entradas (precipitação) e saídas (evapotranspiração, escoamento) em uma determinada área;
- Métodos de base física – incluem medidas diretas, como lisímetros, e aproximações baseadas na Lei de Darcy, aplicáveis à zona saturada ou não saturada;
- Técnicas com traçadores – utilizam elementos naturais ou artificiais (isótopos estáveis, cloretos, entre outros) para identificar fluxos e tempos de trânsito da água;
- Modelagens numéricas – baseiam-se na resolução de equações diferenciais (ex. Richards, Darcy) por meio de métodos numéricos, permitindo simulações em diferentes cenários.

Cada método possui potencialidades e limitações, que devem ser avaliadas em função do objetivo da pesquisa, da disponibilidade de dados e da escala de aplicação. Em muitos casos,

a utilização de métodos combinados é recomendada, de modo a aumentar a confiabilidade das estimativas e reduzir as incertezas (FAGUNDES, 2010).

Na Tabela 1, estão resumidos os principais métodos de estimativa de recarga, suas vantagens e limitações, evidenciando que não há um método universalmente aplicável a todas as condições, mas sim técnicas que devem ser escolhidas conforme o objetivo do estudo, a escala de análise e a disponibilidade de dados.

Tabela 1 - Resumo dos métodos para a estimativa de recarga.

Balanço hídrico		
Método	Vantagem	Desvantagem
Balanço hídrico - consiste na quantificação das variáveis do ciclo hidrológico (precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração), sendo a recarga a diferença entre o total de água que entra e o total de água que sai da área de estudo.	Método simples; Flexibilidade em frente as escalas espaciais e temporais.	Podem surgir incertezas relacionadas a erros de medição dos componentes envolvidos no método.
Métodos físicos de superfície		
Método	Vantagem	Desvantagem
Medidor de fluxo de leito (seepage meter) - equipamentos cilíndricos cavados no leito de córregos a fim de se determinar fluxos de água entre o córrego e a zona saturada. Por meio de sacos plásticos conectados são feitas medidas de volume com o tempo.	Barato e aplicabilidade simples.	Medida pontual, levando a incertezas para estimativa de fluxos.
Descarga por fluxo de base - baseado no recurso de separação hidrografá, isto é, um gráfico que relaciona vazões com o tempo, este método associa os volumes descarregados pelo fluxo de base (origem subsuperficial) com a recarga, enquanto que o fluxo de direto é associado ao escoamento superficial.	-	Subjetividade na separação entre os fluxos superficial e de base; não indica onde a recarga acontece.
Métodos físicos aplicados à zona não saturada		
Método	Vantagem	Desvantagem

Lisímetros - funcionam como uma espécie de simulação do processo de recarga, em que caixas instaladas em campos e preenchidas com solo deformado e indeformado coletam as quantidades de água que percolam pela zona não saturada. Podem ser realizadas com ou sem vegetação.	Podem ser utilizados para avaliar efeitos de diferentes usos, principalmente se relacionados à evapotranspiração.	Condições de contorno na base dos lisímetros são alteradas em função do coletor de água, levando a discrepância nos valores reais; as caixas podem alterar as partes externas sobre a coluna do solo, alterando as condições hidrogeológicas reais; custo elevado, inadequado para larga escala
Plano de fluxo zero (PFZ) - denominado o plano em que o gradiente hidráulico vertical é zero, onde se forma uma região ascendente relacionada a evapotranspiração, na qual é considerada desprezível na outra região denominada descendente. A recarga é obtida a partir de termos potenciais, relação aos volumes drenados	Apresenta precisão associadas às precisões das medidas de umidade volumétrica e de potenciais ao longo do perfil; recomendado em regiões com grandes variações de umidade ao longo do ano.	Apresenta fragilidades em épocas chuvosas.
Lei de Darcy - Consistindo basicamente na obtenção dos potenciais mátricos e funções de condutividade hidráulica não saturada em profundidade, a recarga é calculada de maneira pontual a partir da equação de Darcy, adotando fluxo unidimensional e vertical.	Pode ser aplicado em qualquer período.	Incertezas associadas a condutividade hidráulica, podendo levar a erros consideráveis.
Métodos diretos e indiretos para obtenção da umidade volumétrica na zona não saturada		
Métodos	Vantagem	Desvantagem
Métodos diretos - consistem na obtenção direta da umidade volumétrica por meio de amostras resultantes de ensaios de tradagem. Posteriormente, a umidade volumétrica é calculada por meio da relação em que a razão entre a massa específica aparente seca e a massa específica da água é multiplicada pela umidade gravimétrica.	-	Monitoramento exige grande esforço; O ensaio não pode ser feito em um mesmo ponto por conta das perturbações geradas no solo.
Sensores TDR (Time Domain Reflectometry) - é baseado na diferença de valores das constantes hidrelétricas do solo e da água, em que esta última é maior que a do solo, gerando valores de velocidade de propagação que indicam o teor de umidade volumétrica do solo. Tal velocidade é obtida a partir da propagação de um sinal de alta frequência no dispositivo constituído de pontas metálicas introduzidas no solo no local de interesse.	Registra a evolução das frentes de umedecimento em profundidade.	Profundidade de instalação do equipamento limitada;

Sensores FTDR (Flexible Time Domain Reflectometry Sensors) - sendo uma variante da sonda TDT, o método consiste na instalação de diversos sensores FTDR em furos inclinados, podendo ter as suas perfurações realizadas até a profundidade saturada, com monitoramento constante, em que cada sensor está associado a um sistema de aquisição de dados automáticos em superfície.	Minimiza os erros relacionados ao fluxo preferencial de perfuração	Custo alto para obtenção dos inúmeros sensores e do conjunto de aquisição automática dos dados
Tensiômetros - consiste em um tubo fechado preenchido por água, com uma pedra porosa em sua base, na qual cria condições de equilíbrio de pressões(sucção) entre o solo não saturado e a parte interna do equipamento. A partir de um manômetro acoplado no equipamento a pressão matricial(sucção) é e correlacionada à umidade por meio da curva de retenção.	-	Inadequados em solos secos.
Sonda de Nêutrons - é basicamente uma fonte radioativa de nêutrons, instalada numa determinada profundidade do solo através de um tubo de acesso, em que são emitidos os nêutrons provocando colisões com núcleos atômicos presentes no solo. Essas colisões levam a uma perda de energia cinética pelos nêutrons, sendo estes correlacionados a presença de hidrogênio do meio e, por consequência, ao conteúdo de água.	Possuem natureza não destrutiva; rápido e preciso.	Falta de critérios para calibração das sondas.
Métodos físicos aplicados à zona saturada		
Método	Vantagem	Desvantagem
Variação do nível de água - sendo uma das estimativas utilizados, esse método consiste na obtenção das variações do nível água por meio de poços de monitoramento, as quais são subsequentemente multiplicadas pelo rendimento específico do material geológico para se obter a recarga num determinado intervalo de tempo. Para definição da variação do nível da água é fixado um ponto inferior no prolongamento da curva de recessão até o seu pico.	Método simples.	A avaliação do intervalo de tempo é um fator crítico, podendo afetar significativamente os resultados.
Estimativa Darcyniana - a combinação da equação da continuidade com a equação de Darcy resulta numa relação capaz de fornecer a recarga, isto considerando fluxo constante e ausência de extração de água. O método é realizado associado ao uso de mapas potenciométricos, ferramenta fundamental na determinação do gradiente hidráulico e na orientação da locação da seção transversal A.	Simples e de fácil aplicação.	Custo relacionado ao uso de mapas potenciométricos; Incertezas associadas a condutividade hidráulica,
Traçadores		
Método	Vantagem	Desvantagem

Traçadores - consiste em substâncias que permitem a caracterização hidrodinâmica de algum sistema. Dentre as substâncias têm-se as químicas como os cloretos solúveis em água, fenóis, ácido bórico, azul de metileno entre outros representando os traçadores químicos, e as substâncias isotópicas, isto é, aquelas com mesmo número atômico e diferentes números de massa como $^{24}\text{Na}, ^{86}\text{Rb}, ^{58}\text{Co}(\text{CN})_6\text{K}_3, ^{124}\text{Sb}$ -EDTAm, caracterizando os traçadores isotópicos.	Úteis na medida de recarga efetiva sobre períodos longos de tempo; pequena toxicidade, baixo custo e fácil aplicabilidade.	Não fornecem séries temporais, incertezas associadas a erros de medidas nas concentrações das substâncias, sua quantidade inicial e os processos de transporte.
Modelagem numérica		
Método	Vantagem	Desvantagem
Modelagens numéricas - consiste na resolução de uma equação geral que comanda o fluxo da água subterrânea, como por exemplo a de Richards. A partir do método é possível analisar objetivamente os dados climáticos, analisar fatores importantes envolvidos na recarga, prever impactos futuros.	Pode ser aplicada em todas as zonas (superficial, saturadas, insaturadas); avalia modelos conceituais; fornece o comportamento futuro de processos que podem afetar a recarga.	Podem surgir incertezas decorrentes da variabilidade dos parâmetros (condutividade hidráulica e material geológico).

Fonte: Adaptado de FAGUNDES (2010).

2.9 FONTES DE POLUIÇÃO

A água, apesar de ser um recurso natural renovável em razão do ciclo hidrológico, pode tornar-se não renovável quando submetida a pressões antrópicas intensas. Isso ocorre pela introdução de substâncias em concentrações superiores à capacidade natural de depuração do meio ou pela presença de compostos químicos sintéticos, inexistentes na natureza, que não podem ser biodegradados pelos microrganismos (BRANCO, 2022).

De forma geral, a **poluição hídrica** corresponde a qualquer alteração nas características físicas, químicas ou biológicas da água, resultante de fatores naturais ou antrópicos, capaz de provocar impactos estéticos, fisiológicos, ecológicos e socioeconômicos. As fontes de poluição podem ser classificadas conforme a **origem** (tipo de fonte) ou segundo a **natureza dos resíduos** (BRANCO, 2022).

2.9.1 Classificação quanto ao tipo de fonte

Fontes pontuais: caracterizam-se pelo lançamento de efluentes em locais específicos, como descargas de esgoto doméstico não tratado ou parcialmente tratado, efluentes industriais,

drenagem de minas subterrâneas e acidentes com navios petroleiros. A concentração espacial facilita sua identificação, monitoramento e regulamentação (BRANCO, 2022; PALMA, 2004).

Fontes difusas: correspondem a lançamentos distribuídos em áreas extensas, de difícil identificação em um único ponto. Exemplos incluem o carreamento de poluentes por águas pluviais em áreas urbanas (óleos, metais pesados, resíduos sólidos) e agrícolas (fertilizantes, pesticidas). Por sua natureza distribuída, são de complexa mensuração e controle, sobretudo em períodos chuvosos, quando há maior mobilização de contaminantes (BRANCO, 2022; PALMA, 2004).

2.9.2 Classificação quanto ao tipo de resíduos

De acordo com sua origem, composição e potencial de risco, os resíduos sólidos podem ser classificados em diferentes categorias. A ABNT NBR 10004:2004 define os resíduos como Classe I (perigosos), Classe II A (não inertes) e Classe II B (inertes), conforme suas características de periculosidade, reatividade, inflamabilidade, corrosividade e toxicidade. Essa norma constitui a base técnica nacional para o enquadramento e a gestão de resíduos sólidos.

Complementarmente, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a responsabilidade compartilhada e a gestão integrada desses materiais, enquanto as Resoluções CONAMA nº 307/2002 e 313/2002 tratam, respectivamente, dos resíduos da construção civil e dos resíduos industriais.

Para este estudo, foi adotada uma classificação adaptada a partir dessas normas e legislações, permitindo um agrupamento por origem e composição, de modo a abranger tanto o aspecto técnico quanto o ambiental. Assim, os resíduos foram organizados nas seguintes categorias:

Classe 1 – Resíduos perigosos: materiais que apresentam risco à saúde e ao ambiente, devido às características de toxicidade, inflamabilidade, corrosividade ou reatividade. Exemplos: solventes, restos de tinta, resíduos hospitalares, rejeitos radioativos.

Classe 2 – Resíduos de mineração e resíduos orgânicos/inorgânicos: incluem rejeitos líquidos provenientes do beneficiamento mineral, estéreis sólidos, resíduos domésticos orgânicos (restos de alimentos, jardinagem) e resíduos inorgânicos de uso cotidiano (vidro, alumínio, plásticos).

Classe 3 – Resíduos industriais: cinzas, lodos, óleos, ácidos, bases e subprodutos sólidos ou líquidos das atividades fabris.

Classe 4 – Resíduos urbanos e animais: gerados por atividades domésticas e de limpeza urbana (papel, papelão, plásticos, roupas, óleos lubrificantes) e resíduos de origem animal provenientes de abatedouros e frigoríficos.

Classe 5 – Resíduos da construção civil e da indústria alimentícia: entulhos de obras (solos, rochas, azulejos, metais) e efluentes ou rejeitos da produção de alimentos, de natureza biológica ou química.

Classe 6 – Resíduos especiais: incluem compostos orgânicos naturais e areias industriais (como as de fundição), frequentemente oriundas de sucatas metálicas, moldagem e poeiras de processos industriais.

Essa categorização visa integrar critérios técnicos e ambientais, possibilitando uma visão abrangente da geração e destinação dos resíduos sólidos, de acordo com seus impactos potenciais e necessidades de manejo diferenciado.

2.9.3 Mecanismos de transporte de poluentes

A infiltração das águas provenientes da precipitação constitui a principal via de entrada de contaminantes nos materiais geológicos. Durante esse processo, ocorre a **solubilização** dos compostos químicos presentes nas fontes de poluição e, em seguida, o transporte dos íons e moléculas até a **zona saturada** (BRANCO, 2022).

A compreensão desses mecanismos é essencial para o controle da contaminação das águas subterrâneas, uma vez que envolve tanto as características do meio poroso (mineralogia, textura, porosidade e matéria orgânica) quanto as propriedades do poluente (solubilidade, carga elétrica, massa molecular, entre outros) (BRANCO, 2022; FAGUNDES, 2010).

Conforme apresentado por Fagundes (2010), os principais mecanismos de transporte em meios porosos são:

- **Advecção** – transporte do soluto em função do fluxo da água subterrânea, diretamente relacionado à **velocidade de percolação** e ao **gradiante hidráulico**. É o mecanismo dominante em aquíferos livres e caracteriza-se pelo deslocamento do contaminante sem interação significativa com o meio sólido.
- **Dispersão hidrodinâmica** – processo de **espalhamento** do poluente além do que ocorreria apenas pela advecção, resultando na diminuição da concentração conforme a pluma avança. Divide-se em duas componentes:
- **Dispersão mecânica**: causada pelas variações de velocidade dentro dos poros e pela tortuosidade do meio.

- **Difusão molecular:** decorrente do gradiente de concentração, em que os solutos migram de regiões mais concentradas para menos concentradas.
- **Sorção** – conjunto de processos físicos e químicos que envolvem a **retenção temporária ou definitiva** dos contaminantes pelas partículas do solo. Inclui fenômenos de adsorção, absorção e troca iônica, que atuam como barreiras naturais à migração de poluentes, mas cuja eficiência depende das características do solo e do contaminante.

Além desses mecanismos naturais, o transporte de contaminantes pode ser analisado por meio de **modelagens numéricas**, que simulam o fluxo subterrâneo e a dinâmica dos poluentes com base em equações diferenciais (ex. Darcy e Richards). Softwares como **MODFLOW**, **FEFLOW** e **MIKE SHE** são amplamente utilizados para prever cenários de contaminação, avaliar riscos e subsidiar planos de remediação de áreas impactadas (BRANCO, 2022; FAGUNDES, 2010).

Tabela 2 - Resumo dos principais Mecanismos de transporte de poluentes.

Mecanismos de transporte de poluentes
Advecção - Decorrente do fluxo hidráulico qual relaciona-se à velocidade de percolação, a advecção é processo pelo qual o soluto é carregado pela água em movimento, sem que haja interação com o meio poroso. Pode ser considerado como um mecanismo gerado por gradiente hidráulico.
Dispersão hidrodinâmica - Mecanismo de espalhamento do poluente no meio poroso, em que o contaminante ocupa um volume maior do que se ocorresse apenas a advecção. Nele a concentração diminui conforme a frente de contaminação se move mais rápido. Esse mecanismo pode ser definido como a soma de duas parcelas, as quais correspondem a dispersão mecânica e a difusão molecular.
Dispersão mecânica: espalhamento decorrente das variações de velocidade do fluido dentro do meio poroso, pode depender da rugosidade e tamanho dos poros e a tortuosidade.
Difusão molecular: ocorre devido ao gradiente de concentração, em que as moléculas e íons parte do local de maior concentração para o de menor.
Sorção - consiste em interações químicas e físicas alternando entre a fase líquida(solução) e as partículas do solo, referindo-se a transferência geral de material da fase líquida para as interfaces da fase sólida.
Modelagens - consistem na modelagem do fluxo e do transporte de contaminantes por meio da resolução de equações diferenciais de fluxo por meio de softwares, utilizados também para análise de alternativas de mediação em áreas contaminadas por meio de simulações. Destacam-se os programas: MODFLOW, FEFLOW e MIKE SHE.

Fonte: Adaptado de BRANCO (2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido com base em uma Análise Multicritério em ambiente SIG (QGIS), integrando dados geoambientais, geológicos e antrópicos para hierarquizar áreas de recarga e avaliar fontes potenciais de contaminação em São Carlos (SP). A metodologia foi estruturada em etapas sequenciais, envolvendo a definição da área de estudo, levantamento e tratamento dos dados, modelagem conceitual, atribuição de pesos e integração final dos resultados no QGIS.

Os materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados são apresentados a seguir.

3.1 MATERIAIS

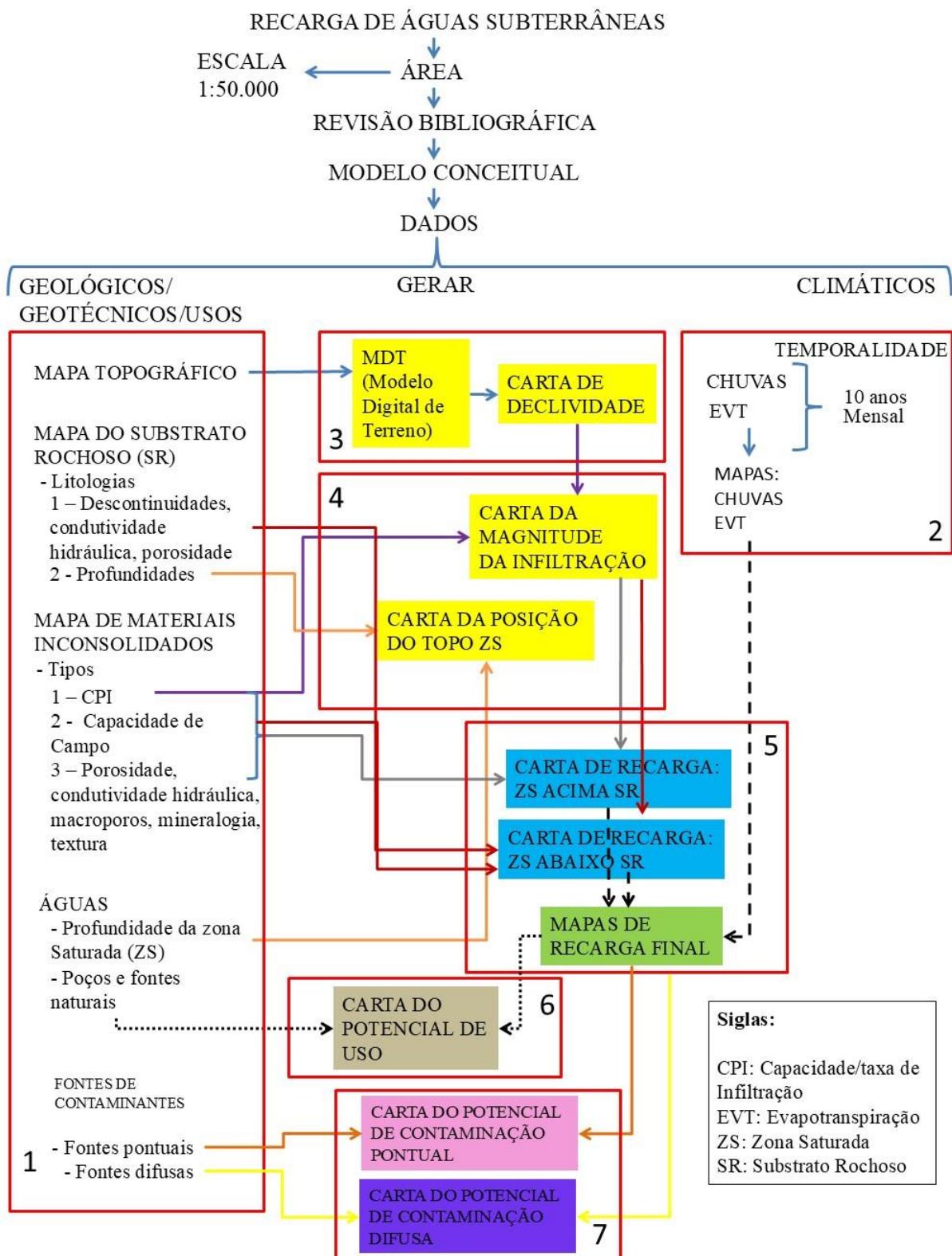
Os materiais utilizados para a execução deste trabalho incluíram softwares, bases de dados e estudos prévios que serviram de referência metodológica e de dados de entrada. Dentre os principais materiais, destacam-se:

- QGIS versão 3.28 (2023) (software livre de geoprocessamento).
- SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance).
- Banco de dados do DAEE-SP (Departamento de Águas e Energia Elétrica).
- Banco de dados da ANA (Agência Nacional de Águas).
- Cartas de zoneamento em formato DWG (Muro, 2000).
- Trabalhos prévios de Zuquette (1981), Nishiyama (1991), Leite (1995), Muro (2000), Palma (2004), Fagundes (2010), Lemos (2010), entre outros.

3.2 MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 5, seguindo as diferentes etapas descritas nos subtópicos seguintes.

Figura 5 - Fluxograma geral do estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.2.1 Definição da área e da escala de estudo

A área de estudo compreende o **município de São Carlos (SP)**, localizado na região central do estado de São Paulo. A escolha do município justifica-se por sua **relevância hidrogeológica**, visto que parte de seu território está inserido na área de ocorrência do **Aquífero Guarani**, um dos maiores reservatórios de água doce do mundo. Além disso, São Carlos apresenta intensa **ocupação urbana e industrial**, o que exerce forte pressão sobre os recursos hídricos subterrâneos, reforçando a importância de estudos voltados à recarga e à gestão sustentável desse recurso.

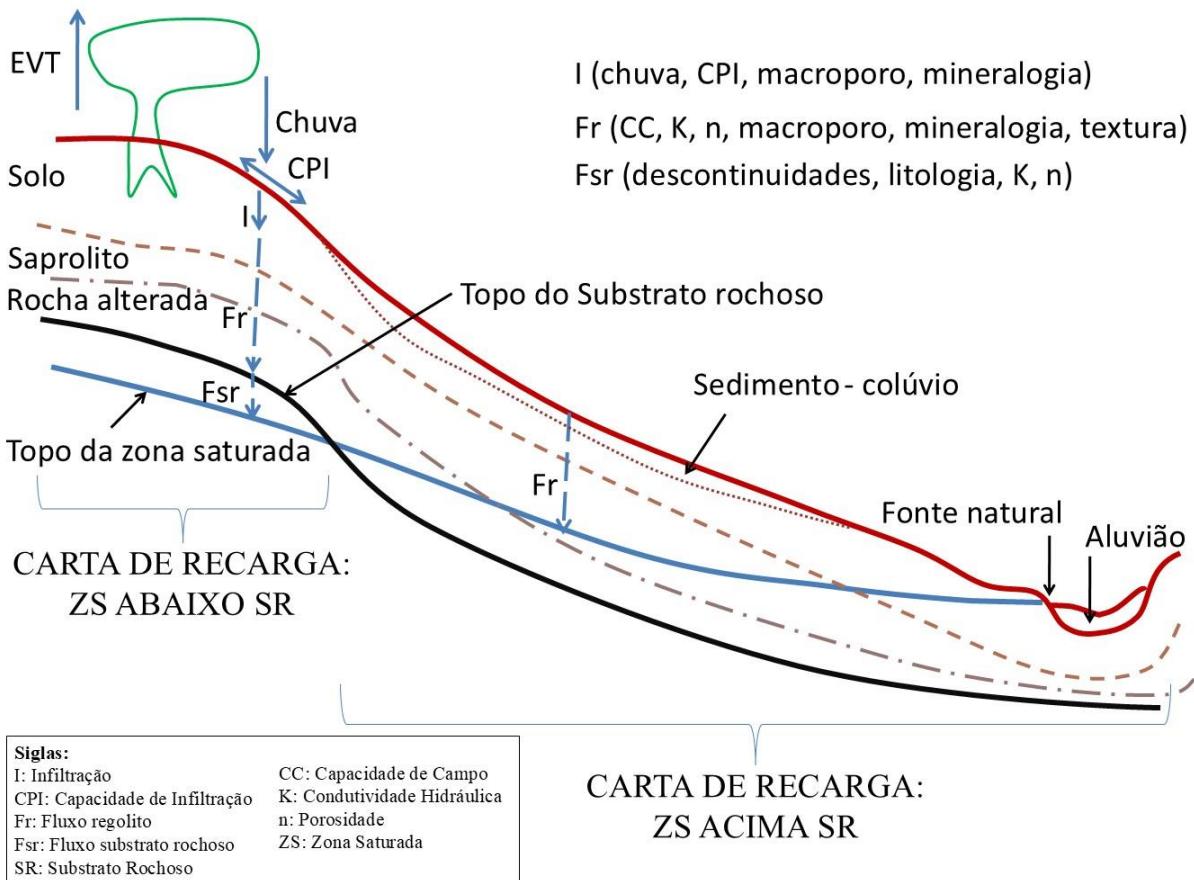
Outro fator determinante foi a **disponibilidade de dados cartográficos, geotécnicos e hidrogeológicos**, fruto de diversos trabalhos acadêmicos desenvolvidos na Escola de Engenharia de São Carlos (USP) e de informações oficiais de órgãos como ANA e DAEE.

A escala cartográfica adotada para o desenvolvimento dos mapas foi **1:50.000**, por se tratar da resolução das cartas fornecidas por Muro (2000), além de ser adequada para análises em nível **municipal e regional**. Essa escala garante um equilíbrio entre nível de detalhe e abrangência espacial, permitindo a representação dos principais processos de recarga sem perder a visão integrada da área estudada.

3.2.2 Levantamento bibliográfico e modelo conceitual

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os principais fatores que influenciam o processo de recarga de aquíferos, subsidiando a elaboração de um modelo conceitual (Figura 6) para o município de São Carlos.

Figura 6 - Modelo conceitual adotado no estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Esse modelo considerou dois cenários distintos:

- recarga ocorrendo quando o topo da zona saturada (ZS) encontra-se **acima do substrato rochoso**;
- recarga ocorrendo quando o topo da ZS está **abaixo do substrato rochoso**.

Para representar esses cenários, foram selecionados seis grupos de atributos com diferentes atributos que estão representados na tabela 3. Esses atributos foram definidos a partir de estudos prévios e da disponibilidade de dados:

- **Climáticos (chuva e evapotranspiração)**: controlam a entrada e a saída de água no sistema, determinando o volume efetivo disponível para infiltração.
- **Materiais inconsolidados**: englobam propriedades como textura, porosidade, espessura e condutividade hidráulica, que controlam a infiltração e o armazenamento da água.
- **Substrato rochoso**: inclui atributos como litologia, descontinuidades e condutividade hidráulica da rocha, que são determinantes quando a recarga percola até o embasamento rochoso.

- **Geomorfologia:** representada pela declividade do relevo, influencia a velocidade de escoamento superficial e a taxa de infiltração.
- **Água subterrânea e superficial:** profundidade da zona saturada, presença de poços de bombeamento e fontes naturais, que modulam a disponibilidade e a dinâmica da recarga.

No primeiro cenário (ZS acima do substrato rochoso), os **materiais inconsolidados** são o principal controle, já que a recarga se dá no meio não consolidado antes de atingir a rocha. No segundo cenário (ZS abaixo do substrato rochoso), as **características do substrato rochoso** passam a ter maior relevância, pois a percolação atravessa esse material até alcançar a zona saturada.

Assim, o modelo conceitual integra esses grupos de atributos de forma hierárquica, refletindo a interação entre fatores climáticos, geológicos e hidrogeológicos que condicionam o processo de recarga em São Carlos.

Tabela 3 - Atributos, classes e graduação da importância para a recarga.

TABELA DE ATRIBUTOS E CLASSES PARA A ESTIMATIVA DE RECARGAS DE ÁGUAS. FONTE: MODIFICADO DE ZUQUETTE E GANDOLFI (2004).			IMPORTÂNCIA BASEADA EM UMA ESCALA DE 1 A 9.	1 EXTREMA MENTE BAIXA 2 – MUITO BAIXA 3 – BAIXA 4 BAIXA/MOD ERADA 5 MODERAD A	– 6 – MODERADA/ALTA 7 - ALTA 8 – MUITO ALTA 9 – EXTREMAMENTE ALTA
GRUPO DE ATRIBUTOS	ATRIBUTOS	CLASSES	RECARGA GRAU DE IMPORTÂNCIA	–	JUSTIFICATIVA PARA O GRAU DE IMPORTÂNCIA
Chuva	Volume Total Anual (mm/ano)	<900	3	Quanto maior o volume de precipitação, maior volume de água poderá atingir a zona saturada.	
		900 – 1350	4		
		1350 – 1550	5		
		1550 – 2000	6		
		> 2000	7		
EVT		<900	8		
		900 – 1350	5		

	Volu me Total Anual (mm/ano)	1350 – 1550	3	Quanto menor o volume de água evapotranspirada, maior volume de água poderá atingir a zona saturada.
		1550 – 2000	2	
		> 2000	1	
Material Inconsolidado	Distribuição em área (% da unidade)	100-80	8	Quanto maior o percentual de material inconsolidado favorável a recarga, mais facilmente ocorrerá a recarga.
		80-60	7	
		60-40	5	
		40-20	3	
		20 a 5	2	
		<5	1	
	Macroporos	Sem	1	Os macroporos são facilitadores da passagem de água pela ação da gravidade.
		1 - 2%	2	
		2 - 5%	4	
		5 - 10%	6	
		>10%	9	
	Taxa de infiltração (mm/hora)	>100	8	Quanto maior o volume de água que penetra no perfil do solo, mais água estará disponível para ser infiltrada.
		71-100	7	
		31-70	5	
		10 – 30	3	
		<10	1	
	Condutividade hidráulica (cm/s)	> 10^{-3}	8	Quanto maior a condutividade hidráulica, maior a capacidade do solo de transmitir água.
		10^{-3} a 10^{-4}	6	
		10^{-4} a 10^{-5}	5	
		10^{-5} a 10^{-6}	3	
		10^{-6} a 10^{-7}	2	
		< 10^{-7}	1	
	Capacidade de Campo (Umidade volumétrica - %)	<0,12	8	A percolação de água cessa ao atingir a capacidade de campo, visto que há um nível alto de umidade.
		0,12-0,16	4	
		0,16 - 0,25	3	
		>0,25	1	
	Distribuição em	<2 m	7	Quanto mais espessa a camada, mais dificilmente a água atinge a zona saturada.
		2-5	6	
		5 – 15	5	

profundidade (m) - Espessura	15 – 25	3		
	> 25	2		
Distribuição em profundidade - Sequência materiais	Homogêneo	9	Quanto menos homogêneo for o material, mais características influenciarão no processo de recarga.	
	Duas interfaces	7		
	Gradacional Diminuindo	5		
	Gradacional Aumentando	3		
	Heterogêneo	1		
Porosidade (%)	>50	8	Quanto maior a porosidade, mais facilmente a água infiltra no solo.	
	50 -40	7		
	40 – 30	4		
	30 a 15	3		
	<15	1		
Textura	Areia	8	Os solos de textura arenosa são mais permeáveis que os argilosos.	
	Areia Silto-Argilosa	7		
	Silte Arenoso	6		
	Silte	3		
	Argila	2		
Substrato Rochoso	Litologia	Arenitos com baixa cimentação e diagênese (Porosidade > 50%)	8	Arenitos com baixa cimentação são mais porosas diferentemente dos basaltos diabásicos e as rochas com porosidade, facilitando a percolação da água.
		Arenitos	7	
		Arenitos siltosos	5	
		Basaltos Diabásicos	3	
		Rochas com porosidade < 5%	2	
Continuidade (Distribuição em área - % unidade)		100-80	8	Quanto maior o percentual de substrato favorável a recarga, mais facilmente ocorrerá a recarga.
		80-60	7	
		60-40	5	
		40-20	3	
		20 a 5	2	
		<5	1	

Condutividade Hidráulica (cm/s)	$< 10^{-3}$	8	Quanto maior a condutividade hidráulica, maior a capacidade do substrato rochoso de transmitir água.
	$10^{-3} \text{ a } 10^{-4}$	6	
	$10^{-4} \text{ a } 10^{-5}$	5	
	$10^{-5} \text{ a } 10^{-6}$	3	
	$10^{-6} \text{ a } 10^{-7}$	2	
	$< 10^{-7}$	1	
Porosidade (%)	$> 30\%$	8	Quanto maior a porosidade, maior a quantidade de água que o solo poderá armazenar
	30 - 15%	7	
	15 - 10%	4	
	10 - 5%	3	
	$< 5\%$	1	
Descontinuidades (famílias, frequência, abertura, continuidade)	1 - Não ocorrem descontinuidades.	1	As descontinuidades são facilitadoras da passagem de água, principalmente quando estão com aberturas e sem preenchimentos.
	2 - Fechadas ou com preenchimento de baixa condutividade hidráulica.	2	
	3 - < 3 famílias, $> 3/m$, com abertura maior que 0,1mm, continuidade menores que 10m.	4	
	4 - < 3 famílias, $> 3/m$, com abertura maior que 0,1mm, continuidade maiores que 10m.	7	
	5 - > 3 famílias, $> 3/m$, com abertura maior que 0,1mm, continuidade maiores que 10m.	8	

Características das paredes das Descontinuidades (Grau de alteração, preenchimento)	Sem preenchimento - Sem alteração nas paredes	9	As descontinuidades são fissuras que facilitam a passagem de água, a presença de preenchimento dificulta a passagem de água, principalmente se for preenchida por argila.	
	Sem preenchimento - Pouca alteração nas paredes	8		
	Sem preenchimento - Muita alteração nas paredes	6		
	Preenchida de areia	4		
	Preenchida de argila	2		
<hr/>				
Geomorfologia	Declividade (%)	< 5	8	Quanto maior a declividade, menor a infiltração, devido o tempo de permanência nas vertentes.
		5 – 15	5	
		15 -30	3	
		> 30	2	
<hr/>				
Água Subterrânea/Superficial	Profundidade do topo da zona saturada (m)	< 2	9	Quanto menor a profundidade do topo da zona saturada, mais facilmente a água atinge a zona saturada.
		2-5	8	
		5 – 10	7	
		10-20	3	
		20 - 30m	2	
		> 30 m	1	
<hr/>				
Número de Poços de Bombeamento / Unidade de pixel	Número de Poços de Bombeamento / Unidade de pixel	Sem	9	Os poços de bombeamento retiram água da zona saturada, aumentando a profundidade do topo da zona saturada, sendo desfavorável ao processo de recarga.
		1	8	
		2	6	
		3	4	
		>3	1	
<hr/>				
Número de Fontes/Unidade	Número de Fontes/Unidade	0	9	As fontes funcionam como uma descarga, visto que elas se interceptam com o topo do terreno.
		1	7	
		2	4	
		3 ou mais	1	
<hr/>				
FONTES DE CONTAMINANTES – ATRIBUTOS E CLASSES				

		IMPORTÂNCIA BASEADA EM UMA ESCALA DE 1 A 9.	1 – EXTREMAMENTE BAIXA 2 – MUITO BAIXA 3 – BAIXA 4 – BAIXA/MODERADA 5 – MODERADA	6 – MODERADA/ALTA 7 - ALTA 8 – MUITO ALTA 9 – EXTREMAMENTE ALTA
		MAGNITUDE COMO FONTE DE CONTAMINANTES – GRAU DE IMPORTÂNCIA		
Fonte Pontual	Volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (m ³)	<50000	4	Quanto maior o volume de resíduos potencialmente contaminantes, mais vulnerável fica a recarga.
		50000 a 100000	5	
		100000 a 250000	6	
		250000 a 500000	8	
		>500000	9	
	Tempo de exposição (anos)	>20	8	
		20 - 10	6	
		10 – 5	4	
		< 5	3	
	Técnicas de Disposição	1 – Feições erosivas e outras depressões preenchidas;	8	A disposição adequada de resíduos é a realizada em aterros sanitários.
		2 - Sem qualquer sistema de mitigação (aterros comuns – lixões);	9	

	3 – Disposição em cavas;	4	
	4 – Aterros controlados;	3	
	5 – Aterros sanitários.	1	
Tipos de resíduos	1 - Resíduos perigosos	9	Alguns tipos de resíduos são mais perigosos que outros, podendo ser mais contaminantes.
	2 - Rejeitos sólidos e líquidos de mineração	9	
	3 - Resíduos industriais	9	
	4 - Resíduos sólidos e líquidos urbanos	8	
	5 - Resíduos e rejeitos construção civil,	8	
	6 - Areia de fundição e restos de matéria orgânica	7	
Material geológico da base	Alto fluxo	9	Materiais que permitem o alto fluxo são mais favoráveis a contaminação das áreas de recarga pois permitem uma maior movimentação dos contaminantes.
	Botucatu	7	
	Basalto	5	
	Pirambóia	3	
	Adamantina	2	
	Baixo fluxo	1	
Conteúdo inicial de água (%)	Seco	2	Representa a umidade presente no material ou resíduo no momento da disposição. Quanto maior o teor de água, maior o potencial de mobilização e transporte de contaminantes por lixiviação e infiltração. Assim, materiais secos receberam menores pesos, enquanto os mais úmidos foram associados a maior risco de contaminação.
	<25%	3	
	25 - 50%	6	
	>50%	8	

Fonte Difusa	Áreas urbanas	Cidade 1 – Mais de 500 mil habitantes. Economia ligada à atividade industrial (Ex.: Ribeirão Preto);	8	Cidades mais habitadas, industrializadas e sem tratamento de esgoto produzem mais resíduos do que cidades menos habitadas e industrializadas.
		Cidade 2 – Entre 100 a 500 mil habitantes. Economia ligada à atividade industrial (Ex.: São Carlos, Araraquara);	7	
		Cidade 3 – Entre 100 a 20 mil habitantes. Economia ligada à atividade industrial e/ou sem tratamento de esgoto;	7	
		Cidade 4 – Entre 100 a 20 mil habitantes. Economia basicamente agrícola e/ou com tratamento de esgoto;	4	
		Cidade 5 – Menos de 20 mil habitantes.	2	
Tipos de Uso e Ocupação do Solo	Uso acentuado de produtos químicos	9	Produtos provenientes da agricultura, pecuária, dutos e estradas podem ser tóxicos e contaminantes.	
	Cana de açúcar	8		
	Áreas irrigadas	7		
	Estradas/Aeroportos	5		
	Pecuária	3		
	Reflorestamento/Vegetação natural	1		
Diversidade de produtos	Órgânicos e Inorgânicos	9	Rejeitos e combustíveis são potencialmente tóxicos. Os produtos orgânicos e	

	Orgânicos	7	inorgânicos individualmente podem ser tóxicos, portanto em conjunto, aumentam sua potencialidade.
	Inorgânicos	8	
	Orgânico - combustível	9	
	Rejeitos	9	
Condição de disposição	Em profundidade	9	Os líquidos possuem mais mobilidade e maior potencial de contaminação, bem como a disposição direta.
	Direta – líquido	8	
	Direta – sólido	7	
	Indireta (Pulverizações)	5	
Continuidade temporal	Poucas vezes/Ano	4	A continuidade das fontes difusas aumenta o potencial e a incidência da contaminação das áreas de recarga.
	Intercalados dias/Ano	5	
	Sazonal – Meses	8	
	Continuo/Ano	9	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.2.3 Definição de classes e atribuição de pesos

As classes dos atributos apresentadas na Tabela 3 foram adaptadas de Zuquette (2004), de forma a representar as condições geoambientais específicas do município de São Carlos. Atribuiu-se a cada classe um peso variando de 1 a 9, correspondente ao grau de influência no processo de recarga, indo de “extremamente baixa” a “extremamente alta”. A definição dos pesos foi realizada pela autora com base em revisão bibliográfica (Feitosa, 2008; Fagundes, 2010) e na experiência prática adquirida ao longo do estudo, sendo posteriormente validada pelo orientador.

3.2.4 Obtenção dos atributos e dados

A obtenção dos atributos necessários ao estudo foi realizada a partir de diferentes fontes, como bancos de dados oficiais, ensaios de campo e de laboratório, e trabalhos acadêmicos pré-existentes. A Tabela 4 resume o modo de obtenção dos principais atributos.

Tabela 4 - Modo de obtenção dos atributos

GRUPO DE ATRIBUTOS	ATRIBUTOS	MODO DE OBTENÇÃO
Chuva	Volume Total Anual (mm/ano)	Banco de Dados do DAEE-SP e da ANA
EVT	Volume Total Anual (mm/ano)	Simulador SSEBop
Material Inconsolidado	Distribuição em área (% da unidade)	Ensaios de campo ou laboratório
Material Consolidado	Macroporos	Equipamentos de laboratório porosímetro de mercúrio ou por análise com lupas.
	Taxa de infiltração (mm/hora)	Capacidade potencial de infiltração - Curva
	Condutividade hidráulica (cm/s)	Ensaios de campo ou laboratório
	Capacidade de Campo (Umidade volumétrica - %)	Estimativas com a textura
	Distribuição em profundidade (m) – Espessura	Ensaios de campo ou laboratório
	Distribuição em profundidade - Seqüência materiais	Ensaios de campo ou laboratório
	Porosidade (%)	Ensaios de campo ou laboratório
	Textura	Ensaios de campo ou laboratório
Substrato Rochoso	Litologia	Ensaios de campo ou laboratório
Geossistemas	Continuidade (Distribuição em área - % unidade)	Ensaios de campo ou laboratório
	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Ensaios de campo ou laboratório
	Porosidade (%)	Ensaios de campo ou laboratório
	Descontinuidades (famílias, frequência, abertura, continuidade)	Ensaios de campo ou laboratório

	Características das paredes das Descontinuidades	Ensaios de campo ou laboratório
Geomorfologia	Declividade (%)	Modelo Digital de Terreno
Água Subterrânea/Superficial	Profundidade do topo da zona saturada (m)	Carta da posição do topo da zona saturada
	Número de Poços de Bombeamento / Unidade	Banco de Dados do DAEE-SP e da ANA
	Número de Fontes/Unidade	Banco de Dados do DAEE-SP e da ANA
Fontes de contaminantes	Inventário de áreas potencialmente contaminadas da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (2019), Mapa de Uso e Ocupação do Solo do MapBiomas (Coleção 8, 2024) e dados de Palma (2004).	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os valores referentes aos atributos físicos do substrato rochoso e material inconsolidado não foram obtidos diretamente neste estudo, mas adaptados a partir dos resultados de ensaios de campo e laboratório realizados por Palma (2004) e Fagundes (2010) no município de São Carlos. Na Tabela 4, o termo “ensaios de campo ou laboratório” refere-se, portanto, à metodologia empregada por esses autores, cujos dados foram aqui utilizados como base para a atribuição dos valores e pesos adotados.

3.2.5 Integração e processamento no QGIS

Todos os dados foram organizados e tratados no QGIS, adotando o sistema de referência geodésico SIRGAS 2000 / UTM Zone 23S, padrão cartográfico oficial do Brasil.

Inicialmente, os mapas temáticos de base (materiais inconsolidados, substrato rochoso, topografia, recursos hídricos superficiais e subterrâneos) foram trabalhados em formato vetorial. Nessa etapa, cada unidade mapeada foi classificada em classes e recebeu pesos correspondentes, conforme definido na Tabela de Atributos.

Posteriormente, os mapas foram convertidos para o formato raster, com resolução espacial de 50 metros, utilizando a ferramenta Rasterize (vector to raster) do QGIS. Esse procedimento permitiu a padronização dos dados e a realização de operações de álgebra espacial.

3.2.5.1 Tratamento do mapa topográfico

O mapa topográfico passou por etapas adicionais em relação aos demais atributos:

- A partir do mapa vetorial de curvas de nível com pontos cotados, foi gerado um Modelo Digital do Terreno (MDT) por interpolação.
- O MDT foi utilizado para calcular as declividades do terreno, por meio da ferramenta Slope.
- As classes de declividade foram posteriormente reclassificadas e receberam pesos, seguindo o mesmo critério aplicado aos demais atributos.

3.2.5.2 Tratamento dos atributos climáticos

Além dos atributos geomorfológicos, os atributos climáticos — precipitação e evapotranspiração — foram processados de forma independente. O município de São Carlos foi subdividido em três áreas de referência (norte, alta e sul), considerando as curvas de nível e as variações altimétricas do relevo, que influenciam diretamente os processos de escoamento superficial e infiltração.

A área alta, localizada na porção central do município, apresenta maiores altitudes e maior densidade de curvas de nível, caracterizando-se como uma zona de divisor topográfico entre as demais regiões. Já as áreas norte e sul possuem relevo mais suave, com menores cotas altimétricas e maior tendência à concentração de fluxo superficial.

Essa subdivisão foi complementada pela localização dos postos pluviométricos e pela disponibilidade de séries históricas de precipitação, permitindo uma representação espacial mais precisa das variações climáticas e hidrológicas no município.

- **Precipitação:** considerou-se a média anual (mm/ano) em cada uma das três áreas, a partir de uma série histórica de aproximadamente 10 anos, obtida a partir de dados de poços pluviométricos registrados no DAEE-SP e na ANA.
- **Evapotranspiração (ETR/ETP):** os valores médios anuais foram estimados para as mesmas áreas, utilizando o modelo SSEBop (Operational Simplified Surface Energy Balance), que integra imagens de sensoriamento remoto e variáveis meteorológicas.

Após a obtenção desses valores, cada área foi classificada em faixas de intensidade e recebeu pesos proporcionais ao seu potencial de contribuição para a recarga. Dessa forma,

foram gerados os mapas de precipitação e evapotranspiração, que seguiram o mesmo procedimento de integração dos demais atributos.

3.2.5.3 Integração final

Com todos os atributos convertidos para raster e ponderados por classes e pesos, foi realizada a integração final por meio da ferramenta Raster Calculator. Esse processo resultou nas cartas temáticas intermediárias (chuva, evapotranspiração, materiais inconsolidados, substrato rochoso, geomorfologia e águas subterrâneas/superficiais) e, por fim, no mapa final de recarga hierarquizada do município de São Carlos.

3.2.6 Hierarquização das áreas de recarga

Após a obtenção dos mapas de atributos, foram realizadas operações de soma ponderada para gerar cartas intermediárias de recarga, considerando separadamente os cenários de topo da zona saturada acima e abaixo do substrato rochoso. Posteriormente, essas cartas foram integradas com os mapas de precipitação e evapotranspiração, resultando no mapa final de hierarquização das áreas de recarga.

3.2.7 Mapa de potencial de uso

O mapa de potencial de uso foi obtido pela integração do mapa de recarga com os atributos relacionados à presença de poços e fontes naturais. Esse procedimento teve como objetivo indicar as áreas de maior relevância prática para exploração e manejo sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, fornecendo subsídios para a gestão municipal e regional.

3.2.8 Mapeamento das fontes potenciais de contaminação

Além da hierarquização das áreas de recarga, o presente estudo também contemplou a identificação e análise das fontes potenciais de contaminação, classificadas em fontes pontuais e difusas, com o objetivo de avaliar a pressão antrópica sobre os sistemas aquíferos do município e integrar essa variável à análise de vulnerabilidade.

3.2.8.1 Fontes Pontuais

As fontes pontuais foram obtidas a partir do Inventário de Áreas Contaminadas e Reabilitadas da CETESB (2019), que reúne empreendimentos com potencial de contaminação em função de suas atividades. No software QGIS, cada empreendimento foi veteado como polígono conforme seus limites operacionais e classificado segundo quatro atributos principais:

- Volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (m^3);
- Tempo de exposição (anos);
- Técnicas de disposição;
- Tipo de resíduo.

