

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ESTUDO DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS EM ÁREAS DE  
CONTRIBUIÇÃO DE FONTES NATURAIS SUPOSTAS POR  
SEDIMENTOS CENOZOICOS E DA FORMAÇÃO ITAQUERI, NA  
REGIÃO DE SÃO CARLOS-SP**

**THAMIRIS CRISTINA COSTA BASILIO**

São Carlos

2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ESTUDO DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS EM ÁREAS DE  
CONTRIBUIÇÃO DE FONTES NATURAIS SUPORTADAS POR  
SEDIMENTOS CENOZOICOS E DA FORMAÇÃO ITAQUERI, NA  
REGIÃO DE SÃO CARLOS-SP**

**THAMIRIS CRISTINA COSTA BASILIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Marcilene Dantas Ferreira

São Carlos

2019

Aos meus pais, Solange e Arlindo.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Aparecida Solange Costa e Arlindo Basilio, meus grandes heróis. Obrigada por me permitirem sonhar e por lutarem para que cada sonho meu se torne realidade. As minhas irmãs Rosanna e Bibianne, pelo carinho e amizade de sempre, por serem as melhores partes de mim.

Aos meus avós, dignos de amor, respeito e admiração eternos. Que mesmo não estando mais presentes em carne, sempre mantiveram meu coração aquecido e cheio de luz; meus orientadores de todas as causas, os pais que meus pais escolheram para mim.

Ao meu melhor amigo, companheiro, namorado, noivo e amor da minha vida, Niko, que sempre esteve ao meu lado, nos piores e melhores momentos, pronto para sorrir comigo ou me acalantar quando necessário e por compreender e tolerar meus momentos de crises e ausências em momentos importantes de sua vida.

Aos irmãos que a vida me deu, Vanessa, Raquel, Joice, Milk, Ska, Marcus, por serem um porto seguro ao longo de todos esses anos. E aos demais amigos de São Carlos e Rio Claro. Aos amigos conquistados no mestrado, essenciais ao longo desses anos, em especial, Leilane, Giulia e Caio que levarei daqui pra vida.

A todo o pessoal que passou pelo LabGeo, Wilmer, Vagner, Professor Lorandi, Marcão, Jaqueline, João que tornaram a passagem por essa fase mais agradável, em especial a Jackeline e ao Mateus, meus filhinhos da gestão, que sempre levavam alegria ao laboratório.

Aos conselhos do Professor Zuquette e, ao Oscar que me ajudou muito durante todos os ensaios geotécnicos feitos no final de minha pesquisa, grandes sábios que sempre estão dispostos a dividir tanto conhecimento com os que têm oportunidade de com eles conviver.

Agradeço também à todos os professores da Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho e da Universidade Federal de São Carlos, nos mais diversos Institutos e Departamentos, que passaram por minha vida acadêmica e contribuíram para minha formação. Especialmente aos professores que foram meus orientadores e definiram de certa maneira o meu destino na Geologia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos que tornaram possível a conclusão dessa missão, à minha gratidão.  
Sintam-se os verdadeiros mestres.

“Toute réussite déguise une abdication.”

Simone de Beauvoir

## RESUMO

A crise hídrica é um assunto muito debatido nos últimos anos, principalmente no que se refere aos efeitos da globalização, tanto na interferência das mudanças climáticas diretamente na recarga, quanto no aumento desordenado do meio urbano que afeta diretamente a disponibilidade de água para consumo tanto doméstico, quanto industrial. Essas mudanças climáticas alteram os regimes e volumes pluviométricos, a evapotranspiração, o processo de recarga dos aquíferos e os fluxos dos rios. O desmatamento e a pavimentação das áreas de recarga são resultados da urbanização e do avanço da produção agrícola, acarretando no aumento da impermeabilização do solo e, afetando assim, a infiltração e o armazenamento das águas subsuperficiais. Objetivou-se o preenchimento de algumas lacunas na literatura, em relação aos estudos que investigam as recargas de água, utilizando-se de um mapeamento bibliométrico e de um mapeamento geológico-geotécnico de detalhe, visando o monitoramento das zonas de recargas de água na região norte do município de São Carlos, SP. Para tanto, realizou-se o monitoramento de aquífero livre da microbacia por meio de frequentes medições dos níveis estáticos de 4 poços de monitoramento para a posterior aplicação do método *Water Tabel Fluctuation (WTF)* que aferiu uma recarga anual de 1338,8mm, valor inferior aos anos anteriores, representando uma média de 16-36% de toda a recarga direta anual da microbacia. Além disso, uma análise multitemporal do tipo de cobertura do solo foi feita neste estudo, demonstrando os problemas gerados pelo aumento da porcentagem de solo exposto em regiões de nascentes. Conclui-se que o monitoramento da recarga de águas realizado foi satisfatório e que medidas mais rígidas na gestão dos recursos hídricos devem ser tomadas para que as futuras gerações não sofram com crises hídricas na região. Além disso, a expansão urbana na área em estudo pode interferir diretamente nessa diminuição da recarga superficial.