Cada atributo foi dividido em classes com faixas de valores e pesos entre 1 e 9, de acordo com o seu grau de influência sobre o risco de contaminação das águas subterrâneas de acordo com trabalhos de base geotécnica da região (Feitosa, 2008; Fagundes, 2010; Palma, 2004). A integração desses mapas resultou em cartas temáticas intermediárias, seguidas por mapas de potencial de contaminação pontual, considerando dois cenários:

- sem influência do potencial de recarga;
- integrando as cartas de recarga final — permitindo, assim, identificar zonas de alta recarga associadas a fontes pontuais de elevada periculosidade.

3.2.8.2 Fontes Difusas

As fontes difusas foram mapeadas a partir da interpretação do uso e ocupação do solo, considerando classes de atividades agrícolas, industriais e urbanas. Foram definidos cinco atributos principais, também ponderados de 1 a 9 conforme sua intensidade potencial de contaminação:

- Áreas urbanas (porte e tipo de economia);
- Tipos de uso e ocupação do solo (cana-de-açúcar, pecuária, estradas e aeroportos, áreas irrigadas etc.);
- Diversidade de produtos (orgânicos, inorgânicos, rejeitos, orgânico-combustível);
- Condição de disposição (profundidade, direta ou indireta);
- Continuidade temporal (frequência de aplicação ou geração de contaminantes).

Esses atributos foram obtidos a partir de dados da CETESB (2019), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (MapBiomas, Coleção 8, 2024) e de trabalhos de base geotécnica da região (Feitosa, 2008; Fagundes, 2010; Palma, 2004). Após a veteização e

reclassificação no QGIS, as camadas rasterizadas foram integradas por meio de álgebra de mapas, gerando uma carta de potencial de contaminação difusa, igualmente avaliada com e sem a influência da recarga.

3.2.8.3 Integração final: Interação entre recarga e contaminação

Por fim, os mapas de recarga e de contaminação foram sobrepostos para produzir as cartas de potencial de contaminação com e sem interação da recarga, refletindo tanto a capacidade de infiltração e armazenamento quanto a intensidade de pressões antrópicas sobre o sistema hídrico subterrâneo. Essa etapa possibilitou hierarquizar áreas críticas — como regiões de alta recarga associadas a fontes pontuais ou difusas elevado potencial poluidor— e subsidiar estratégias de monitoramento, licenciamento e gestão territorial.

3.2.9 Tratamento e classificação das unidades

A definição das categorias frente aos resultados obtidos para cada pixel contendo diferentes valores que retratam o potencial de recarga e/ou de contaminação foi a partir do valor da média e do desvio padrão dos valores obtidos para cada pixel, porém outros critérios para definição de classes podem ser usados, em função das amplitudes dos valores.

3.2.10 Hierarquização das unidades quanto ao potencial de recarga e de contaminação.

Após a obtenção dos valores para cada pixel será executada uma reclassificação para definição das classes considerando a média e desvio padrão e a partir da reclassificação e das classes da carta de potencial de recarga e de contaminação, essas unidades serão classificadas em categorias e, que serão baseadas na potencialidade de recarga e de contaminação.

4 RESULTADOS

4.1 BÁSICOS

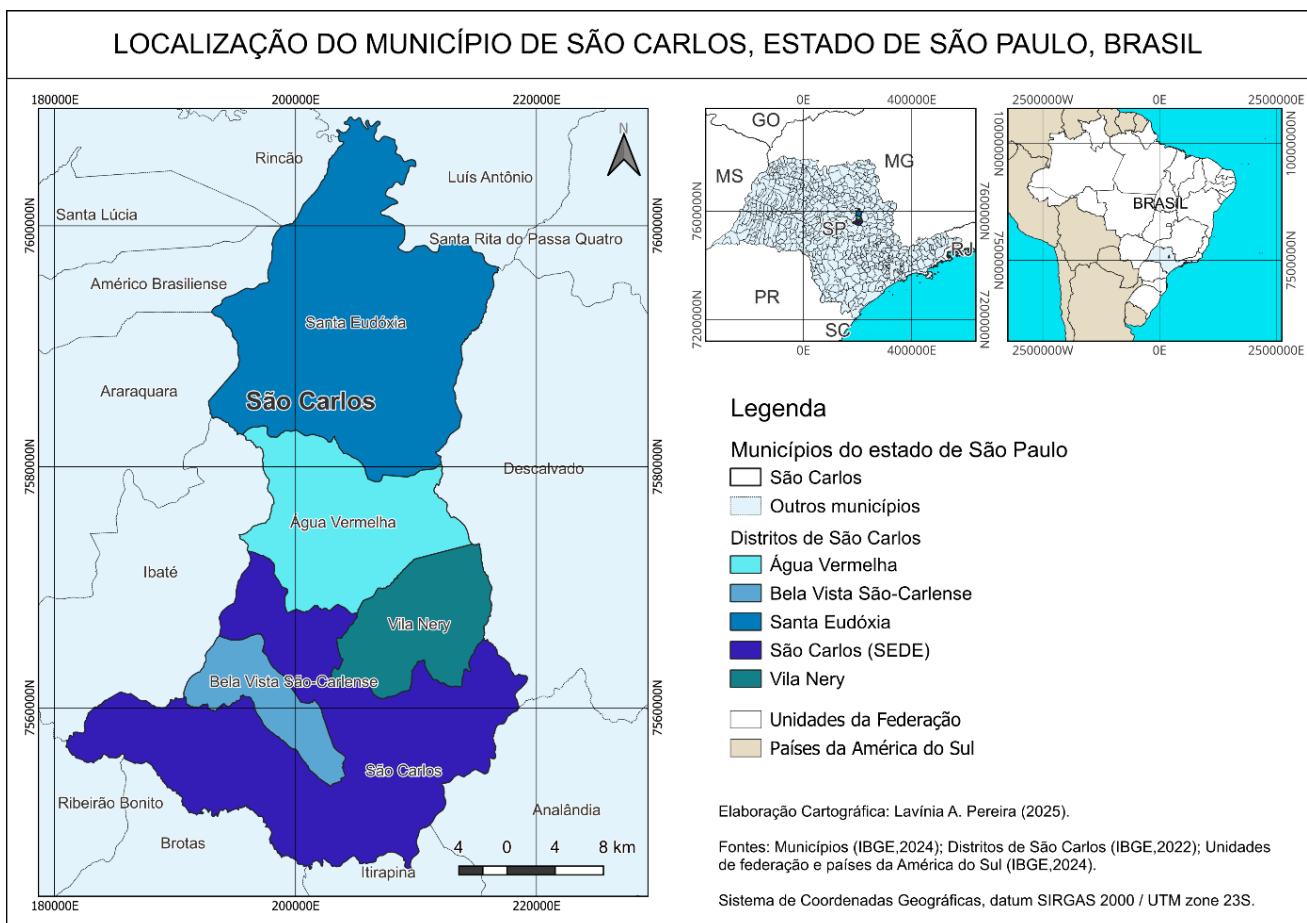
4.1.1 Características gerais da área de estudo

4.1.1.1 Localização

A área de estudo compreende o município de São Carlos (SP), com escala de trabalho 1:50.000, localizado na região central do estado de São Paulo e limitado pelos municípios de Ibaté, Descalvado, Araraquara, Ribeirão Bonito e Itirapina (Figura 7). O município abrange uma área aproximada de **1.137 km²**, situando-se entre as coordenadas **47°45' e 48°00' de longitude oeste** e **21°45' e 22°00' de latitude sul**, incluindo os distritos **Água Vermelha, Bela Vista São Carlense, Santa Eudóxia, São Carlos (sede) e Vila Nery**.

Essa localização é particularmente relevante do ponto de vista hidrogeológico, pois o município está inserido em área de ocorrência do **Sistema Aquífero Guarani (SAG)** e apresenta condições geológicas e geomorfológicas diversificadas, que influenciam diretamente o processo de recarga.

Figura 7 - Localização da área de estudo.



Fonte: Pereira, L.A. (2025)

4.1.1.2 Clima

A área de estudo encontra-se na faixa tropical do hemisfério sul, sob a classificação **Cwa** de Köppen — clima tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso (PEEL et al., 2007). O regime climático é controlado por três massas de ar principais: **tropical atlântica (MTA)**, **polar atlântica (MPA)** e **equatorial continental (MEC)**, cuja alternância define a sazonalidade regional (LORANDI et al., 2001).

A temperatura média do mês mais quente ultrapassa **22 °C**, enquanto a do mês mais frio é inferior a **18 °C**, com precipitações concentradas entre **outubro e março**. Esse padrão sazonal exerce influência direta sobre a recarga, já que o período úmido coincide com maior infiltração e recarga efetiva dos aquíferos, enquanto o período seco está associado à predominância de evapotranspiração (MUDO,2000).

Para a caracterização espacial da precipitação, o município foi subdividido em três áreas (norte, sul e alta), considerando a variação espacial da pluviosidade. Foram utilizados dados de

três postos pluviométricos (Tabela 5), obtidos junto ao **DAEE-SP** e à **ANA**, referentes a uma série histórica de **10 anos (2010–2020)**.

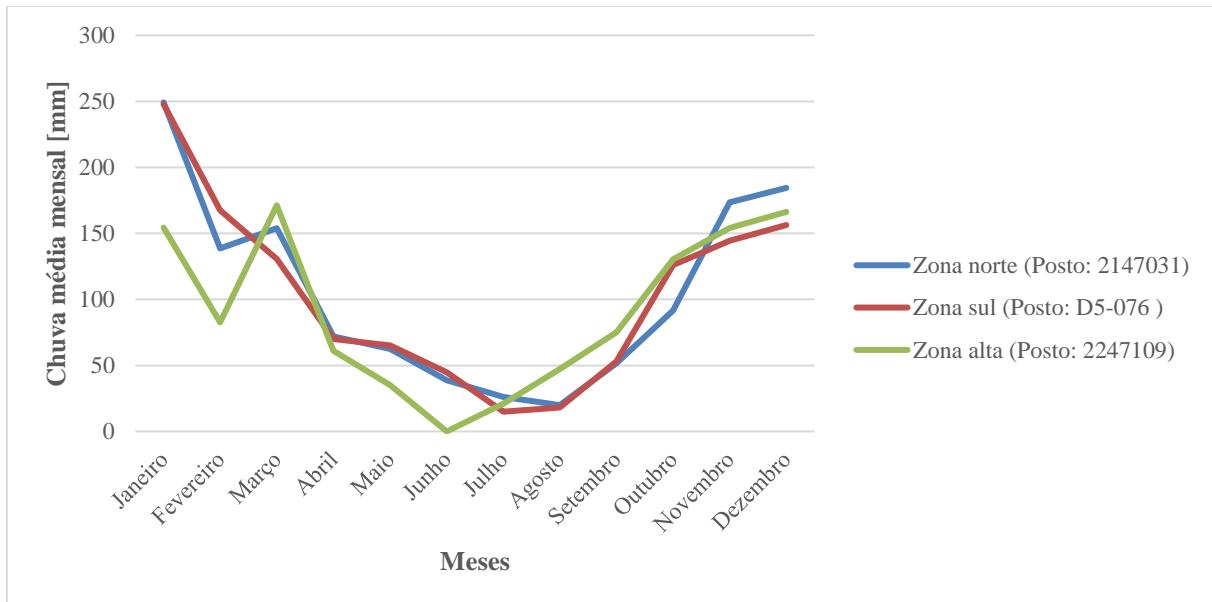
Tabela 5 - Propriedades dos postos pluviométricos dos bancos de dados.

Posto	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Curso d'água
D5-076	FAZENDA ÁGUA BRANCA	580	22°04'03"S	48°02'46"W	JACARE-GUACU,R
2147031	SANTA EUDOXIA	620	21°47'00"S	47°47'00"W	-
2247109	SÃO CARLOS	870	22°01'00"S	47°53'00"W	-

Fonte: DAEE e ANA.

O gráfico 1 apresenta o comportamento mensal da precipitação nos três postos, evidenciando um padrão semelhante — com picos entre dezembro e fevereiro e estiagem de abril a setembro. Esse regime define a sazonalidade do balanço hídrico local, controlando a taxa de recarga direta dos aquíferos livres.

Gráfico 1 - Padrões de Chuvas Mensais (2010-2020) dos postos 2147031, D5-076 e 2247109.



Fonte: DAEE e ANA.

4.1.1.3 Vegetação

A vegetação original da região é composta por formações do **Cerrado**, com variações de **campo cerrado, cerradão e matas ciliares**. Atualmente, restam apenas fragmentos esparsos dessas fisionomias, devido à expansão da **pecuária e da cultura da cana-de-açúcar**, predominantes no município (MULO, 2000).

Em áreas de relevo mais acidentado, com declividades superiores a **20%**, a vegetação nativa encontra-se relativamente preservada (MULO, 2000). Esses remanescentes exercem

papel fundamental na **proteção do solo contra a erosão**, na **regulação da infiltração** e na **redução do escoamento superficial**, contribuindo positivamente para a recarga das águas subterrâneas (MURO,2000).

4.1.1.4 Geomorfologia e Pedologia

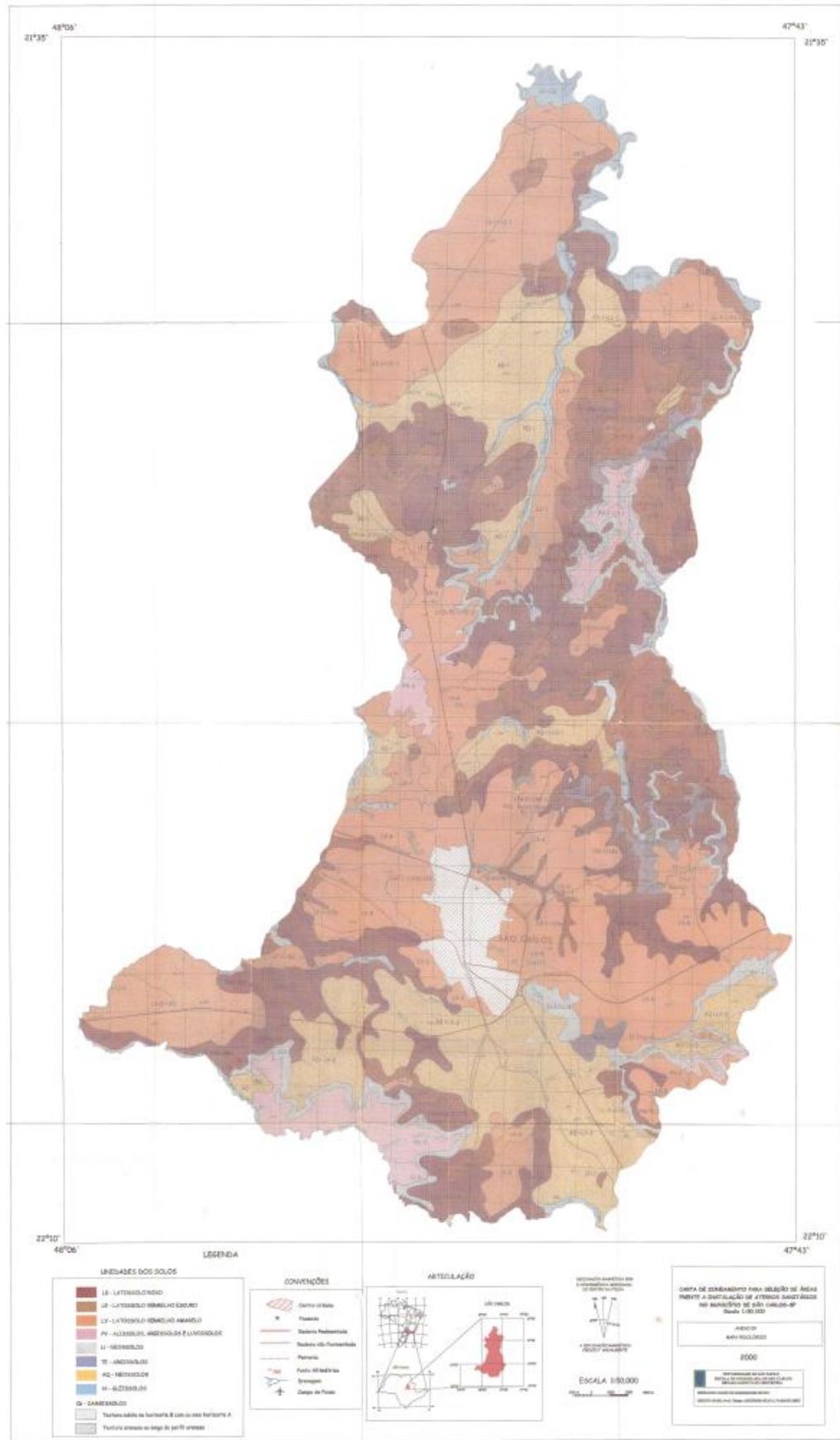
De acordo com a divisão geomorfológica proposta pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (1981), o município de São Carlos está inserido predominantemente na Província das Cuestas Basálticas, enquanto a porção ocidental pertence à Província do Planalto Ocidental Paulista. Essa configuração reflete um relevo caracterizado por altos estruturais, escarpas íngremes e extensas superfícies suavemente onduladas, resultantes da dissecação diferencial das rochas sedimentares e vulcânicas da Bacia do Paraná. (MURO,2000).

As altitudes variam entre 600 e 1.020 metros, com predominância de encostas suaves a moderadas (declividades inferiores a 15°), intercaladas por zonas de escarpas íngremes com declividades que podem atingir 45° a 70° (NISHIYAMA; ZUQUETTE, 1994). Essa variação topográfica exerce influência direta sobre o escoamento superficial e o potencial de infiltração, sendo as áreas mais suaves naturalmente mais favoráveis à recarga, enquanto as escarpas atuam como zonas de drenagem e escoamento concentrado (MURO,2000).

Os solos da região resultam da alteração e desagregação de basaltos, diabásios, arenitos e sedimentos recentes, apresentando em geral pH ácido, altos teores de alumínio trocável e baixa fertilidade natural (LORANDI et al., 2001). São identificadas as seguintes classes pedológicas: Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Roxo, Podzólico Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada, Areias Quartzosas, Solos Litólicos, Solos Hidromórficos e Solos Concrecionários (OLIVEIRA; PRADO, 1984; LORANDI et al., 2001).

Esses tipos de solo apresentam comportamentos distintos frente à infiltração: os latossolos e terras roxas estruturadas, por sua elevada porosidade e boa drenagem, favorecem a recarga; já os solos hidromórficos e concrecionários apresentam baixa permeabilidade, restringindo o fluxo descendente da água (MURO,2000).

Figura 8 - Mapa pedológico.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

4.1.1.5 Hidrologia e Hidrogeologia

O município de São Carlos abrange seis das dez principais bacias hidrográficas regionais: Quilombo, Araras, Chibarro, Cabaceiras, Monjolinho e Mogi-Guaçu (Figura 9). A rede de drenagem apresenta padrão dendrítico a subdendrítico, típico de terrenos sedimentares e vulcânicos com fraturas e lineamentos estruturais, o que influencia a direção preferencial do fluxo superficial e subsuperficial (MURO,2000).

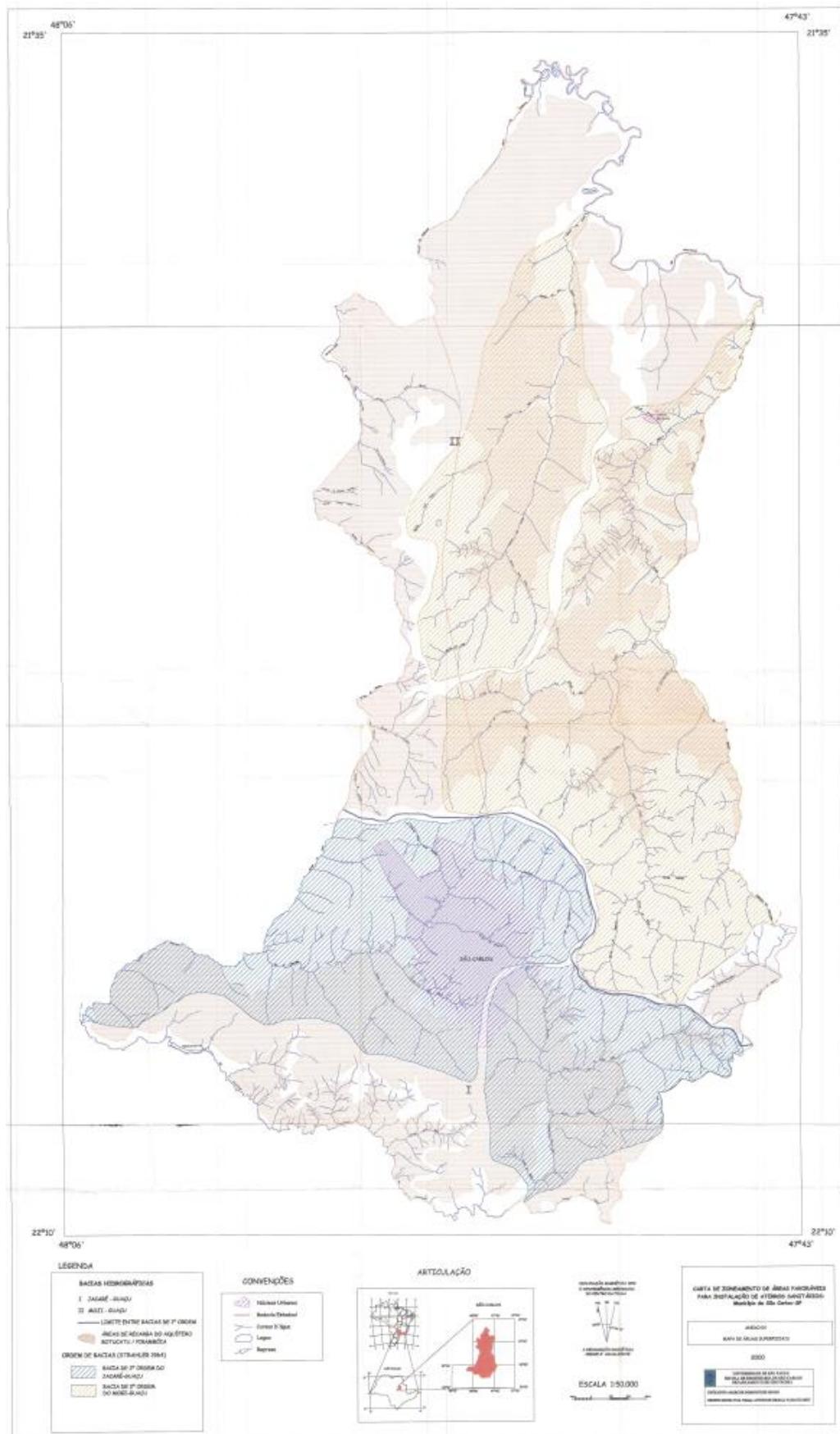
Hidrogeologicamente, a área é sustentada por dois sistemas principais (MURO,2000).:

- o Sistema Aquífero Guarani (Formações Botucatu e Pirambóia), de natureza porosa e granular, e
- o Sistema Aquífero Serra Geral, constituído por derrames basálticos fraturados.

A recarga do Aquífero Guarani ocorre predominantemente nos afloramentos das Formações Botucatu e Pirambóia, e secundariamente pelas zonas de fraturas dos basaltos em áreas de topo elevado (altos estruturais). O sistema Serra Geral, por sua vez, atua como aquífero fraturado, com condutividade hidráulica mais variável e dependente da densidade e abertura das fraturas (MURO,2000).

As vazões típicas observadas em poços tubulares variam de 40 a 80 m³/h para o Aquífero Guarani e de 7 a 100 m³/h para o Serra Geral, que evidencia boas condições de armazenamento e potencial de exploração (MURO,2000).

Figura 9. Mapa hidrográfico da área de estudo.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

4.1.2 Descrição e Características Geológico-Geotécnicas da Áreas

4.1.2.1 Topografia e Declividade

O relevo exerce papel fundamental na dinâmica da recarga e do escoamento superficial, uma vez que controla o tempo de permanência da água na superfície e, consequentemente, o volume infiltrado. Declividades elevadas associadas a chuvas intensas promovem escoamento superficial acentuado e menor infiltração, enquanto relevos suaves favorecem a retenção da água e o aumento da recarga subsuperficial (MURO,2000).

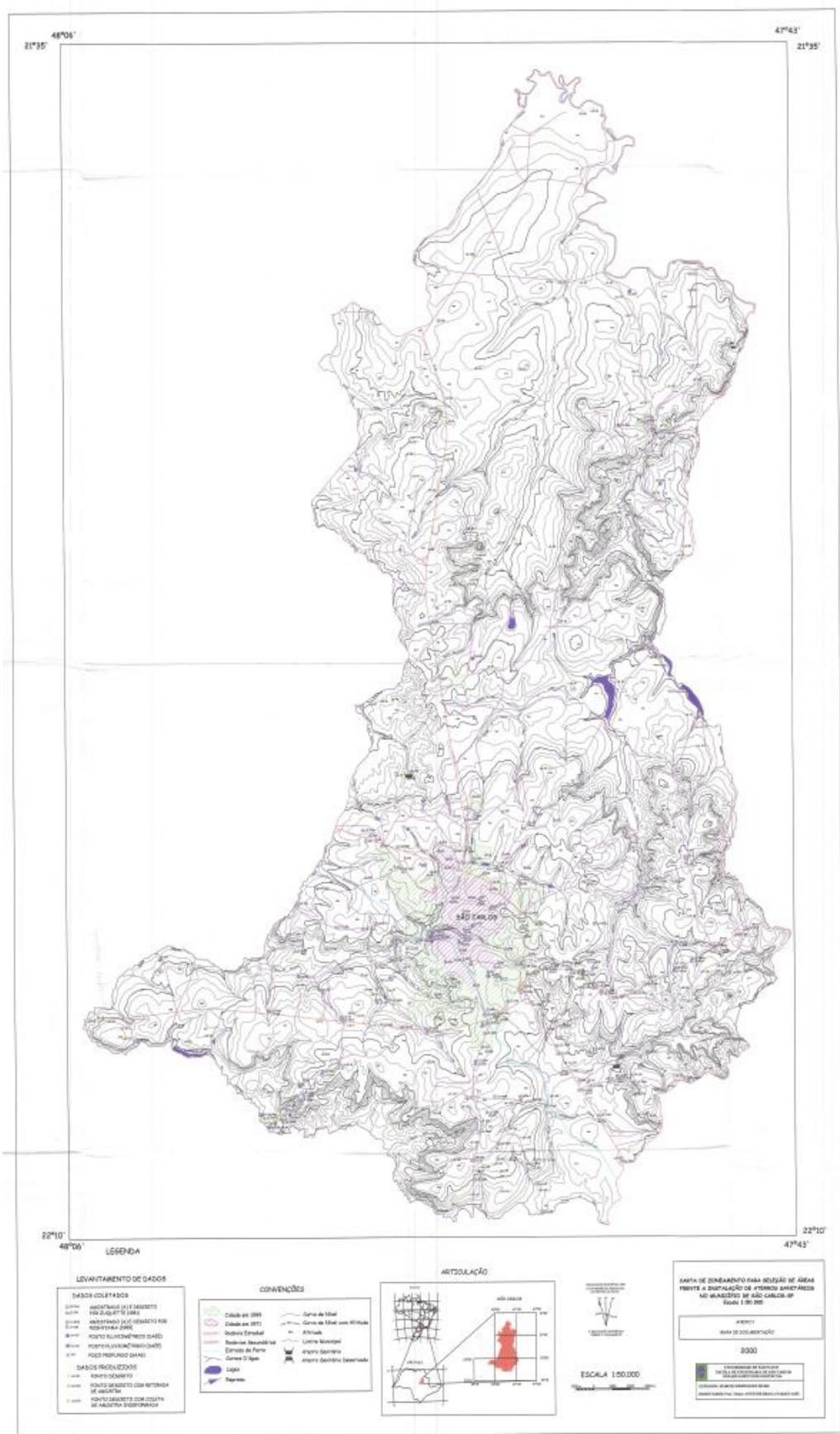
O mapa topográfico (Figura 10), IBGE (1992), adaptado por MURO (2000) (escala 1:50.000) com equidistância de 20 metros entre curvas de nível, mostra que a maior parte do município apresenta relevo suave a ondulado, com poucas áreas de declividades acentuadas.

A carta de declividade (Figura 11), derivada do Modelo Digital do Terreno (MDT), evidencia as variações altimétricas e permitiu a classificação do relevo em quatro classes, conforme Zuquette e Failache (2018):

- < 5%: relevo plano a suave ondulado (alta infiltração);
- 5–15%: relevo ondulado (infiltração moderada);
- 15–30%: relevo forte ondulado (escoamento predominante);
- 30%: relevo montanhoso ou escarpado (escoamento acentuado).

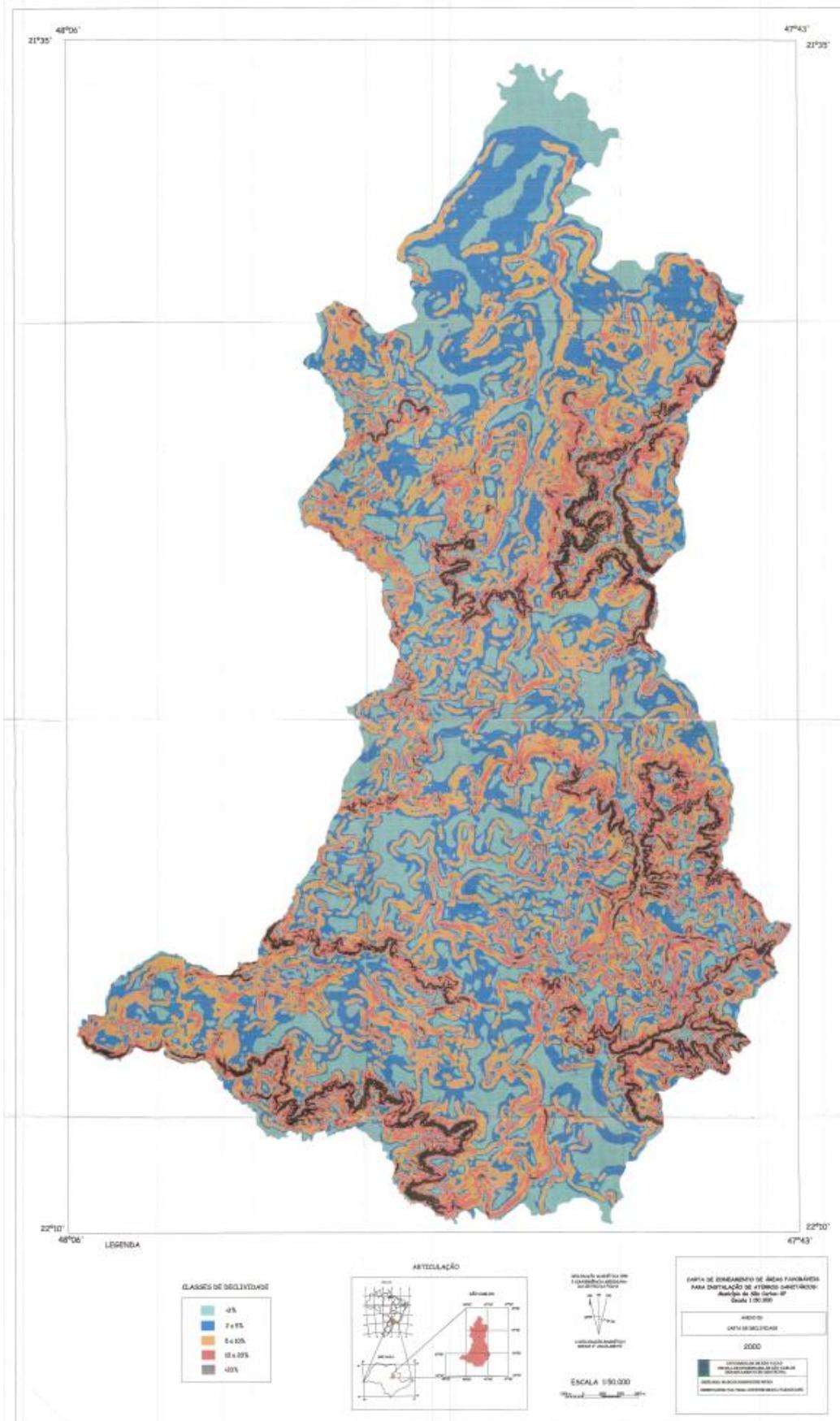
Essas classes foram utilizadas posteriormente na elaboração das cartas de vulnerabilidade e recarga, demonstrando a relação direta entre declividade e potencial de infiltração.

Figura 9 - Mapa topográfico.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

Figura 10. Carta de declividade.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

4.1.2.2 Materiais Geológicos

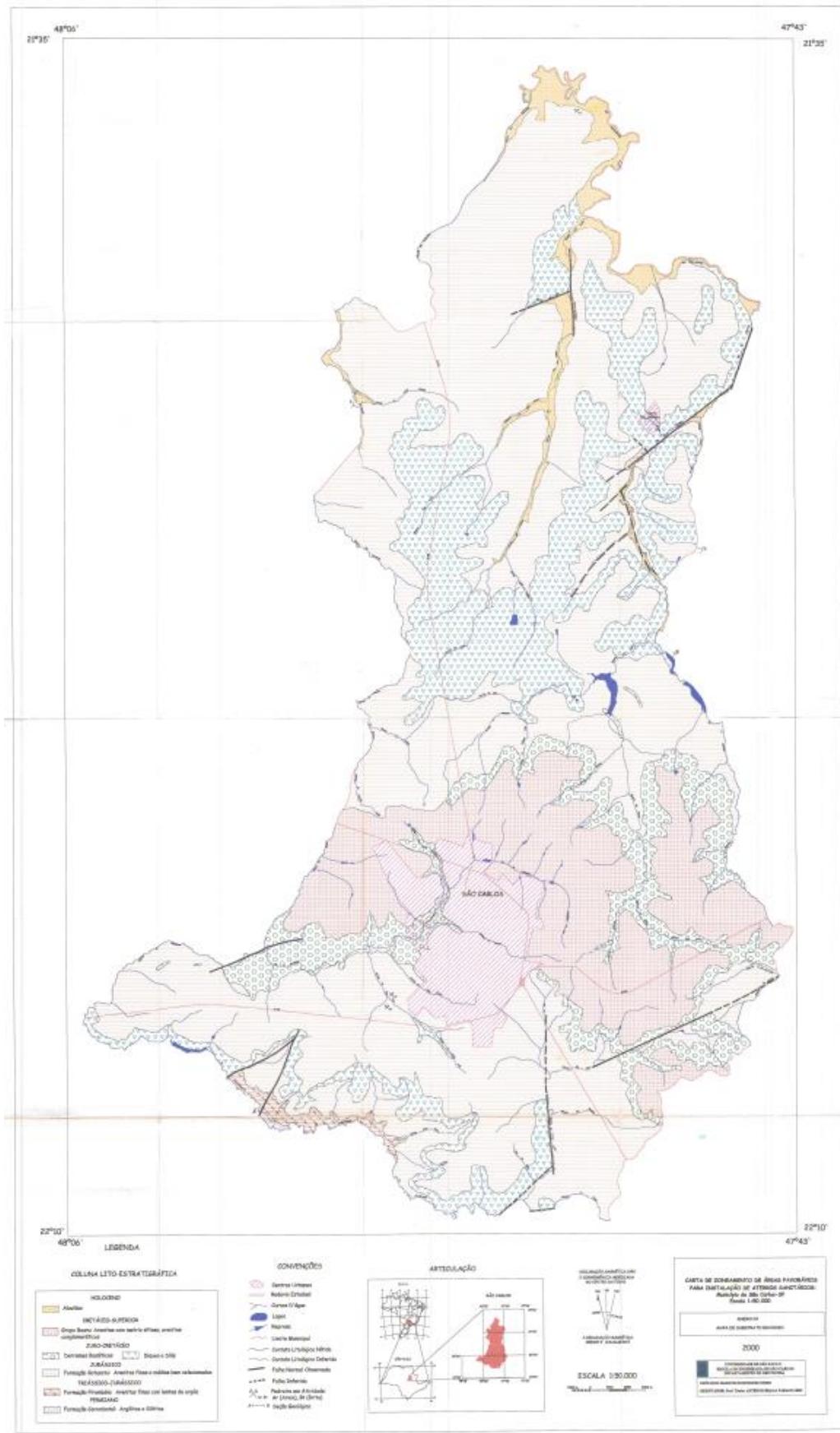
Os materiais geológicos compreendem o conjunto de **rochas e sedimentos**, consolidados ou inconsolidados, que compõem a crosta terrestre. Esses materiais formam uma estrutura porosa, cujos vazios podem estar preenchidos por ar e/ou água, desempenhando papel essencial nos processos de **infiltração, armazenamento e circulação da água subterrânea** (MURO,2000).

Na área de estudo, esses materiais foram agrupados em duas categorias principais: **substrato rochoso e materiais inconsolidados**, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13 (MURO,2000).

4.1.2.2.1 *Substrato Rochoso*

A Figura 12 apresenta as formações geológicas que afloram na área de estudo, destacando-se as **Formações Itaqueri, Pirambóia, Botucatu e Serra Geral**, além dos **depósitos aluvionares e intrusões de diques e sills**.

Figura 11. Mapa de substrato rochoso.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

A Formação Itaqueri é composta por arenitos conglomeráticos e conglomerados, com fragmentos de rochas e minerais variados, intercalados por siltitos. Os depósitos indicam um ambiente de alta energia, possivelmente leques aluviais em clima árido, recobertos por sedimentos cenozoicos arenosos e coluvionares (MASSOLI, 2007). Do ponto de vista hidrogeológico, a textura predominantemente arenosa favorece a permeabilidade local, especialmente nas zonas de fraturas.

A Formação Pirambóia, base do Grupo São Bento, apresenta camadas arenosas avermelhadas e amareladas, intercaladas com siltitos e folhelhos. Depositionalmente fluvial, sua estratificação plano-paralela e cruzada confere boa permeabilidade vertical, sendo uma das principais zonas de recarga do Sistema Aquífero Guarani (MURO, 2000).

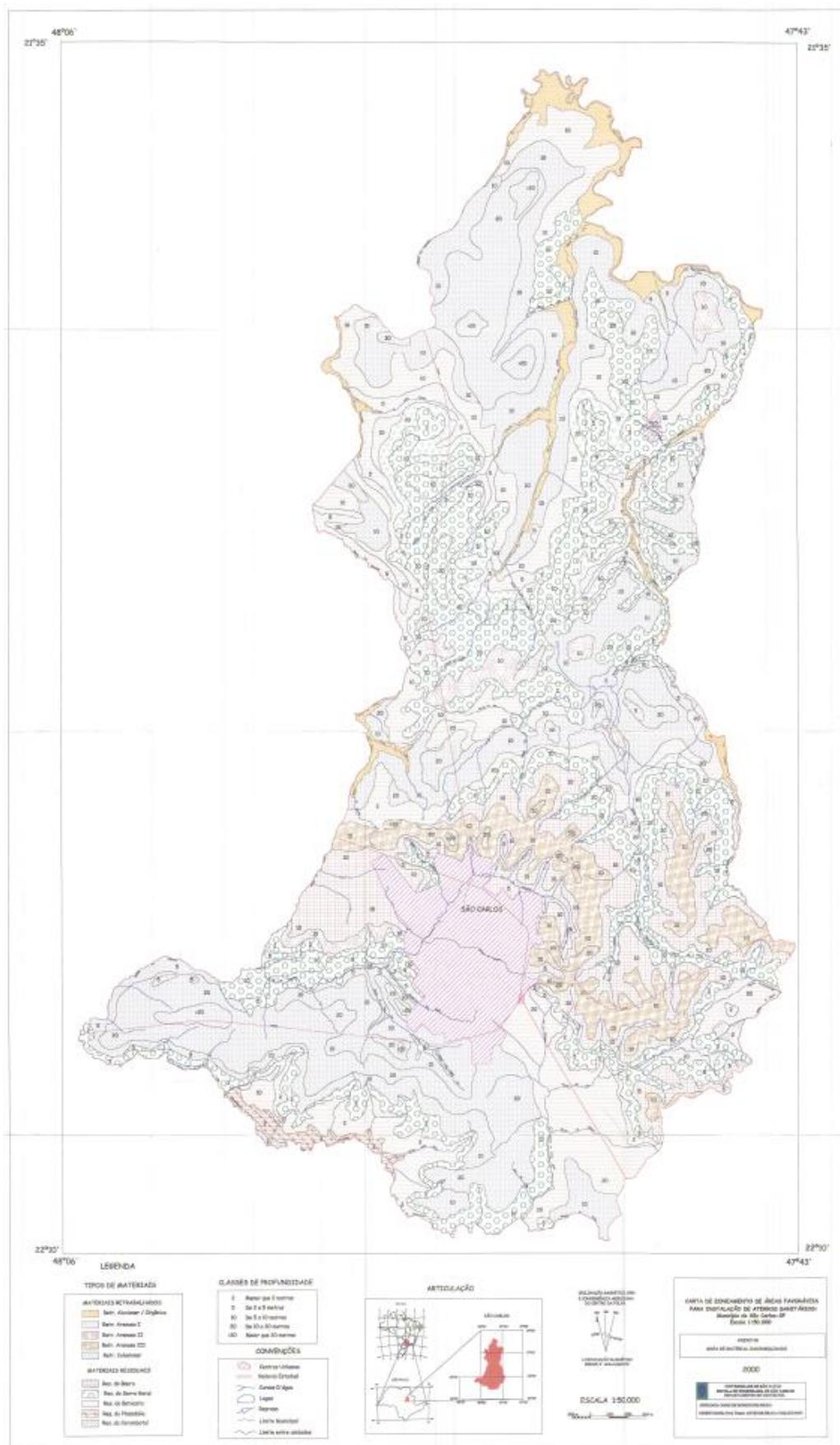
A Formação Botucatu representa o depósito desértico e eólico do Grupo São Bento, composta por arenitos de granulação fina a média, bem arredondados e de superfície fosca. Sua alta porosidade e permeabilidade a tornam uma das principais unidades aquíferas do país. Localmente, é recoberta por basaltos da Formação Serra Geral, o que gera condições favoráveis à recarga em zonas de afloramento e fraturamento (MURO, 2000).

Originada por derrames basálticos de vulcanismo fissural, a Formação Serra Geral é constituída por rochas basálticas afaníticas, de cor cinza-escura, intercaladas com arenitos interderrames (intertrapps). Apesar de a rocha matriz apresentar baixa permeabilidade primária, o sistema fraturado resultante de resfriamento e tectonismo confere boa permeabilidade secundária, tornando-se importante para o armazenamento e transmissão da água subterrânea (MURO, 2000).

4.1.2.2 Materiais Inconsolidados

Os materiais inconsolidados resultam do intemperismo físico e químico das rochas do substrato rochoso, podendo ocorrer *in situ* (residuais) ou após transporte e deposição (retrabalhados). Esses materiais são fundamentais na avaliação da recarga, pois controlam a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica do solo (MURO, 2000).

Figura 12 - Mapa de material inconsolidado.



Fonte: IBGE (1992), adaptado por MURO (2000).

Materiais Inconsolidados Residuais

Argilosos da Formação Serra Geral: Originados a partir do intemperismo dos basaltos, esses materiais possuem textura argilosa, coloração marrom-avermelhada e espessuras reduzidas. Sua condutividade hidráulica varia entre 10^{-5} e 10^{-8} m/s, e o índice de vazios entre 0,8 e 1,0. Por apresentarem alta fração de argila (23–60%), têm baixa permeabilidade, atuando como barreiras parciais à infiltração e condicionando o fluxo lateral (MURO,2000).

Argilosos da Formação Itaqueri: Com espessuras de até 20 m e textura argilo-arenosa, esses materiais ocorrem em posições intermediárias do relevo, apresentando permeabilidade moderada e importância local para a recarga (MURO,2000).

Arenosos da Formação Pirambóia: Com frações de areia de até 90% e condutividade hidráulica entre 10^{-5} e 10^{-7} m/s, esses materiais exibem elevado potencial de infiltração, sobretudo nas porções mais baixas das vertentes. A granulometria areno-siltosa e a presença de quartzo e caulinita favorecem alta porosidade efetiva, tornando-os zonas preferenciais de recarga (MURO,2000).

Arenosos da Formação Botucatu: Localizados em áreas de baixa declividade (<10%), esses materiais apresentam textura arenosa (até 90% de areia) e boa drenagem natural, favorecendo a infiltração direta em planícies e vales. A presença de quartzo e gibbsita confere estabilidade física, mas baixa retenção de umidade (MURO,2000).

Arenosos da Formação Itaqueri: Com espessuras de até 20 m, são formados por areias finas a médias, intercaladas por estratos siltosos. A condutividade hidráulica moderada e a presença de minerais como quartzo e esmectita indicam bom potencial de recarga, embora susceptíveis à compactação (MURO,2000).

Materiais Inconsolidados Retrabalhados

Argilosos (coluvionares): Ocorrentes ao pé de encostas associadas à Formação Serra Geral, esses materiais resultam do transporte de curta distância, mantendo composição semelhante à rocha de origem. Apresentam granulometria fina (23–60% argila) e índice de vazios entre 0,95 e 1,24, indicando baixa condutividade e tendência a escoamento lateral. Atuam, portanto, como barreiras parciais à recarga vertical (MURO,2000).

Arenosos (aluvionares e coluvionares): Encontrados em fundos de vale e topos suavemente ondulados, esses materiais possuem fração arenosa de até 90%, espessuras médias inferiores a 15 m e distribuição granulométrica homogênea. Apresentam boa drenagem e elevada condutividade, funcionando como zonas preferenciais de infiltração e recarga (MURO,2000).

Relação com o Potencial de Recarga

A combinação entre as formações geológicas e os materiais inconsolidados define zonas de recarga diferenciadas:

- Alta recarga: Formações Botucatu e Pirambóia, e materiais arenosos residuais e retrabalhados.
- Recarga intermediária: Formações Itaqueri e materiais argilo-arenosos.
- Baixa recarga: Formação Serra Geral e materiais argilosos residuais e coluvionares.

Essas relações foram fundamentais na elaboração do modelo conceitual e dos mapas de vulnerabilidade e potencial de recarga discutidos nas seções seguintes.

4.1.3 Contextualização do meio antrópico: uso do solo e áreas contaminadas

4.1.3.1 Uso e ocupação do solo

A caracterização do uso e ocupação do solo no município de São Carlos (SP) (Figura 13) foi elaborada a partir dos dados disponibilizados pela Plataforma MapBiomas – Coleção 8.0 (2024), que integra informações obtidas por sensoriamento remoto e classificação automática da cobertura e uso da terra para todo o território nacional. O recorte espacial do município foi extraído conforme os limites oficiais do IBGE (2022) e reclassificado para fins de compatibilidade com as análises hidroambientais realizadas neste trabalho.

De acordo com os dados de 2024, o território de São Carlos apresenta predomínio de áreas antrópicas, refletindo a forte influência urbana e agropecuária sobre o ambiente natural. As áreas de pastagem e agricultura (principalmente culturas temporárias) correspondem à maior parcela da superfície municipal, ocupando conjuntamente aproximadamente 55–60% do território. Essas classes concentram-se nas porções centro-sul e oeste do município, sobre solos de boa fertilidade e declividades suaves, que favorecem a mecanização agrícola. Essa predominância revela o papel histórico de São Carlos como área de uso agropecuário consolidado, associando-se à intensa fragmentação da cobertura vegetal nativa.

A área urbana consolidada representa cerca de 15–20% da superfície municipal, localizada majoritariamente na porção centro-sul, coincidindo com o perímetro urbano principal e os distritos industriais adjacentes. Essa concentração espacial coincide com as zonas de maior impermeabilização do solo, as quais, conforme observado nas cartas de recarga e contaminação, tendem a apresentar baixo potencial de infiltração e elevado risco de

contaminação superficial devido ao acúmulo de efluentes, resíduos sólidos e escoamento concentrado.

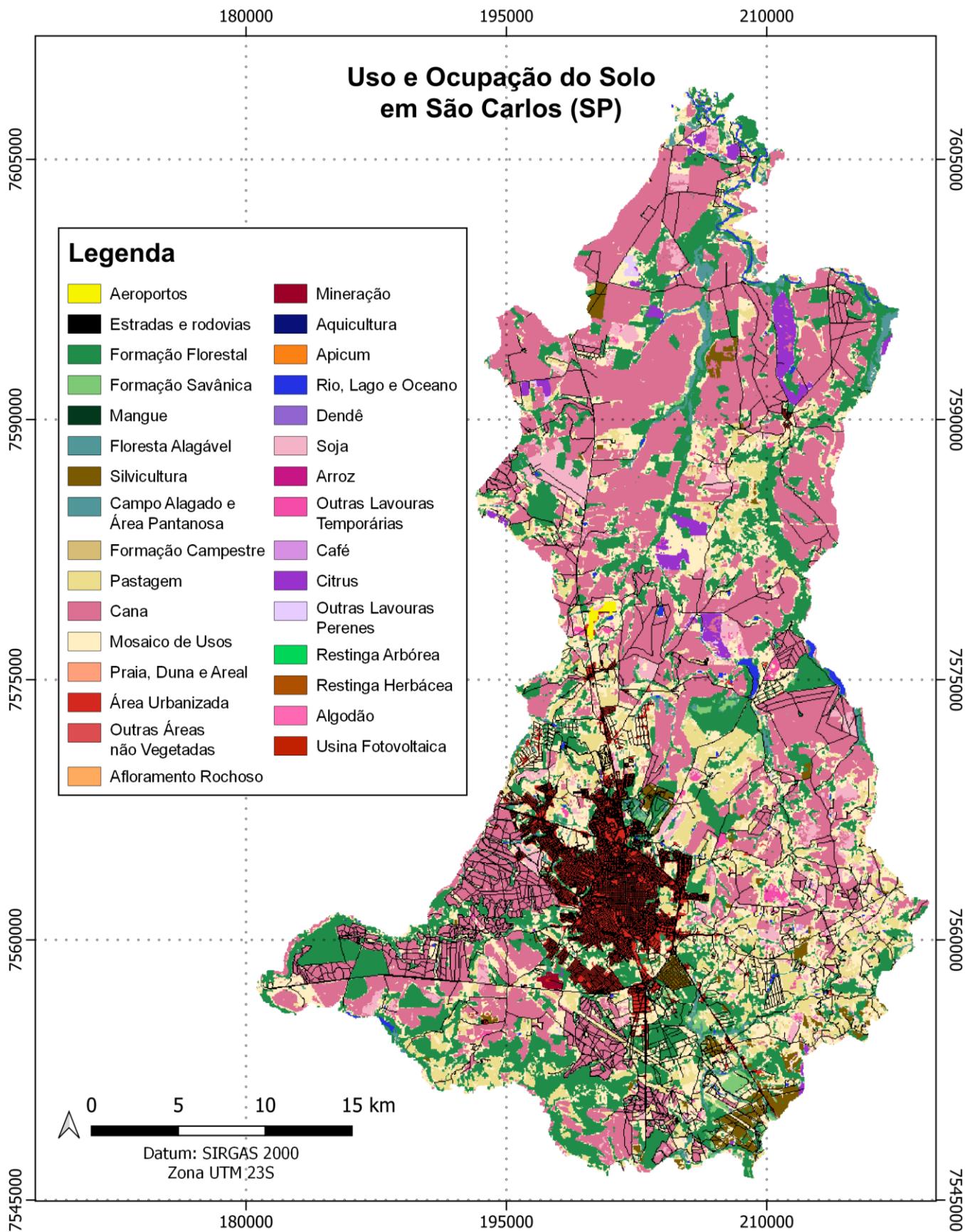
As formações florestais e vegetação natural remanescente abrangem aproximadamente 15% do território, distribuindo-se de forma fragmentada, principalmente nas porções norte e leste do município, ao longo de vales fluviais e encostas. Essas áreas exercem papel essencial na proteção de nascentes e na regulação hídrica local, atuando como zonas preferenciais de infiltração e mitigação de impactos difusos. Contudo, o padrão espacial identificado sugere fragmentação acentuada e desconexão ecológica, reduzindo a eficiência desses remanescentes na manutenção da qualidade ambiental e da recarga subterrânea.

Outras classes observadas, como reflorestamentos com espécies exóticas e áreas de mineração, correspondem a uma fração menor da superfície (inferior a 5%), mas exercem papel relevante na alteração do balanço hídrico e no aumento da vulnerabilidade do solo à erosão e à contaminação.

De modo geral, a análise do uso e ocupação do solo demonstra que aproximadamente 75% do município apresenta uso antrópico consolidado, com predomínio de pastagens, agricultura e áreas urbanizadas, em detrimento das formações naturais. Essa configuração territorial está diretamente associada às pressões sobre as zonas de recarga do aquífero freático, já que a conversão de áreas permeáveis em superfícies impermeáveis reduz a infiltração e potencializa os fluxos de contaminação superficial e subsuperficial.

A distribuição espacial dessas classes será utilizada como base interpretativa para a análise das cartas de recarga e potencial de contaminação apresentadas nas seções seguintes, permitindo compreender como o uso do solo influencia os processos de infiltração, escoamento e transporte de contaminantes no município.

Figura 13 - Uso e Ocupação no município de São Carlos (SP)



Fonte: Adaptado de Plataforma MapBiomas – Coleção 8.0 (2024).

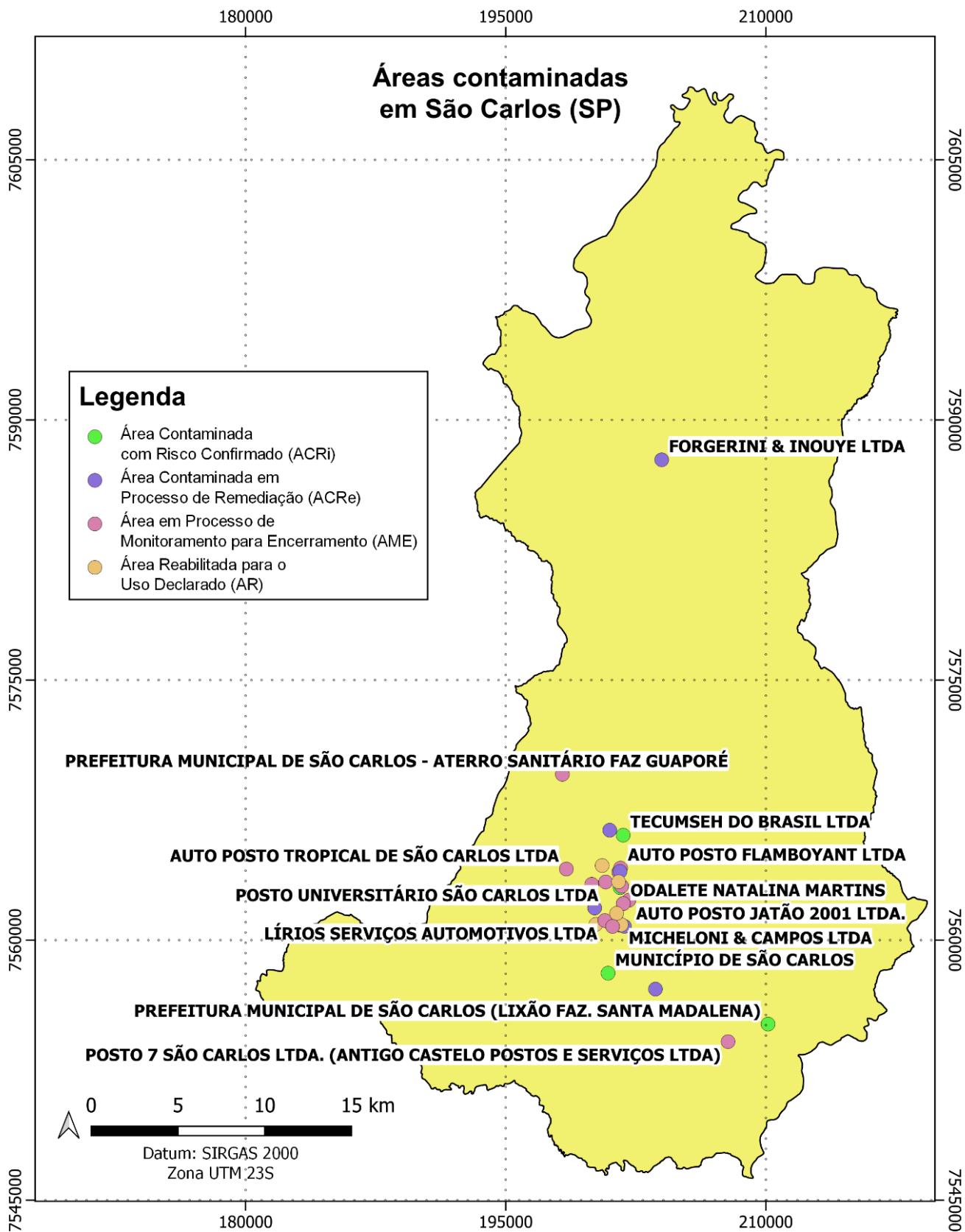
4.1.3.2 Áreas contaminadas

As fontes pontuais listadas na tabela 6, foram obtidas a partir do Inventário de Áreas Contaminadas e Reabilitadas da CETESB (2019), que reúne empreendimentos com potencial de contaminação em função de suas atividades. O levantamento reúne informações referentes à razão social dos empreendimentos, atividade desenvolvida, classificação ambiental atribuída pela CETESB e localização espacial dos pontos. Esses dados constituem a principal fonte oficial de monitoramento e controle dos passivos ambientais do Estado de São Paulo.

A Figura 14 ilustra a distribuição espacial das áreas contaminadas, permitindo visualizar a concentração e o padrão de dispersão dessas ocorrências no território municipal. Observa-se que as áreas se encontram majoritariamente nas regiões urbanizadas, coincidindo com eixos de infraestrutura consolidada e presença de atividades potencialmente poluidoras, como postos de combustíveis, oficinas mecânicas, indústrias metalúrgicas e áreas de disposição de resíduos. Essa distribuição acompanha a lógica do uso e ocupação do solo, refletindo o histórico de desenvolvimento urbano e industrial de São Carlos.

A análise conjunta entre o mapa de áreas contaminadas e as cartas de recarga subterrânea apresentadas nos tópicos seguintes fornece subsídios para compreender a relação entre as fontes pontuais de contaminação e as zonas de recarga do aquífero, etapa fundamental para a hierarquização do risco ambiental e o planejamento territorial sustentável do município.

Figura 14 - Áreas contaminadas e reabilitadas no município de São Carlos segundo o banco de dados da CETESB (2019)



Fonte: CETESB (2019).

Tabela 6 - Áreas contaminadas e reabilitadas no município de São Carlos segundo o banco de dados da CETESB (2019).

Razão Social	Atividade	Classificação	Localização
ARTAM COMÉRCIO DE COMBUSTÍVEIS LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA AV.DR.TEIXEIRA DE BARROS, 1258
AUTO POSTO BANDEIRA 3 LTDA	Auto posto	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA DR CARLOS BOTELHO, 2120
AUTO POSTO BANDEIRA 6 LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi)	RUA XV DE NOVEMBRO, 2063
AUTO POSTO E LANCHONETE JÓIA DE SÃO CARLOS LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA PROCÓPIO DE TOLEDO MALTA, 285
AUTO POSTO FLAMBOYANT LTDA	Posto de combustível	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA PROF. LUIZ DE OLIVEIRA, 366
AUTO POSTO JATÃO 2001 LTDA.	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA SÃO PAULO, 964
AUTO POSTO TROPICAL DE SÃO CARLOS LTDA	Auto posto	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA BRUNO RUGGIERO FILHO, 1157

DHS RANKS REVENDA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO LTDA	Auto posto	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	RUA ORLANDO DAMIANO, 2000
ELECTROLUX DO BRASIL S.A.	Máquinas de lavar roupas para uso doméstico; fabricação de	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	AVENIDA JOSÉ PEREIRA LOPES, 250
FORGERINI & INOUYE LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	RUA LOURENCO INOCENTINI, 700
FUTUROS SHOPPING, CONDOMÍNIO RESID. E HOTEL (A.W. FABER CASTELL S/A)	-	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	
INOUYE E FORGERINI LTDA	Posto de abastecimento de veículos	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	RUA PROF. LUIZ AUGUSTO DE OLIVEIRA, 130
LÍRIOS SERVIÇOS AUTOMOTIVOS LTDA	Posto de abastecimento de veículos	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA SALUM, 861
MICHELONI & CAMPOS LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	AVENIDA SÃO CARLOS, 233
MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS	Administração pública em geral	Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi)	RUA EPISCOPAL, 1575

ODALETE NATALINA MARTINS	COMBUSTÍVEIS PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES (POSTOS REVENDEDORES), COMÉRCIO	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA GEMINIANO COSTA, 844
POSTO 7 SÃO CARLOS LTDA. (ANTIGO CASTELO POSTOS E SERVIÇOS LTDA)	Posto de abastecimento de veículos	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RODOVIA WASHINGTON LUIZ,
POSTO GRÉCIA DE SÃO CARLOS LTDA	Posto de abastecimento de veículos	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	RUA HENRIQUE GREGORI, 859
POSTO JARDIM ALVORADA DE SÃO CARLOS LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	AVENIDA FRANCISCO PEREIRA LOPES, 1201
POSTO JARDIM SANTA PAULA DE SÃO CARLOS LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	RUA DOUTOR VIRIATO FERNANDES NUNES, 40
POSTO PANTANAL BORBA GATO LTDA	Posto de abastecimento de veículos	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	RUA GETULIO VARGAS, 60
POSTO PANTANAL FENIX LTDA	Combustíveis e lubrificantes para veículos; comércio varejista	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA CAPITÃO ALBERTO MENDES JR, 20
POSTO UNIVERSITÁRIO SÃO CARLOS LTDA	Posto de combustível	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	RUA CAPITÃO ADÃO PEREIRA DE SOUZA CABRAL, 883

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS - ATERRO SANITÁRIO FAZ GUAPORÉ	Aterros sanitários; gestão de	Área em Processo de Monitoramento para Encerramento (AME)	FAZENDA GUAPORÉ, S/N
PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS (LIXÃO FAZ. SANTA MADALENA)	-	Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi)	-
SUPERMERCADO SAVEGNAGO (SAVEGNAGO EMPR. E PART.) (ANT POSTO ITÁLIA)	-	Área Reabilitada para o Uso Declarado (AR)	-
TECUMSEH DO BRASIL LTDA	Compressores para uso não-industrial, fabricação de	Área Contaminada com Risco Confirmado (ACRi)	RUA CEL. JOSÉ AUGUSTO DE OLIVEIRA SALLES, 478
VOLKSWAGEN DO BRASIL INDUSTRIA DE VEICULOS AUTOMOTORES LTDA	Blocos do motor, usinados, para veículos rodoviários; fabricação de	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	RODOVIA LUIZ AUGUSTO DE OLIVEIRA, SP-215, S/Nº
Não identificado	Não identificado	Área Contaminada em Processo de Remediação (ACRe)	Não identificado

Fonte: CETESB (2019).

4.2 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS FINAIS

4.2.1 Grupo de climáticos

4.2.1.1 Volume Total Anual de Chuva

A carta de Volume Total Anual de Chuva (Figura 15) apresenta a distribuição espacial da precipitação média anual no município de São Carlos (SP), elaborada a partir dos dados dos

postos pluviométricos D5-076 (Fazenda Água Branca), 2147031 (Santa Eudóxia) e 2247109 (São Carlos), obtidos junto à DAEE-SP e à Agência Nacional de Águas (ANA). Foram considerados os registros do período de 2010 a 2020, representando uma média decenal das condições pluviométricas da região.

Com base na análise dos valores obtidos, o município foi dividido em três zonas pluviométricas principais: Zona Sul, Zona Alta (região central e de maior altitude) e Zona Norte. Essa divisão permitiu compreender melhor as variações espaciais da chuva e seu papel no processo de recarga das águas subterrâneas.

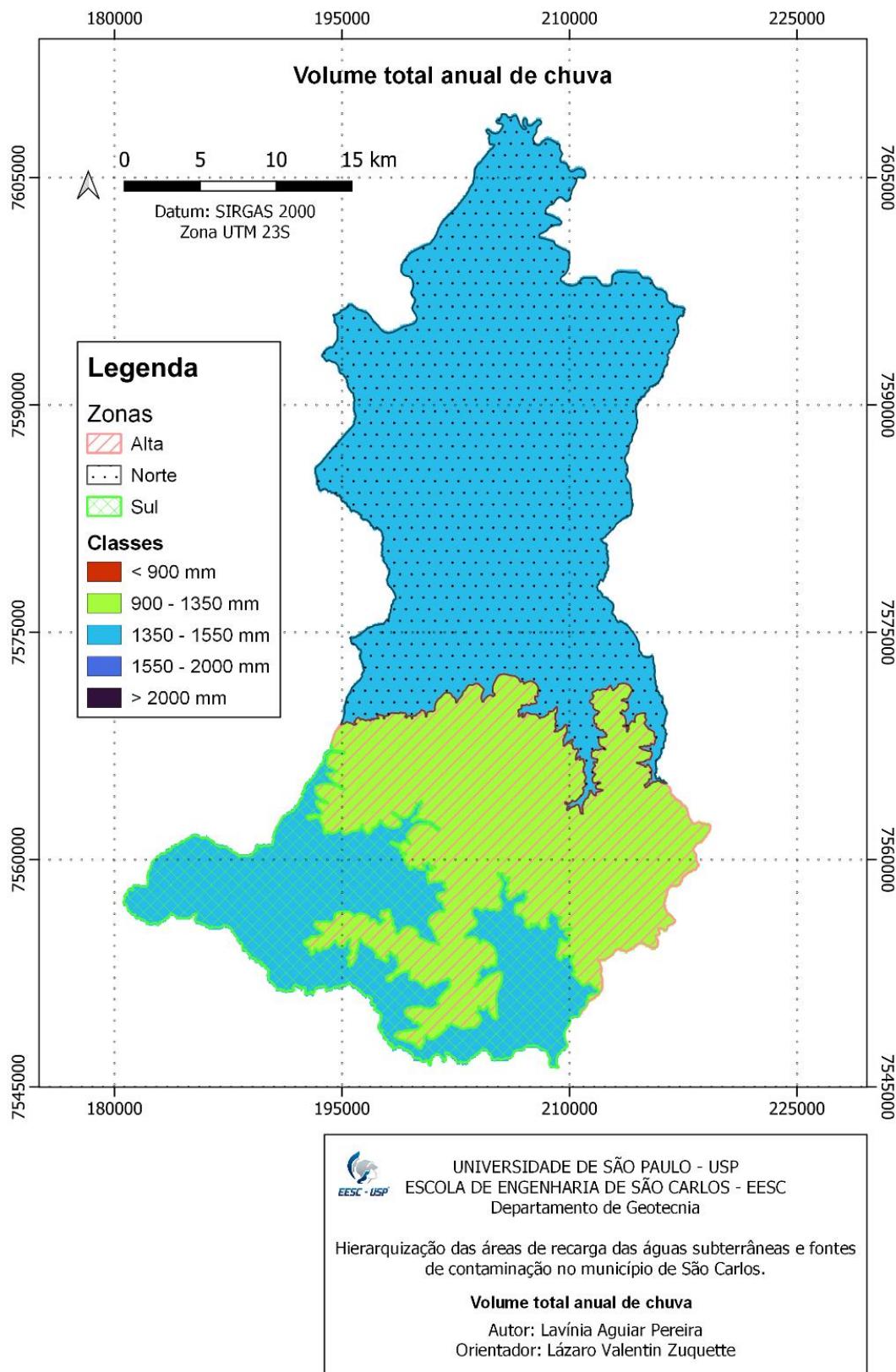
A Zona Alta, localizada no centro do município e correspondendo às cotas mais elevadas do relevo, apresentou os menores volumes anuais de precipitação, variando entre 900 e 1350 mm/ano. Apesar da altitude favorecer o escoamento superficial, a infiltração tende a ser limitada devido à menor disponibilidade hídrica, o que confere a essa zona um baixo potencial de recarga direta.

As Zonas Norte e Sul apresentaram valores semelhantes de precipitação média anual, variando entre 1350 e 1550 mm/ano, mas com condicionantes distintos. A Zona Sul, mesmo recebendo volumes intermediários de chuva, possui declividades acentuadas e solos espessos derivados de rochas basálticas, o que favorece a infiltração em trechos de relevo suave e a recarga difusa ao longo das vertentes.

Já a Zona Norte, caracterizada por relevo mais suave e solos predominantemente arenosos, também apresenta boa permeabilidade, o que permite infiltração significativa mesmo sob volumes pluviométricos moderados.

De forma geral, o padrão observado indica que as extremidades do município (norte e sul) apresentam condições mais favoráveis à recarga das águas subterrâneas, enquanto a região central (alta) tende a atuar como uma zona de menor contribuição hídrica, servindo mais como área de transição entre os dois extremos. Essas diferenças reforçam a importância de integrar o atributo “chuva” aos demais parâmetros — como declividade, solos e materiais geológicos — na determinação das áreas prioritárias de recarga.

Figura 15 - Carta do volume total anual de chuva (mm/ano).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.1.2 Volume Total Anual de Evapotranspiração

A Carta do Volume Total Anual de Evapotranspiração (Figura 16) representa a distribuição espacial da perda de água para a atmosfera por meio dos processos combinados de evaporação e transpiração da vegetação, os quais influenciam diretamente a disponibilidade hídrica para recarga das águas subterrâneas. O mapa foi elaborado com base em dados climáticos regionais correspondentes ao período de 2010 a 2020, considerando o mesmo recorte espacial e a divisão em zonas estabelecida na carta de precipitação: Zona Sul, Zona Alta e Zona Norte.

Os valores de evapotranspiração média anual variam entre 900 e 1550 mm/ano, apresentando um padrão espacial diretamente proporcional à altitude e à exposição solar. As Zonas Alta e Norte concentram as maiores taxas de evapotranspiração, com valores entre 1350 e 1550 mm/ano, enquanto a Zona Sul apresenta valores menores, entre 900 e 1350 mm/ano.

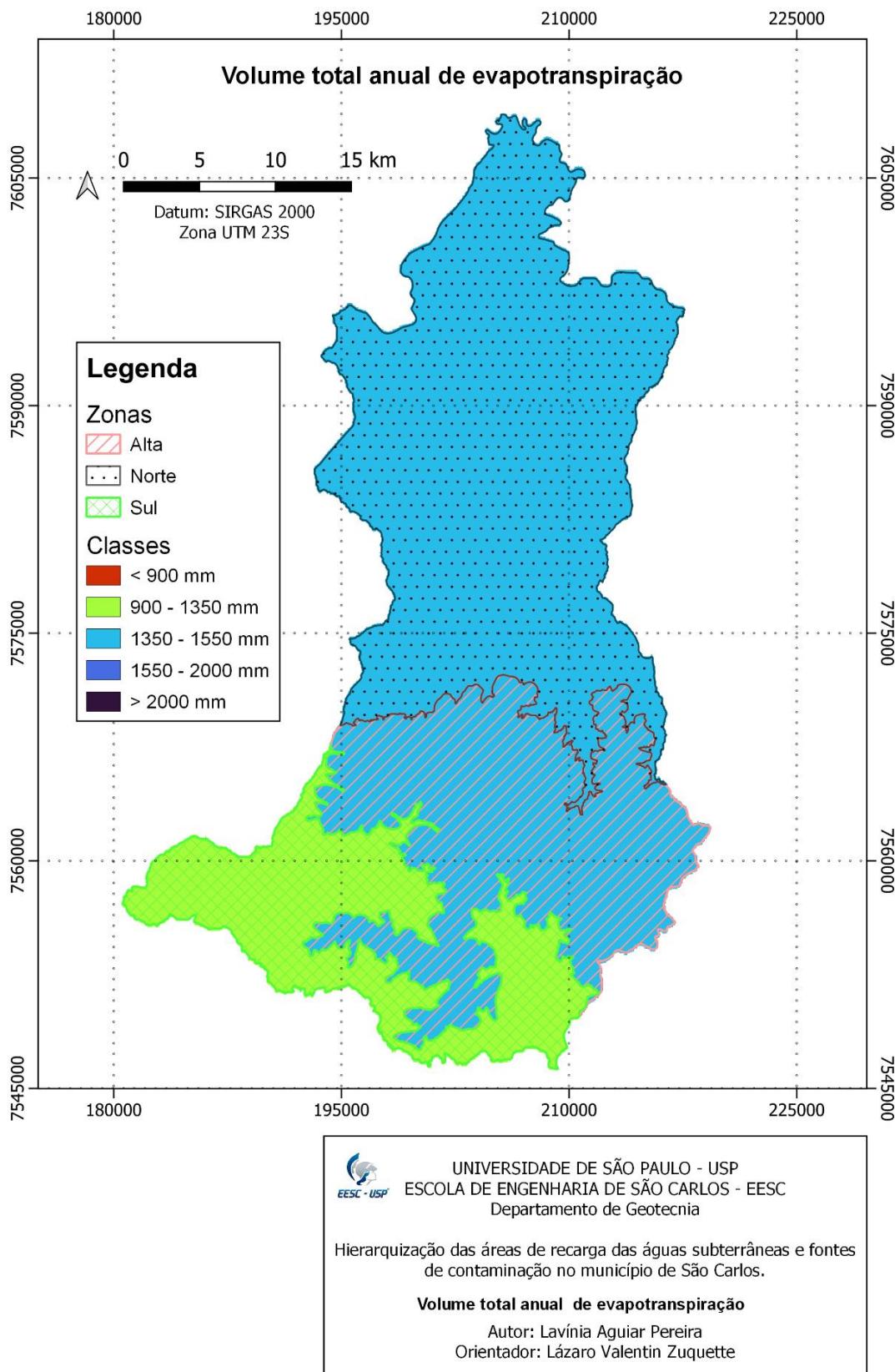
Na Zona Alta, localizada na porção central do município, a combinação de altitudes elevadas, solos menos úmidos e menor índice de chuvas (900–1350 mm/ano) resulta em maior perda de água para a atmosfera e, consequentemente, menor disponibilidade efetiva para infiltração. Trata-se, portanto, de uma área de déficit hídrico relativo, onde o volume perdido por evapotranspiração tende a se aproximar da precipitação anual.

A Zona Norte, embora apresente altas taxas de evapotranspiração (1350–1550 mm/ano), também recebe maiores volumes de precipitação (1350–1550 mm/ano), o que compensa parcialmente as perdas atmosféricas e mantém um balanço hídrico mais equilibrado. Essa condição favorece um potencial de recarga moderado a alto, especialmente em áreas de relevo suave e solos arenosos.

Já a Zona Sul, caracterizada por maior umidade do solo, presença de vegetação densa e áreas agrícolas irrigadas, apresenta menores taxas de evapotranspiração. Esse comportamento indica condições mais favoráveis à recarga, uma vez que a água tende a permanecer por mais tempo disponível no solo antes de ser transferida para a atmosfera.

De modo geral, o mapa evidencia que as zonas extremas do município (Norte e Sul) apresentam condições mais equilibradas entre precipitação e evapotranspiração, enquanto a Zona Alta se destaca como área de maior déficit hídrico. Essa distribuição espacial reforça a importância de considerar a evapotranspiração como um fator limitante da recarga, especialmente em regiões de relevo elevado e menor precipitação.

Figura 16 - Carta do volume total anual de evapotranspiração (mm/ano).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2 Grupo de Materiais Inconsolidados

4.2.2.1 Distribuição em área (% da unidade)

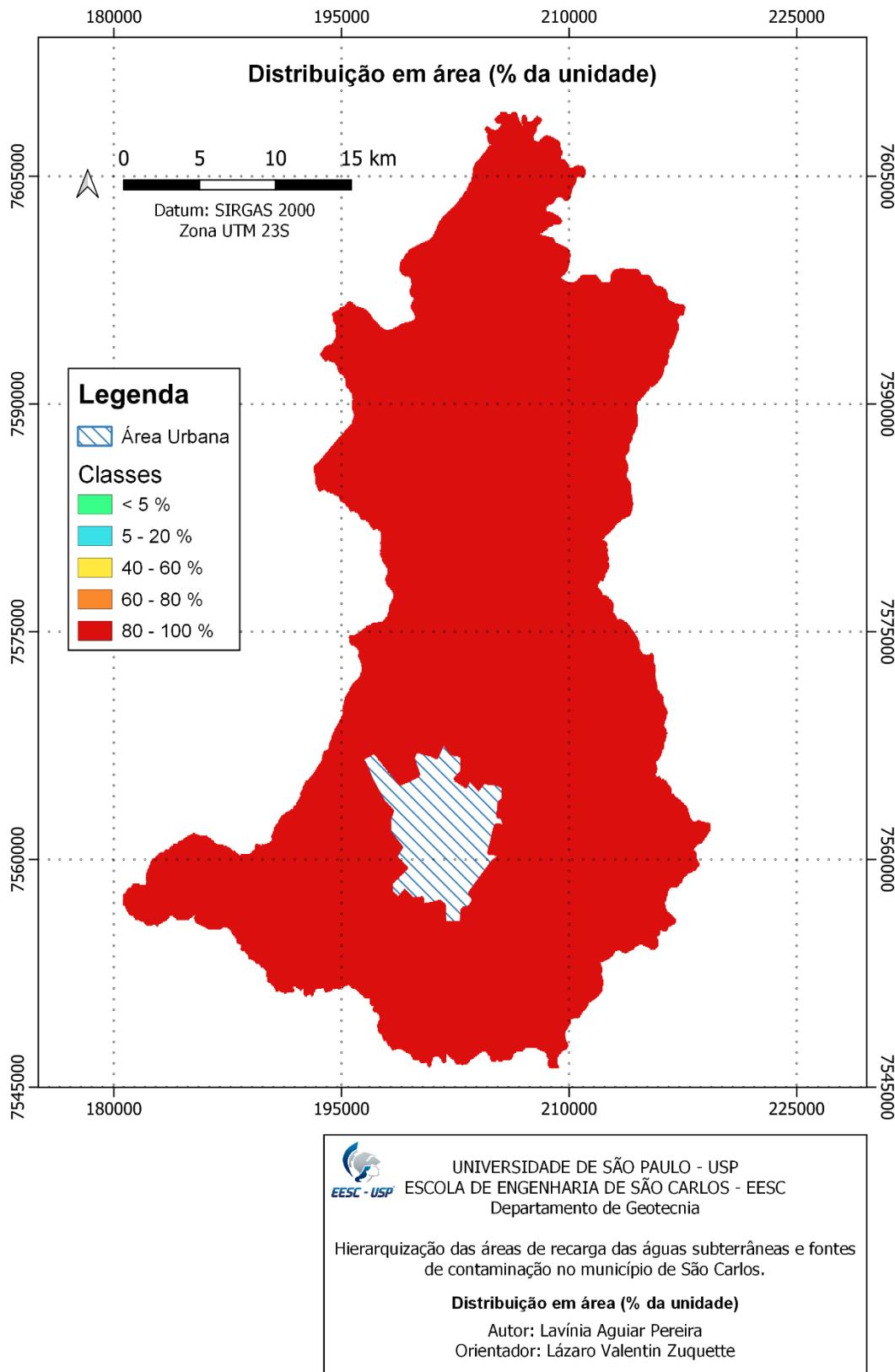
A carta de distribuição em área (% da unidade) (Figura 17) mostra que praticamente a totalidade do município ($1.115,50\text{ km}^2$; ~100%) é ocupada por uma única classe de representatividade espacial, correspondente ao intervalo de 80 a 100% da área da unidade mapeada. Isso indica predomínio absoluto de materiais inconsolidados ao longo do território municipal, evidenciando uma cobertura superficial contínua e expressiva, sem descontinuidades litológicas significativas.

Essa homogeneidade espacial reforça a importância dos materiais inconsolidados na dinâmica de infiltração e recarga das águas subterrâneas, uma vez que esses depósitos — compostos majoritariamente por solos e sedimentos não consolidados — atuam como meios porosos dominantes, controlando a infiltração, o armazenamento e a percolação vertical da água.

Na prática, o predomínio da classe de 80–100% reflete a forte representatividade dos materiais inconsolidados no município de São Carlos, o que sustenta a coerência dos resultados obtidos nos atributos anteriores (como espessura, textura e porosidade), nos quais também se observou ampla contribuição dessas coberturas para o potencial de recarga.

Em síntese, a uniformidade da distribuição em área confirma que o comportamento hidrogeológico local é amplamente governado pelos materiais inconsolidados, reforçando sua relevância nas análises de vulnerabilidade e no planejamento ambiental e territorial do município.

Figura 17 - Distribuição em área (% da unidade)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.2 Macroporosidade

A Carta de Macroporosidade (Figura 18) representa o potencial de fluxo preferencial nos materiais inconsolidados, sendo um indicador direto da eficiência de infiltração e da recarga subterrânea. Foram estabelecidas cinco classes de macroporosidade (2–5%, 1–2%, >10%, 5–10% e sem macroporosidade), determinadas a partir da contagem de pixels no QGIS (resolução de 50 m), totalizando uma área de ~1.115,43 km².

A classe 2–5% predomina amplamente, ocupando 583,68 km² (52,3%), e indica a condição mais favorável à recarga: há presença expressiva de macroporos interconectados, que proporcionam infiltração moderada a boa e recarga eficiente, especialmente em solos arenosos e relevo suave.

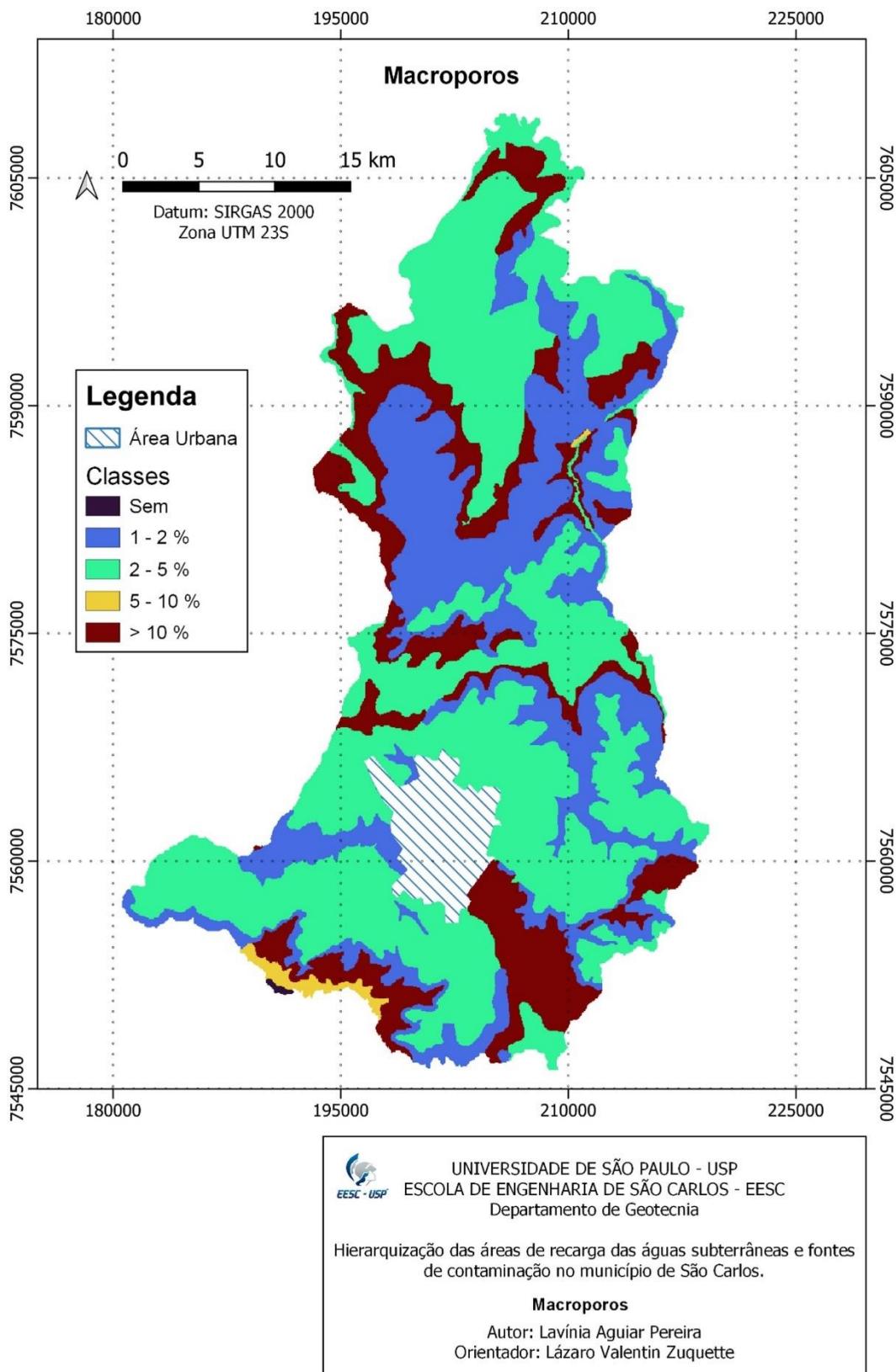
Em seguida, a classe 1–2%, com 309,62 km² (27,8%), apresenta infiltração moderada-baixa, dependente da intensidade e duração das chuvas. Embora a conectividade de poros seja discreta, há melhora significativa em relação aos setores mais compactos.

A classe >10% ocupa 212,66 km² (19,1%), representando zonas de alta condutividade hidráulica e recarga preferencial acelerada. Nesses locais, há maior vulnerabilidade à contaminação rápida, sobretudo quando associados a fontes potenciais ou níveis freáticos rasos.

As classes 5–10% (8,69 km²; 0,78%) e sem macroporosidade (0,78 km²; 0,07%) aparecem de forma pontual. A primeira indica recarga intensa e localizada, enquanto a segunda reflete ambientes compactados, com baixa infiltração e predominância de escoamento superficial.

De modo geral, o município apresenta predomínio de macroporosidade baixa a intermediária (1–5%), correspondendo a cerca de 80% da área total, o que sugere recarga predominantemente difusa e progressiva. Já as manchas com macroporosidade ≥ 5%, embora reduzidas, funcionam como hotspots de recarga preferencial, devendo ser priorizadas em estratégias de gestão do uso do solo e monitoramento ambiental.

Figura 18 - Carta de macroporosidade (% de volume total).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.3 Taxa de Infiltração

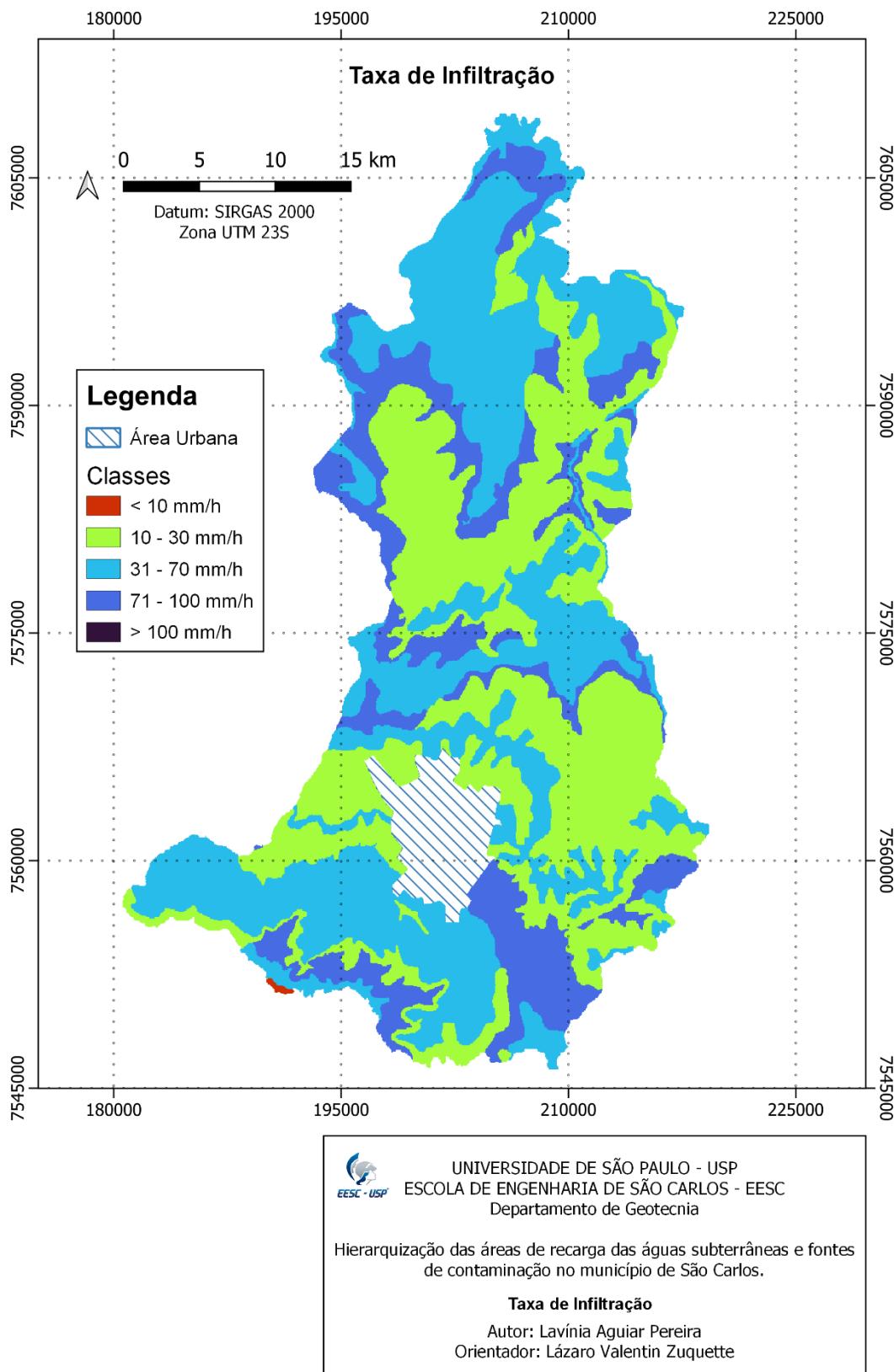
A Carta de Taxa de Infiltração (Figura 19) indica que o município é dominado por condições intermediárias. As classes 31–70 mm/h e 10–30 mm/h somam 482,74 km² ($\approx 43,3\%$) e 419,20 km² ($\approx 37,6\%$), respectivamente — juntas, cerca de 81% da área mapeada (1.115,45 km²). Esse quadro traduz uma recarga majoritariamente difusa e progressiva, típica de materiais de permeabilidade média e de relevo suave a moderado: a água entra no perfil com eficiência razoável, mas sem picos de percolação muito rápida.

As manchas de alta infiltração (71–100 mm/h) totalizam 212,74 km² ($\approx 19,1\%$). Quando cotejadas com os demais atributos, tendem a coincidir com setores de solos mais arenosos e declividades baixas, onde também observamos macroporosidade $\geq 2\text{--}5\%$. São áreas muito importantes para a recarga efetiva, mas que demandam maior cautela do ponto de vista ambiental: a percolação vertical acelerada aumenta a vulnerabilidade ao transporte preferencial de contaminantes, sobretudo quando há fontes potenciais próximas, níveis d’água rasos e litologias fraturadas.

A classe < 10 mm/h é residual (0,78 km²; $\approx 0,07\%$) e marca pontos com baixa infiltração; ali, o escoamento superficial tende a prevalecer e a contribuição direta para a recarga é pequena. Esses trechos funcionam mais como áreas de transferência lateral de água para jusante do que como zonas de armazenamento.

Em termos de gestão, o retrato que emerge é claro: a maior parte do território apresenta infiltração moderada, onde práticas de conservação do solo (manutenção de cobertura vegetal, manejo de compactação e drenagem difusa) podem ampliar ganhos incrementais de recarga. Já as áreas 71–100 mm/h devem ser tratadas como hotspots: são desejáveis para recarga, mas requerem controle rigoroso de cargas para evitar que a eficiência hidráulica se converta em vias rápidas de contaminação.

Figura 19 - Carta da taxa de infiltração (mm/h).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

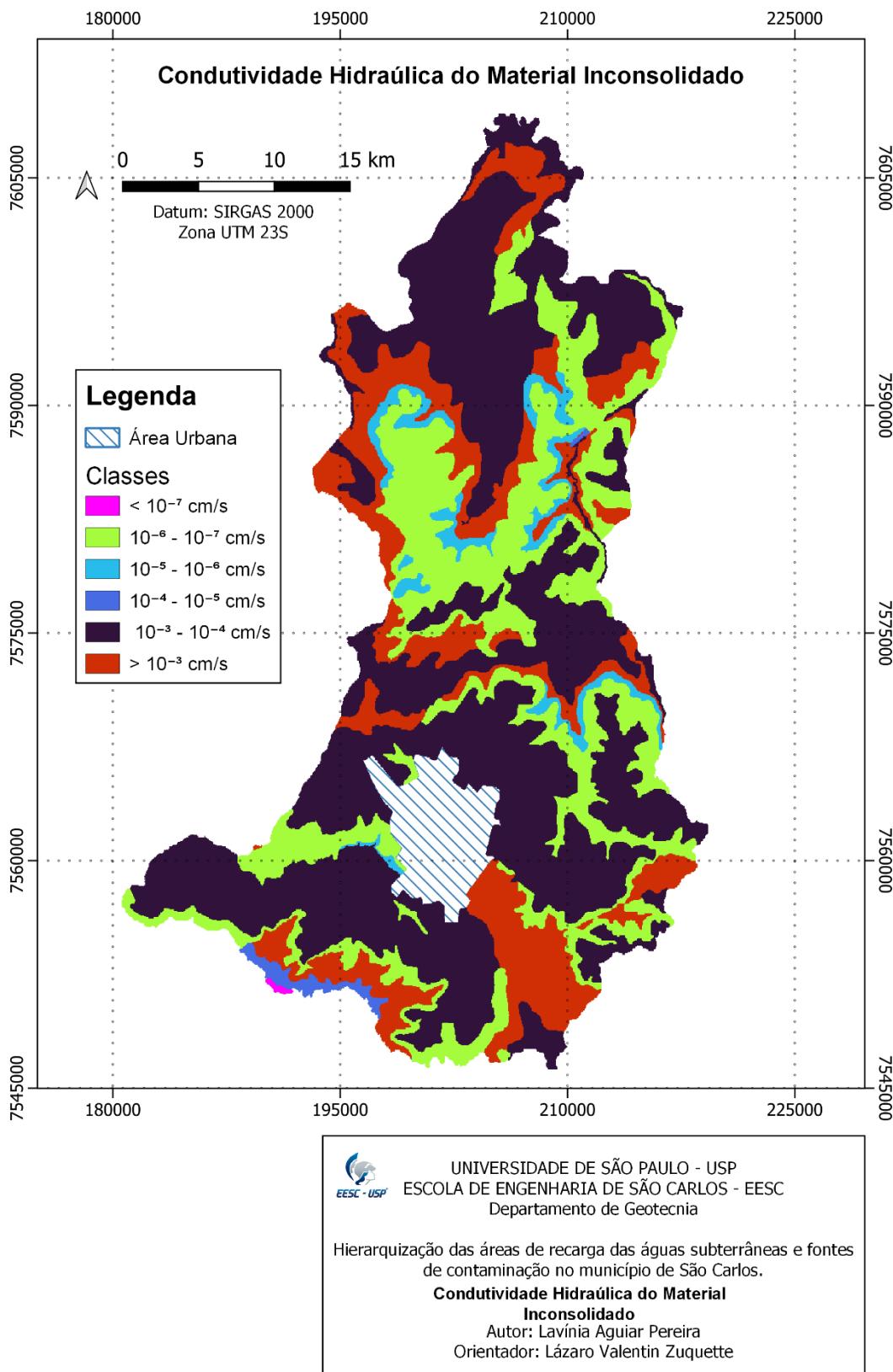
4.2.2.4 Condutividade Hidráulica do Material Inconsolidado

A carta de condutividade hidráulica dos materiais inconsolidados (cm/s) (Figura 20) mostra um predomínio claro das classes mais permeáveis. A faixa 10^{-3} – 10^{-4} cm/s ocupa 583,80 km² (~52,3%) do município, indicando materiais que permitem percolação eficiente e favorecem a recarga difusa. Em seguida, a classe de muito alta permeabilidade ($>10^{-3}$ cm/s) soma 212,65 km² (~19,1%); nesses trechos a percolação vertical é acelerada, o que aumenta o potencial de recarga, mas também a vulnerabilidade ao transporte preferencial de contaminantes.

Na outra ponta, a faixa 10^{-6} – 10^{-7} cm/s representa 273,86 km² (~24,6%), caracterizando setores de baixa permeabilidade onde a infiltração é lenta e o escoamento superficial tende a ser mais expressivo. As classes intermediárias são pouco representativas: 10^{-5} – 10^{-6} cm/s totaliza 35,65 km² (~3,2%) e 10^{-4} – 10^{-5} cm/s apenas 8,70 km² (~0,8%). A classe $<10^{-7}$ cm/s é residual (0,78 km²; ~0,07%).

Em termos práticos, mais de 70% do território (10^{-3} – 10^{-4} + $>10^{-3}$) apresenta boa a muito boa capacidade de infiltração, compondo as principais zonas de recarga. Já cerca de um quarto do município (10^{-6} – 10^{-7}) funciona como áreas de menor contribuição direta, com maior propensão ao escoamento e à recarga mais lenta. Assim, os setores $>10^{-3}$ cm/s devem ser considerados hotspots de recarga e, simultaneamente, áreas prioritárias para controle de cargas poluidoras; os trechos 10^{-3} – 10^{-4} cm/s sustentam a maior parte da recarga difusa; e as faixas $\leq 10^{-6}$ cm/s tendem a atuar como zonas de passagem lateral de água, com baixa percolação vertical.

Figura 20 - Condutividade hidráulica do material inconsolidado (cm/s).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.5 Capacidade de Campo (%)

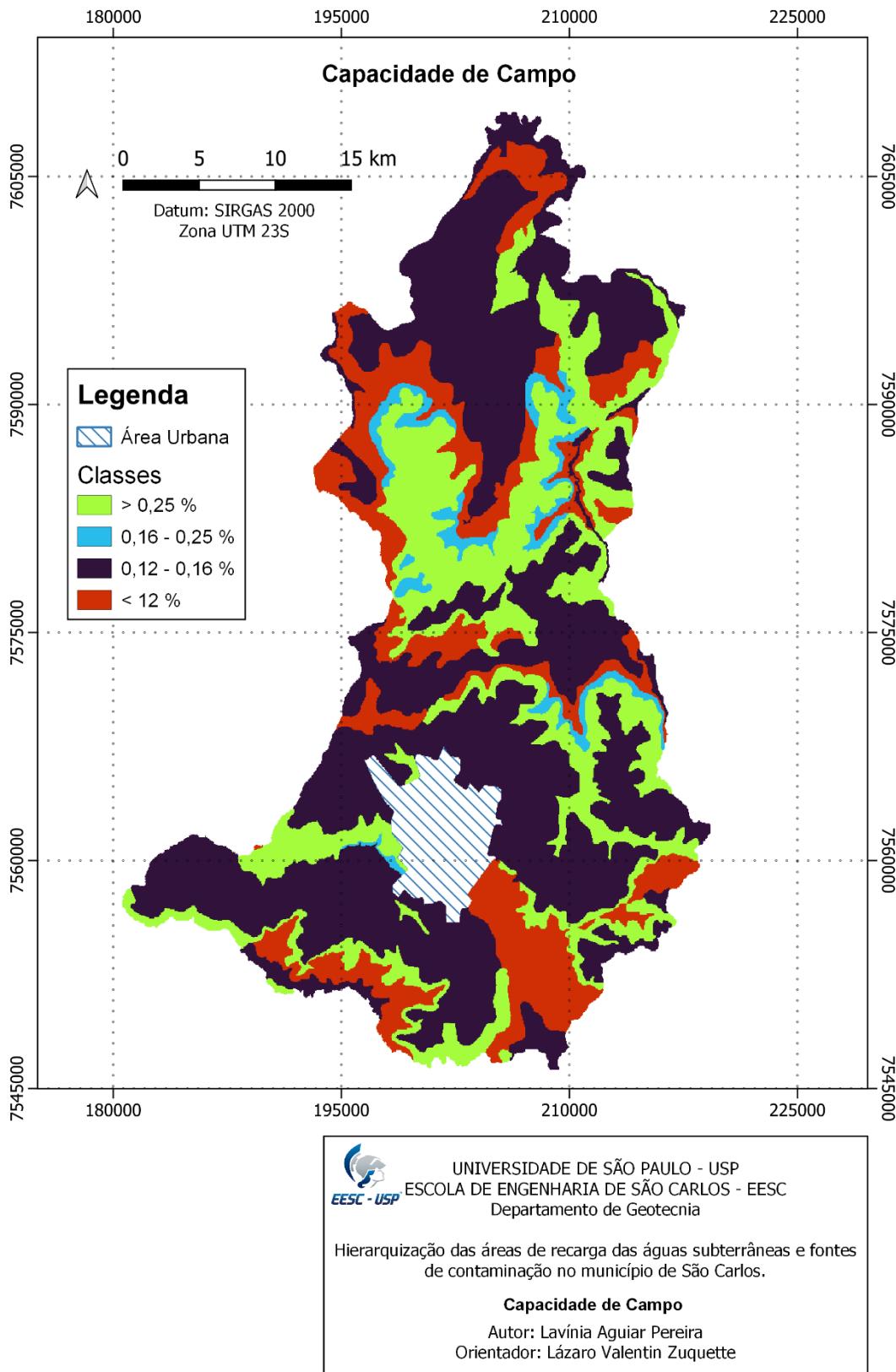
A carta de capacidade de campo (Figura 21) mostra o predomínio da classe 0,12–0,16%, que ocupa 592,44 km² (~51,3%) da área total do município. Essa faixa representa materiais com retenção moderada de água após a drenagem gravitacional, indicando solos capazes de armazenar umidade suficiente para sustentar processos de recarga, sem comprometer a infiltração vertical.

As áreas com capacidade de campo superior a 0,25% abrangem 212,52 km² (~18,4%), distribuídas principalmente nas regiões mais baixas e suavemente onduladas. Nesses locais, a retenção hídrica é mais elevada, o que favorece a manutenção da umidade no perfil do solo, porém pode reduzir ligeiramente a velocidade de percolação, tornando o processo de recarga mais lento, mas constante.

As faixas intermediárias (0,16–0,25%) totalizam 274,70 km² (~23,8%), configurando zonas de equilíbrio entre infiltração e armazenamento — áreas com boa capacidade de recarga e baixa suscetibilidade ao escoamento superficial. Já os setores com capacidade de campo inferior a 0,12%, que somam 35,73 km² (~3,1%), ocorrem pontualmente em regiões mais declivosas ou de solos arenosos, onde a infiltração é rápida, mas a retenção hídrica é reduzida, resultando em menor disponibilidade de água no solo e maior vulnerabilidade à contaminação.

De modo geral, observa-se que a maior parte do município apresenta valores médios de capacidade de campo, refletindo um ambiente com bom balanço entre infiltração e armazenamento. As áreas >0,16% destacam-se como reservatórios naturais de umidade, importantes para a recarga contínua dos aquíferos, enquanto as porções <0,12% devem ser consideradas zonas de recarga rápida e maior sensibilidade ambiental.

Figura 21 - Capacidade de Campo (%)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.6 Espessura do Material Inconsolidado (distribuição em profundidade)

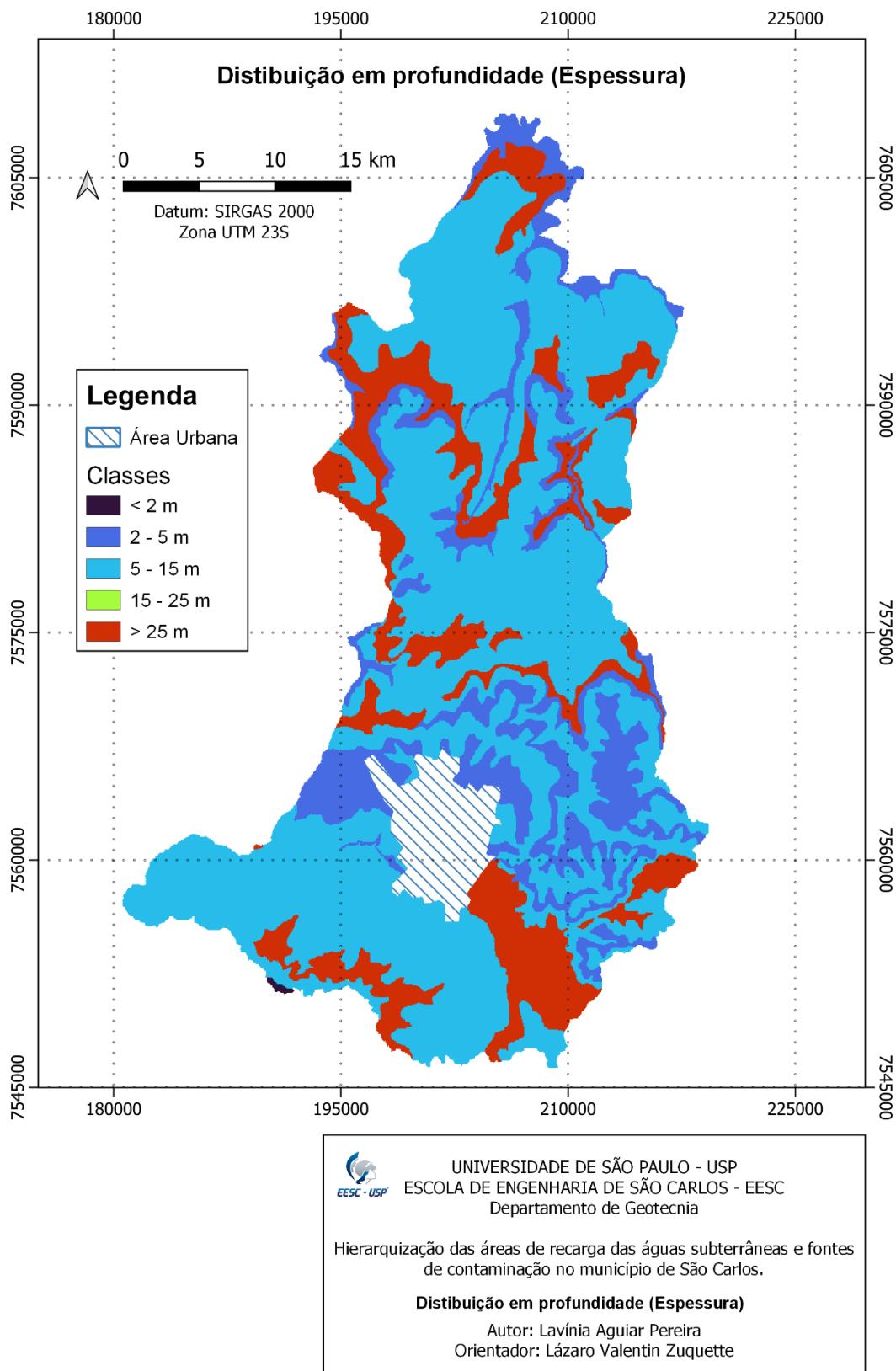
A Carta de Espessura do Material Inconsolidado (Figura 22) evidencia o predomínio das camadas com espessura **entre 5 e 15 m**, que ocupam **713,23 km²** (~64%) da área do município. Essa faixa representa o domínio dos materiais inconsolidados de espessura intermediária, que favorecem a recarga difusa por permitir a percolação da água até o nível saturado sem restrições significativas, mas com tempo de residência suficiente para filtração natural.

As **camadas mais espessas (> 25 m)** correspondem a **212,48 km²** (~19%), concentrando-se principalmente nas porções de relevo mais rebaixado e vales encaixados. Nessas regiões, a infiltração tende a ocorrer de forma mais profunda, com maior capacidade de armazenamento subterrâneo, embora a recarga efetiva possa ser mais lenta em função do aumento do percurso vertical.

Em contrapartida, as **espessuras reduzidas (2–5 m)** totalizam **188,82 km²** (~17%), e as **muito rasas (< 2 m)** são praticamente residuais (**0,78 km²; < 0,1%**). Essas áreas, situadas sobretudo em topos e interflúvios, apresentam menor capacidade de retenção e filtragem, além de maior suscetibilidade à contaminação direta do aquífero.

De modo geral, o município apresenta **predominância de coberturas inconsolidadas médias a espessas**, o que contribui positivamente para o potencial de recarga das águas subterrâneas. As zonas com espessura > 25 m configuram-se como **reservatórios potenciais** e áreas prioritárias para preservação da infiltração; já as porções com espessura < 5 m devem ser tratadas como **áreas sensíveis**, onde o aquífero é mais vulnerável a pressões antrópicas e contaminações superficiais.

Figura 22 - Espessura do material inconsolidado (m).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.7 Distribuição em Profundidade – Sequência de Materiais

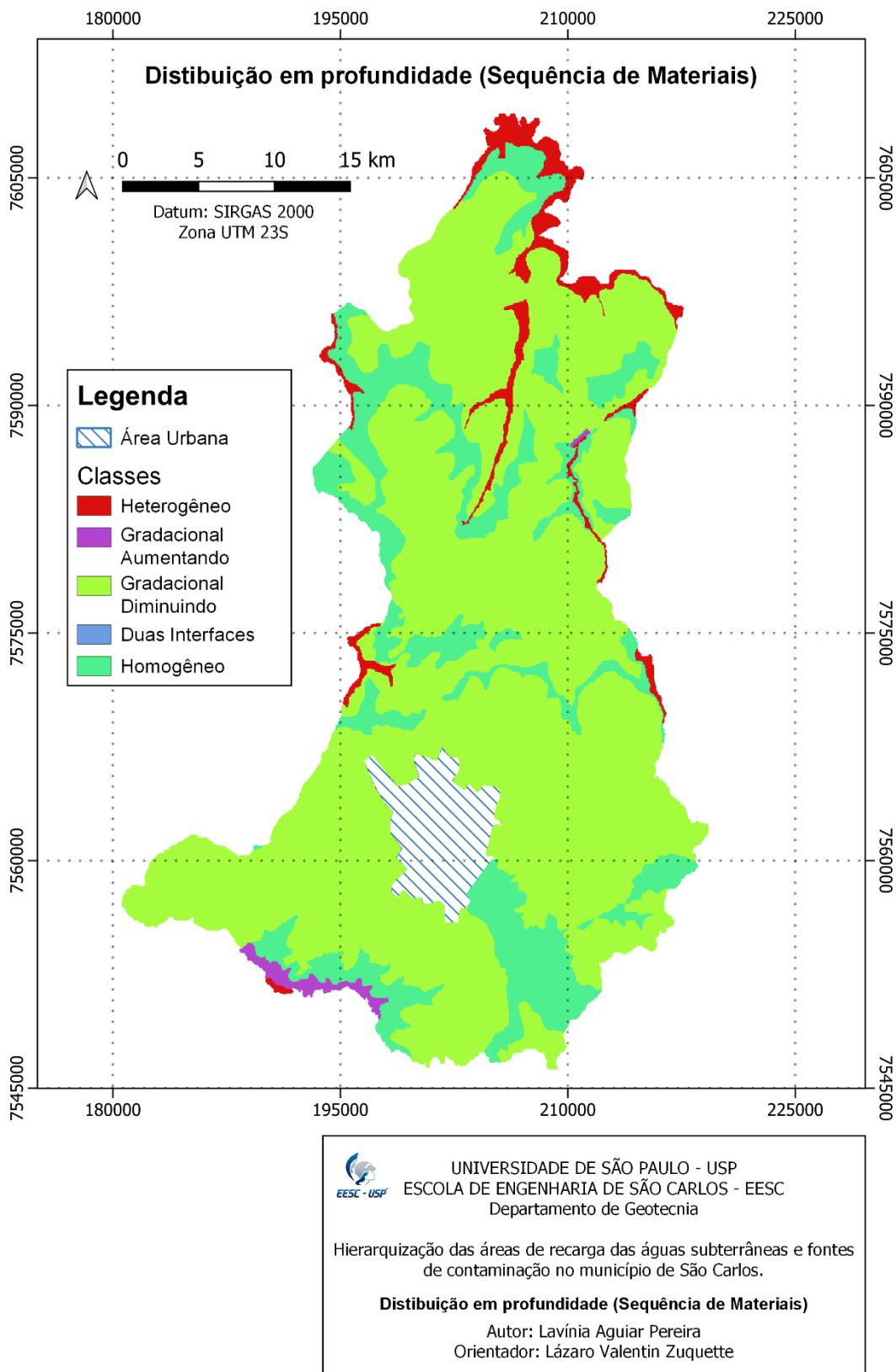
A Carta de Sequência de Materiais (Figura 23) demonstra que o município é amplamente dominado por sequências gradacionais diminuindo, que abrangem 850,07 km² (~73,7%) da área total. Esse padrão indica a ocorrência de perfis nos quais a granulometria tende a se refinar em profundidade, o que favorece a percolação gradual e contínua da água até as camadas inferiores, mantendo boa condutividade e filtragem natural — características ideais para a recarga difusa do aquífero.

As sequências homogêneas ocupam 212,60 km² (~18,4%), representando zonas com pouca variação litológica vertical. Nesses setores, o comportamento hidráulico tende a ser mais uniforme, mas a ausência de camadas texturalmente distintas pode reduzir a capacidade de retenção intermediária e aumentar a velocidade de percolação em determinados pontos, o que pode intensificar a vulnerabilidade local à contaminação.

Em menor proporção, as sequências heterogêneas somam 44,08 km² (~3,8%), associadas a perfis com mudanças abruptas de textura, que dificultam a percolação vertical e favorecem o acúmulo de água em camadas menos permeáveis. As sequências gradacionais aumentando, com 8,68 km² (~0,8%), indicam o oposto — texturas progressivamente mais grosseiras em profundidade —, permitindo infiltração mais rápida e menor tempo de filtração. Por fim, as áreas com duas interfaces são residuais (0,025 km²; <0,01%) e praticamente desprezíveis no balanço geral.

Em síntese, a predominância dos perfis gradacionais diminuindo reforça o caráter favorável à recarga subterrânea no município, já que essas sequências atuam como meios transicionais entre a superfície e o aquífero, equilibrando infiltração e filtragem. As zonas heterogêneas e gradacionais aumentando, por sua vez, merecem atenção especial por apresentarem comportamentos hidráulicos mais complexos e maior potencial de restrição ao fluxo vertical.

Figura 23 - Distribuição em profundidade (Sequência de Materiais).



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.2.8 Porosidade do material inconsolidado (%)

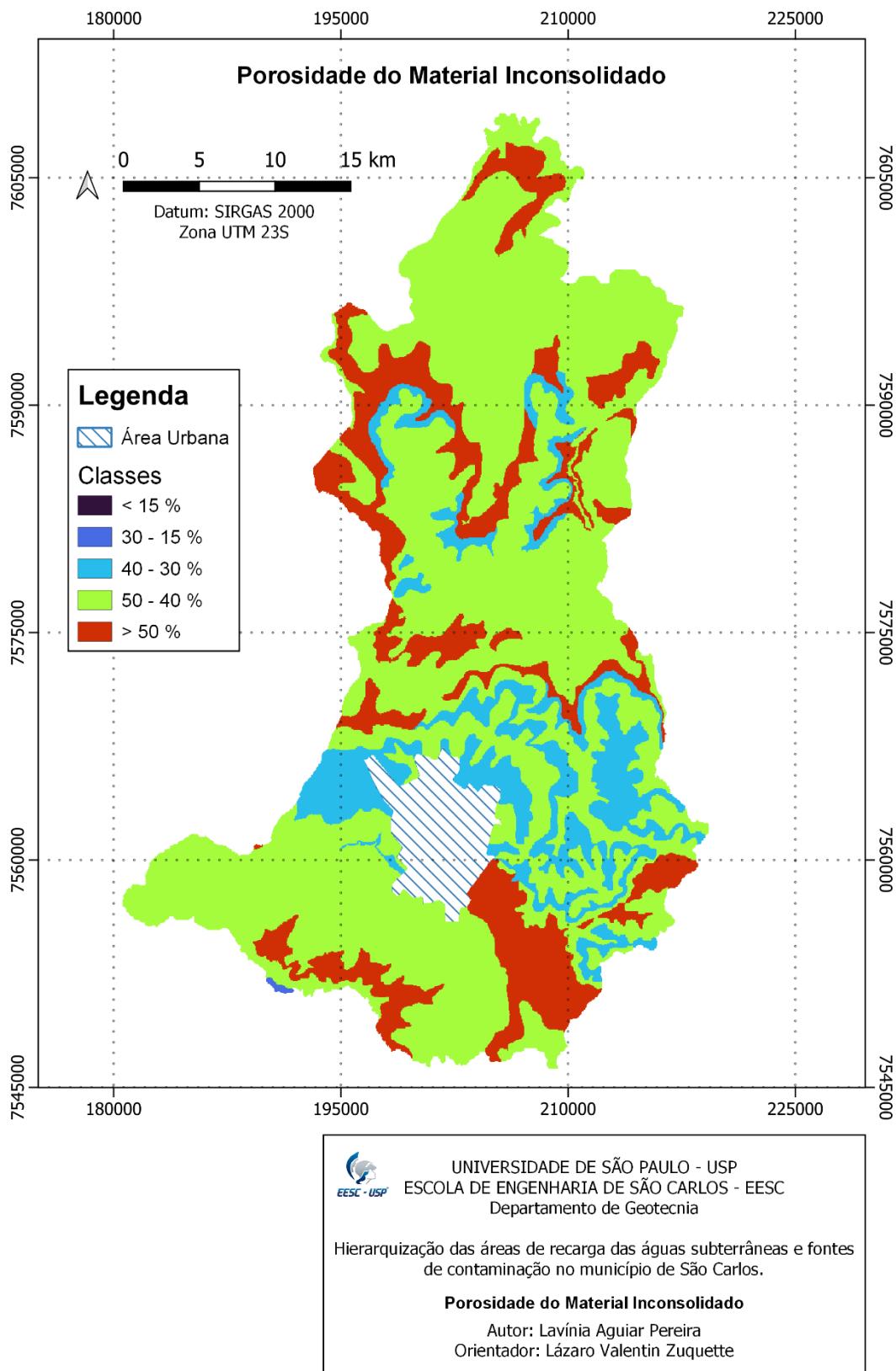
A carta de porosidade do material inconsolidado (Figura 24) evidencia o predomínio das classes com porosidade entre 40% e 50%, que ocupam 756,55 km² (~65,6%) da área do município. Essa faixa representa materiais de alta capacidade de armazenamento e circulação de água, favorecendo tanto a infiltração quanto a retenção temporária no perfil do solo, o que é essencial para a recarga difusa e sustentação dos fluxos subterrâneos.

As áreas com porosidade superior a 50% abrangem 212,66 km² (~18,4%), localizadas principalmente nas porções de relevo mais suave e fundos de vale. Esses materiais, extremamente porosos, apresentam excelente capacidade de infiltração, mas também maior vulnerabilidade à contaminação, já que a percolação ocorre de forma rápida e com menor filtração natural.

As faixas intermediárias de 30% a 40% somam 145,42 km² (~12,6%), representando zonas de transição com comportamento hidráulico moderado, enquanto as porosidades menores (15–30%) são residuais (0,78 km²; <0,1%), ocorrendo pontualmente em topos e áreas de solo mais compacto, onde a infiltração é limitada e o escoamento superficial tende a predominar.

De modo geral, o município apresenta predominância de materiais inconsolidados altamente porosos, o que contribui significativamente para o potencial de recarga subterrânea. As faixas >40% configuram-se como áreas preferenciais de infiltração e armazenamento, enquanto os setores ≤30% devem ser considerados de menor permeabilidade e maior propensão ao escoamento superficial.

Figura 24 - Porosidade do material inconsolidado (%).



4.2.2.9 Textura do material inconsolidado

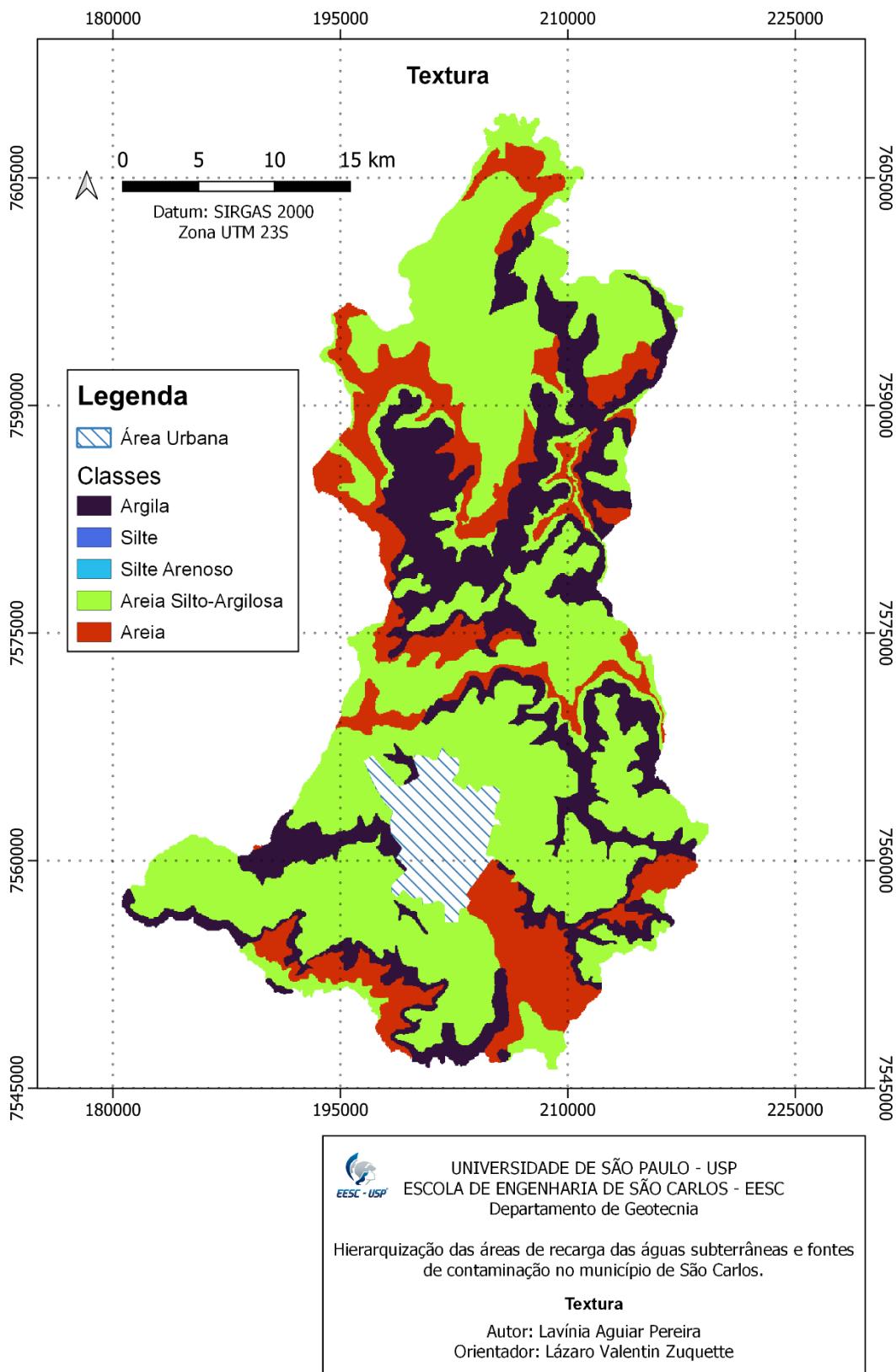
A carta de textura (Figura 25) evidencia o predomínio das **areias silto-argilosas**, que ocupam **627,96 km²** (~54,4%) do território municipal. Essa classe representa solos com composição intermediária entre frações finas e grossas, proporcionando um **equilíbrio entre infiltração e retenção de água**. Assim, favorecem tanto o movimento descendente da água no perfil quanto a filtragem natural de contaminantes, configurando-se como materiais ideais para recarga difusa.

As **texturas argilosas** totalizam **274,82 km²** (~23,8%), concentrando-se principalmente nas áreas mais rebaixadas e nas porções centrais do município. Nesses locais, o predomínio de partículas finas confere **baixa permeabilidade** e maior capacidade de retenção hídrica, o que tende a reduzir a infiltração direta, mas aumenta a **capacidade de adsorção de poluentes**, funcionando como uma barreira natural de proteção ao aquífero.

Já as **texturas arenosas**, que abrangem **212,64 km²** (~18,4%), ocorrem predominantemente nas bordas das drenagens e nas áreas mais elevadas. Esses materiais, de maior granulometria, apresentam **alta condutividade hidráulica**, permitindo rápida percolação vertical da água e favorecendo a recarga direta, embora com **menor eficiência de filtragem** e maior vulnerabilidade à contaminação superficial.

De modo geral, o município apresenta **predominância de materiais texturalmente equilibrados**, com condições favoráveis à recarga subterrânea. As porções argilosas funcionam como **zonas de retenção e proteção**, enquanto as arenosas se destacam como **áreas preferenciais de infiltração**, exigindo maior controle de fontes potenciais de poluição.

Figura 25 - Textura do material inconsolidado.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3 Grupo do Substrato Rochoso

4.2.3.1 Litologia do substrato rochoso

A carta litológica (Figura 26) evidencia o predomínio dos arenitos com baixa cimentação e diagênese, apresentando porosidade superior a 50%, que ocupam 647,46 km² (~56%) da área total do município. Esses materiais se destacam por sua alta permeabilidade e elevada capacidade de armazenamento, o que os torna os principais responsáveis pela recarga dos aquíferos livres da região. A baixa cimentação favorece o fluxo de água através da matriz porosa, permitindo infiltração rápida e recarga efetiva, embora também represente maior vulnerabilidade à contaminação por substâncias superficiais.

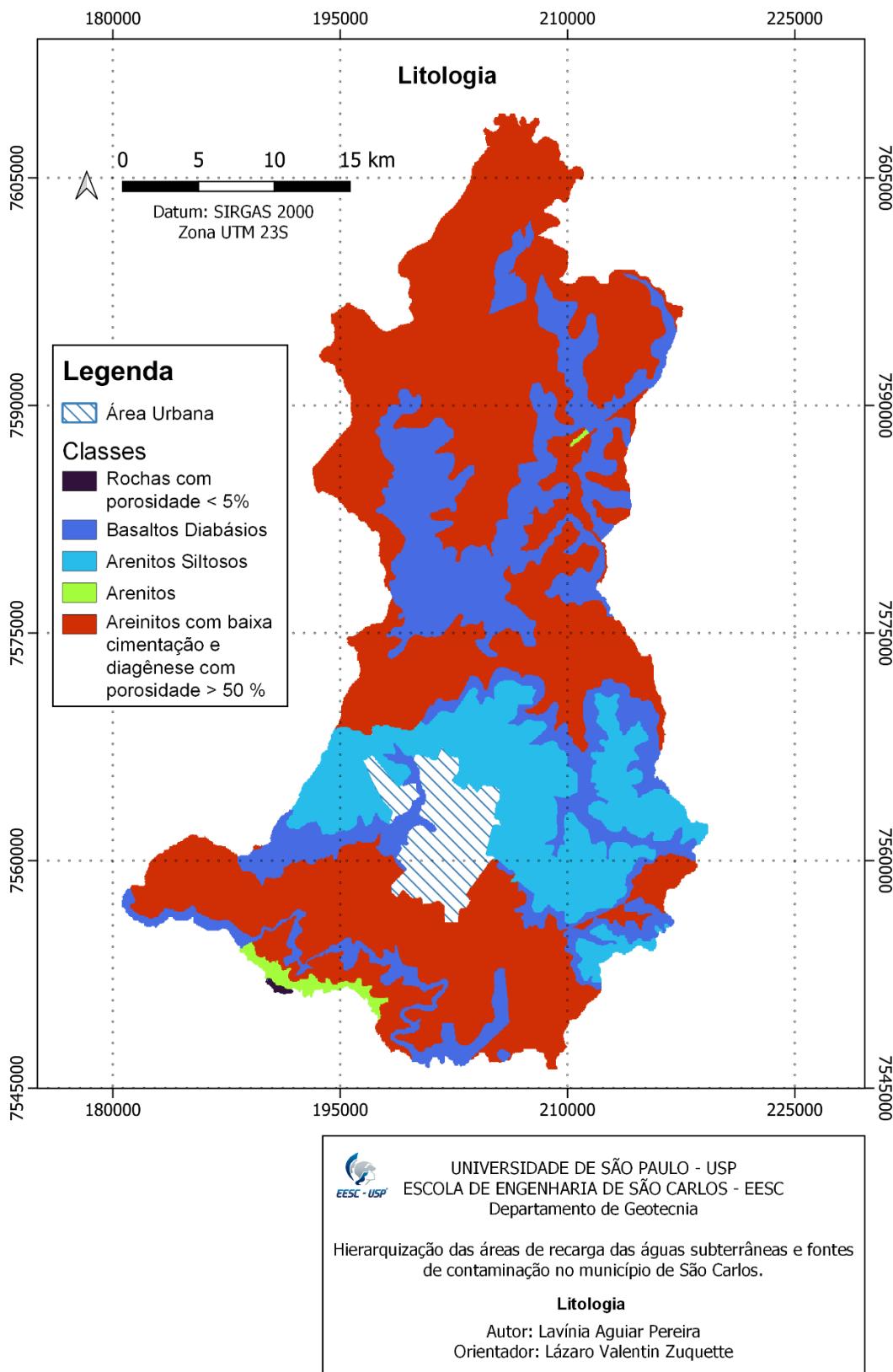
As áreas compostas por basaltos e diabásios somam 288,99 km² (~25%), concentrando-se em setores do norte e noroeste do município. Esses litotipos, de natureza ígnea e textura compacta, apresentam baixa porosidade e permeabilidade, limitando a infiltração direta e atuando como barreiras naturais ao fluxo vertical da água. Entretanto, quando fraturados, podem desenvolver permeabilidade secundária, permitindo circulação restrita, porém significativa, de águas subterrâneas.

Os arenitos siltosos, com 173,83 km² (~15%), e os arenitos mais consolidados, com 8,65 km² (~0,8%), aparecem de forma pontual e estão associados a condições intermediárias de permeabilidade. Esses materiais permitem infiltração moderada e recarga difusa, funcionando como transições entre as zonas de alta e baixa condutividade hidráulica.

Por fim, as rochas com porosidade inferior a 5% representam apenas 0,77 km² (<0,1%), sendo praticamente residuais. Essas formações, extremamente compactas, têm baixa relevância hidrogeológica, pois praticamente não contribuem para o armazenamento ou recarga subterrânea.

De modo geral, o município é amplamente dominado por arenitos de elevada porosidade, o que confere ao subsolo alta capacidade de infiltração e recarga, especialmente nas áreas centrais e sul do território. Os basaltos e diabásios, por outro lado, atuam como unidades menos permeáveis, condicionando a dinâmica subterrânea e influenciando o fluxo lateral e a direção preferencial das águas.

Figura 26 - Litologia do substrato rochoso



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.2 Continuidade do substrato rochoso (distribuição em área)

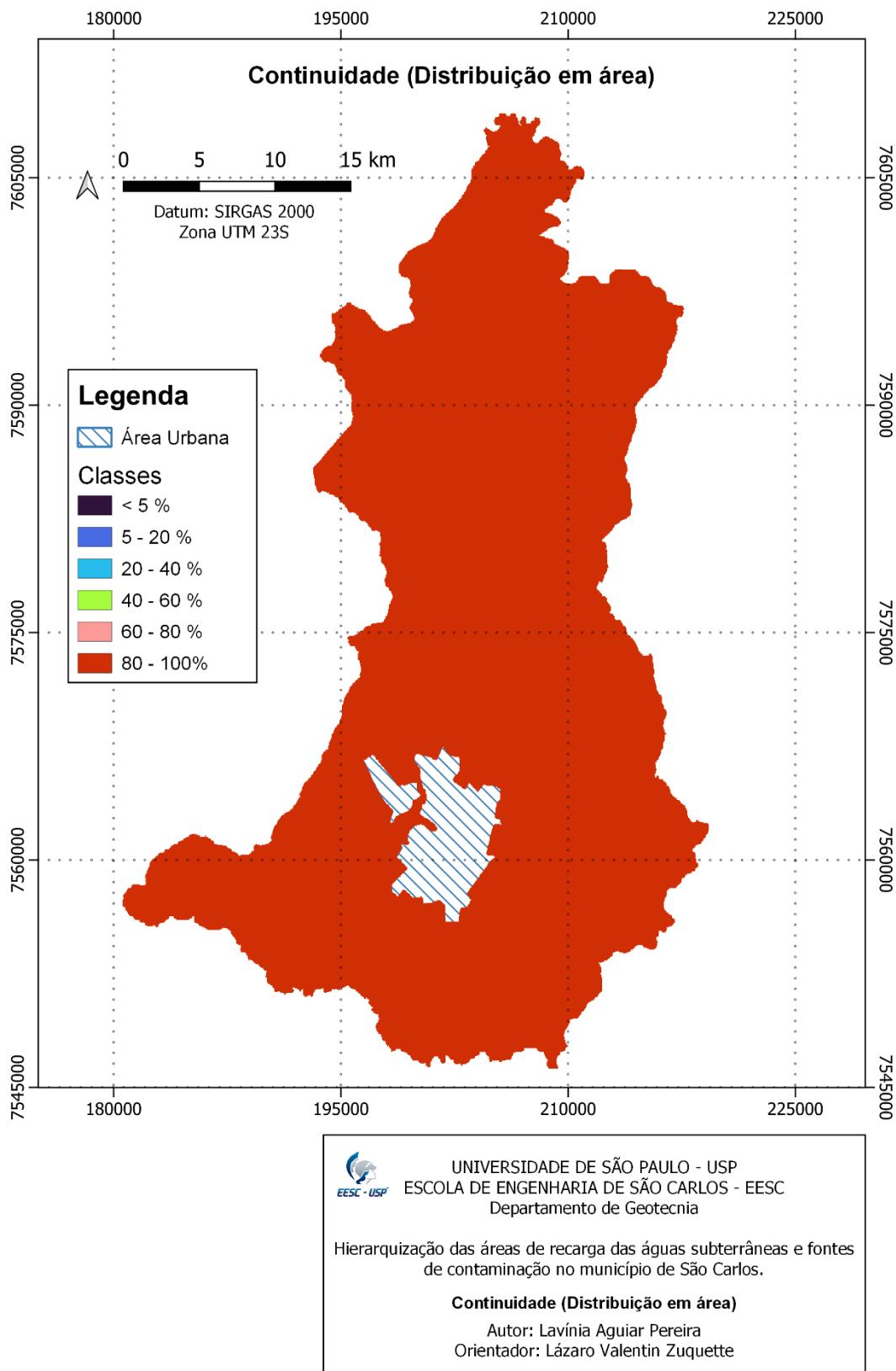
A carta de continuidade areal do substrato (Figura 27) demonstra que a totalidade do município ($1.115,5\text{ km}^2$; ~100%) está inserida na classe de 80 a 100% de continuidade, indicando um predomínio absoluto de formações rochosas contínuas em subsuperfície. Esse comportamento evidencia que o substrato apresenta baixa fragmentação estrutural e extensa conectividade entre as unidades litológicas, o que garante uniformidade na sustentação geológica e na distribuição das propriedades físicas do meio.

Essa alta continuidade é típica de áreas onde o embasamento rochoso se mantém bem preservado, com variações limitadas em sua espessura e litologia. Na prática, isso significa que o substrato atua como uma base estável para os materiais inconsolidados sobrejacentes, influenciando de forma direta o padrão de drenagem, o comportamento do fluxo subterrâneo e o armazenamento hídrico.

Além disso, a predominância dessa classe sugere que as descontinuidades geológicas — como falhas e fraturas — são pouco expressivas em escala regional, embora possam ocorrer de forma pontual e exercer papel relevante em processos locais de recarga e condução preferencial de água subterrânea.

De modo geral, a continuidade elevada do substrato rochoso reforça a coerência geológica do município e sustenta a distribuição dos materiais inconsolidados descrita nas cartas anteriores. Essa característica é fundamental para compreender a interação entre o meio rochoso e o aquífero livre, servindo como base para a etapa de integração multicritério voltada à hierarquização das zonas potenciais de recarga.

Figura 27 - Continuidade do substrato rochoso (distribuição em área, % da unidade)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.3 Condutividade hidráulica do substrato rochoso

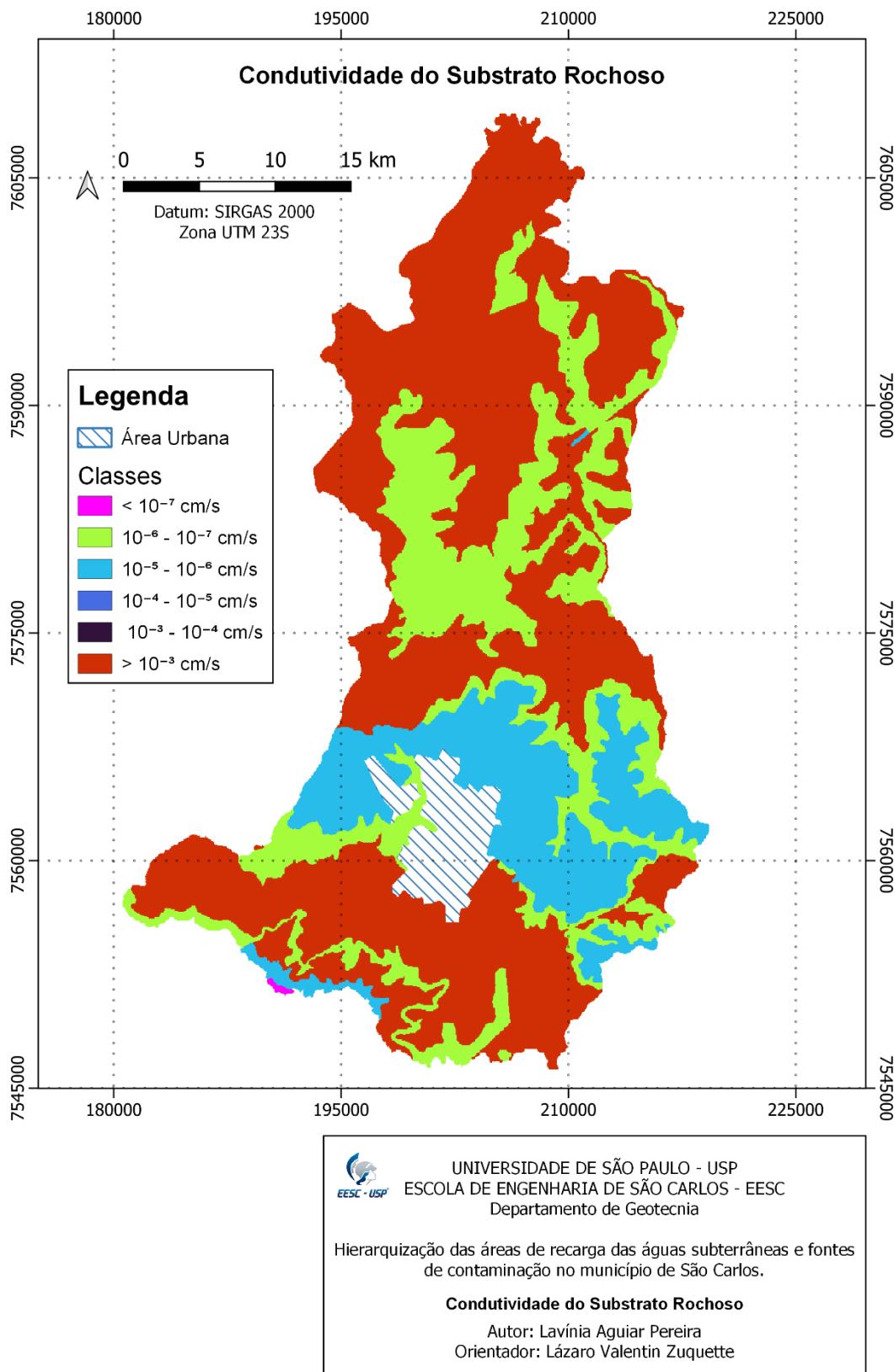
A carta de condutividade hidráulica do substrato rochoso (cm/s) (Figura 28) mostra um predomínio das classes de alta permeabilidade ($>10^{-3}$ cm/s), que ocupam 647,42 km² (~56%) do território municipal. Essa faixa representa os arenitos com baixa cimentação e elevada porosidade, que possibilitam percolação rápida e eficiente da água subterrânea, atuando como as principais zonas de recarga do sistema aquífero. Essa característica favorece o armazenamento e o fluxo vertical, mas também amplia a vulnerabilidade à contaminação, devido à maior conectividade entre a superfície e o aquífero.

As classes de baixa condutividade (10^{-6} – 10^{-7} cm/s) abrangem 288,87 km² (~25%), concentradas nas áreas onde predominam basaltos e diabásios. Essas rochas compactas apresentam permeabilidade primária praticamente nula, permitindo circulação apenas quando fraturadas. Nesses setores, a recarga é limitada e o fluxo subterrâneo ocorre de forma lenta e restrita às descontinuidades estruturais.

As faixas intermediárias (10^{-5} – 10^{-6} cm/s) totalizam 182,48 km² (~15,8%), correspondendo a materiais de permeabilidade moderada, como arenitos siltosos e formações parcialmente consolidadas. Nessas áreas, o fluxo subterrâneo ocorre de forma equilibrada, representando zonas de recarga difusa com baixa vulnerabilidade. Por fim, a classe $<10^{-7}$ cm/s é praticamente residual (0,77 km²; <0,1%), indicando regiões de rocha extremamente compacta, com condutividade desprezível e comportamento praticamente impermeável.

De modo geral, o município apresenta predomínio de substratos rochosos altamente permeáveis, especialmente nas porções centrais e meridionais, o que reforça o alto potencial de recarga do sistema aquífero. Já os setores basálticos e de baixa condutividade exercem papel importante no controle do fluxo subterrâneo, funcionando como barreiras naturais e condicionando a direção e intensidade da recarga.

Figura 28 - Condutividade hidráulica do substrato rochoso (cm/s)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.4 Porosidade do substrato rochoso

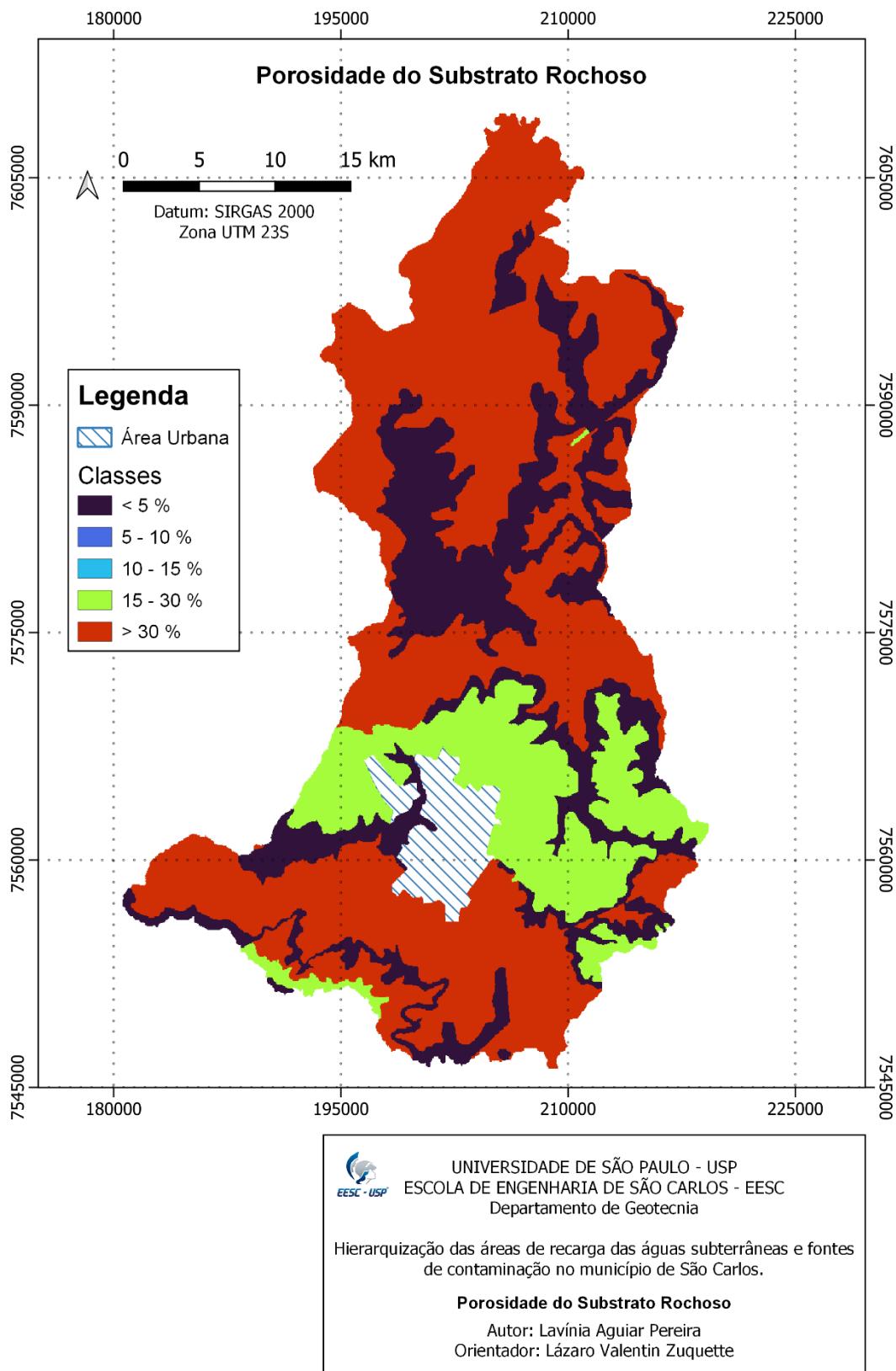
A carta de porosidade do substrato rochoso (Figura 29) evidencia o predomínio da classe >30%, que ocupa 647,43 km² (~56%) do território municipal. Essa faixa representa arenitos altamente porosos, caracterizados por baixa cimentação e diagênese incipiente, que favorecem elevada capacidade de armazenamento e infiltração de água subterrânea. Nesses setores, a recarga ocorre de forma eficiente, com circulação predominante por poros intergranulares, o que os torna zonas preferenciais de recarga, embora também mais vulneráveis à contaminação.

As áreas de porosidade inferior a 5% abrangem 289,66 km² (~25%), correspondendo principalmente a basaltos e diabásios. Essas rochas apresentam estrutura compacta e baixa porosidade primária, atuando como unidades com pouca capacidade de infiltração e armazenamento, mas que podem desenvolver permeabilidade secundária quando fraturadas. Nesses casos, o fluxo subterrâneo se concentra em condutos preferenciais, o que limita a recarga difusa, mas pode favorecer o escoamento concentrado.

As porosidades intermediárias (15–30%) somam 182,43 km² (~15,8%), e estão associadas a arenitos siltosos e formações parcialmente consolidadas, com características mistas de retenção e percolação. Esses setores funcionam como áreas de transição, com recarga moderada e menor suscetibilidade à poluição.

De modo geral, o município apresenta predomínio de rochas de elevada porosidade, o que reforça o alto potencial de infiltração e recarga subterrânea, especialmente nas regiões centrais e meridionais. Já as áreas basálticas e de baixa porosidade exercem papel de barreira ao fluxo vertical, influenciando o direcionamento e a distribuição da água subterrânea.

Figura 29 - Porosidade do substrato rochoso (%)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.3.5 Descontinuidades do substrato rochoso (famílias, frequência, abertura e continuidade)

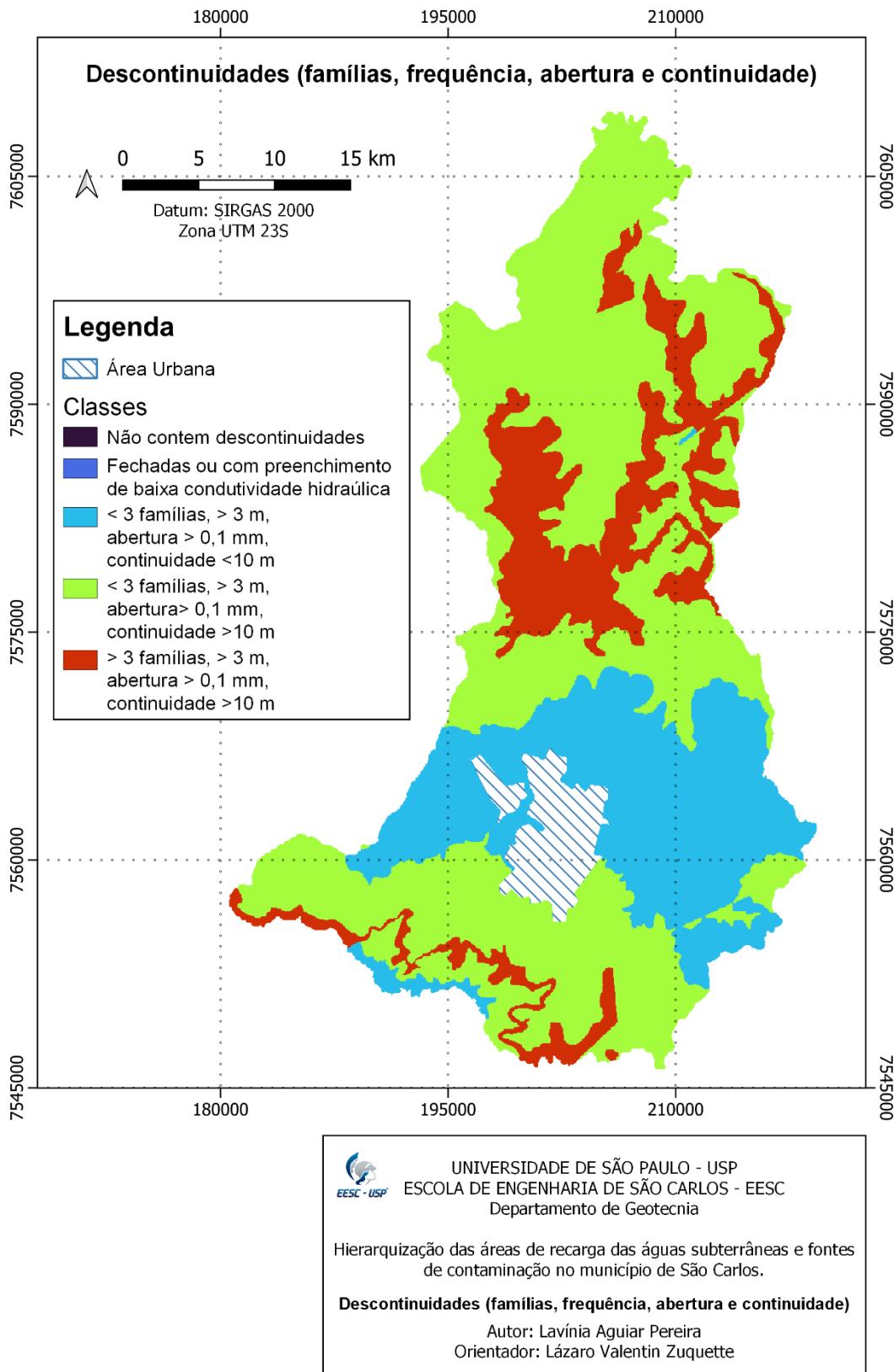
A carta de descontinuidades (Figura 30) evidencia o predomínio das estruturas com menos de três famílias de fraturas, abertura superior a 0,1 mm e continuidade maior que 10 m, que abrangem 647,20 km² (~56%) do território municipal. Essas zonas correspondem a descontinuidades amplas e conectadas, capazes de atuar como canais preferenciais de fluxo subterrâneo, favorecendo a percolação vertical e o intercâmbio entre as camadas do aquífero. A presença de fraturas abertas e contínuas contribui para aumentar a permeabilidade secundária das rochas, especialmente nos arenitos, intensificando o potencial de recarga.

As áreas caracterizadas por menos de três famílias de fraturas com continuidade inferior a 10 m, totalizando 274,56 km² (~23,8%), indicam descontinuidades mais restritas, nas quais o fluxo subterrâneo é limitado a pequenas zonas de infiltração. Nesses locais, a conectividade hidráulica tende a ser menor, e a circulação da água ocorre de forma localizada, condicionada pela geometria e pela extensão das fraturas.

Por outro lado, as zonas com mais de três famílias de fraturas, abertura >0,1 mm e continuidade >10 m ocupam 197,79 km² (~17%) e representam setores de intensa fraturação, com elevada densidade e interconectividade estrutural. Essas regiões, embora apresentem maior capacidade de infiltração e armazenamento, também possuem maior vulnerabilidade à contaminação, devido à rápida condução de poluentes através das redes de fraturas.

De modo geral, o município apresenta predomínio de descontinuidades bem desenvolvidas e conectadas, que ampliam a permeabilidade do substrato rochoso e reforçam o papel das fraturas como importantes vias de recarga secundária. As áreas de fraturamento intenso, sobretudo nas porções centrais e meridionais, configuram-se como zonas prioritárias para proteção da qualidade da água subterrânea, enquanto as regiões de menor continuidade funcionam como barreiras locais ao fluxo.

Figura 30 - Descontinuidades do substrato rochoso (famílias, frequência, abertura e continuidade)



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

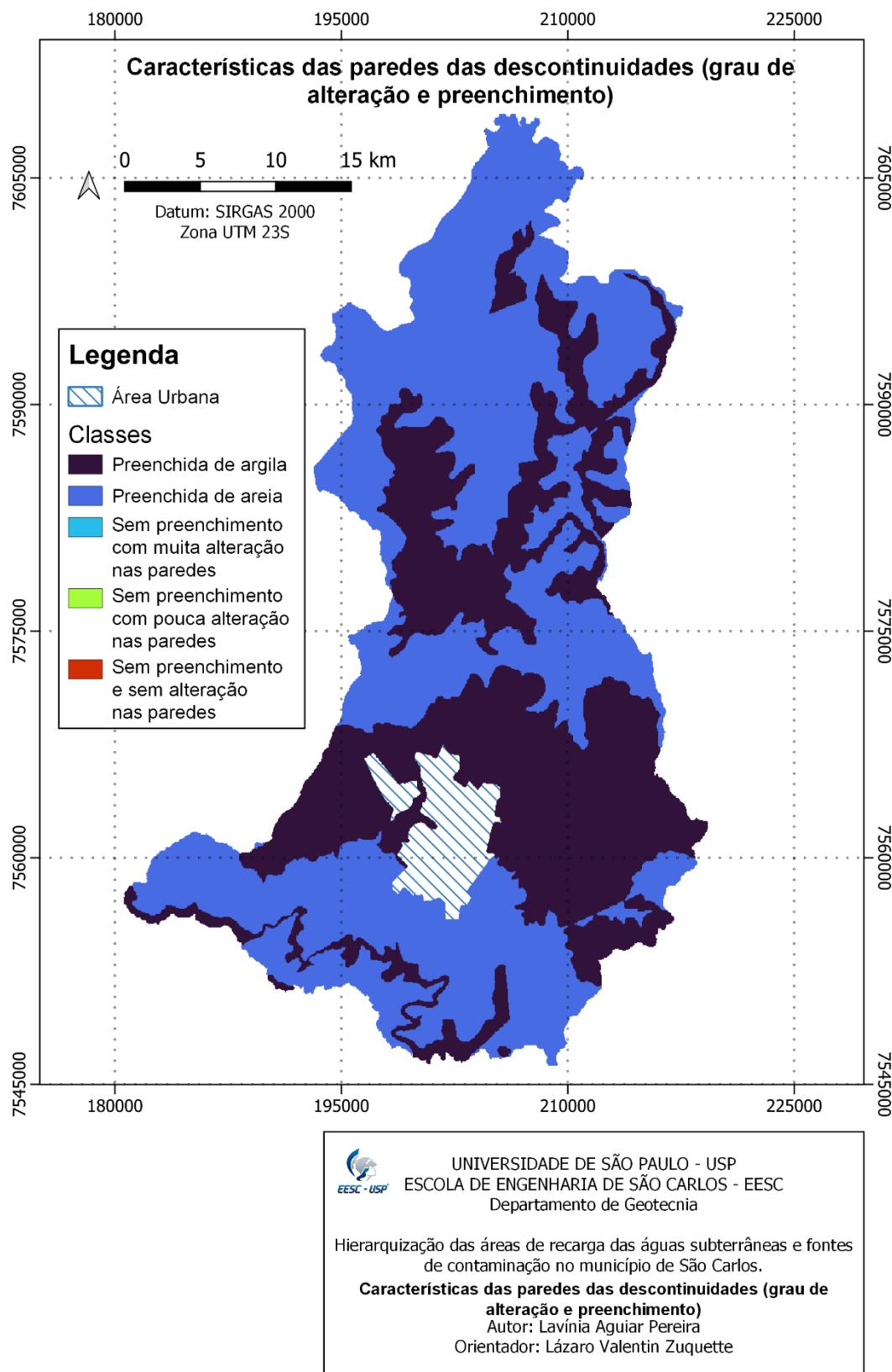
4.2.3.6 Características das paredes das descontinuidades (grau de alteração e preenchimento do substrato rochoso)

A carta das Características das paredes das descontinuidades (Figura 31) mostra o predomínio das estruturas preenchidas por areia, que ocupam 655,93 km² (~58,6%) do território municipal. Esses preenchimentos indicam fraturas abertas e permeáveis, nas quais o material arenoso atua como meio condutor, favorecendo a infiltração e o fluxo preferencial da água subterrânea. Essa condição é típica de arenitos e formações pouco consolidadas, onde a circulação hídrica ocorre de forma eficiente, aumentando o potencial de recarga, mas também elevando a vulnerabilidade à contaminação.

As descontinuidades preenchidas por argila abrangem 463,58 km² (~41,4%) e se distribuem em setores onde predominam basaltos, diabásios e arenitos mais consolidados. Nesses casos, o preenchimento fino e coeso reduz a condutividade hidráulica das fraturas, dificultando o fluxo vertical e o intercâmbio entre os aquíferos rasos e profundos. As fraturas argilosas tendem a funcionar como barreiras parciais, retardando o avanço de contaminantes e diminuindo o potencial de recarga direta, embora possam favorecer o armazenamento local de umidade.

De modo geral, o município apresenta equilíbrio entre descontinuidades condutivas (arenosas) e impermeáveis (argilosas), refletindo a heterogeneidade estrutural e litológica do substrato rochoso. Essa dualidade influencia fortemente a recarga subterrânea: enquanto as zonas de preenchimento arenoso ampliam a percolação e o fluxo vertical, as áreas de preenchimento argiloso atuam como camadas de proteção natural, filtrando ou retardando a migração de contaminantes.

Figura 31 - Características das paredes das descontinuidades (grau de alteração e preenchimento) do substrato rochoso



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.4 Grupo Geomorfológico

4.2.4.1 Declividade

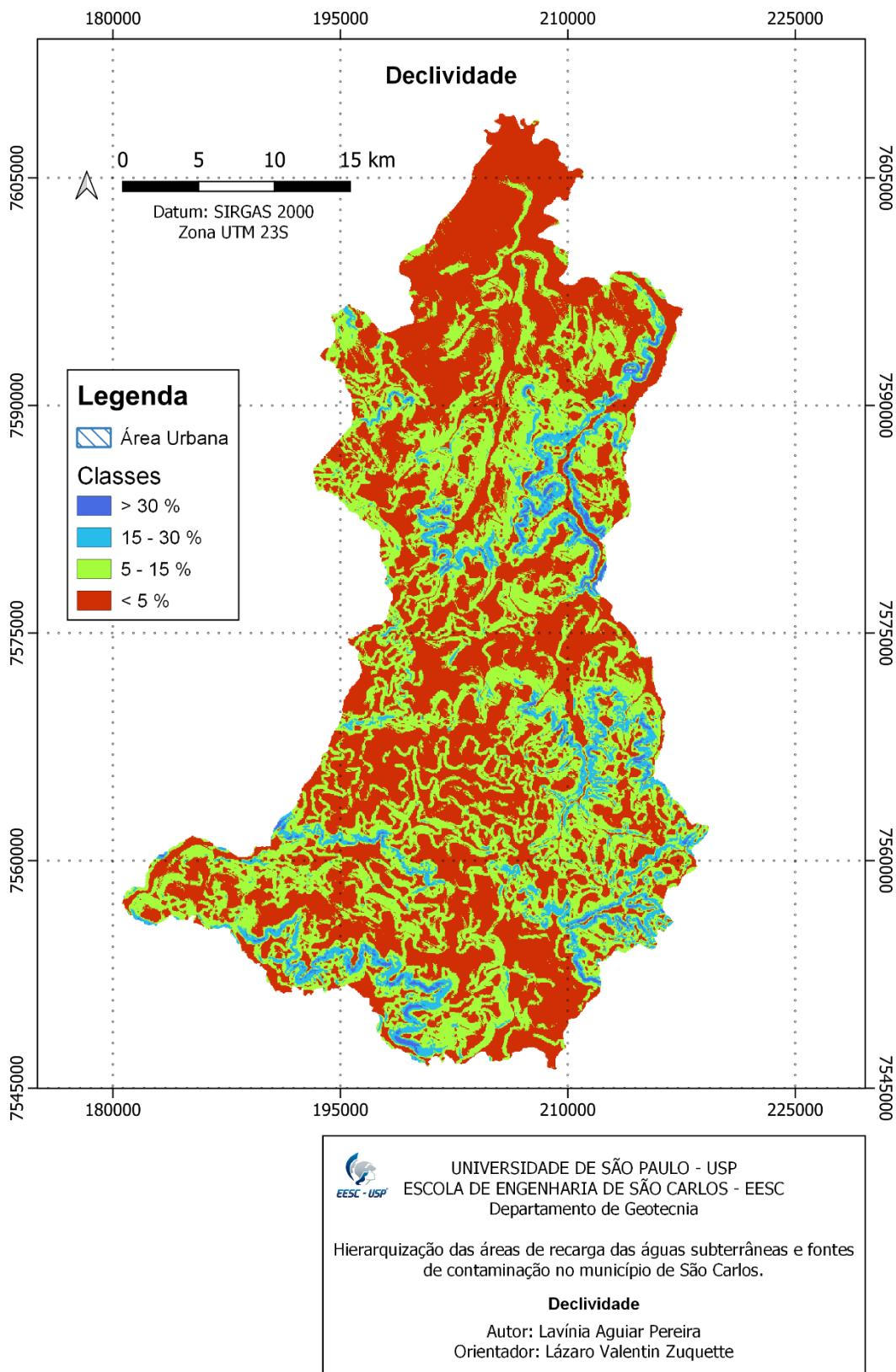
A carta de declividade (Figura 32) A carta de declividade mostra o predomínio das áreas com declividades inferiores a 5%, que ocupam 594,98 km² (~53%) do município. Essas regiões correspondem a superfícies suavemente onduladas e fundos de vales amplos, caracterizadas por escoamento superficial reduzido e maior potencial de infiltração. Por apresentarem gradientes baixos, essas áreas favorecem a recarga difusa das águas subterrâneas, constituindo zonas preferenciais de percolação vertical e armazenamento hídrico.

As declividades entre 5% e 15% abrangem 459,24 km² (~41%), representando relevos moderadamente ondulados, com equilíbrio entre infiltração e escoamento. Nesses setores, a recarga ainda é significativa, porém começa a haver maior escoamento superficial, especialmente em solos mais rasos ou compactados. Essas faixas são comuns nas transições entre planícies e topos suavizados, funcionando como áreas intermediárias de recarga e drenagem.

As declividades mais acentuadas (15–30%) somam 86,92 km² (~7,7%), e as superiores a 30% representam 13,12 km² (~1,2%) do território. Esses trechos, situados principalmente em bordas de drenagem e escarpas estruturais, apresentam escoamento superficial predominante e baixa capacidade de infiltração direta, configurando-se como zonas de menor contribuição à recarga. Além disso, são áreas naturalmente mais suscetíveis à erosão e instabilidade de encostas.

De modo geral, o município apresenta predominância de declividades suaves a moderadas, o que favorece o equilíbrio entre infiltração e escoamento superficial. As áreas planas e levemente onduladas destacam-se como zonas prioritárias para a recarga de aquíferos, enquanto as encostas mais íngremes exercem papel de escoamento concentrado, influenciando a redistribuição hídrica superficial e subterrânea.

Figura 32 - Declividade



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.5 Grupo das Águas Subterrâneas e Superficiais

4.2.5.1 Profundidade do topo da zona saturada (ZS)

A carta de profundidade do topo da zona saturada (Figura 33) mostra o predomínio das profundidades entre 5 e 10 m, que abrangem 416,55 km² (~37%) do município. Essa faixa representa níveis freáticos rasos, típicos de áreas com alta permeabilidade dos materiais inconsolidados e condições favoráveis à recarga direta. Nessas zonas, o tempo de percolação da água até a zona saturada é reduzido, o que favorece o reabastecimento do aquífero, mas também aumenta a vulnerabilidade à contaminação por fontes superficiais.

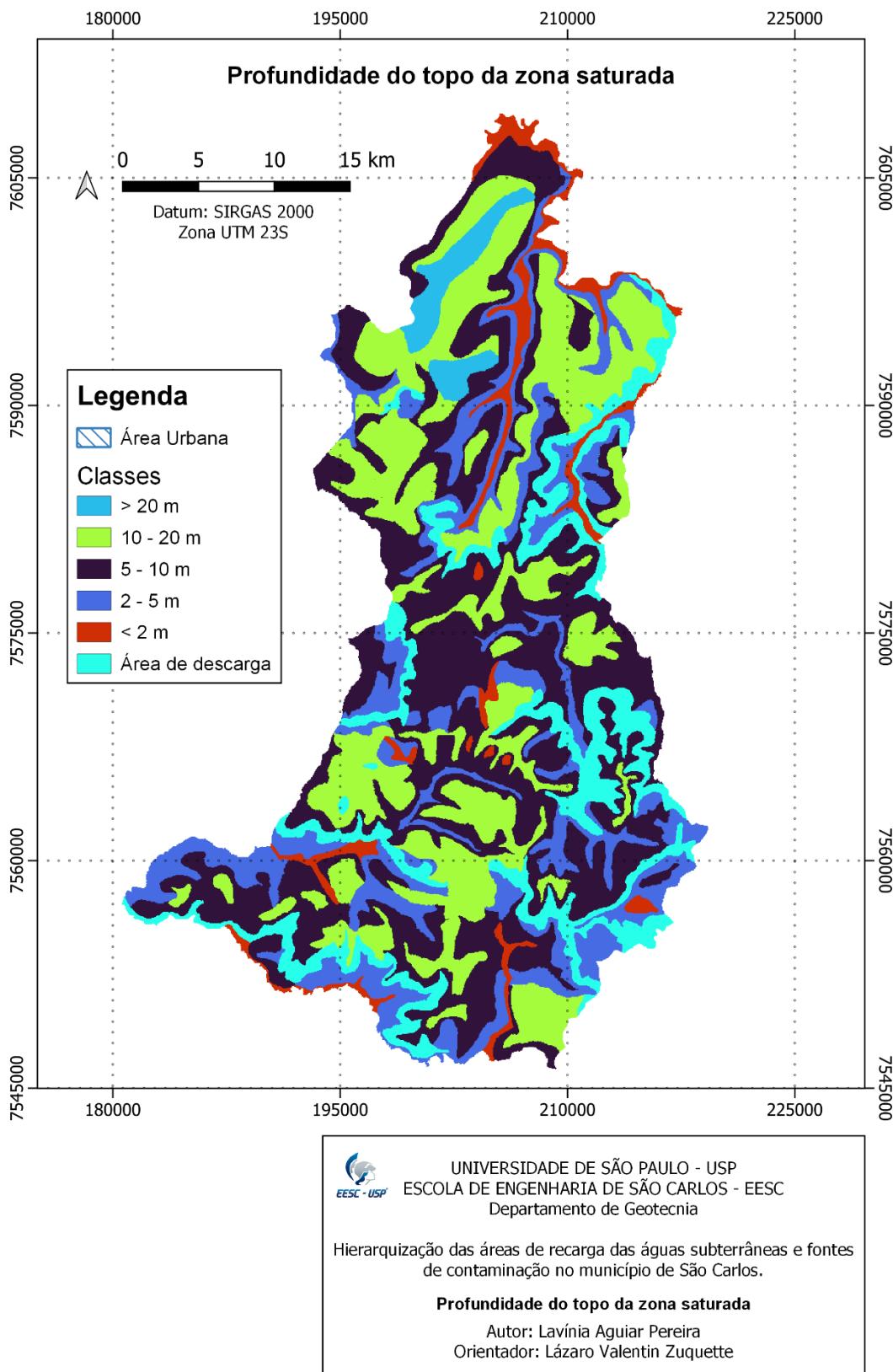
As profundidades intermediárias, entre 10 e 20 m, totalizam 301,65 km² (~27%), distribuídas principalmente nas porções centrais e de relevo suavemente ondulado. Essas áreas caracterizam condições estáveis de recarga, com infiltração moderada e maior capacidade de filtragem natural dos contaminantes. Os valores nessa faixa refletem boa eficiência de recarga, com risco ambiental reduzido.

As profundidades de 2 a 5 m somam 206,76 km² (~18%), e as menores que 2 m abrangem 50,91 km² (~4,5%), correspondendo às zonas mais rasas do lençol freático, frequentemente associadas a fundos de vale e áreas de várzea. Nesses locais, a recarga é intensa, porém o risco de contaminação é elevado, especialmente em regiões com presença de atividades antrópicas e solos pouco espessos.

As áreas de descarga, totalizando 146,71 km² (~13%), representam setores onde o fluxo subterrâneo emerge para a superfície, alimentando corpos d'água e drenagens. Já as regiões com profundidades superiores a 20 m, com 28,21 km² (~2,5%), indicam lençóis freáticos profundos, típicos de topos de morro e zonas de recarga lenta, onde a infiltração é reduzida e o armazenamento ocorre em camadas mais profundas do substrato.

De modo geral, observa-se que o município apresenta predominância de níveis freáticos rasos a intermediários, o que reforça o alto potencial de recarga das águas subterrâneas e a importância de gestão integrada com o uso do solo. As zonas com lençol raso e de descarga constituem áreas prioritárias para proteção da qualidade da água e controle de fontes poluidoras.

Figura 33 - Profundidade do topo da zona saturada



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.5.2 Número de poços de bombeamento por unidade

A carta de número de poços de bombeamento (Figura 34) evidencia a predominância de áreas sem poços cadastrados, que ocupam 1.170,93 km² (~99,97%) do território municipal. Essa ausência de estruturas de captação indica baixa exploração direta das águas subterrâneas em grande parte do município, o que pode estar associado à boa disponibilidade de abastecimento superficial, à proteção das áreas de recarga ou à falta de cadastro completo dos poços existentes.

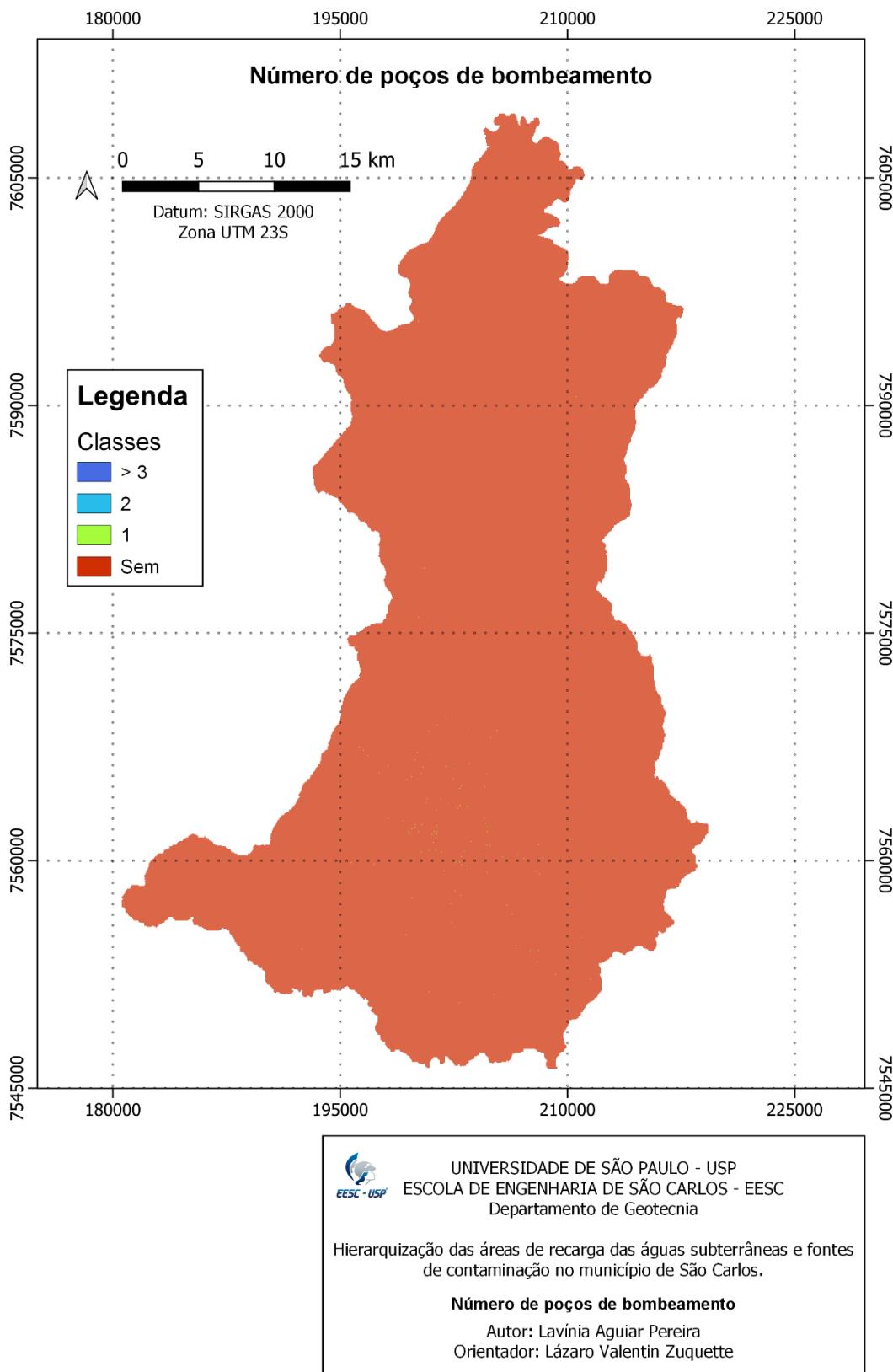
Apenas 0,03% da área (305.000 m²) apresenta a presença de um poço de bombeamento, concentrado em um ponto isolado. Essa ocorrência pontual indica uso localizado do recurso subterrâneo, possivelmente para fins industriais, agrícolas ou de abastecimento institucional.

Observa-se que a maioria dos poços se concentra na porção central e na zona alta do município, coincidente com a área urbana de São Carlos, onde se localizam os principais bairros, indústrias e instituições de ensino. Essa concentração está associada à maior demanda por abastecimento público e industrial, além da presença de infraestrutura consolidada. Em seguida, nota-se maior presença de poços na zona sul, área caracterizada por uso rural e atividades agropecuárias. Já a zona norte apresenta menor número de poços, indicando menor pressão sobre o aquífero e, possivelmente, maior dependência de mananciais superficiais.

A baixa densidade de poços sugere que o aquífero local ainda é pouco explorado, o que contribui para a preservação do equilíbrio hídrico subterrâneo e reduz os riscos de rebaixamento do lençol freático. Entretanto, a ausência de dados mais detalhados sobre a perfuração e o monitoramento desses poços pode ocultar áreas de uso irregular ou não licenciado, o que reforça a importância de atualizações cadastrais e integração com órgãos de gestão hídrica, como o DAEE.

De forma geral, observa-se que o município apresenta grande potencial para uso sustentável das águas subterrâneas, com predominância de áreas ainda não exploradas, o que é positivo do ponto de vista da preservação dos recursos hídricos e da manutenção das zonas de recarga.

Figura 34 - Número de poços de bombeamento por unidade



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.5.3 Número de fontes por unidade

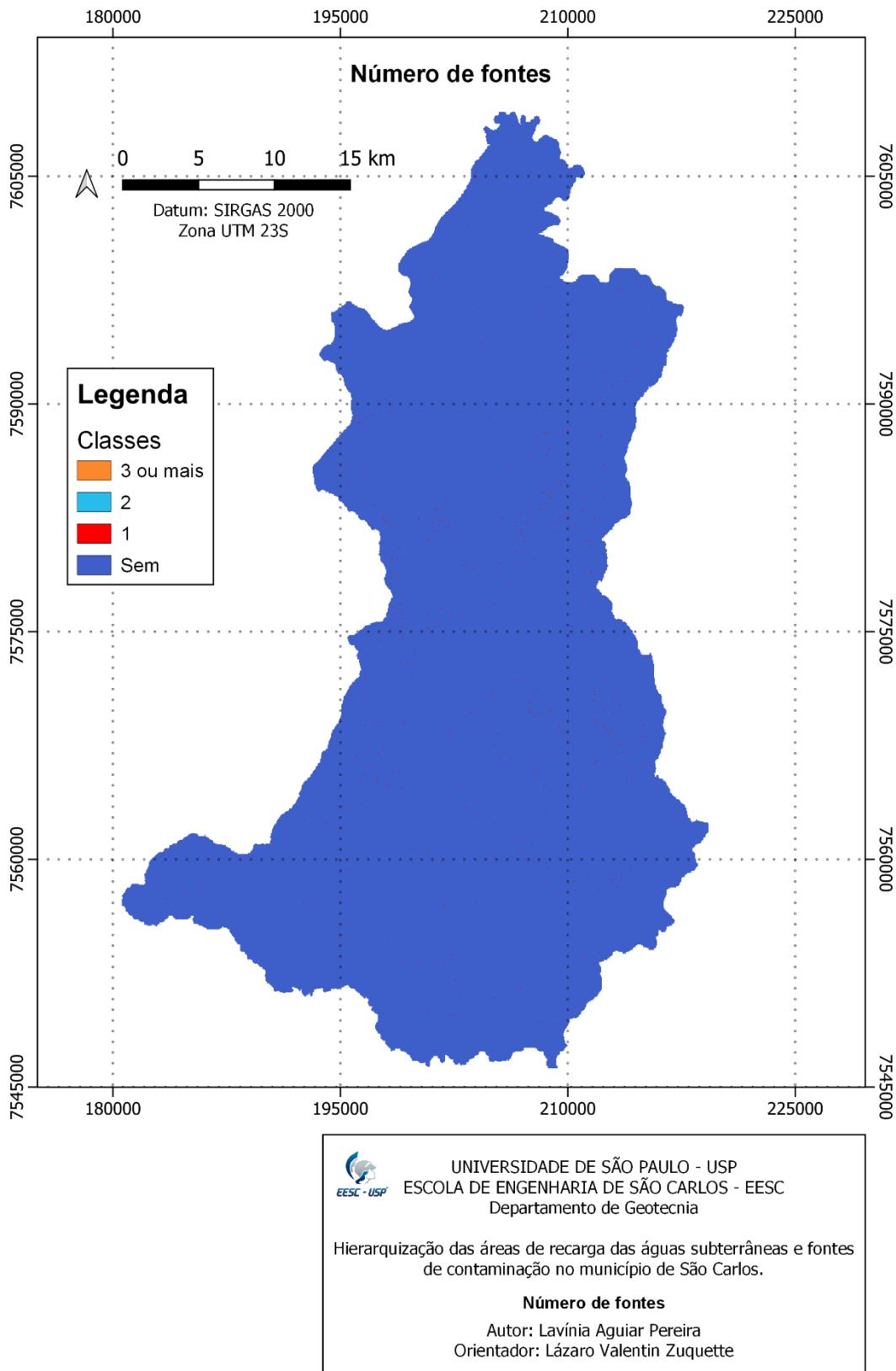
A carta de número de fontes por unidade (Figura 35) revela que a quase totalidade do município ($1.170,17 \text{ km}^2$, equivalente a ~99,9%) não apresenta fontes cadastradas, indicando baixa densidade de nascentes mapeadas ou possível sub-representação nos registros disponíveis. Apenas 0,1% da área ($1,17 \text{ km}^2$) apresenta a ocorrência de uma fonte.

Apesar do número reduzido, observa-se que as fontes estão distribuídas por todo o município, com maior concentração nas zonas norte e alta — regiões associadas a maiores altitudes, declividades mais acentuadas e proximidade das cabeceiras de drenagem, condições naturais que favorecem o surgimento de nascentes e exfiltrações difusas.

Essas áreas coincidem com setores de maior potencial de recarga, onde a topografia e a estrutura geológica local permitem que a água infiltrada retorne à superfície, alimentando córregos e contribuintes do sistema hidrográfico municipal. A zona sul apresenta menor ocorrência, reflexo de menor densidade de drenagem e predomínio de áreas planas, o que dificulta o afloramento natural do lençol freático.

A distribuição espacial das fontes, embora limitada, reforça a importância das zonas de recarga localizadas nas porções altas e norte do município, que desempenham papel essencial na manutenção das vazões de base e na sustentabilidade hídrica das bacias de drenagem. A carência de registros oficiais também destaca a necessidade de levantamentos complementares e de monitoramento contínuo das nascentes, tanto para fins de conservação quanto para o planejamento do uso do solo.

Figura 35 - Número de fontes por unidade



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.6 Grupo de Fontes Pontuais de Contaminação

4.2.6.1 Volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (m^3)

A carta de volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (Figura 36) representa a distribuição espacial das áreas do município de São Carlos que possuem acúmulo expressivo de resíduos sólidos ou materiais com potencial de contaminação ambiental, como aterros, áreas industriais, depósitos de resíduos de construção civil e lixões desativados. Essa variável reflete o porte e a capacidade de impacto das fontes pontuais, uma vez que o volume de resíduos armazenados está diretamente relacionado à quantidade potencial de contaminantes passíveis de liberação para o meio físico.

Os resultados indicam que as classes de maior volume são predominantes entre as áreas identificadas. A classe superior a $500.000\ m^3$ ocupa uma área de aproximadamente $1,98\ km^2$ (~68%), enquanto a classe entre 250.000 e $500.000\ m^3$ corresponde a cerca de $0,94\ km^2$ (~32%) do total. Essa concentração de volumes elevados demonstra a existência de poucas, porém expressivas áreas de acúmulo, associadas principalmente a empreendimentos de grande porte e infraestrutura consolidada de disposição de resíduos.

As áreas de maior volume ($>500.000\ m^3$) localizam-se nas porções central e sul do município, coincidindo com zonas de uso industrial, logístico e de serviços urbanos. Nessas regiões, encontram-se instalações de destinação final de resíduos sólidos, áreas de armazenamento e triagem, bem como antigos depósitos e pátios de compostagem e reciclagem. A magnitude desses volumes indica maior potencial de geração de lixiviados e percolados, especialmente em locais sem impermeabilização total ou com drenagem insuficiente, o que pode representar risco para o solo e, secundariamente, para os aquíferos superficiais.

Já as áreas de volume intermediário (250.000 a 500.000 m^3) são mais pontuais e se distribuem de forma dispersa pelo território municipal. Essas zonas estão geralmente associadas a empreendimentos de menor escala, como aterros controlados, depósitos de resíduos da construção civil e áreas de apoio operacional, cujo impacto ambiental tende a ser mais localizado. Ainda assim, em função do porte e da natureza do material armazenado, essas áreas demandam monitoramento periódico, controle de drenagem pluvial e manejo adequado do chorume e efluentes.

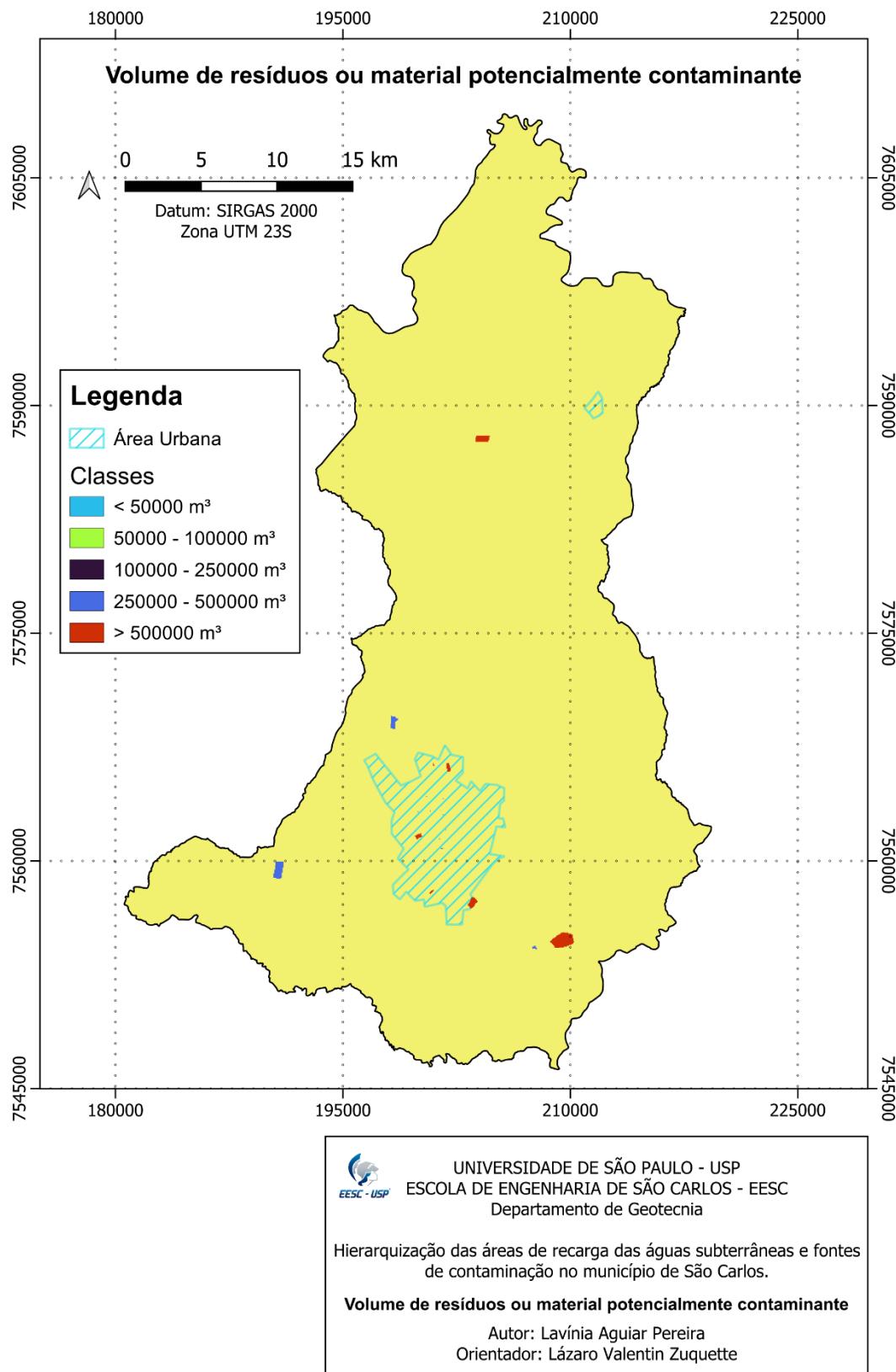
Observa-se que o município apresenta baixa densidade de áreas com acúmulo expressivo de resíduos, o que reflete boas práticas de gestão e centralização do descarte em poucos pontos, mas também ressalta a necessidade de controle técnico rigoroso sobre esses

locais de grande volume, devido ao risco potencial de percolação de contaminantes e emissão de gases.

De forma geral, a análise evidencia que o volume de resíduos ou materiais potencialmente contaminantes em São Carlos é concentrado em poucos empreendimentos de grande porte, situados principalmente em áreas já urbanizadas e impermeabilizadas. Essa configuração reduz o risco de infiltração direta, mas exige manutenção estrutural constante e fiscalização ambiental contínua, de modo a prevenir a migração de poluentes e o comprometimento das águas subterrâneas adjacentes.

Assim, o mapa de volume de resíduos contribui para a identificação e priorização das áreas críticas de armazenamento e disposição, sendo uma ferramenta essencial para o planejamento de ações de controle ambiental, reabilitação de áreas degradadas e prevenção de passivos ambientais futuros.

Figura 36 - volume de resíduos ou material potencialmente contaminante (m^3)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.6.2 Tempo de exposição (anos)

A carta de tempo de exposição (Figura 37) indica o período estimado de atividade ou permanência das fontes pontuais potencialmente contaminantes no território do município de São Carlos. Essa variável é fundamental para avaliar o grau de maturação dos processos de contaminação, uma vez que o tempo de exposição prolongado aumenta a probabilidade de liberação, mobilização e dispersão de poluentes no meio físico, especialmente quando associado a condições de manejo inadequado e ausência de barreiras de contenção.

Os resultados mostram que a totalidade das áreas mapeadas apresenta tempo de exposição superior a 20 anos, ocupando aproximadamente 2,93 km² do território municipal. Essa predominância de empreendimentos antigos indica que as principais fontes pontuais de risco ambiental estão associadas a atividades consolidadas historicamente, com funcionamento contínuo ou desativação recente, mas ainda sem processos completos de remediação ou requalificação ambiental.

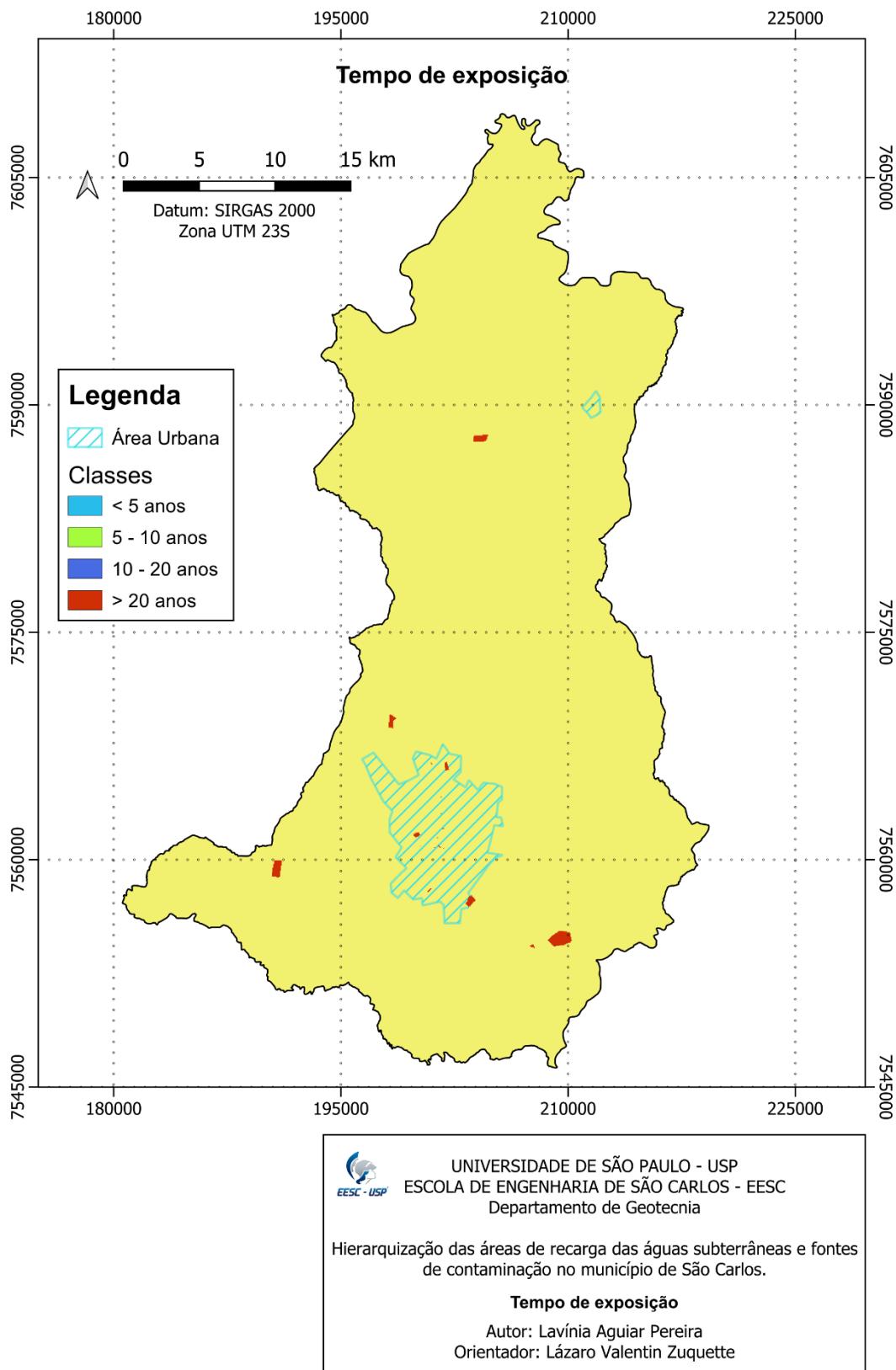
As áreas de maior tempo de exposição (>20 anos) estão concentradas principalmente nas porções central e sul do município, coincidindo com zonas industriais, áreas de serviços urbanos e locais anteriormente utilizados para disposição de resíduos, oficinas mecânicas, pátios de manutenção e unidades de armazenamento de combustíveis. Em muitos desses pontos, a antiguidade das estruturas e a falta de controle técnico nas décadas passadas elevam o potencial de contaminação residual, especialmente em solos não impermeabilizados e suscetíveis à infiltração.

Do ponto de vista hidrogeológico, o tempo prolongado de exposição implica maior interação entre os contaminantes e o meio físico, ampliando o risco de percolação vertical e transporte lateral de substâncias tóxicas. Mesmo em áreas atualmente pavimentadas, antigas práticas de disposição irregular, infiltração acidental de efluentes e acúmulo de resíduos industriais podem ter gerado plumas subterrâneas persistentes, demandando investigação detalhada e monitoramento periódico.

A presença predominante de fontes com mais de duas décadas de existência reflete o caráter histórico da ocupação urbana e industrial de São Carlos, marcada pela expansão gradual das atividades produtivas e de infraestrutura sem, inicialmente, o suporte de políticas ambientais rigorosas. Apesar dos avanços recentes na gestão ambiental e na legislação sobre áreas contaminadas, parte dessas áreas antigas ainda representa passivos ambientais potenciais, exigindo ações de diagnóstico e reabilitação.

Assim, a análise do tempo de exposição evidencia que o risco ambiental associado às fontes pontuais no município é mais qualitativo do que quantitativo, concentrando-se em poucas áreas antigas de atividade contínua. Esses resultados reforçam a importância de inventariar e priorizar o monitoramento das áreas com histórico de uso industrial, de disposição de resíduos ou de armazenamento de substâncias perigosas, de modo a prevenir a reincidência de contaminações e garantir o uso seguro do solo urbano e periurbano.

Figura 37 - Tempo de exposição (anos)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.6.3 Técnicas de disposição

A carta do atributo “Técnicas de disposição” (Figura 38) representa as formas utilizadas para o manejo e destinação final dos resíduos sólidos e materiais potencialmente contaminantes no município de São Carlos. Esse parâmetro é crucial para a avaliação do grau de vulnerabilidade ambiental das fontes pontuais, pois reflete diretamente a eficiência dos sistemas de contenção e mitigação quanto à infiltração de poluentes e à geração de percolados.

Os resultados evidenciam que todas as áreas mapeadas ($2,92 \text{ km}^2$) encontram-se classificadas na categoria “sem qualquer sistema de mitigação”, correspondendo a aterros comuns e antigos lixões. Essa situação revela que, historicamente, as práticas de disposição adotadas no município não incluíam barreiras técnicas adequadas, como impermeabilização de base, drenagem de chorume, captação de gases ou sistemas de monitoramento ambiental.

Essas áreas estão localizadas principalmente nas porções sul e centro-sudeste do município, coincidindo com setores tradicionalmente ocupados por instalações de disposição de resíduos urbanos e industriais. Nessas regiões, observa-se a presença de aterros controlados antigos, depósitos de entulho e lixões desativados, que foram utilizados por longos períodos antes da consolidação das normas ambientais vigentes (como as resoluções CONAMA nº 313/2002 e nº 404/2008).

Do ponto de vista técnico, a ausência de sistemas de contenção implica alto potencial de percolação de contaminantes no solo e nas águas subterrâneas, especialmente em locais com solos arenosos, lençol freático raso e declividades suaves, condições que favorecem a infiltração e o transporte de substâncias dissolvidas. Além disso, a exposição direta dos resíduos às chuvas intensifica o processo de lixiviação, promovendo a mobilização de compostos orgânicos, metais pesados e nutrientes em direção às camadas inferiores do solo.

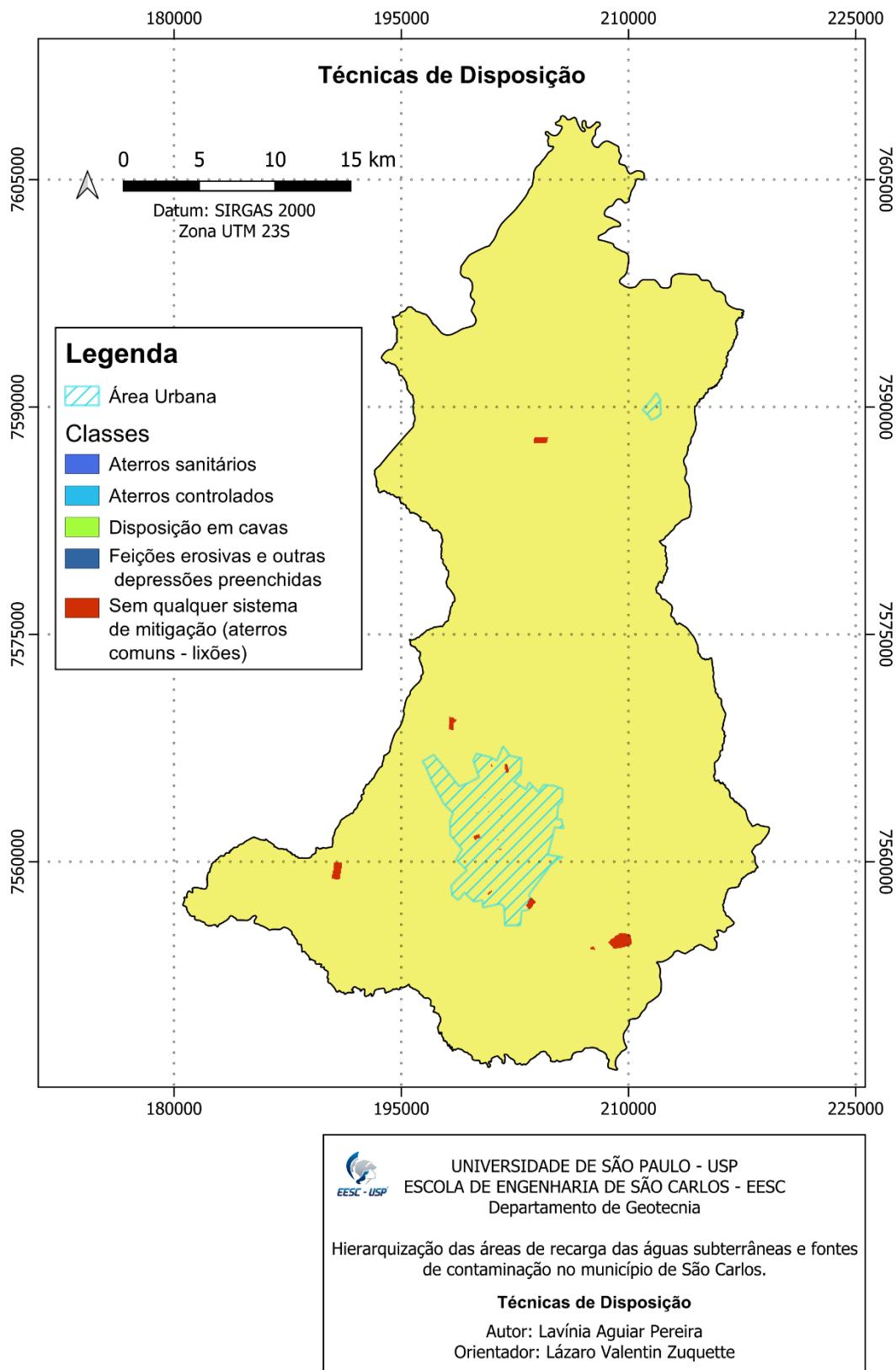
A análise espacial também sugere que algumas dessas áreas se sobrepõem a zonas de recarga moderada a alta, identificadas nas cartas hidrogeológicas anteriores, o que agrava o risco ambiental ao associar vulnerabilidade natural do meio físico à ausência de controle técnico. Essa combinação reforça a necessidade de ações corretivas e de monitoramento, incluindo estudos hidrogeológicos detalhados, instalação de piezômetros e acompanhamento das concentrações de contaminantes no entorno.

De forma geral, a carta demonstra que as técnicas de disposição adotadas historicamente em São Carlos foram predominantemente rudimentares, refletindo o contexto anterior à modernização da gestão de resíduos. Atualmente, apesar da redução dessas práticas, as áreas antigas ainda constituem passivos ambientais relevantes, exigindo atenção contínua do poder

público e dos órgãos de controle para prevenir a reativação de processos de contaminação e garantir a reabilitação ambiental dos terrenos.

Assim, o mapa reforça a importância de implantar e manter sistemas de mitigação adequados, especialmente nas áreas de disposição de resíduos inativas, com o objetivo de interromper fluxos contaminantes e preservar as condições de qualidade do solo e da água subterrânea no município.

Figura 38 - Técnicas de disposição



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.6.4 Tipos de resíduos

O mapa de Tipos de Resíduos (Figura 39) representa a caracterização das principais classes de materiais depositados nas áreas pontuais de disposição identificadas no município de São Carlos. Essa variável é essencial para a avaliação do risco potencial de contaminação, uma vez que a natureza física e química dos resíduos determina tanto o grau de periculosidade dos contaminantes gerados quanto a mobilidade e persistência das substâncias no meio ambiente.

Os resultados demonstram que a totalidade das áreas mapeadas (aproximadamente 2,93 km²) é composta por resíduos sólidos e líquidos urbanos, além de resíduos e rejeitos da construção civil. Essa configuração revela a predominância de fontes de natureza doméstica e inerte, embora com potencial de impacto relevante quando associadas à ausência de sistemas de contenção e ao longo tempo de exposição.

Os resíduos sólidos e líquidos urbanos incluem materiais provenientes do descarte domiciliar, comercial e de serviços urbanos, contendo matéria orgânica em decomposição, rejeitos diversos, lodos e efluentes sem tratamento adequado. Esse tipo de resíduo, quando disposto sem impermeabilização de base ou drenagem de chorume, gera líquidos percolados altamente contaminantes, ricos em compostos nitrogenados, metais pesados e microrganismos patogênicos, com elevado potencial de infiltração nas camadas superficiais do solo. Além disso, a decomposição anaeróbia desses resíduos pode liberar gases como metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), contribuindo para riscos de explosividade local e impactos climáticos.

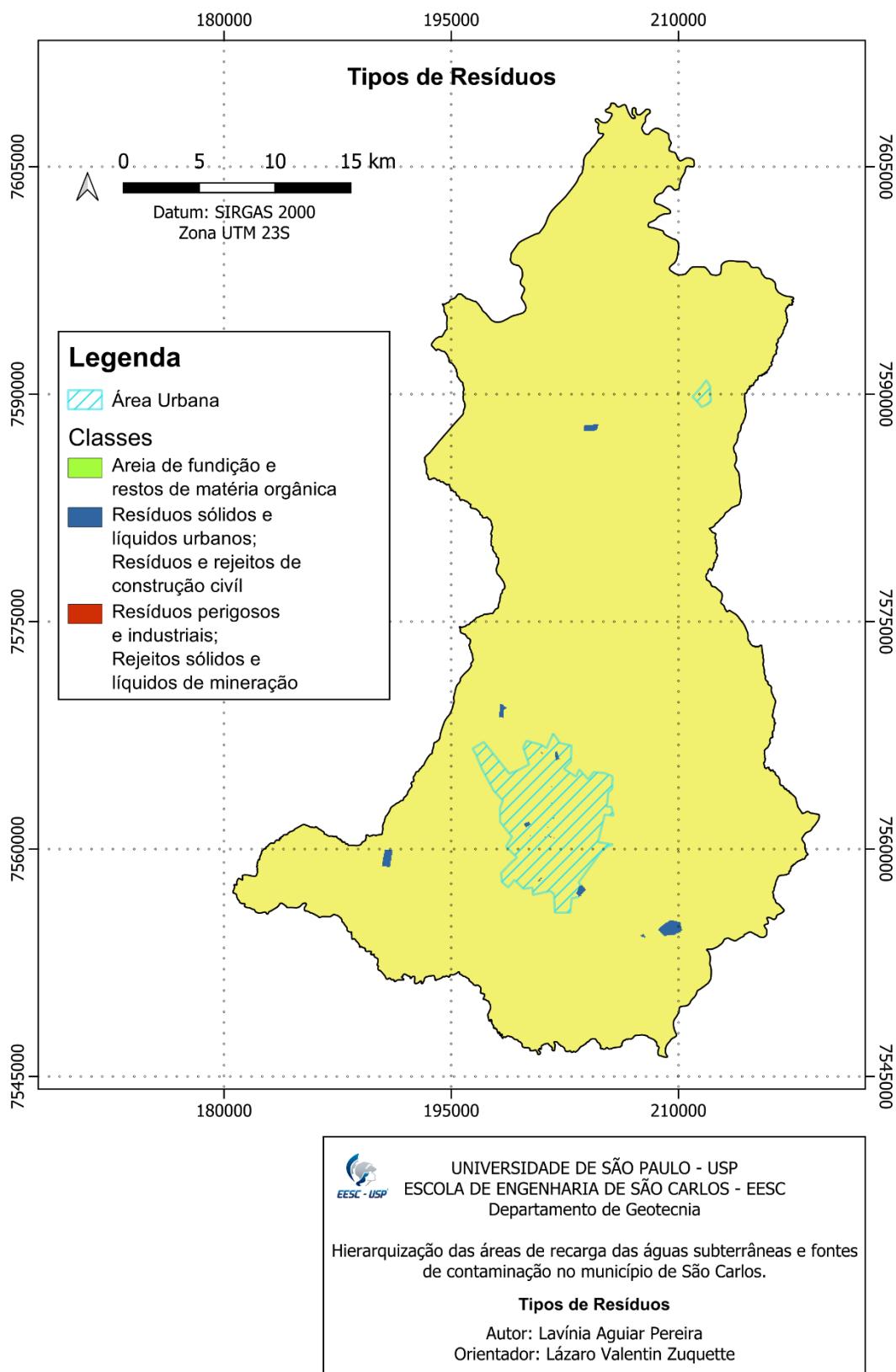
Já os resíduos e rejeitos de construção civil (RCC) correspondem principalmente a solos escavados, concreto, cerâmica, tijolos, argamassa e materiais de demolição. Embora classificados como resíduos predominantemente inertes, quando depositados de forma irregular — especialmente sobre o solo natural ou em áreas de recarga —, podem modificar a drenagem superficial e reduzir a infiltração difusa, além de contribuir para o assoreamento de cursos d'água e degradação de nascentes. Em casos de presença de tintas, solventes, metais e aditivos químicos, o RCC também pode assumir caráter potencialmente contaminante.

A sobreposição espacial dessas classes com as áreas de disposição sem sistema de mitigação (Figura anterior) evidencia que grande parte dos resíduos urbanos e da construção civil foi acumulada sem controle técnico adequado, principalmente em áreas periféricas e de topografia suave. Tais condições ampliam o risco de migração vertical de contaminantes e alteração físico-química do solo, sobretudo em setores de recarga intermediária ou alta, conforme identificado nas cartas hidrogeológicas.

Assim, a análise dos tipos de resíduos reforça o caráter histórico e difuso das fontes pontuais no município, evidenciando que, embora predominem materiais de baixa periculosidade isoladamente, o conjunto de fatores — grande volume, tempo prolongado de exposição e ausência de contenção — eleva significativamente o risco ambiental global dessas áreas.

Em síntese, o município de São Carlos apresenta um perfil de fontes pontuais formado majoritariamente por resíduos urbanos e de construção civil, cujo impacto potencial depende menos da toxicidade intrínseca e mais das condições de disposição e da vulnerabilidade natural do meio físico. A gestão adequada dessas áreas, com ações de reabilitação, cobertura e monitoramento geotécnico e hidroquímico, é fundamental para prevenir a contaminação do solo e das águas subterrâneas e garantir o uso sustentável do território.

Figura 39 - Tipos de Resíduos



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.6.5 Material geológico de base

A carta de material geológico de base (Figura 40) representa as unidades litológicas subjacentes às áreas de disposição de resíduos e potenciais fontes pontuais de contaminação. Esse atributo é determinante para compreender a mobilidade dos contaminantes e o comportamento do fluxo subterrâneo, já que a litologia influencia diretamente a condutividade hidráulica, a capacidade de adsorção e o tempo de residência dos poluentes no subsolo.

Os resultados indicam a predominância de duas classes principais: Basalto, com área de aproximadamente 0,25 km², e alto fluxo, abrangendo 2,69 km². Essa distribuição evidencia a coexistência de materiais de baixa permeabilidade (representados pelas rochas basálticas) e materiais altamente permeáveis e fraturados, associados a formações arenosas ou a zonas de intensa circulação de água subterrânea.

As áreas sobre basaltos da Formação Serra Geral correspondem a setores onde o substrato é caracterizado por rochas ígneas compactas, com condutividade hidráulica muito baixa e predomínio de escoamento superficial. Essas regiões atuam como barreiras naturais à percolação vertical, restringindo a infiltração de contaminantes para níveis mais profundos. Apesar disso, o acúmulo superficial de poluentes sobre essas rochas pode gerar escoamento lateral contaminado, que atinge drenagens próximas, especialmente quando há declividade acentuada.

Em contrapartida, as áreas classificadas como de alto fluxo indicam a presença de materiais inconsolidados altamente permeáveis ou fraturamentos intensos, nos quais o movimento da água subterrânea é rápido e contínuo. Essa condição, embora favoreça a recarga hídrica, também aumenta a vulnerabilidade à contaminação, pois substâncias dissolvidas tendem a se deslocar com facilidade através dos poros e fraturas, atingindo zonas mais profundas do aquífero.

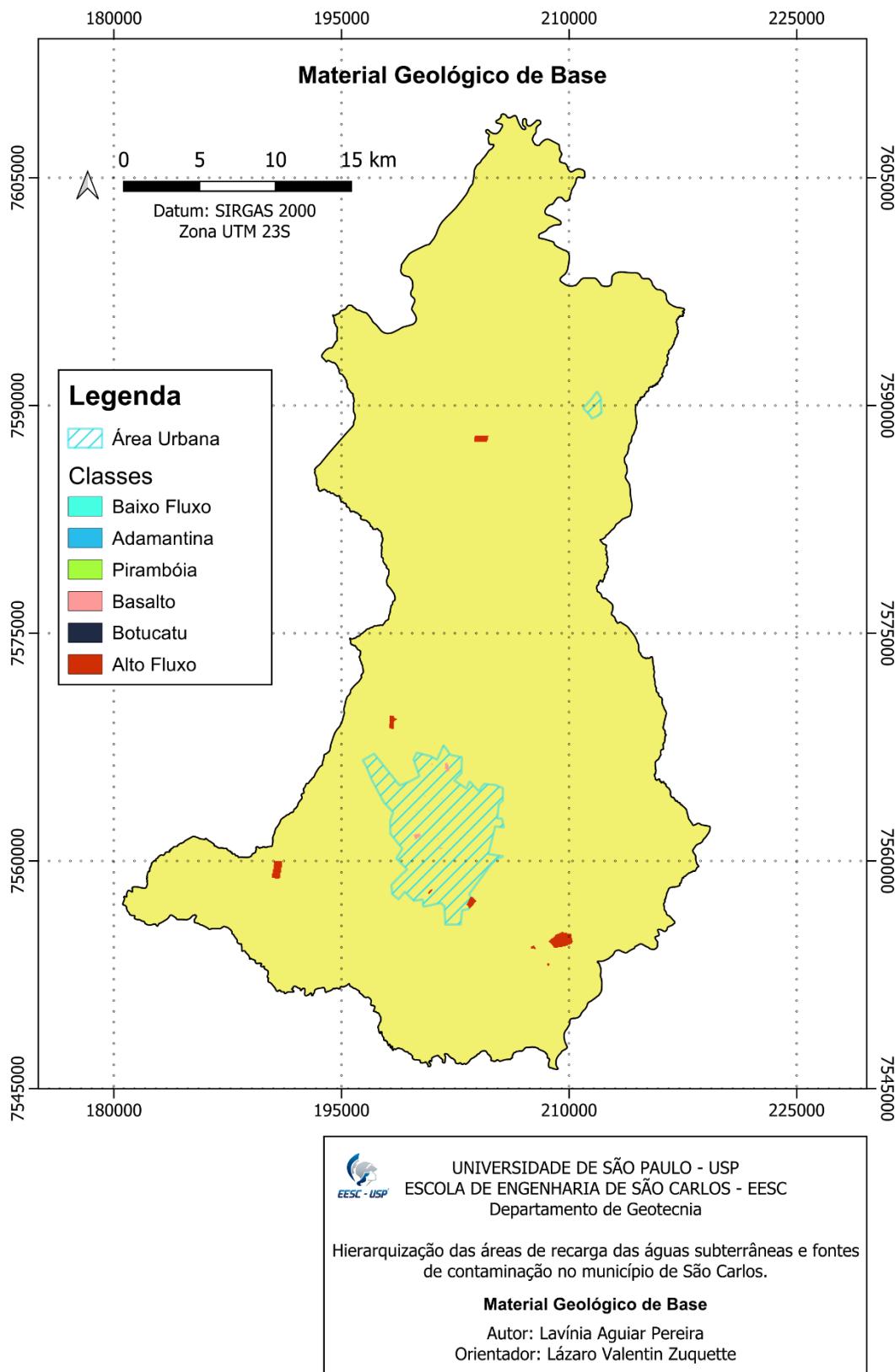
A sobreposição espacial dessas classes com os antigos locais de disposição de resíduos e atividades industriais sugere que grande parte das fontes pontuais se encontra sobre áreas de alta permeabilidade, o que eleva o risco potencial de migração de contaminantes. Nessas situações, a ausência de sistemas de impermeabilização, associada a décadas de exposição (como indicado nas cartas anteriores), cria condições favoráveis à infiltração e dispersão de lixiviados no perfil do solo.

De forma geral, o mapeamento do material geológico de base reforça a importância de considerar a geologia local como elemento-chave na avaliação de risco ambiental. As áreas sobre basalto atuam como zonas de proteção relativa, limitando o transporte vertical de

contaminantes, enquanto as áreas de alto fluxo devem ser prioritárias em ações de monitoramento e remediação, dado o seu elevado potencial de condução de poluentes.

Assim, conclui-se que a vulnerabilidade associada ao material geológico de base no município de São Carlos é heterogênea, variando de baixa a muito alta conforme a natureza do substrato. Esse fator, aliado às condições de disposição inadequada e à ausência de mitigação, evidencia a necessidade de um planejamento integrado entre geologia, uso do solo e gestão ambiental, garantindo maior segurança na ocupação e no manejo das áreas potencialmente contaminadas.

Figura 40 - Material geológico de base



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.6.6 Conteúdo inicial de água (%)

A carta de conteúdo de umidade no resíduo (Figura 41) expressa o percentual estimado de umidade presente nos materiais e resíduos dispostos nas áreas de fontes pontuais, sendo um indicador importante para a mobilidade de contaminantes e geração de percolados. O teor de água inicial influencia diretamente os processos de lixiviação, transporte de solutos e reações químicas que ocorrem no interior das massas de resíduos e no solo subjacente.

Os resultados indicam que as áreas analisadas concentram-se em duas classes principais: 25–50% e >50% de conteúdo de água, abrangendo 0,94 km² (≈33%) e 1,98 km² (≈67%), respectivamente. Essa predominância de valores elevados sugere que os resíduos depositados apresentam alta umidade, o que é coerente com a natureza mista e orgânica dos materiais identificados (resíduos sólidos urbanos, lodos e efluentes líquidos, conforme descrito no item anterior).

As áreas com umidade superior a 50% distribuem-se principalmente nas porções sul e centro-sul do município, onde também se observam as maiores concentrações de materiais inconsolidados e zonas de alta permeabilidade. Essa condição intensifica a mobilização vertical de contaminantes, uma vez que o excesso de água disponível favorece a dissolução e o transporte de substâncias solúveis, além de contribuir para a geração de chorume com elevada carga orgânica e inorgânica.

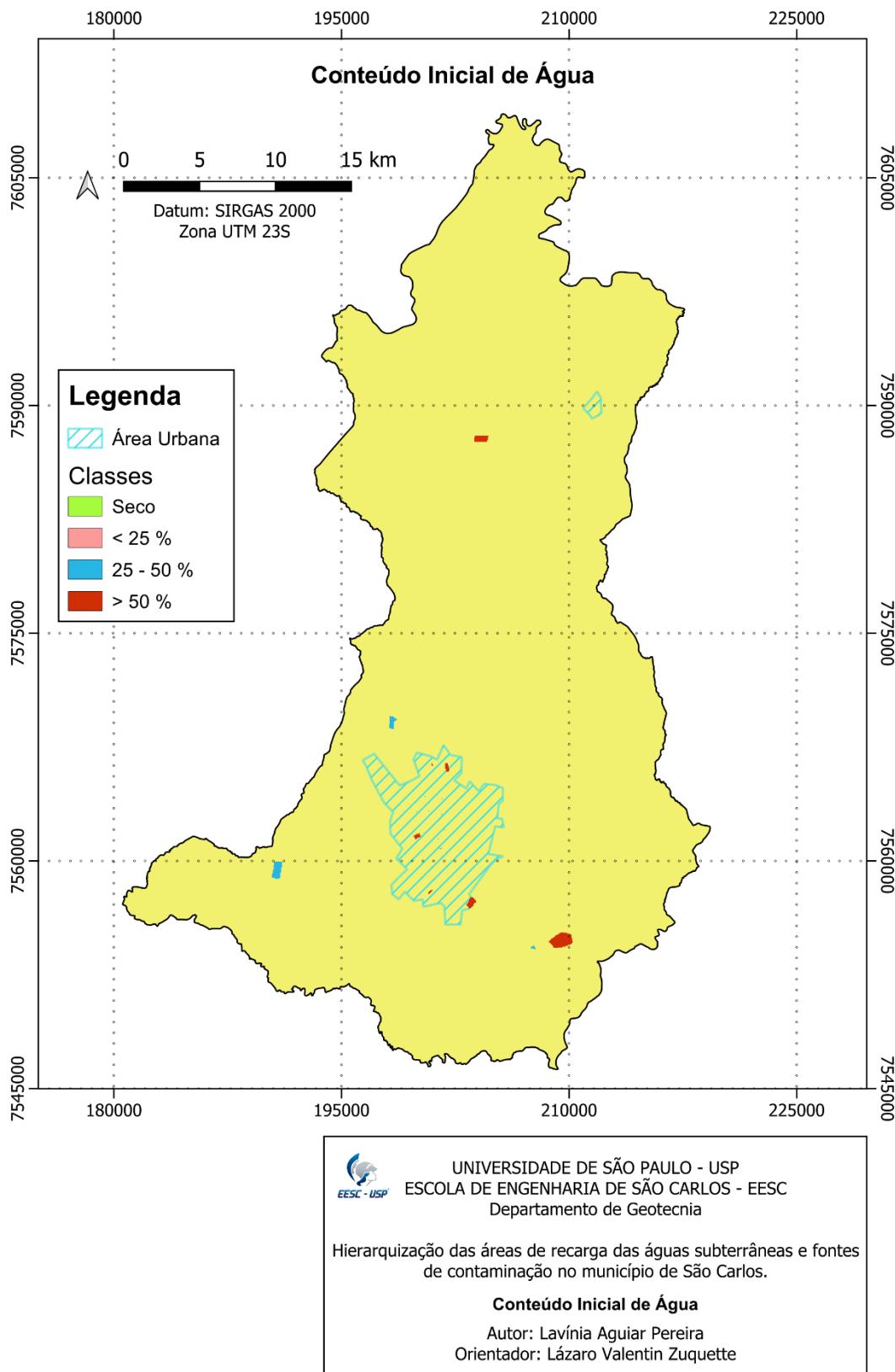
Já as áreas com 25–50% de umidade, localizadas predominantemente nas regiões mais elevadas e de substrato basáltico, apresentam menor propensão à infiltração direta, mas ainda mantêm risco ambiental significativo, especialmente quando associadas à ausência de impermeabilização e às técnicas de disposição inadequadas observadas em cartas anteriores. Nesses locais, o conteúdo hídrico intermediário pode sustentar processos anaeróbios de decomposição, liberando gases e compostos voláteis, com potencial de migração lateral.

O elevado teor de umidade encontrado nas áreas mapeadas reforça o papel do conteúdo inicial de água como agente facilitador da contaminação, pois amplia o contato entre a fase líquida e os resíduos, promovendo reações químicas e a geração contínua de lixiviados. Esse fator é particularmente crítico quando associado a materiais geológicos de alta condutividade e ausência de barreiras artificiais, resultando em vulnerabilidade ambiental ampliada.

De forma geral, o mapeamento evidencia que o município de São Carlos apresenta condições favoráveis à produção e infiltração de líquidos percolados em áreas de disposição de resíduos, devido à combinação entre alto conteúdo de água, ausência de mitigação técnica e materiais de base permeáveis. Assim, a manutenção e o monitoramento dessas áreas são

essenciais para prevenir a contaminação difusa do solo e do aquífero freático, especialmente nas zonas onde há coincidência entre alta umidade e elevado potencial de recarga.

Figura 41 - Conteúdo inicial de água (%)



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.7 Grupo de Fontes Difusas de Contaminação

4.2.7.1 Áreas urbanas

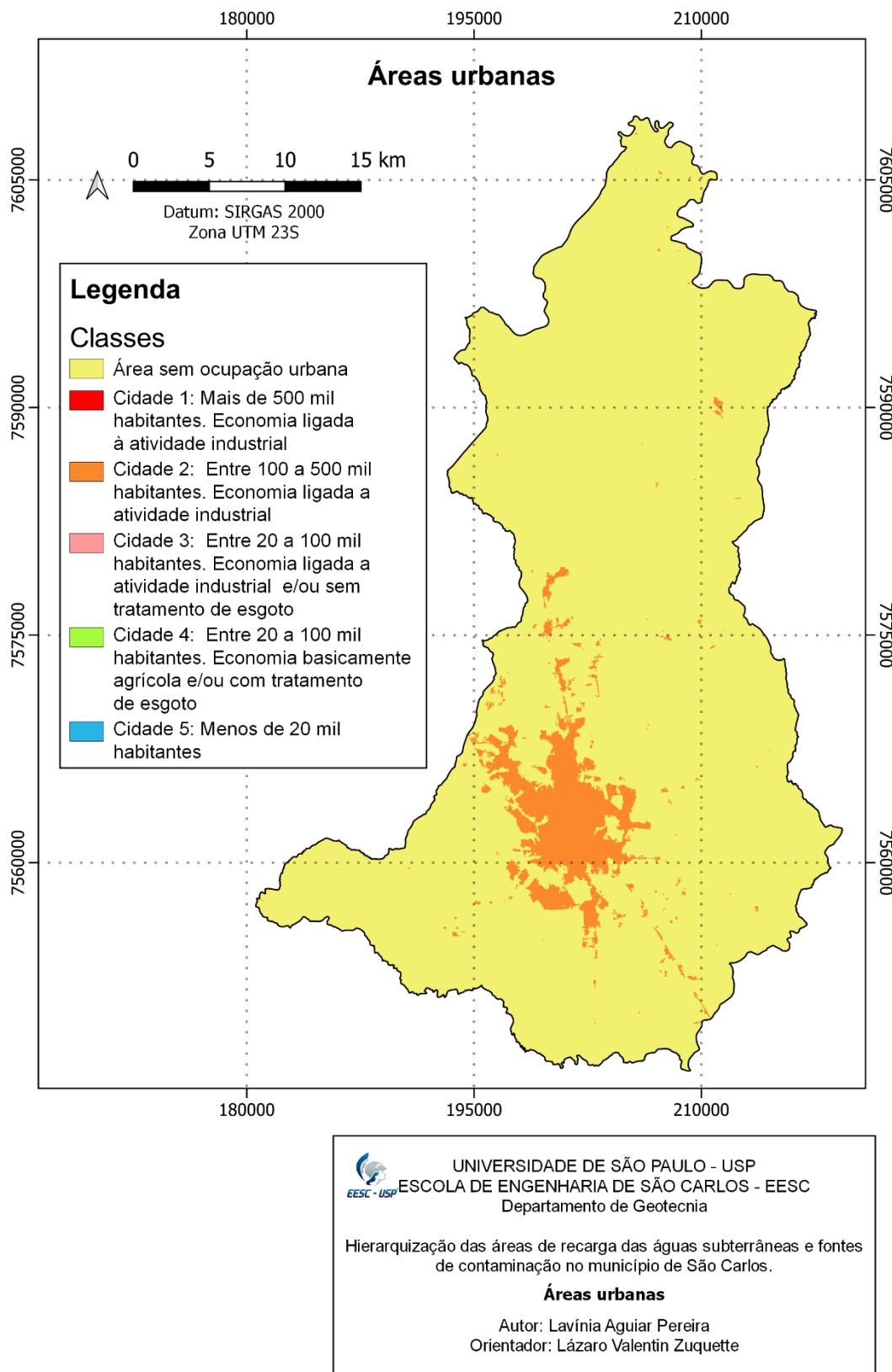
A carta de áreas urbanas (Figura 42) evidencia que a maior parte do município de São Carlos (equivalente a aproximadamente 94%) é composta por áreas sem ocupação urbana, predominando usos rurais, vegetação natural e zonas de recarga. Essas regiões desempenham papel essencial na infiltração das águas pluviais e na manutenção do equilíbrio hidrogeológico, atuando como áreas de proteção natural contra fontes difusas de contaminação.

Por outro lado, aproximadamente 6% do território corresponde a áreas urbanizadas, enquadradas como Cidade 2, que engloba centros urbanos com população entre 100 e 500 mil habitantes e economia associada à atividade industrial — categoria que representa o município de São Carlos.

Essas áreas urbanas se concentram principalmente na região central e sudoeste do município, onde se localiza o perímetro urbano consolidado. A densidade de ocupação e a presença de atividades industriais indicam maior potencial de geração de fontes difusas de contaminação, especialmente relacionadas ao escoamento superficial de águas pluviais, impermeabilização do solo e lançamento de efluentes domésticos e industriais.

Ainda assim, observa-se que a urbanização mantém-se relativamente concentrada, cercada por extensas áreas rurais e de vegetação natural que funcionam como zonas de amortecimento ambiental, contribuindo para a proteção das áreas de recarga do aquífero. Esse cenário reforça a importância do planejamento urbano integrado à gestão ambiental, de modo a conter a expansão desordenada e minimizar os impactos sobre os recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

Figura 42 - Áreas urbanas



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.7.2 Tipos de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de Tipos de Uso e Ocupação do Solo (Figura 43) evidencia a forte predominância da cana-de-açúcar, que ocupa cerca de 31% da área total do município. Essa cultura é característica da região e exerce papel relevante na economia local, porém representa um dos principais fatores de pressão ambiental, devido ao uso intensivo de defensivos agrícolas e fertilizantes, além da compactação do solo decorrente do tráfego de máquinas pesadas. Essas condições podem reduzir a infiltração e aumentar o escoamento superficial, contribuindo para fontes difusas de contaminação.

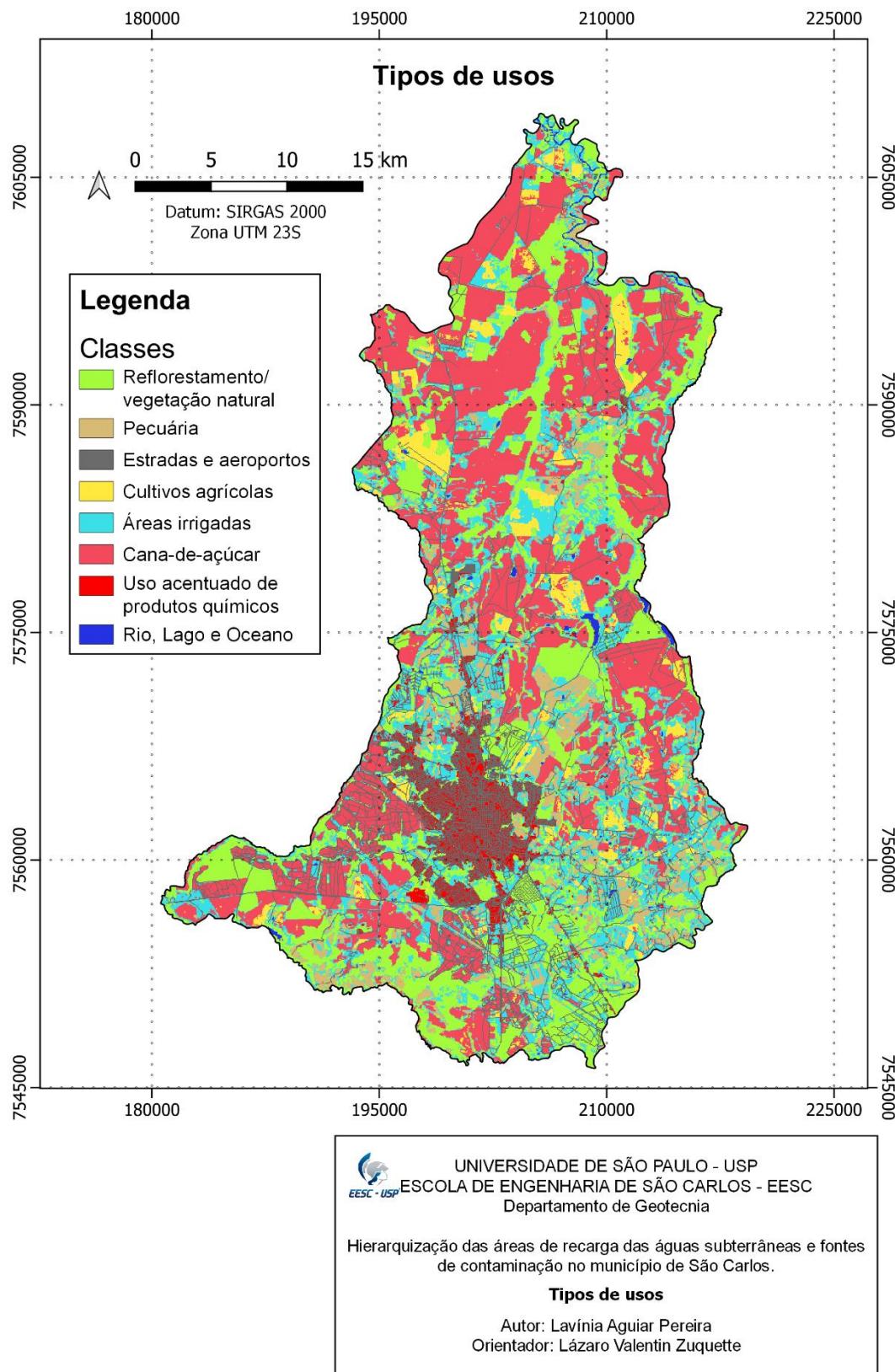
As áreas de reflorestamento e vegetação natural somam ~23%, concentrando-se principalmente em porções de relevo acidentado e zonas de recarga, o que reforça sua importância na proteção dos recursos hídricos e na estabilidade dos solos. Essas áreas funcionam como barreiras naturais à contaminação difusa, favorecendo a infiltração e o armazenamento de água subterrânea.

Em seguida, destacam-se as áreas irrigadas (~18,6%) e as zonas de estradas e aeroportos (~11,6%), que representam usos antrópicos de maior impermeabilização e vulnerabilidade à contaminação superficial. As pastagens e áreas de pecuária (~7%) e os cultivos agrícolas diversos (~4,7%) também se distribuem amplamente, compondo um mosaico rural heterogêneo com diferentes graus de interferência sobre o solo e a água.

Por fim, as áreas de uso acentuado de produtos químicos — toda a área urbana em vermelho — embora representem apenas ~2%, configuram zonas críticas do ponto de vista ambiental, especialmente próximas às áreas irrigadas e de cultivo intensivo.

O padrão espacial indica um predomínio de usos agroindustriais e rurais sobre o território, com fragmentos de vegetação natural atuando como elementos de amortecimento ambiental. Esse contexto ressalta a necessidade de monitoramento contínuo do manejo agrícola e da implementação de práticas conservacionistas, de modo a reduzir a carga de poluentes difusos e preservar as zonas de recarga subterrânea do município.

Figura 43 - Tipos de Uso e Ocupação do Solo



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.7.3 Diversidade de Produtos

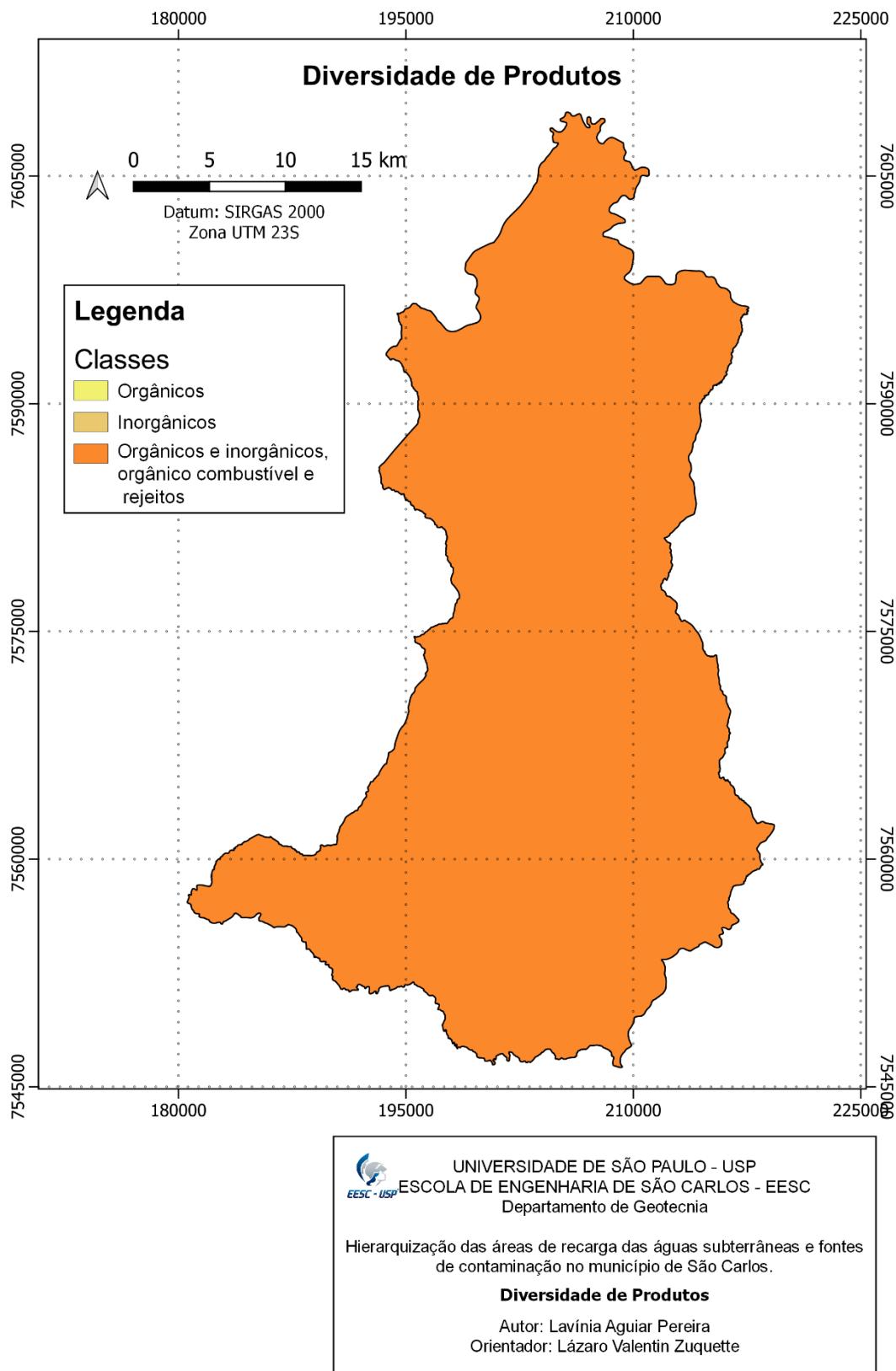
O mapa de Diversidade de Produtos das fontes difusas (Figura 44) demonstra que a totalidade do território municipal apresenta ocorrência de produtos orgânicos, inorgânicos, combustíveis e rejeitos. Esse resultado reflete o caráter multifatorial das pressões ambientais sobre o município de São Carlos, onde coexistem atividades agrícolas, industriais, urbanas e de infraestrutura viária, cada uma contribuindo de forma distinta para a geração de contaminantes difusos.

As substâncias orgânicas estão majoritariamente associadas a efluentes domésticos, resíduos agropecuários e matéria orgânica proveniente do uso do solo, enquanto os produtos inorgânicos derivam principalmente de fertilizantes, corretivos de solo e resíduos industriais. A presença de combustíveis e rejeitos, por sua vez, relaciona-se a atividades de transporte, armazenamento de derivados de petróleo e disposição inadequada de resíduos sólidos.

O predomínio dessa classe integrada — que combina diferentes grupos de contaminantes — indica alta complexidade na dinâmica de contaminação difusa, exigindo abordagens de gestão ambiental mais integradas e intersetoriais. Essa sobreposição de fontes potencializa os riscos de carreamento de poluentes para o lençol freático e compromete a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, especialmente em zonas de recarga com alta permeabilidade.

Em síntese, o município apresenta um cenário de uso múltiplo e intensivo do território, no qual as atividades antrópicas se sobrepõem às áreas de recarga natural, reforçando a importância do planejamento territorial, do controle de efluentes e da adoção de práticas agrícolas sustentáveis para minimizar os impactos das fontes difusas de contaminação.

Figura 44 - Diversidade de Produtos



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.7.4 Condição de Disposição

A carta de Condição de Disposição (Figura 45) evidencia que a maior parte do município de São Carlos, aproximadamente 78%, está associada à disposição direta de efluentes líquidos, representada em laranja. Essa classe abrange tanto áreas urbanas quanto agrícolas, refletindo a predominância de lançamentos superficiais de efluentes domésticos, águas pluviais contaminadas e escoamento de defensivos agrícolas. Essa configuração demonstra maior suscetibilidade à contaminação dos solos e das águas superficiais, sobretudo nas zonas de recarga e nas margens de drenagens.

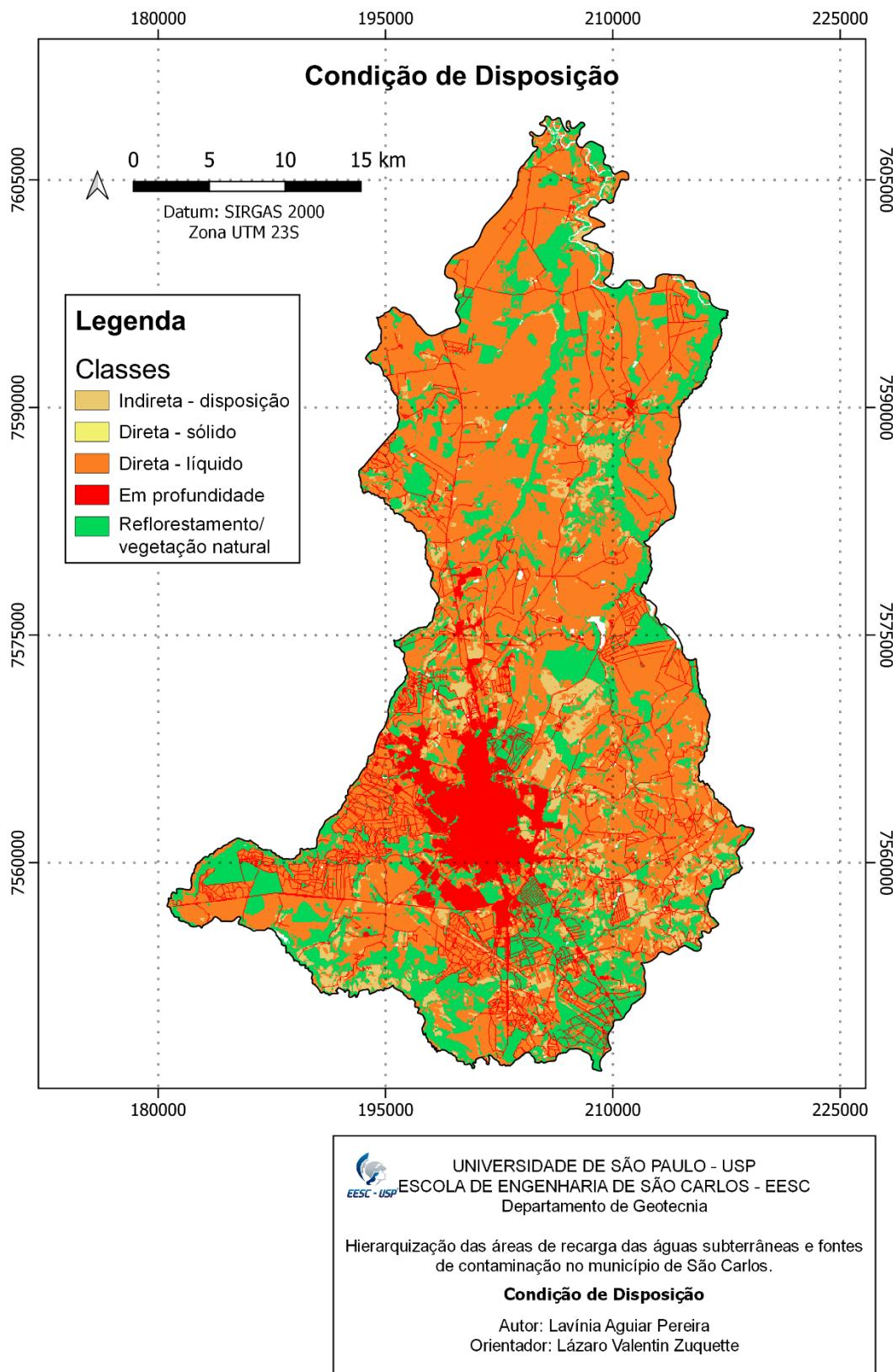
As áreas classificadas como disposição em profundidade, mostradas em vermelho, ocupam ~19,6% e estão distribuídas principalmente nas zonas urbanas e ao longo das estradas. Nessas regiões, a presença de infraestruturas subterrâneas, sistemas de drenagem e áreas pavimentadas favorece a infiltração de líquidos e resíduos em maior profundidade, seja por poços, valas, galerias pluviais ou fissuras no solo compactado. Essa dinâmica representa um potencial risco à contaminação subterrânea, especialmente onde o nível freático é mais raso e o escoamento superficial é reduzido.

Por outro lado, as áreas de disposição indireta, em amarelo, totalizam ~2,4%, caracterizando locais onde os efluentes passam por barreiras intermediárias, como solos argilosos ou zonas vegetadas, antes de atingirem o meio físico. Essas áreas atuam como zonas de attenuação parcial, reduzindo o transporte de contaminantes, mas ainda exigem atenção em longo prazo devido à possibilidade de acúmulo e migração lenta de poluentes.

No mapa, observa-se que as zonas de disposição direta líquida (laranja) estão fortemente concentradas na porção centro-sul, coincidente com a área urbana e as regiões agrícolas intensivas, enquanto as áreas de disposição em profundidade (vermelho) aparecem em faixas contínuas associadas às principais vias e zonas urbanizadas. Já as regiões de reflorestamento e vegetação natural (verde) se destacam como áreas de menor interferência antrópica e maior potencial de recarga.

Esse cenário reforça que o lançamento direto de efluentes líquidos é o principal modo de disposição predominante em São Carlos, configurando um fator relevante de vulnerabilidade ambiental. Assim, torna-se essencial o monitoramento contínuo da qualidade da água e do solo, aliado a políticas de manejo sustentável e controle de efluentes, visando à proteção das áreas de recarga e dos recursos hídricos subterrâneos.

Figura 45 - Condição de Disposição.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.7.5 Continuidade Temporal

O mapa de Continuidade Temporal (Figura 46) indica a frequência e a constância com que as atividades potencialmente poluidoras ocorrem ao longo do ano no município de São Carlos. Observa-se que a maior parte da área municipal, cerca de 51%, apresenta atividades intercaladas ao longo do ano, representadas em amarelo. Essa classe abrange, principalmente, áreas agrícolas de cultivo rotativo, estradas e zonas rurais, onde o uso do solo e a geração de contaminantes variam conforme o ciclo das safras e as condições climáticas.

As áreas com atividades sazonais por meses, em laranja, ocupam ~ 26,5%, e estão relacionadas a práticas que ocorrem apenas em determinados períodos, como aplicação de defensivos agrícolas, irrigação e manejo de resíduos rurais. Essas zonas apresentam risco temporário de contaminação, mas de alta intensidade durante os períodos de atividade.

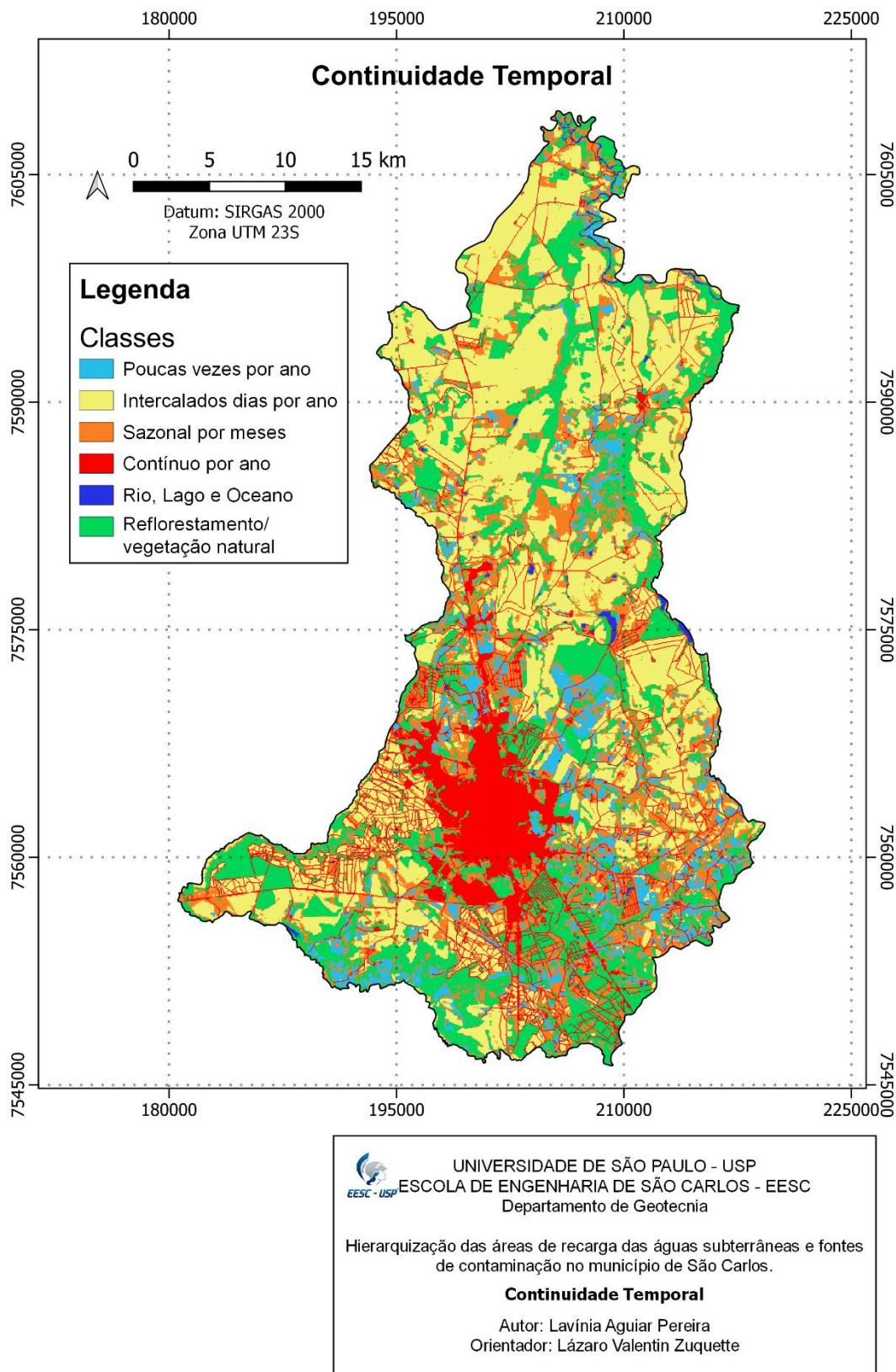
As regiões classificadas como contínuas durante todo o ano, representadas em vermelho, abrangem ~ 19,5%, concentrando-se nas áreas urbanas e industriais, onde há descarga contínua de efluentes, tráfego constante e impermeabilização do solo. Nessas áreas, a pressão antrópica é permanente, o que torna o risco de contaminação do solo e da água subterrânea mais elevado.

Por fim, as áreas de ocorrência esporádica, mostradas em azul, totalizam ~3%, e se distribuem de forma fragmentada em regiões de baixa densidade de uso. Essas zonas sofrem menor interferência antrópica, atuando como áreas de recarga natural e retenção de água superficial, especialmente nas proximidades de reflorestamentos e remanescentes vegetais (verde).

No mapa, é possível observar uma transição clara entre o padrão urbano contínuo no centro-sul e o uso agrícola intercalado e sazonal nas zonas rurais. Essa distribuição reflete a dinâmica mista de fontes de contaminação em São Carlos, combinando pressões constantes em áreas urbanizadas e impactos periódicos em áreas agrícolas.

Assim, o atributo evidencia que a contaminação potencial do meio físico ocorre de forma praticamente ininterrupta em algumas regiões do município, especialmente nas zonas urbanas e industriais, enquanto as áreas agrícolas exercem influência variável, porém recorrente, sobre os sistemas de recarga subterrânea.

Figura 46 - Continuidade Temporal.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4.2.8 Cartas integradas e mapas síntese

Os resultados desta etapa são apresentados por meio de cartas temáticas e mapas de integração, que representam tanto os atributos relacionados à recarga subterrânea quanto aqueles associados às fontes potenciais de contaminação. Essa abordagem integrada permite compreender, de maneira espacialmente distribuída, como os diferentes fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, hidrológicos e antrópicos interagem no processo de infiltração, armazenamento e qualidade das águas subterrâneas no município de São Carlos.

A partir da aplicação do método de análise multicritério, os atributos mapeados foram ponderados conforme seu grau de influência, seja na facilitação da recarga ou na potencialização de riscos de contaminação. Dessa forma, as variáveis foram hierarquizadas segundo sua relevância e transformadas em valores de peso relativos, posteriormente normalizados e integrados em ambientes de modelagem espacial.

Para o grupo de recarga, os pesos atribuídos resultaram em quatro classes de potencial de infiltração e recarga subterrânea:

- Baixa,
- Moderada,
- Alta, e
- Muito alta.

Já para o grupo de fontes de contaminação, os atributos relacionados às fontes pontuais e difusas foram classificados segundo seu potencial de contaminação isolado e relacionado a recarga, originando quatro classes de potencial de contaminação:

- Baixo,
- Moderado,
- Alto, e
- Muito alto.

A definição dos intervalos de classes, tanto para recarga quanto para contaminação, foi baseada em parâmetros estatísticos dos valores resultantes (média, desvio padrão e distribuição dos pixels), assegurando consistência espacial e coerência ambiental entre as áreas de maior e menor suscetibilidade.

Assim, as cartas temáticas e os mapas de integração obtidos constituem a base fundamental para a análise integrada dos processos de recarga e contaminação, permitindo identificar zonas críticas de conflito entre potencial de infiltração e risco ambiental. Esses

produtos cartográficos subsidiam a interpretação dos cenários hidrogeológicos conceituais e orientam a elaboração do mapa final de hierarquização das áreas de recarga e vulnerabilidade à contaminação, apresentados nas seções seguintes.

4.2.8.1 Carta da magnitude da infiltração

A Carta de Magnitude de Infiltração (Figura 47) representa a integração entre os atributos declividade e capacidade/taxa de infiltração do material inconsolidado, permitindo identificar as zonas com maior ou menor capacidade de recarga das águas subterrâneas no município de São Carlos.

A classe de infiltração moderada, predominante em grande parte do município, abrange 386,60 km² (~34%). Essas áreas estão associadas a superfícies suavemente onduladas, compostas por materiais arenosos das formações Bauru e Botucatu, com declividades inferiores a 15%. Essa combinação favorece a infiltração difusa e contínua da água no solo, constituindo zonas de recarga intermediária, fundamentais para o equilíbrio hídrico regional.

As áreas classificadas como de alta magnitude de infiltração totalizam 322,63 km² (~28%), distribuindo-se principalmente nas porções noroeste e centro-sul do município. Nessas regiões, predominam solos mais porosos e profundos, com taxas de infiltração entre 71 e 100 mm/h e relevo suave. Tais condições resultam em recarga eficiente dos aquíferos livres, mas também em maior vulnerabilidade à contaminação, especialmente quando próximas a áreas de uso agrícola intensivo ou expansão urbana.

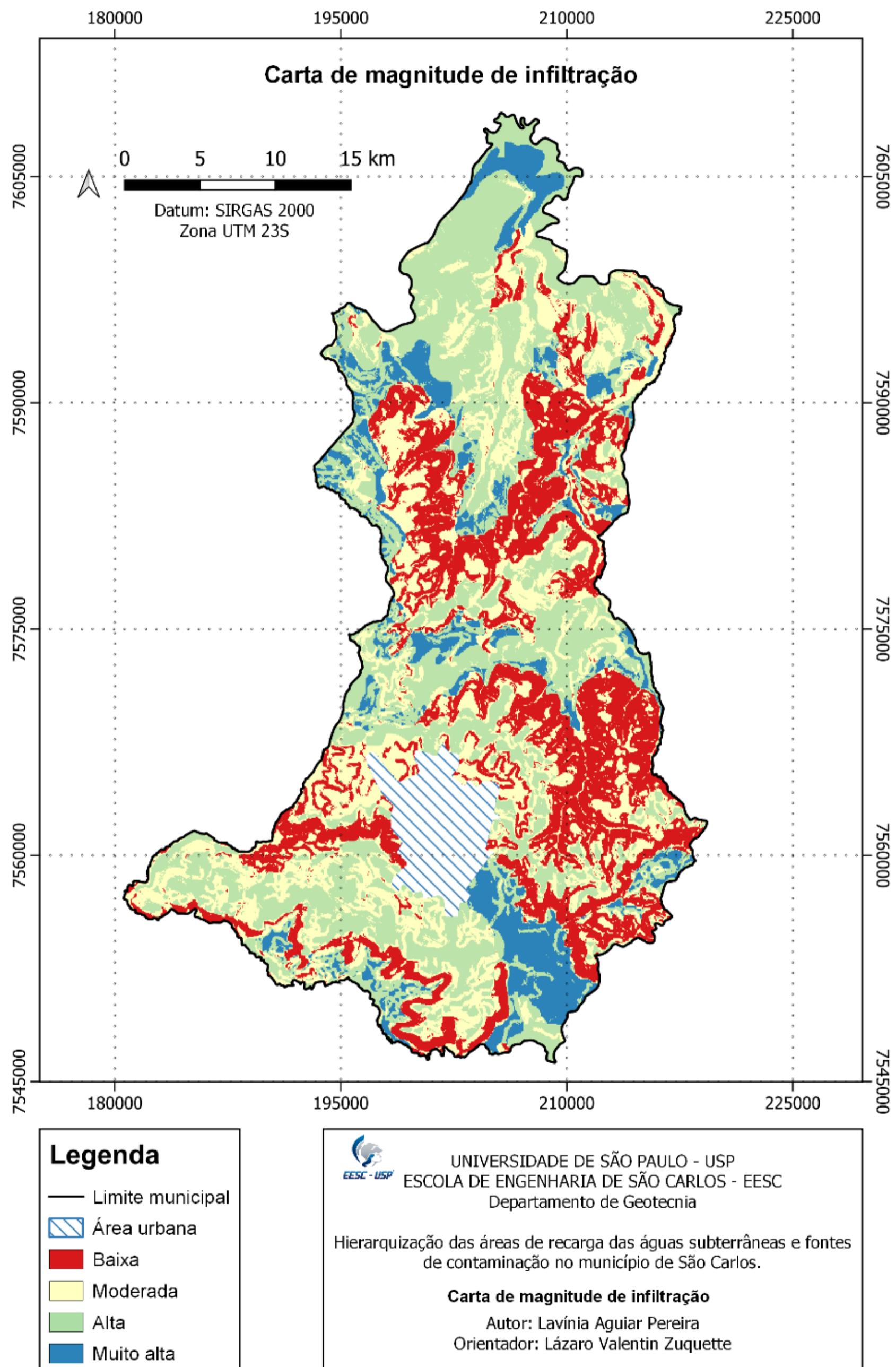
As zonas de baixa magnitude de infiltração, em vermelho, somam 279,01 km² (~24%) e concentram-se nas bordas de drenagem, topos convexos e encostas mais íngremes. Nesses setores, a declividade superior a 15% e a presença de solos menos permeáveis reduzem significativamente a percolação vertical, predominando o escoamento superficial e lateral. Por isso, essas áreas funcionam mais como zonas de transferência hídrica, com menor contribuição direta à recarga.

Por fim, as áreas de infiltração muito alta, em azul, ocupam 110,17 km² (~9,7%) e correspondem aos setores mais planos do sudeste e do norte do município, frequentemente associados a materiais aluvionares e solos arenosos pouco coesos. Nesses locais, a taxa de infiltração ultrapassa 100 mm/h, e a recarga subterrânea é intensa. No entanto, devido à elevada permeabilidade, essas áreas configuram hotspots de vulnerabilidade hidrogeológica, exigindo controle rigoroso de fontes potenciais de contaminação — como o uso de fertilizantes, efluentes e produtos químicos.

A distribuição espacial das classes demonstra coerência com a litologia e com o comportamento hidrogeomorfológico do município. As formações arenosas e coluvionares sustentam as áreas de infiltração alta e muito alta, enquanto os setores basálticos da Formação Serra Geral e os relevos escarpados se associam às zonas de baixa infiltração.

De modo geral, o município apresenta condições naturais favoráveis à recarga subterrânea, com cerca de 72% do território apresentando infiltração moderada a alta. Essa configuração confirma a importância da conservação das áreas planas e vegetadas como zonas prioritárias para proteção hidrogeológica, além de indicar a necessidade de planejamento criterioso do uso do solo em regiões de alta vulnerabilidade à contaminação.

Figura 47 - Carta da magnitude de infiltração



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.8.2 Carta de Recarga: Zona Saturada Acima do Substrato Rochoso

A Carta de Recarga da Zona Saturada Acima do Substrato Rochoso (Figura 48) a integração entre os parâmetros de magnitude de infiltração e as características do material inconsolidado, refletindo a capacidade efetiva do solo e dos materiais superficiais em promover a recarga da zona saturada localizada imediatamente acima do embasamento rochoso.

Os resultados evidenciam o predomínio das classes de recarga moderada, que ocupam aproximadamente ~37% do município. Essas áreas correspondem principalmente a superfícies suavemente onduladas compostas por materiais arenosos do Grupo Bauru e da Formação Botucatu, que apresentam boa condutividade hidráulica e taxas intermediárias de infiltração. Nessas regiões, o fluxo vertical de água é constante e difuso, favorecendo a recarga sustentada dos aquíferos livres.

As zonas classificadas como de alta recarga, com área estimada de ~18%, distribuem-se preferencialmente nas porções centrais e noroeste do município, coincidindo com setores de solos mais porosos e espessos, associados a materiais coluvionares e aluvionares. A combinação entre permeabilidade elevada e declividades suaves faz dessas áreas importantes zonas de infiltração e percolação vertical, com recarga significativa do aquífero superior.

A classe de baixa recarga, que abrange ~24%, ocorre principalmente nas bordas de drenagem e encostas mais íngremes, onde a presença de solos argilosos ou compactados, associada a maiores declividades, limita o tempo de residência da água na superfície e aumenta o escoamento superficial. Nesses trechos, a recarga direta é reduzida, atuando apenas de forma localizada.

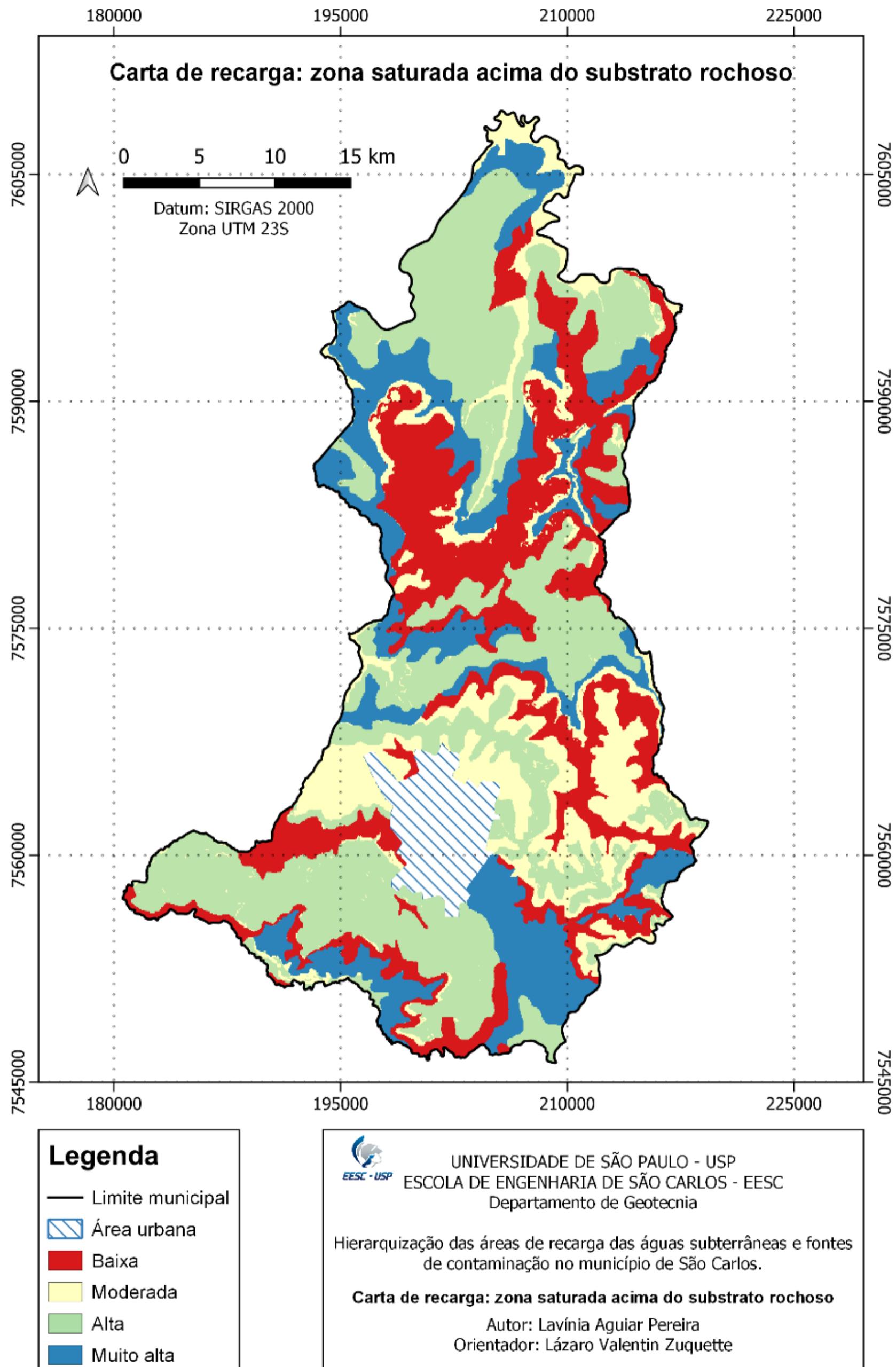
As áreas de recarga muito alta, representadas em azul, totalizam ~16% e correspondem às porções planas e baixas do território, muitas delas associadas a planícies de inundação e depósitos aluvionares recentes. A presença de materiais inconsolidados altamente permeáveis e lençóis freáticos rasos favorece a infiltração rápida e a alimentação direta da zona saturada, tornando essas áreas fundamentais para a manutenção do balanço hídrico subterrâneo. Entretanto, a alta taxa de recarga também implica maior vulnerabilidade à contaminação, exigindo cuidados especiais de manejo e proteção ambiental.

De modo geral, o município apresenta distribuição equilibrada entre zonas de recarga moderada e alta, o que indica condições favoráveis à recarga difusa e sustentada dos aquíferos. A coerência espacial observada entre os setores de solos arenosos e declividades suaves reforça

a importância dessas áreas como zonas prioritárias de conservação, especialmente nas porções central e noroeste, onde a recarga subterrânea é mais expressiva.

Assim, a Carta de Recarga da Zona Saturada Acima do Substrato Rochoso sintetiza as principais condições físico-estruturais do meio superficial, integrando aspectos pedológicos, litológicos e geomorfológicos. O resultado evidencia que, apesar das diferenças locais, o município de São Carlos apresenta um sistema hidrogeológico naturalmente favorável à recarga, cuja manutenção depende diretamente da preservação das áreas de maior infiltração e da gestão adequada do uso do solo nas regiões vulneráveis à contaminação.

Figura 48 - Carta de recarga zona saturada acima do substrato rochoso.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.8.3 Carta de Recarga: Zona Saturada Abaixo do Substrato Rochoso

A Carta de Recarga da Zona Saturada Abaixo do Substrato Rochoso (Figura 49) integra as informações de magnitude de infiltração, material inconsolidado e características do substrato rochoso, permitindo identificar as regiões com maior potencial de recarga profunda — isto é, a infiltração efetiva que ultrapassa o manto de alteração e atinge as zonas fraturadas do embasamento. Essa etapa é fundamental para compreender o comportamento hidrogeológico em subsuperfície e estimar o potencial de alimentação dos aquíferos fraturados e fissurais.

As áreas de recarga moderada, predominantes no município, totalizam ~34%. Elas correspondem a setores de relevo suavemente ondulado, com materiais arenosos e argilo-arenosos e substrato rochoso de permeabilidade intermediária, como basaltos fraturados e arenitos cimentados. Nessas zonas, a percolação é contínua, porém condicionada pela espessura do manto de intemperismo e pelo grau de fraturamento da rocha subjacente. Trata-se, portanto, de áreas de recarga profunda moderada, onde parte da água infiltrada consegue atingir as zonas de fraturas e contribuir para o armazenamento subterrâneo de médio prazo.

As zonas de alta recarga, com área de ~18%, distribuem-se principalmente nas porções central e nordeste do território. Essas áreas coincidem com regiões de contato entre unidades litológicas arenosas e basaltos fraturados, associadas a declividades suaves e solos bem drenados. A presença de discontinuidades estruturais e material inconsolidado mais permeável favorece a infiltração profunda, resultando em fluxos descendentes eficientes e deposição expressiva das reservas hídricas subterrâneas.

As classes de baixa recarga, que abrangem ~23%, estão concentradas nas bordas das drenagens, topos convexos e áreas de relevo acentuado, onde o substrato apresenta baixa porosidade e compactação elevada, reduzindo a percolação vertical. Nessas regiões, o escoamento superficial e subsuperficial predomina, e a contribuição à recarga profunda é limitada.

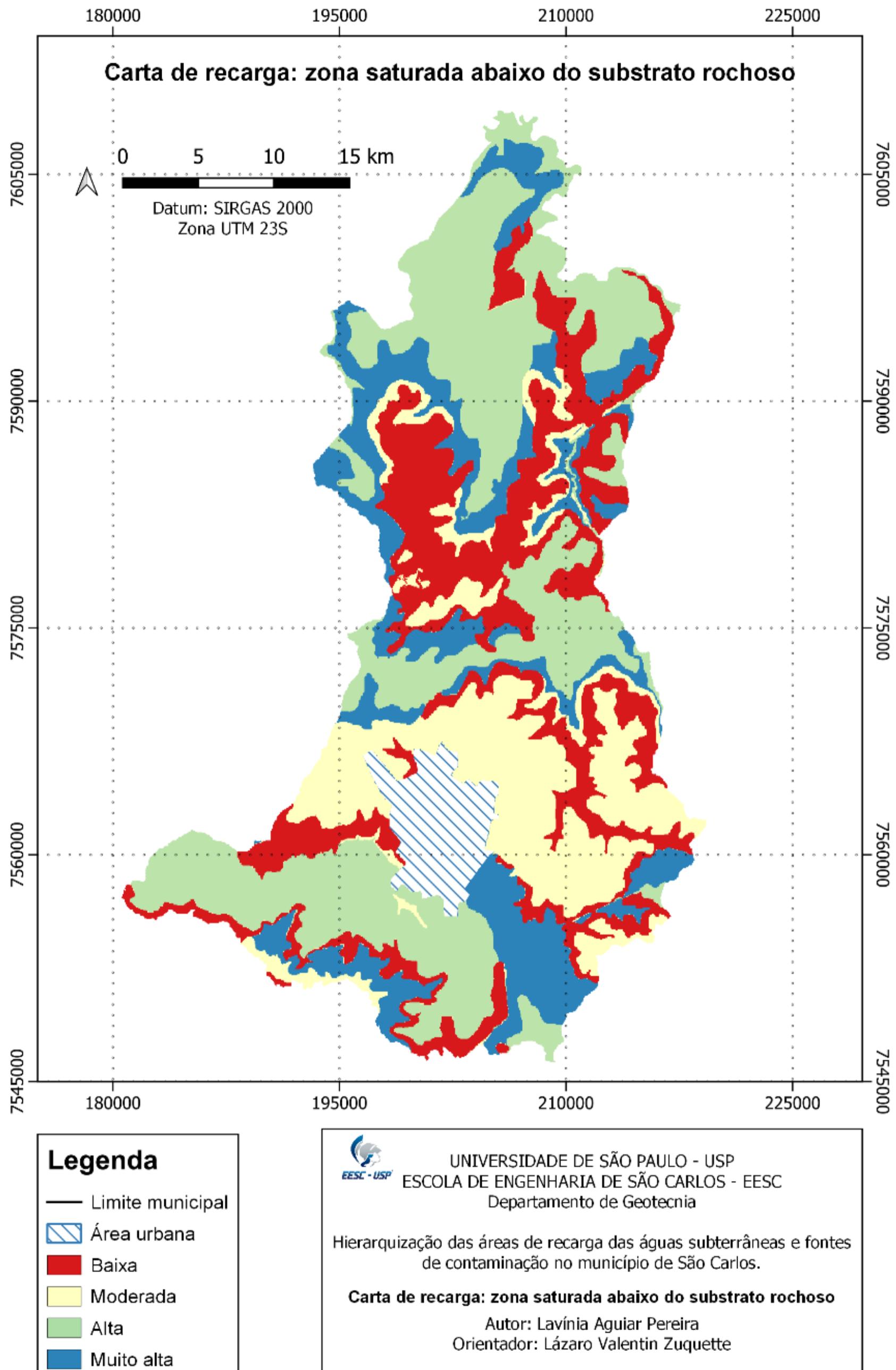
Por outro lado, as áreas de recarga muito alta, que somam ~20%, localizam-se em setores planos e depressões estruturais, onde há contato direto entre materiais arenosos altamente permeáveis e zonas fraturadas do embasamento. Nessas condições, a infiltração rápida e a comunicação direta entre o solo e as fraturas rochosas possibilitam recarga profunda intensa e imediata, tornando essas áreas de alta importância hidrogeológica. Entretanto, a

mesma eficiência que favorece a recarga também aumenta a vulnerabilidade à contaminação, exigindo rigoroso controle do uso e ocupação do solo.

De modo geral, observa-se que o município de São Carlos apresenta boas condições para a recarga profunda, com cerca de 72% da área classificada entre moderada e muito alta. A coerência espacial entre os materiais arenosos do Grupo Bauru, os arenitos fraturados da Formação Botucatu e as zonas de maior magnitude de infiltração reforça o papel dessas unidades como principais condutoras de fluxo vertical.

Assim, a Carta de Recarga da Zona Saturada Abaixo do Substrato Rochoso sintetiza os processos de percolação profunda que alimentam os aquíferos fraturados, evidenciando a importância da preservação das áreas de contato litológico permeável e baixa declividade. Essa carta, portanto, complementa a análise da recarga superficial e oferece subsídios essenciais para o gerenciamento e a proteção integrada dos recursos hídricos subterrâneos.

Figura 49 - Carta de recarga zona saturada abaixo do substrato rochoso



4.2.8.4 Carta de zoneamento da recarga das águas subterrâneas

A Carta de zoneamento da recarga das águas subterrâneas (Figura 50) representa o resultado final da integração dos fatores físicos e climáticos que controlam o processo de recarga subterrânea no município de São Carlos. Essa síntese considerou as cartas de recarga da zona saturada acima e abaixo do substrato rochoso, bem como os mapas climáticos de precipitação média anual e evapotranspiração potencial, permitindo uma avaliação abrangente da capacidade efetiva de reposição das águas subterrâneas.

De modo geral, observa-se o predomínio das classes de recarga moderada, que abrangem aproximadamente 425,79 km² (~37%) do território municipal. Essas áreas correspondem, em sua maioria, a superfícies suavemente onduladas e solos arenosos ou argilo-arenosos, associados a materiais inconsolidados do Grupo Bauru e da Formação Botucatu, com taxas intermediárias de infiltração (30–70 mm/h) e precipitações anuais entre 1.350 e 1.550 mm. Nessas regiões, a recarga ocorre de forma difusa e contínua, garantindo a sustentação do fluxo de base dos cursos d’água e o equilíbrio do sistema aquífero freático.

As áreas de alta recarga, totalizando 208,83 km² (~18%), distribuem-se principalmente nas porções centrais e noroeste do município, coincidindo com zonas de baixa declividade e maior volume pluviométrico. A combinação entre materiais altamente permeáveis, fraturamento do substrato rochoso e baixa taxa de evapotranspiração (900–1.350 mm/ano) favorece a percolação vertical eficiente, tornando essas regiões fundamentais para o abastecimento das reservas subterrâneas.

As zonas de muito alta recarga, com 193,89 km² (~17%), localizam-se preferencialmente nas porções sul e sudoeste, onde há sinergia entre alta precipitação (>1.550 mm/ano), solos arenosos e profundos, e materiais coluvionares e aluvionares com elevada condutividade hidráulica. Nessas áreas, a recarga subterrânea é intensa, ocorrendo tanto de forma difusa (em planícies) quanto concentrada (ao longo de zonas de fratura). Entretanto, o mesmo potencial de infiltração que as torna essenciais para o equilíbrio hídrico também as torna vulneráveis à contaminação, exigindo controle rigoroso sobre o uso agrícola e urbano.

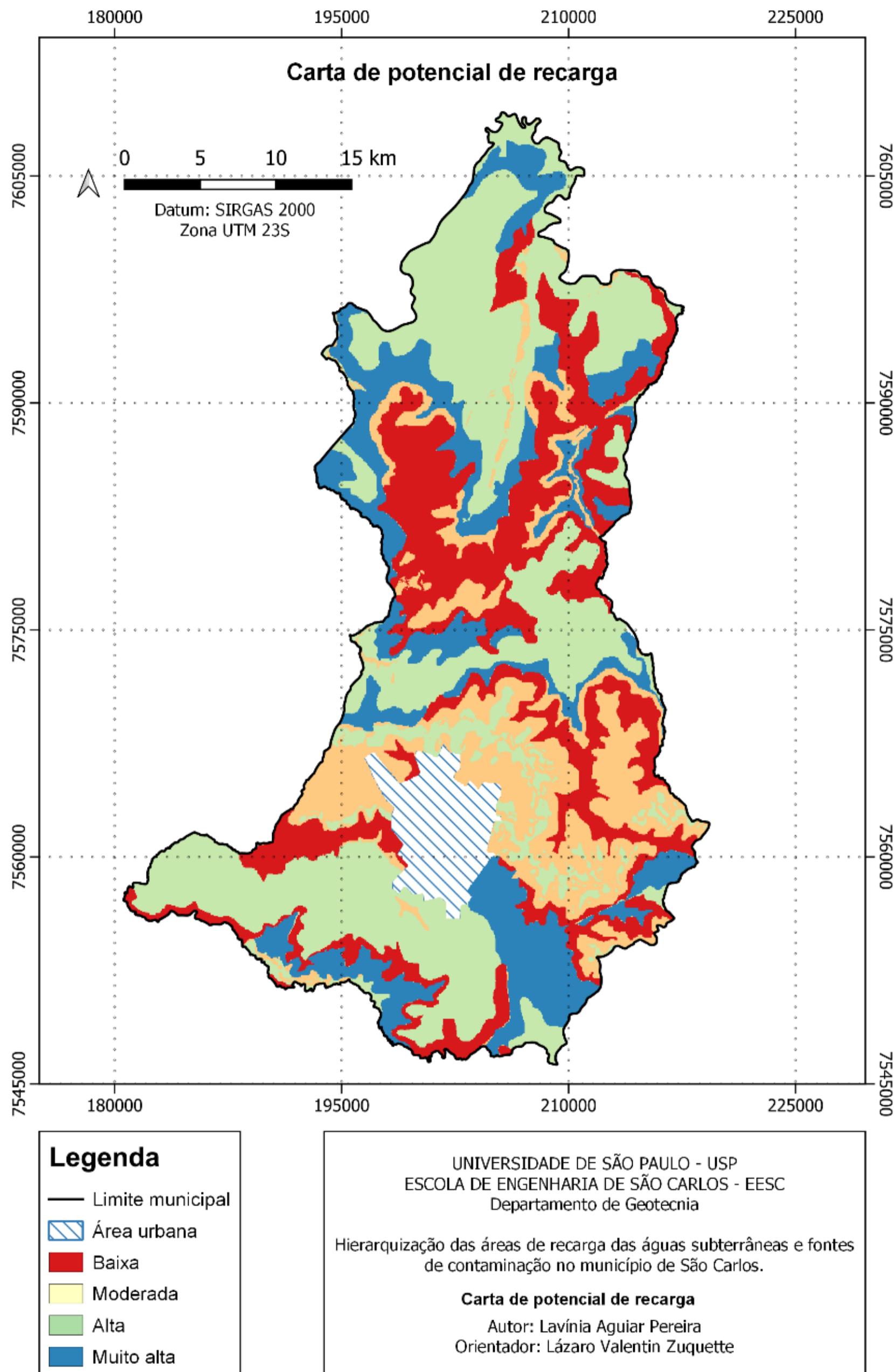
As classes de baixa recarga, que somam 269,25 km² (~23%), estão associadas a declividades mais acentuadas, solos argilosos compactados e litologias menos permeáveis, como as rochas da Formação Serra Geral. Nesses locais, o escoamento superficial é predominante, e a contribuição direta à recarga é reduzida.

O comportamento espacial identificado na carta indica que o potencial de recarga aumenta progressivamente do norte para o sul do município, acompanhando o gradiente de precipitação e permeabilidade dos materiais superficiais. A porção norte, caracterizada por menores índices pluviométricos e substratos menos permeáveis, tende a apresentar menor potencial de recarga, enquanto a porção sul concentra as condições mais favoráveis à infiltração e ao armazenamento hídrico.

Em termos hidrogeológicos, a integração dos parâmetros evidencia que aproximadamente 72% do território municipal apresenta potencial moderado a muito alto de recarga, demonstrando a eficiência natural do sistema hidrogeológico de São Carlos. Esse padrão reforça a importância da preservação das áreas de maior infiltração, principalmente nas zonas de contato entre materiais arenosos e fraturamentos rochosos, e a adoção de práticas de manejo sustentável do solo nas regiões de alta vulnerabilidade.

Assim, a Carta de Potencial de Recarga consolida a hierarquização das condições de recarga do município, sintetizando a influência integrada do relevo, litologia, cobertura pedológica e balanço hídrico climático. O resultado final demonstra que São Carlos apresenta potencial significativo para recarga subterrânea, destacando-se como uma área estratégica para planejamento ambiental e proteção dos recursos hídricos.

Figura 50 - Mapa de zoneamento da recarga das águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

4.2.8.5 Carta de Uso Potencial

A Carta de Uso Potencial (Figura 51) representa o resultado da integração entre o potencial de recarga subterrânea e os elementos de aproveitamento hídrico do município, expressos pelos números de poços de bombeamento e de fontes naturais presentes por pixel. Essa carta sintetiza, portanto, a capacidade efetiva de utilização dos recursos subterrâneos frente à sua disponibilidade natural e às condições hidrogeológicas locais, servindo como base para o planejamento do uso sustentável da água no território de São Carlos.

Os resultados indicam o predomínio da classe de uso potencial moderado, que ocupa aproximadamente 425,94 km² (~37%) do município. Essas áreas correspondem às zonas de recarga intermediária a alta, associadas a materiais inconsolidados arenosos e solos bem drenados, onde há boa disponibilidade hídrica, mas baixa densidade de poços e fontes registradas. Nessas regiões, o uso potencial é elevado, porém ainda pouco explorado, sugerindo oportunidades de uso racional das águas subterrâneas sem comprometer a recarga natural.

As áreas classificadas como de alto uso potencial abrangem cerca de 208,81 km² (~18%) e concentram-se predominantemente nas porções centrais e noroeste do município — regiões que também apresentam maior número de poços de bombeamento e melhor infraestrutura de captação. Esses setores coincidem com zonas de recarga alta e muito alta, onde o substrato é permeável e há contato direto com aquíferos fraturados e arenosos, como os da Formação Botucatu. O cenário indica boa disponibilidade e qualidade da água subterrânea, com capacidade para abastecimento local e uso agrícola, desde que acompanhada de monitoramento e controle da exploração.

A classe de uso potencial muito alto, com 194,43 km² (~17%), distribui-se principalmente na porção sul, onde o potencial de recarga e as condições climáticas são mais favoráveis — precipitação média anual entre 1.350 e 1.550 mm e evapotranspiração relativamente menor. Nessa região, observa-se a presença de nascentes e exfiltrações naturais, além de áreas agrícolas dependentes do uso difuso da água subterrânea. A combinação de alta recarga, boa permeabilidade e ocorrência de fontes faz dessas zonas áreas prioritárias para conservação e manejo sustentável.

As áreas de baixo uso potencial, que somam 268,52 km² (~23%), concentram-se principalmente nas porções norte e leste, caracterizadas por relevo mais acentuado, solos menos permeáveis e baixa densidade de estruturas hídricas cadastradas. Nesses locais, o uso da água subterrânea é limitado, tanto pela baixa recarga quanto pela ausência de poços e fontes naturais,

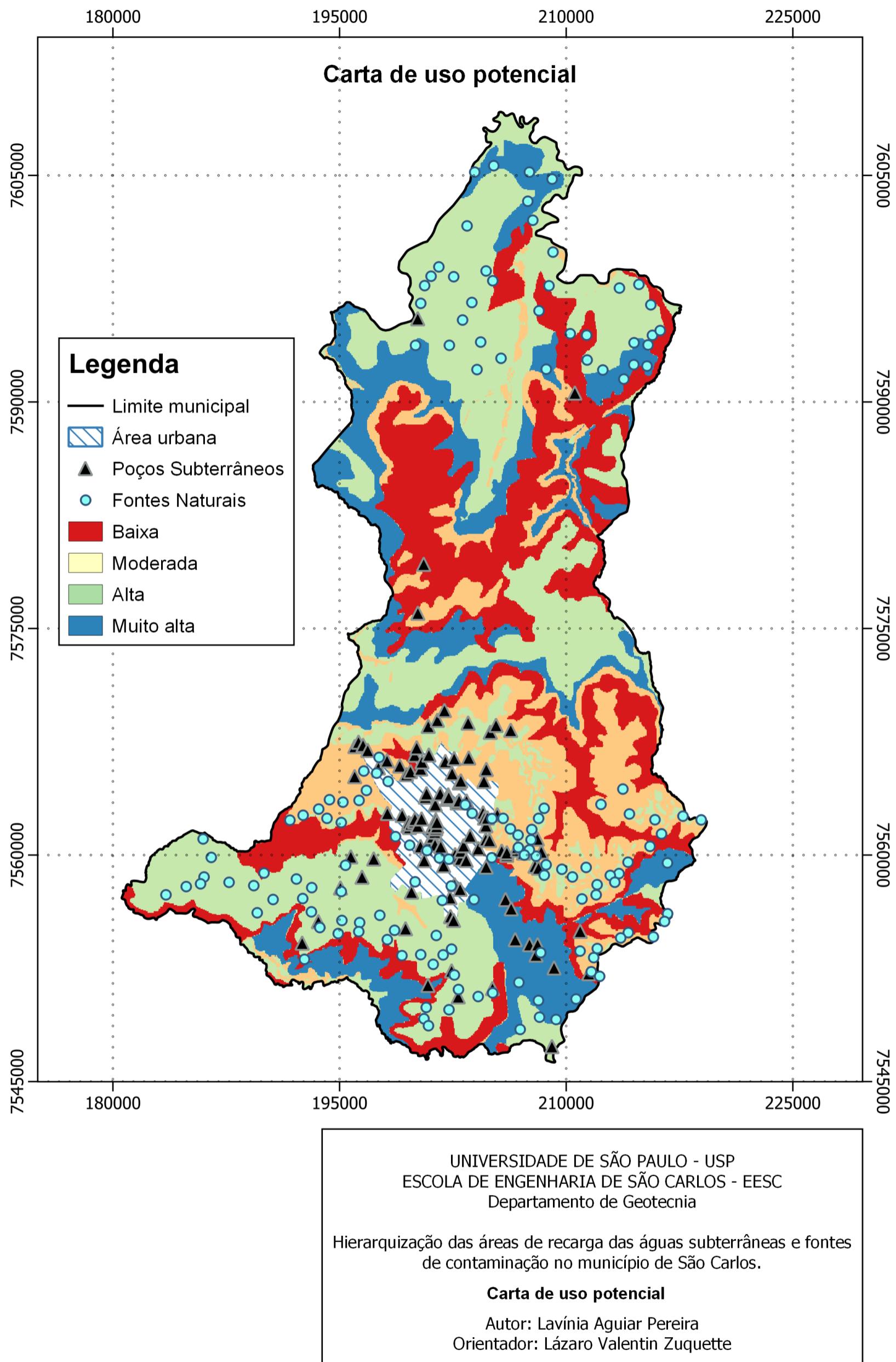
devendo ser priorizado o abastecimento por mananciais superficiais e a proteção das zonas de infiltração adjacentes.

De forma geral, o mapa mostra que o uso potencial aumenta progressivamente de norte para sul, acompanhando o gradiente de recarga, precipitação e permeabilidade dos materiais superficiais. Enquanto a porção norte apresenta uso restrito e baixa disponibilidade hídrica, o setor sul reúne as condições mais favoráveis para o aproveitamento das águas subterrâneas, sendo também o mais vulnerável à contaminação e à supereexploração, caso não haja gestão adequada.

A comparação com as cartas de poços de bombeamento e fontes naturais reforça essa interpretação: apesar da baixa densidade de poços cadastrados (~0,03%) e da escassez de nascentes mapeadas (~0,1%), as áreas de maior potencial de uso coincidem com regiões de alta recarga e boa capacidade de percolação, indicando subaproveitamento do recurso subterrâneo. Essa condição é positiva do ponto de vista ambiental, pois revela equilíbrio hídrico e preservação das zonas de recarga, mas também aponta a necessidade de estratégias de monitoramento e planejamento integrado, especialmente diante da expansão urbana e agrícola.

Assim, a Carta de Uso Potencial consolida a relação entre disponibilidade hídrica, recarga subterrânea e uso efetivo do recurso, permitindo identificar áreas prioritárias para captação sustentável, bem como zonas de proteção hídrica e manejo conservacionista. Os resultados evidenciam que o município de São Carlos possui ampla disponibilidade para uso racional das águas subterrâneas, desde que acompanhado de planejamento técnico e políticas de gestão que assegurem a conservação dos aquíferos e das áreas de recarga.

Figura 51. Carta de uso potencial.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

4.2.8.6 Carta do Potencial de Contaminação por Fontes Difusas sem Recarga

A Carta de Potencial de Contaminação por Fontes Difusas sem Recarga (Figura 52) integra os atributos relacionados às atividades antrópicas de uso e ocupação do solo — como tipos de uso, continuidade temporal, condição de disposição e diversidade de produtos — sem considerar o efeito mitigador ou de diluição associado às áreas de recarga. O objetivo dessa etapa é identificar os setores do município mais suscetíveis à geração e liberação de contaminantes difusos, com base apenas na intensidade e natureza das pressões superficiais exercidas sobre o ambiente.

Os resultados indicam que as áreas de potencial moderado de contaminação predominam no município, abrangendo aproximadamente 416,60 km² (~37%). Essa classe é composta principalmente por zonas rurais e periurbanas, onde predominam atividades agrícolas (cana-de-açúcar, pastagem, cultivos diversos) e áreas irrigadas, frequentemente associadas ao uso de fertilizantes e defensivos agrícolas. Apesar de não apresentarem recarga expressiva, essas áreas representam fontes potenciais de contaminação difusa que, ao longo do tempo, podem contribuir para a acumulação de compostos químicos no solo e transporte superficial de nutrientes e poluentes.

As áreas de alto potencial de contaminação, que totalizam cerca de 303,91 km² (~27%), correspondem a setores de ocupação urbana e industrial, além de faixas próximas a rodovias e áreas de expansão urbana. Nesses locais, a concentração de atividades industriais, vias pavimentadas, sistemas de drenagem e áreas impermeabilizadas favorece o acúmulo e o carreamento de substâncias orgânicas, metais pesados e hidrocarbonetos, principalmente durante eventos de precipitação. A ausência de recarga significativa aumenta a probabilidade de transporte lateral de contaminantes para zonas de recarga adjacentes, reforçando a importância do planejamento integrado do uso do solo.

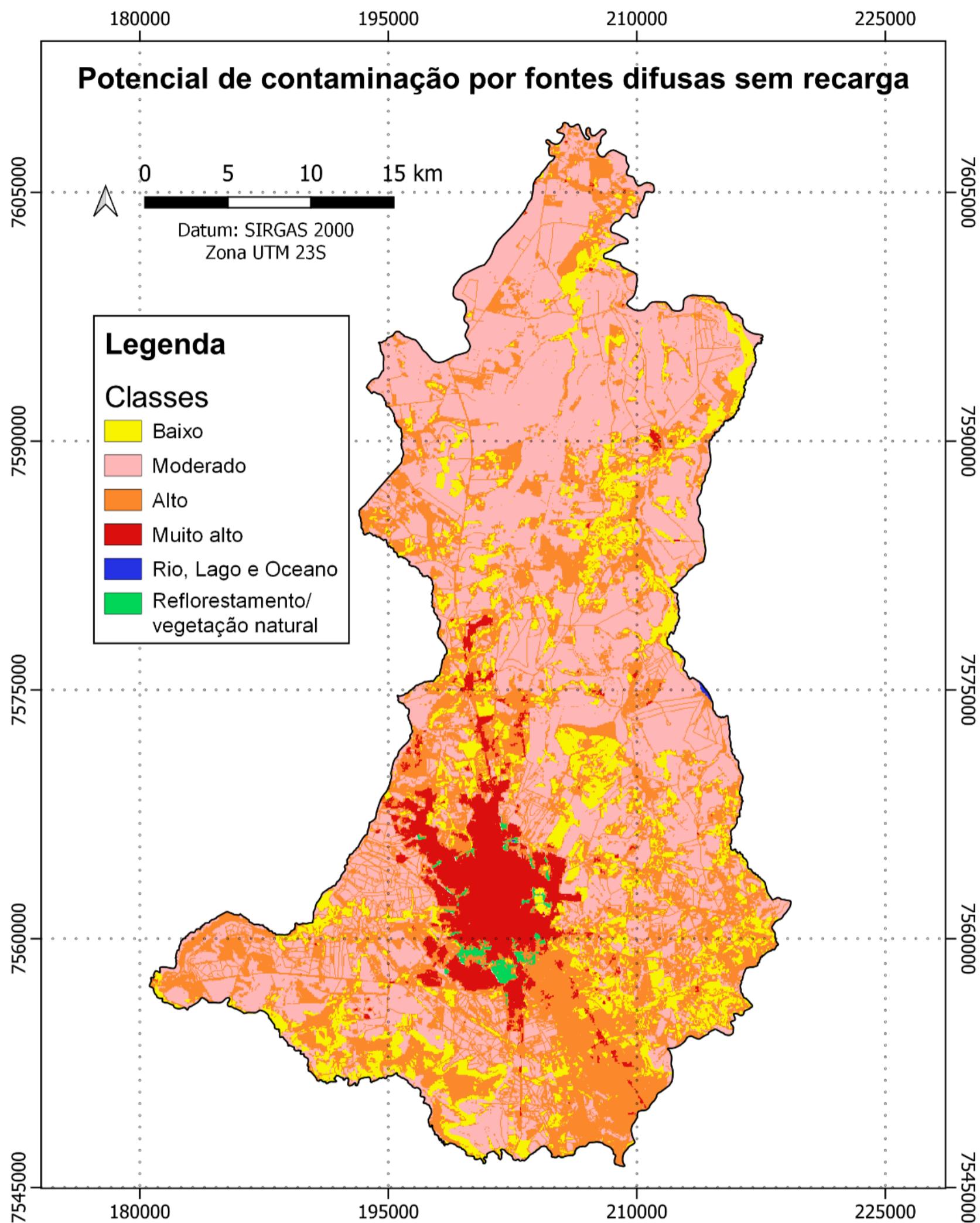
As áreas de muito alto potencial de contaminação, que abrangem 72,11 km² (~6%), concentram-se na porção central e sudoeste do município, coincidindo com a mancha urbana consolidada de São Carlos. Essa região é caracterizada por alta densidade populacional, intensa atividade industrial e presença de vias de tráfego pesado, fatores que elevam significativamente o risco de poluição difusa. Além disso, a baixa permeabilidade superficial e o acúmulo de resíduos sólidos e efluentes urbanos intensificam o processo de escoamento superficial contaminado, ampliando o risco de impacto sobre os corpos d'água superficiais e, indiretamente, sobre o sistema subterrâneo.

Em contraste, as áreas de baixo potencial de contaminação ocupam 80,68 km² (~7%), distribuindo-se principalmente nas porções norte e nordeste, onde predominam florestas secundárias, vegetação natural e reflorestamentos. Nessas regiões, a atividade antrópica é mínima, e a cobertura vegetal atua como barreira protetora contra processos erosivos e transporte de poluentes, contribuindo para a estabilidade ambiental e conservação do solo e da água.

De modo geral, a carta evidencia que a maior parte do município apresenta de moderado a alto potencial de contaminação difusa, refletindo a intensidade das atividades agroindustriais e urbanas. As áreas urbanizadas e agrícolas do centro e do sul constituem zonas críticas de emissão de poluentes superficiais, enquanto os setores com vegetação preservada funcionam como áreas de mitigação natural.

Essa análise é essencial para o diagnóstico ambiental preliminar, pois permite identificar os principais vetores de contaminação não pontual e subsidiar ações de gestão territorial e controle de poluentes. Posteriormente, ao integrar essas informações com as cartas de recarga, é possível definir as zonas de maior vulnerabilidade hidrogeológica, onde há convergência entre alta pressão antrópica e elevada capacidade de infiltração, configurando os principais pontos de risco à qualidade das águas subterrâneas.

Figura 52 - Potencial de Contaminação por Fontes Difusas sem Recarga



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
Departamento de Geotecnia

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no município de São Carlos.

Potencial de contaminação por fontes difusas sem recarga

Autor: Lavínia Aguiar Pereira
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

4.2.8.7 Carta do Potencial de Contaminação por Fontes Difusas com Recarga

A Carta de Potencial de Contaminação por Fontes Difusas com Recarga (Figura 53) representa a integração dos atributos de fontes difusas de poluição — relacionados ao uso e ocupação do solo, manejo agrícola e disposição de efluentes — com as condições de recarga subterrânea do município. Essa síntese permite avaliar não apenas a intensidade das atividades antrópicas, mas também a vulnerabilidade hidrogeológica associada à capacidade de infiltração e recarga, resultando em uma visão abrangente do risco potencial de contaminação das águas subterrâneas.

De modo geral, observa-se o predomínio das classes de alto e moderado potencial de contaminação, que, somadas, abrangem cerca de 878,8 km² (~78% do território municipal). Essa ampla predominância reflete o equilíbrio entre a distribuição das atividades humanas e a capacidade natural de infiltração identificada nas cartas de recarga, indicando que grande parte do município apresenta condições simultâneas de uso intensivo do solo e suscetibilidade à percolação de contaminantes.

As áreas de alto potencial de contaminação correspondem a aproximadamente 483,49 km² (~43%), concentrando-se nas porções central e sudoeste do município, coincidentes com as zonas urbanizadas e agrícolas mais intensivas. Nesses setores, a combinação entre solos permeáveis, alta recarga e intenso uso antrópico — como o cultivo de cana-de-açúcar, estradas e atividades industriais — favorece a mobilização e infiltração de poluentes orgânicos e inorgânicos. A alta condutividade hidráulica dos materiais inconsolidados e o gradiente topográfico suave ampliam a vulnerabilidade dos aquíferos locais, especialmente nas áreas de contato entre zonas de recarga e drenagem superficial.

A classe moderada de potencial de contaminação, que ocupa cerca de 395,31 km² (~35%), distribui-se ao longo das transições entre as zonas de alta recarga e as áreas de uso rural difuso. São regiões onde predominam atividades agrícolas com menor intensidade de insumos e reflorestamentos, mas que ainda apresentam permeabilidade significativa. Nessas áreas, a contaminação tende a ocorrer de forma lenta e difusa, associada ao uso contínuo de defensivos agrícolas e fertilizantes, demandando monitoramento preventivo e boas práticas de manejo para evitar o transporte vertical de contaminantes.

As áreas de muito alto potencial de contaminação, com 142,61 km² (~12,6%), concentram-se nas porções urbanas e industriais da zona sul e centro, coincidindo com áreas de maior recarga e intensa impermeabilização superficial. Nessas zonas, o escoamento pluvial

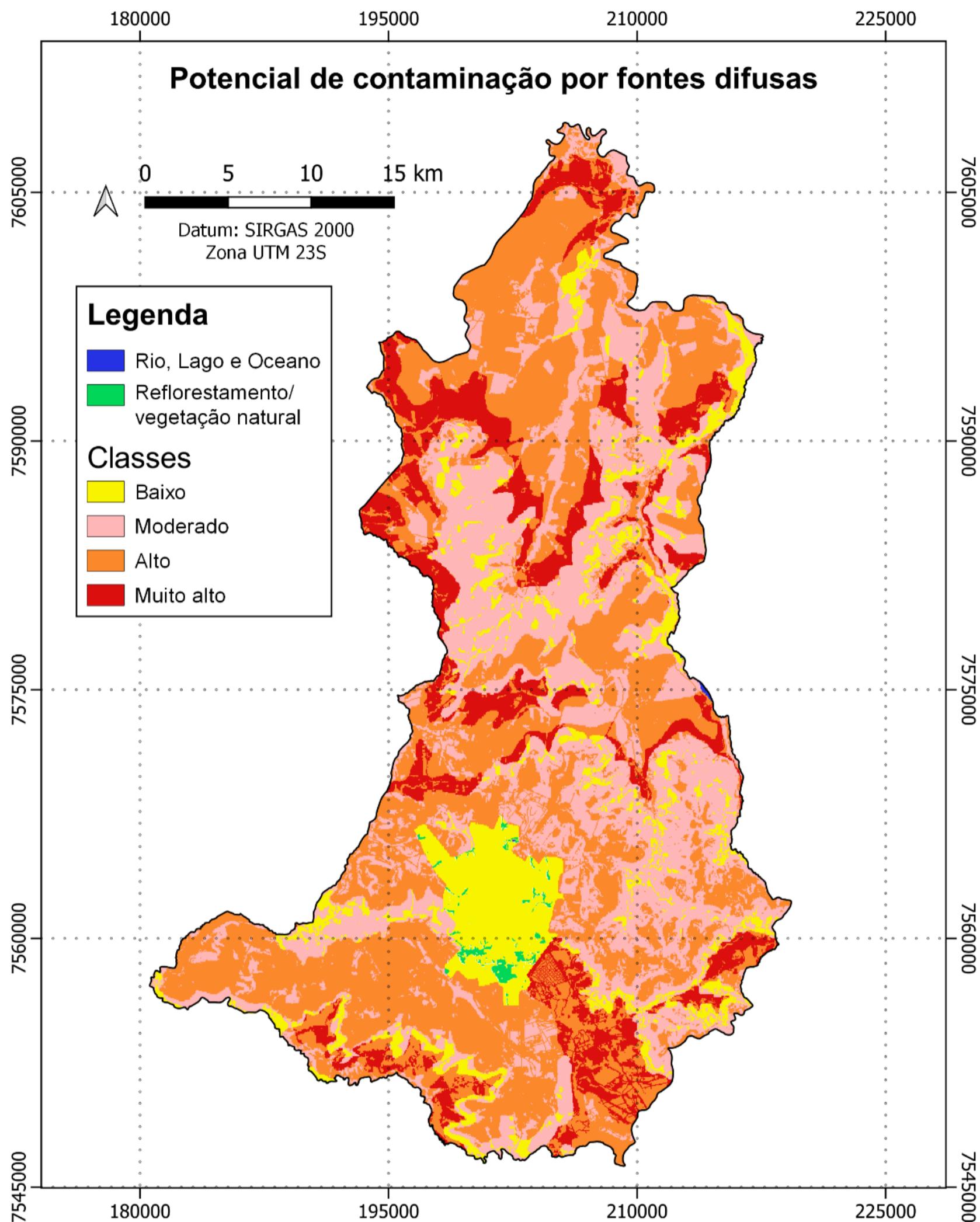
contaminado e a infiltração rápida em solos permeáveis potencializam a entrada de contaminantes nos aquíferos rasos, representando pontos críticos de vulnerabilidade ambiental. A sobreposição entre recarga elevada e forte pressão antrópica caracteriza essas regiões como áreas prioritárias para ações de controle, fiscalização e monitoramento.

Por outro lado, as áreas de baixo potencial de contaminação, que totalizam 127,95 km² (~11%), localizam-se principalmente nas porções norte e noroeste, onde predominam reflorestamentos, vegetação natural e solos menos permeáveis. Nessas regiões, a baixa recarga e o uso antrópico reduzido conferem maior proteção natural aos aquíferos, funcionando como zonas de proteção hidrogeológica e mitigação de impactos provenientes das áreas adjacentes.

De forma integrada, a carta demonstra que o risco de contaminação difusa está fortemente associado às áreas de maior recarga, o que reforça a necessidade de planejamento territorial voltado à proteção dessas zonas. O município de São Carlos apresenta um padrão típico de sobreposição entre potencial de recarga e intensidade de uso do solo, o que exige a implementação de instrumentos de gestão integrada dos recursos hídricos e do uso do solo, especialmente em regiões onde as condições naturais de infiltração amplificam o transporte de poluentes.

Assim, o mapa sintetiza as principais zonas de risco potencial para as águas subterrâneas, destacando a região central e sul como áreas críticas de atenção ambiental, e a porção norte como setor de maior estabilidade e resiliência ecológica. Esses resultados subsidiam a hierarquização das áreas vulneráveis à contaminação, fornecendo base técnica para o ordenamento territorial, fiscalização de atividades agrícolas e industriais e o planejamento de políticas públicas voltadas à proteção dos aquíferos.

Figura 53 - Potencial de Contaminação por Fontes Difusas com Recarga



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
Departamento de Geotecnia

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no município de São Carlos.

Potencial de contaminação por fontes difusas

Autor: Lavínia Aguiar Pereira
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

4.2.8.8 Carta do Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais sem Recarga

A Carta de Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais sem Recarga (Figura 54) representa a distribuição das atividades potencialmente poluidoras localizadas no município de São Carlos, desconsiderando o fator de recarga subterrânea. Essa abordagem permite identificar setores críticos de risco direto, cuja contaminação pode ocorrer por lançamento superficial ou percolação secundária, mesmo em áreas com baixa capacidade de infiltração.

De modo geral, observa-se o predomínio da classe de baixo potencial de contaminação, que ocupa aproximadamente 1,11 km² (~86,6%) do território municipal, refletindo a baixa densidade de fontes pontuais cadastradas e a presença de superfícies impermeáveis em áreas urbanas. Nessas regiões, a infiltração de contaminantes é reduzida, pois as atividades predominantes — como postos de combustíveis e aterros controlados — operam sobre pavimentação ou com sistemas de contenção e drenagem. A impermeabilização do solo, aliada à adoção de estruturas de impermeabilização de tanques e pisos, minimiza o contato direto entre efluentes e o meio físico, limitando a percolação vertical e, portanto, o risco à água subterrânea.

As áreas de muito alto potencial de contaminação, que somam cerca de 1,71 km² (~13,4%), correspondem a locais com atividades industriais e administrativas concentradas, tais como antigos lixões, unidades de administração pública geral, oficinas de blocos de motor usinados, e comércios de combustíveis e lubrificantes para veículos. Essas áreas se distribuem de forma pontual e isolada, principalmente nas porções central e sul do município, coincidindo com regiões de uso urbano consolidado e presença histórica de atividades industriais.

A elevada classificação nessas zonas decorre da natureza e intensidade das atividades antrópicas, que envolvem armazenamento, manipulação e descarte de substâncias químicas, óleos e metais pesados, mesmo em condições de recarga reduzida. Ainda que a infiltração natural seja limitada, a ocorrência de vazamentos, falhas em sistemas de contenção ou descarte irregular de efluentes pode gerar contaminação pontual significativa no solo e em aquíferos rasos, especialmente em áreas com solos alterados e rede de drenagem artificial.

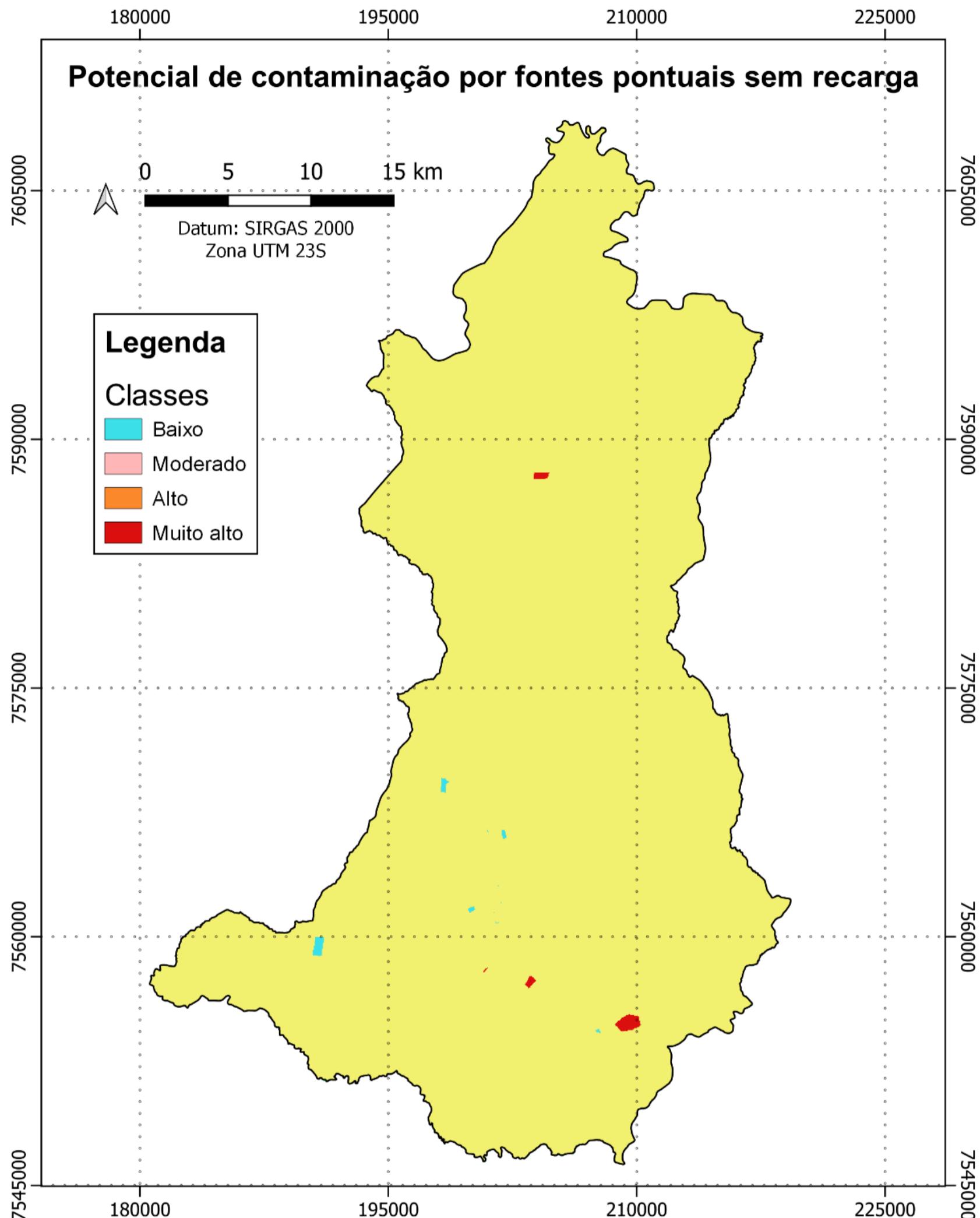
De forma complementar, as áreas de médio e alto potencial de contaminação são praticamente inexistentes, o que reforça que a pressão antrópica pontual sobre o solo de São Carlos é localizada e restrita a poucos empreendimentos. Esse cenário indica que o risco de contaminação direta sem influência da recarga é reduzido, sendo as ameaças concentradas em pontos críticos específicos, cuja vulnerabilidade está mais relacionada à gestão inadequada de

resíduos e à ausência de impermeabilização secundária do que às características naturais do terreno.

De maneira geral, o mapa demonstra que a contaminação pontual sem recarga ocorre de forma muito restrita e isolada, mas requer atenção prioritária em áreas com histórico de deposição de resíduos ou operações industriais antigas, onde há maior probabilidade de contaminação residual ou difusa por infiltração acidental.

Assim, esta carta evidencia que, embora o município apresente baixo risco geral de contaminação pontual sem recarga, a existência de áreas críticas associadas a atividades específicas — como lixões desativados e comércios de combustíveis — reforça a importância de manter ações de monitoramento e controle ambiental contínuas, especialmente sobre áreas com histórico de passivos ambientais.

Figura 54 - Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais sem Recarga



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
Departamento de Geotecnia

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no município de São Carlos.

Potencial de contaminação por fontes pontuais sem recarga

Autor: Lavínia Aguiar Pereira
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

4.2.8.9 Carta do Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais com Recarga

A Carta de Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais com Recarga (Figura 55) representa a integração das fontes pontuais de poluição com as condições de recarga subterrânea obtidas na etapa anterior. Essa análise permite compreender como o uso antrópico concentrado — representado por indústrias, postos de combustíveis, cemitérios, estações de tratamento e outras instalações potencialmente poluidoras — se relaciona com a capacidade de infiltração e recarga dos sistemas aquíferos locais.

Os resultados obtidos seguem a mesma distribuição percentual observada na Carta de Potencial de Recarga, demonstrando que o comportamento espacial do risco pontual está fortemente condicionado às características físicas e hidrogeológicas do município. De modo geral, observa-se o predomínio das classes de potencial moderado e alto, que abrangem conjuntamente cerca de 888,75 km² (~79% do território), refletindo a extensão das áreas com recarga efetiva e atividade antrópica localizada.

As áreas de alta recarga, correspondentes a cerca de 208,83 km² (~18%), estão situadas majoritariamente nas porções centrais e noroeste do município, coincidindo com zonas de baixa declividade e materiais inconsolidados permeáveis. Nessas regiões, embora a infiltração seja eficiente, o potencial de contaminação por fontes pontuais é baixo, pois são áreas predominantemente urbanizadas e impermeabilizadas, onde a percolação vertical é restrita. A cobertura asfáltica e o sistema de drenagem reduzem a infiltração direta, limitando o transporte vertical de contaminantes e atenuando o risco à água subterrânea.

As zonas de muito alta recarga, que somam 193,89 km² (~17%), localizam-se nas porções sul e sudoeste, caracterizadas por solos arenosos e profundos, alta precipitação e materiais de elevada condutividade hidráulica. Nessas áreas, o potencial de contaminação pontual permanece baixo a moderado, uma vez que predominam usos agrícolas e florestais dispersos, com baixa concentração de empreendimentos potencialmente poluidores. Ainda assim, essas regiões exigem atenção especial quanto ao manejo agrícola e uso de insumos químicos, devido à elevada capacidade de infiltração e transporte de substâncias solúveis.

As áreas de potencial moderado, que ocupam aproximadamente 425,79 km² (~37%), estão associadas a superfícies suavemente onduladas e solos de textura média a arenosa, com taxas de infiltração intermediárias e recarga difusa. Nessas regiões, o risco de contaminação pontual está ligado à presença pontual de pequenas indústrias, fossas sépticas e sistemas de abastecimento individualizados, exigindo gestão adequada e fiscalização contínua.

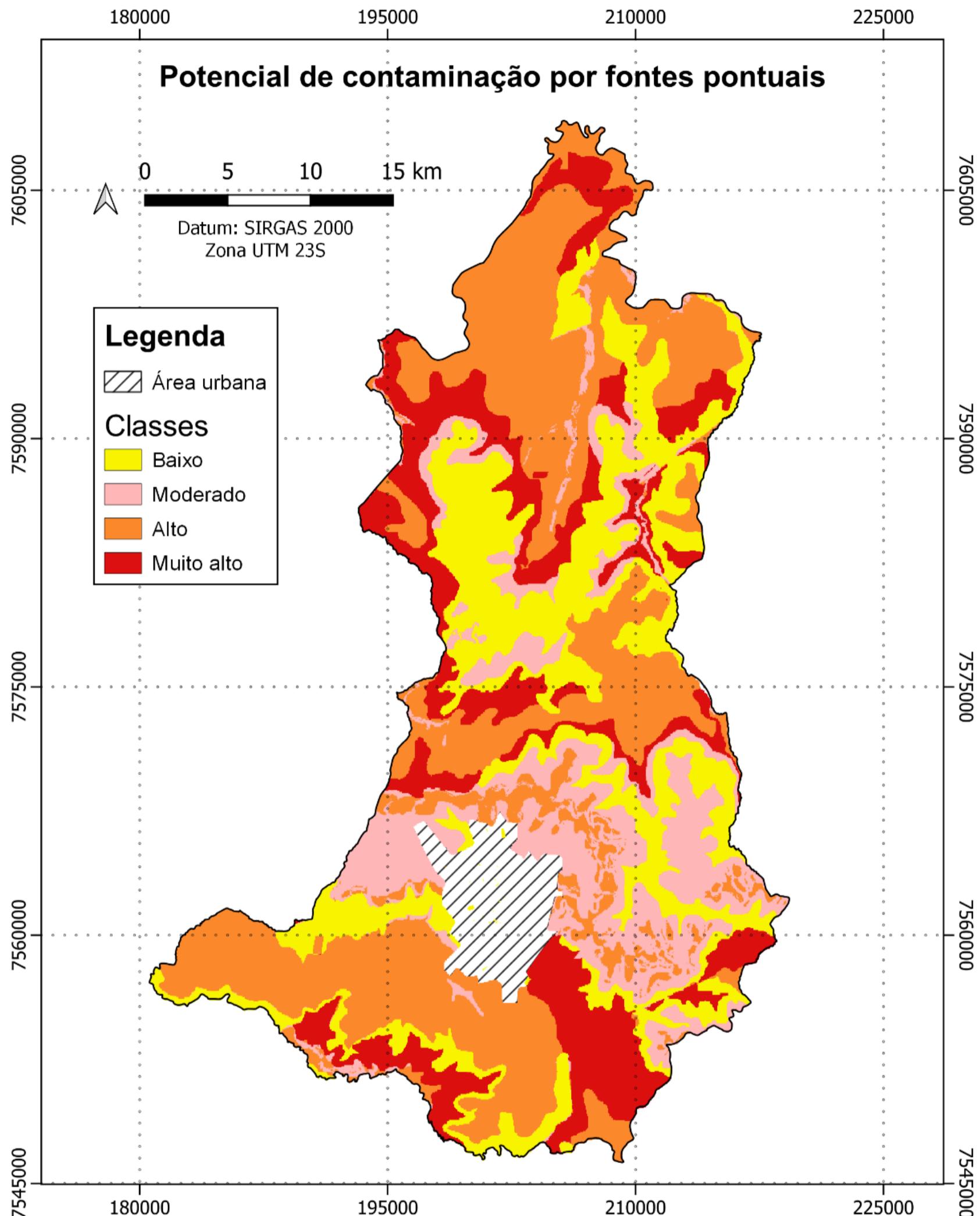
Por sua vez, as classes de baixa recarga, que totalizam 269,25 km² (~23%), apresentam menor vulnerabilidade hidrogeológica, pois correspondem a setores de declividades mais acentuadas, solos argilosos compactados e rochas menos permeáveis, principalmente da Formação Serra Geral. Nesses locais, o escoamento superficial é predominante e a probabilidade de infiltração de contaminantes é mínima, resultando em baixo potencial de contaminação pontual.

De maneira geral, o comportamento espacial do potencial de contaminação por fontes pontuais demonstra que as áreas urbanas consolidadas, por serem fortemente impermeabilizadas, apresentam baixo risco de infiltração direta de contaminantes, apesar da alta densidade de atividades potencialmente poluidoras. Já as áreas rurais, embora menos ocupadas, podem apresentar vulnerabilidade elevada quando associadas a materiais de alta condutividade hidráulica e recarga intensa.

Portanto, a carta evidencia que o risco de contaminação pontual em São Carlos é controlado principalmente pela capacidade de infiltração do meio físico, e não apenas pela presença das fontes. Essa relação reforça a importância de manter as zonas de alta recarga sob uso controlado e sustentável, garantindo que a proteção dos aquíferos ocorra de forma preventiva e integrada ao planejamento territorial.

Assim, o mapa sintetiza a influência conjunta dos fatores geológicos, pedológicos, geomorfológicos e antrópicos, destacando que, embora o município apresente ampla capacidade de recarga, suas áreas urbanas impermeáveis funcionam como barreiras de proteção parcial, enquanto as áreas rurais demandam maior atenção em termos de manejo ambiental e controle de fontes pontuais dispersas.

Figura 55 - Potencial de Contaminação por Fontes Pontuais com Recarga



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
Departamento de Geotecnia

Hierarquização das áreas de recarga das águas subterrâneas e fontes de contaminação no município de São Carlos.

Potencial de contaminação por fontes pontuais

Autor: Lavínia Aguiar Pereira
Orientador: Lázaro Valentin Zuquette

4.3 INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

A integração dos atributos físico-naturais e antrópicos analisados neste trabalho permitiu compreender de forma abrangente a dinâmica hidrogeológica do município de São Carlos (SP), especialmente no que se refere ao potencial de recarga das águas subterrâneas e à vulnerabilidade frente às fontes de contaminação. Os resultados obtidos demonstram que o comportamento da recarga é controlado por uma interação complexa entre fatores climáticos, pedológicos, geológicos, geomorfológicos e antrópicos, cuja combinação define zonas com distintas capacidades de infiltração, armazenamento e proteção do aquífero.

Do ponto de vista climático, observou-se que as zonas norte e sul do município apresentam os maiores volumes de precipitação média anual (1.350–1.550 mm/ano) e balanço mais equilibrado entre chuva e evapotranspiração, resultando em condições favoráveis à recarga difusa. A região central ou “zona alta”, embora apresente altitudes elevadas, mostrou-se relativamente mais seca e sujeita a déficit hídrico, configurando-se como uma área de menor contribuição direta ao recarregamento do sistema aquífero. Essa diferenciação espacial reforça a importância de considerar a variação altitudinal e o regime climático na definição das zonas prioritárias de recarga.

Os materiais inconsolidados representam o principal meio de infiltração e controle do fluxo vertical de água no município. As cartas de macroporosidade, condutividade hidráulica e textura indicaram predominância de solos de média a alta permeabilidade — em especial, as formações arenosas e areno-siltosas — que favorecem o armazenamento e a percolação gradual da água até o nível saturado. Aproximadamente 70% da área total apresentou condutividade hidráulica superior a 10^{-4} cm/s e porosidade acima de 40%, valores indicativos de boa capacidade de recarga difusa. As espessuras médias a altas (5–25 m) e as sequências gradacionais diminuindo, observadas em 73,7% do território, reforçam a existência de perfis litológicos propícios à infiltração contínua e à filtragem natural de contaminantes, destacando a predominância de ambientes favoráveis à recarga subterrânea.

No substrato rochoso, a predominância de arenitos pouco consolidados das Formações Botucatu e Pirambóia, de alta porosidade ($>30\%$) e condutividade hidráulica ($>10^{-3}$ cm/s), indica a presença de amplas zonas de recarga direta do Sistema Aquífero Guarani. Já as formações basálticas e diabásicas da Serra Geral, embora menos permeáveis, contribuem para o fluxo secundário quando fraturadas, formando canais preferenciais de recarga concentrada. As descontinuidades estruturais mapeadas — fraturas abertas, contínuas e preenchidas por areia

— ampliam a permeabilidade secundária do meio rochoso e favorecem o intercâmbio vertical entre as zonas aquíferas, especialmente nas porções central e meridional do município. Dessa forma, a combinação entre arenitos porosos e fraturamentos interconectados constitui um sistema altamente eficiente de infiltração e circulação subterrânea.

O relevo e a declividade confirmam a predominância de superfícies suaves a onduladas (declividades <15%), que ocupam mais de 90% da área total e favorecem o escoamento difuso e a infiltração progressiva. As áreas mais íngremes (declividades >30%), restritas às bordas de drenagem e escarpas estruturais, desempenham papel secundário na recarga, atuando principalmente como zonas de drenagem e transferência lateral. Essa morfologia, associada à boa drenagem natural e à cobertura de solos espessos e arenosos, constitui um cenário favorável à infiltração predominante e à sustentação dos fluxos subterrâneos.

Os atributos hidrogeológicos — profundidade do lençol freático, número de poços e ocorrência de nascentes — corroboram a interpretação anterior. A predominância de níveis freáticos rasos (5–10 m) e intermediários (10–20 m) demonstra que o município apresenta alta conectividade entre o sistema superficial e subterrâneo. As áreas de lençol mais raso coincidem com setores de relevo suave e solos permeáveis, sugerindo intensa recarga direta. Já as zonas de descarga, que representam cerca de 13% da área, evidenciam a contribuição do fluxo subterrâneo para a manutenção das drenagens e nascentes, reforçando a importância da recarga difusa no balanço hídrico local.

Quando integrados aos fatores antrópicos, os resultados revelam um quadro de forte contraste entre potencial natural e pressão ambiental. As zonas norte e sul, de maior potencial de recarga, apresentam uso do solo predominantemente agropecuário e florestal, o que favorece a infiltração, mas exige práticas de manejo e conservação para evitar compactação e contaminação difusa. Em contrapartida, a região central e as bordas urbanas — caracterizadas por intensa impermeabilização e concentração de fontes pontuais de poluição — configuram áreas de alto risco ambiental. O cruzamento entre as cartas de recarga e as cartas de potencial de contaminação por fontes difusas e pontuais evidenciou coincidência entre alta vulnerabilidade e presença de atividades industriais e postos de combustíveis, o que indica setores prioritários para monitoramento e controle ambiental.

De forma geral, a integração dos resultados demonstra que aproximadamente dois terços do território de São Carlos apresentam condições favoráveis à recarga subterrânea, enquanto as zonas urbanas e industriais concentram o maior potencial de contaminação. A sobreposição desses fatores permite identificar áreas críticas onde a alta recarga coincide com o alto risco de

poluição — especialmente nas porções sul e sudoeste da área urbana — que devem ser tratadas como áreas estratégicas de gestão ambiental e uso sustentável do solo.

Essas análises integradas confirmam a efetividade da abordagem de Análise Multicritério em ambiente SIG, que possibilitou avaliar a recarga e a vulnerabilidade de forma espacializada e quantitativa. Os produtos cartográficos resultantes constituem instrumentos de grande valor para o planejamento territorial, licenciamento ambiental e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, oferecendo uma base técnico-científica sólida para subsidiar políticas públicas voltadas à gestão sustentável do Sistema Aquífero Guarani no município de São Carlos.

4.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Entre as principais limitações do estudo, destacam-se:

- A escala de trabalho (1:50.000), que não permite capturar processos locais de menor escala;
- A subjetividade envolvida na atribuição dos pesos, ainda que fundamentada em literatura técnica e validação com o orientador;
- A disponibilidade e qualidade dos dados, alguns interpolados ou obtidos por estimativas indiretas.

Apesar dessas limitações, o método adotado mostrou-se adequado para a hierarquização das áreas de recarga em escala regional e se confirma como uma ferramenta eficaz para subsidiar o planejamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo hierarquizar as áreas de recarga das águas subterrâneas e identificar as principais fontes potenciais de contaminação no município de São Carlos (SP), utilizando técnicas de geoprocessamento e análise multicritério em ambiente SIG. A metodologia adotada permitiu integrar atributos físico-naturais e antrópicos, de modo a representar de forma espacial e quantitativa os processos de infiltração e os riscos associados à degradação da qualidade das águas subterrâneas.

Os resultados obtidos demonstraram que aproximadamente 58% da área do município apresenta potencial de recarga alto e muito alto, concentrando-se predominantemente nas regiões centrais e norte de São Carlos. Tais setores estão associados a materiais geológicos mais permeáveis, solos com maior macroporosidade e relevo favorável à infiltração, além de apresentarem cobertura vegetal que favorece o processo de percolação. Em contrapartida, áreas com potencial de recarga baixo e muito baixo foram observadas principalmente nas porções sul e sudoeste, onde predominam superfícies urbanizadas, compactadas ou impermeabilizadas, com menor capacidade de infiltração e maior escoamento superficial.

A análise das fontes potenciais de contaminação, por sua vez, evidenciou maior concentração de atividades industriais, áreas de disposição de resíduos e uso agrícola intensivo nas zonas de entorno urbano e periurbano, configurando regiões com elevado potencial de contaminação pontual e difusa. A sobreposição entre os mapas de recarga e de contaminação revelou setores críticos, onde coexistem alta capacidade de recarga e elevado risco de poluição, indicando áreas prioritárias para ações de monitoramento, controle e manejo ambiental diferenciado.

A aplicação da Análise Multicritério com combinação linear ponderada mostrou-se adequada e eficaz para a avaliação integrada dos fatores condicionantes da recarga e da contaminação, permitindo a elaboração de produtos cartográficos de alta relevância para o planejamento territorial. A utilização do QGIS possibilitou a manipulação de dados heterogêneos, a padronização das escalas e a integração dos diferentes atributos, reforçando o potencial das ferramentas de geoprocessamento como instrumentos de apoio à tomada de decisão em estudos hidrogeológicos.

Os resultados obtidos reforçam a importância de políticas públicas voltadas à preservação das zonas de recarga e à gestão preventiva das fontes de contaminação, especialmente em municípios com crescimento urbano acelerado. Recomenda-se a incorporação dos mapas gerados neste estudo como subsídios para o zoneamento ambiental e

o licenciamento de empreendimentos, de modo a promover o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

Por fim, ressalta-se que o método proposto apresenta limitações relacionadas à escala de análise e à disponibilidade de dados, fatores que podem influenciar o detalhamento das estimativas de recarga e contaminação. Sugere-se, portanto, que futuras pesquisas ampliem o escopo temporal e espacial do estudo, integrem dados de monitoramento hidroquímico e isotópico e considerem a modelagem numérica do fluxo subterrâneo, a fim de aprimorar o entendimento dos processos de recarga e vulnerabilidade dos aquíferos na região de São Carlos.

Em síntese, conclui-se que o trabalho alcançou seus objetivos, fornecendo subsídios técnicos e científicos de significativa aplicabilidade na gestão ambiental e na conservação dos recursos hídricos subterrâneos, e contribuindo para o fortalecimento das bases de planejamento territorial sustentável no município de São Carlos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BALBINOT, Rafaelo et al. **O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008. Disponível em:<<https://revistas.unicentro.br/index.php/ambiente/article/download/294/1892>>. Acesso em 10 mar de 2023.

BALEK, J. **Groundwater recharge concepts**. In: SIMMERS, I. (Ed.). Estimation of natural groundwater recharge: mathematical and physical sciences. 1987. p. 3–9.

BRANCO, Vitor Xatara. **Zoneamento da vulnerabilidade específica das águas subsuperficiais: folha do IBGE – Ibaté (SP), escala 1:50.000**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências, Área de Concentração: Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002a.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o inventário nacional de resíduos sólidos industriais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 31 out. 2002b.

CARVALHO, L. Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em:<<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-29052003-141211/publico/laercio.pdf>>. Acesso em 10 mar de 2023.

CALIJURI, M; CUNHA, D. Engenharia Ambiental: Conceitos. Tecnologia e Gestão—Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CETESB. Mapa de Áreas Contaminadas – Estado de São Paulo. Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de SP. Disponível em: <https://mapas.infraestrutura.meioambiente.sp.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=77da778c122c4ccda8a8d6babce61b6b>. Acesso em 10 out de 2025.

COSTA, R.A.; NISHIYAMA, L. Caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados das áreas urbana e de expansão urbana da cidade de Caldas Novas (GO). Revista

Geoaraguaia, v. 1, n. 2, p. 40-51, 2011. Disponível em:<<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4025598.pdf>>. Acesso em 10 mar de 2023.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

DE AMORIM, J.M. A utilização do mapeamento geológico para obtenção de atributos do meio físico da região metropolitana de são paulo. ResearchGate, dez de 2009. Disponível em https://www.researchgate.net/profile/Joao-Amorim-10/publication/270277163_A_UTILIZACAO_DO_MAPEAMENTO_GEOLOGICO_PARA_OBTENCAO_DE_ATRIBUTOS_DO_MEIO_FISICO_DA_REGIAO_METROPOLITANA_DE_SAO_PAULO/links/54a557160cf257a63608cabf/A-UTILIZACAO-DO-MAPEAMENTO-GEOLOGICO-PARA-OBTENCAO-DE-ATRIBUTOS-DO-MEIO-FISICO-DA-REGIAO-METROPOLITANA-DE-SAO-PAULO.pdf. Acesso em 10 mar de 2023.

DE VILLA, B et al. Balanço hídrico climatológico: uma revisão. Research, Society and Development, v. 11, n. 6, p. e50211626669-e50211626669, 2022. Disponível em:<<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/download/26669/25447>>. Acesso em 10 mar de 2023.

EPA. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models. In: RAVI, V.; WILLIAMS, J. R. (Ed.). *Environmental Protection Agency*. [s. l.]: EPA, 1998. p. 84.

FAGUNDES, J.R.T. (2010). Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista a avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP. Tese Doutorado (397f), Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Carlos.

FEITOSA et al. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2008.

FERREIRA, C et al. O que são resíduos da construção civil. Gestão de Resíduos Sólidos - CGA/UFSC. Disponível em: <<https://gestaoderesiduos.ufsc.br/rcc/>>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

FONSECA DE CARVALHO, D; DUARTE, L. Escoamento Superficial. UFRRJ, ago de 2006. Disponível em:<<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>>. Acesso em 10 mar de 2023.

FONSECA DE CARVALHO, D; DUARTE, L. Infiltração. UFRRJ, ago de 2006. Disponível em:<<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap5-INF.pdf>>. Acesso em 10 mar de 2023.

GARDNER, W. R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from water table. Soil Science, [s. l.], v. 85, p. 228–232, 1958.

HEALY, R. W. **Estimativa da recarga de águas subterrâneas.** Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 238 p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STYLIANOU, Y. **Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ.** Soil Science, [s. l.], v. 114, n. 5, p. 395–400, 1972.

HIRATA et al. **As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil.** São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em:
https://igc.usp.br/igc_downloads/Hirata%20et%20al%202019%20Agua%20subterranea%20e%20sua%20importancia.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

HOLTAN, H. N. **A concept for infiltration estimates in watershed engineering.** [s. l.], p. 41–51, 1961.

HORTON, R. E. **An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity.** Soil Science Society of America Journal, [s. l.], v. 5, p. 399–417, 1940.

KOSTIakov, A. N. **On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration.** In: Transactions of the Commission of the International Society of Soil Science. Moscow, 1932. p. 17–21.

LEITE, J. C. (1995). **Metodologia para Elaboração da Carta de Susceptibilidade à Contaminação e Poluição das Águas Subsuperficiais.** (1995). 219 f. (Dissertação (Mestrado)), Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 1995.

LEMONS, Felipe Porto de Oliveira. **Elaboração de carta de vulnerabilidade: contaminação das águas subterrâneas região da folha IBGE - Ibaté - SP.** 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. . Acesso em: 07 dez. 2025.

LEONEL, P. **Dinâmica da Água no Solo** Vol. 61, p. 27 - 41, 2005.

LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Simple field methods for estimating hydraulic conductivity.** Soil Science Society of America Journal, [s. l.], v. 44, p. 3–7, 1980.

LISBOA, Rafael Luis Lobato. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro Guelph e ensaios de laboratório.** 2006. Disponível em:<<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3852/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em 10 mar de 2023.

MAPBIOMAS. Cobertura e uso da terra – município de São Carlos (SP). Plataforma MapBiomass Brasil: Cobertura/Land-Use. Disponível em: <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/coverage/>. Acesso em 10 out de 2025.

MASSOLI, M. Caracterização litofaciológica das formações Pirambóia e Botucatu, em superfície, no município de Ribeirão Preto (SP), e sua aplicação na prospecção de águas subterrâneas. 2007. Disponível em:<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/102923/massoli_m_dr_rcla.pdf?sequence=1>. Acesso em 10 mar de 2023.

MENON, B. A. Quantitative analysis of springs. Environmental Geology, [s. l.], v. 26, p. 111–120, 1995.

MIRANDA, G. Resíduo Industrial na mineração. BNA consultoria, 8 de jul de 2020. Disponível em:<<https://www.bnaconsultoria.com/blog/residuo-industrial-mineracao-anm-minerios-de-ferro>>. Acesso em 10 mar de 2023.

MOREIRA, M; COSTA, L. Resíduos Orgânicos. Embrapa, ago. de 2021. Disponível em:<<https://www.embrapa.br/hortalica-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos>>. Acesso em 10 mar de 2023.

MOREIRA, A; VIANA, J; BRASIL, A. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. IPEA, Brasil, 9 de ago. de 2012. Disponível em:<https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%A3stico_2012.pdf>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

MURO, M. D. (2000). Carta de Zoneamento para seleção de áreas frente a instalação de aterros sanitários no município de São Carlos-SP. 2000. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.

NISHIYAMA, L. (1991). Mapeamento geotécnico preliminar da quadrícula de São Carlos - SP. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos. 1991.

NISHIYAMA, L.; ZUQUETTE, L. V. (1994). Importância da Cartografia Geotécnica Para Caracterização de Vulnerabilidade de Aquíferos Livres: Exemplo do Aquífero Botucatu Na Quadrícula de São Carlos -Sp. Geociências (São Paulo) [S.I.], v. 13, n. 2, p. 345-357, 1994.

O que são Resíduos Perigosos. Meu resíduo. Santa cruz do sul-RS. Disponível em:<<https://meuresiduo.com/categoria-1/o-que-sao-residuos-perigosos/>>. Acesso em 10 mar de 2023.

PALMA. J. B. (2004). Avaliação integrada, em diferentes escalas, dos atributos que controlam a dinâmica das águas: aplicação para análise de risco de contaminação das águas subsuperficiais na região entre São Carlos e Ribeirão Preto. Tese de Doutorado (301f.). Escola de Engenharia de São Carlos/USP. São Carlos.

PHILIP, J. R. **Sorptivity and algebraic infiltration equations.** *Soil Science*, [s. l.], v. 84, p. 257–264, 1957.

Resíduos Sólidos Urbanos. SINIR+. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-solidos-urbanos/>>. Acesso em 10 de mar. de 2023.

Recarga subterrânea e Sustentabilidade. PUC-RIO Disponível em:<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14605/14605_5.PDF>. Acesso em 10 mar de 2023.

ROCHA, S; LOUGON, M; DE OLIVEIRA GARCIA, G. **Influência de diferentes fontes de poluição no processo de eutrofização.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 4, n. 4, p. 1, 2009. Disponível em:<<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7476456>>. Acesso em 10 mar de 2023.

RUSHTON, K. **Recharge from permanent water bodies.** In: SIMMERS, I. (Ed.). *Recharge of phreatic aquifers in (semi)arid areas*. Rotterdam: AA Balkema, 1997. p. 215–255.

LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge.** Hannover: IAH, 1990.

SILVEIRA, A. L. L. **Ciclo hidrológico e a bacia hidrográfica.** In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Edusp; ABRH, 1997. p. 35-51.

TUCCI, C; CLARKE, R. **Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão.** Rbrh: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. vol. 2, n. 1 (jun. 1997), p. 135-152, 1997. Disponível em:<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/233443/000150910.pdf?sequence=1>>. Acesso em 10 mar de 2023.

WATSON, K. K. **An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials.** *Water Resources Research*, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 709–715, 1966.

WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; TROEGER, U. **Contribuição da recarga para o Sistema Aquífero Guarani estimada pelo método de balanço hídrico em uma bacia representativa.** Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 87, n. 2, p. 595-609, 2015.

ZUQUETTE, L. V. (1981). **Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos 1981.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica.** São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B.; PEJON, O.J. (2006). **Initial assessment of the infiltration and Overland flow for different rainfall events in land constituted of sandstones of the Botucatu Formation (Guarani Aquifer)**, State of São Paulo, Brazil. Environmental Geology [S.I.], v. 50, n. 3, p. 371-387, 2006.

ZUQUETTE, L.V.; SILVA, E.M. JR.; GARCIA, A. (2008). **Aspectos de Sorção para os Materiais Inconsolidados da Região de São Carlos (SP)**. Revista da Escola de Minas [S.I.], v. 61, n. 2, p. 219-230. 2008.

ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B.; PEJON, O.J. (2009). **Methodology to assess groundwater pollution conditions (current and pre-disposition) in the São Carlos and Ribeirão Preto regions, Brazil**. Bulletin of Engineering Geology and the Environment [S.I.J, v. 68, n. 1, p. 117-136, 2009.