**Palavras-chave:** Crise Hídrica, Expansão Urbana; Impermeabilização do Solo; WTF; Nascentes, Recarga de águas subsuperficiais.

## ABSTRACT

The water crisis is a hotly debated issue in recent years, especially as regards the effects of globalization, both on the interference of climate change directly on recharge and on the disorderly increase of the urban environment that directly affects the availability of water for domestic consumption, and industrial. These climate changes alter pluviometric regimes and volumes, evapotranspiration, the recharge process of aquifers, and river flows. Deforestation and paving of recharge areas are the result of urbanization and the advancement of agricultural production, leading to increased waterproofing of the soil and thus affecting the infiltration and storage of groundwater. The objective was to fill some gaps in the literature, in relation to the studies that investigate the water refills, using a bibliometric mapping and geological-geotechnical detail mapping, aiming the monitoring of water recharge zones in the region north of the municipality of São Carlos, SP. In order to do so, the monitoring of free aquifer of the microbasin was carried out by means of frequent measurements of the static levels of 4 monitoring wells for the subsequent application of the Water Tabel Fluctuation (WTF) method that verified an annual recharge of 1338.8mm, lower value to the previous years, representing an average of 16-36% of all direct annual recharge of the microbasin. In addition, a multitemporal analysis of the soil cover type was done in this study, demonstrating the problems generated by the increase of the percentage of soil exposed in regions of springs, increasing, consequently, the surface runoff and reducing the infiltration. It is concluded that the monitoring of the recharge of water has been satisfactory and that stricter measures in the management of water resources must be taken so that future generations do not suffer from water crises in the region. In addition, urban sprawl in the study area may directly interfere with this decrease in surface recharge.

**Keywords:** Water Crisis, Urban Expansion; Soil Waterproofing; WTF; Springs, Recharge of groundwater.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CICLO HIDROLÓGICO.	6
<b>FIGURA 2.</b> ESQUEMA DE UM AMBIENTE ALTERADO ANTROPICAMENTE.	8
<b>FIGURA 3.</b> EVOLUÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO COM O TEMPO.	11
<b>FIGURA 4.</b> ZONAS DO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO.	13
<b>FIGURA 5.</b> DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DE ÁGUA NO SOLO E SUBSOLO.	14
<b>FIGURA 6.</b> TIPOS DE AQUÍFEROS.	15
<b>FIGURA 7.</b> TIPOS DE RECARGA.	17
<b>FIGURA 8.</b> REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PRINCIPAIS PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM UM BALANÇO HÍDRICO.	20
<b>FIGURA 9.</b> FLUXO PREFERENCIAL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DEVIDO A CAMADAS DE DIFERENTES PERMEABILIDADES.	21
<b>FIGURA 10.</b> SISTEMAS DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.	22
<b>FIGURA 11.</b> RELAÇÃO ENTRE A VEGETAÇÃO E AS ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS.	24
<b>FIGURA 12.</b> CLASSIFICAÇÃO ADAPTADA PARA O PERFIL DE ALTERAÇÃO.	25
<b>FIGURA 13.</b> OBTENÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA, QUE É UM AUMENTO DO NÍVEL DE ÁGUA HIPOTÉTICO, EM RESPOSTA À PRECIPITAÇÃO. $\Delta H$ É IGUAL À DIFERENÇA ENTRE O PICO DA ELEVAÇÃO E O PONTO BAIXO DA CURVA DE RECESSÃO EXTRAPOLADA ANTECEDENTE (LINHA TRACEJADA) NA HORA DO PICO.	33
<b>FIGURA 14.</b> EXEMPLOS DE POÇOS DE OBSERVAÇÃO PARA O MONITORAMENTO DE NÍVEIS D'ÁGUA.	37
<b>FIGURA 15.</b> PONTO DE MEDIÇÃO (TOPO A TOPO).	37
<b>FIGURA 16.</b> CALCULANDO O SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E O GRADIENTE HIDRÁULICO.	39
<b>FIGURA 17.</b> FLUXOGRAMA DE ETAPAS DE TRABALHO.	48
<b>FIGURA 18.</b> LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	51
<b>FIGURA 19.</b> POROSIDADES DE RAÍZES APRESENTANDO FEIÇÕES DE REDUÇÃO (MAIS ESBRANQUIÇADAS) NO ARENITO DA FORMAÇÃO ITAQUERI SILICIFICADA.	56
<b>FIGURA 20.</b> MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS DA ÁREA EM ESTUDO.	61
<b>FIGURA 21.</b> FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA O MAPEAMENTO BIBLIOMÉTRICO.	64
<b>FIGURA 22.</b> MAPA TOPOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDO, COM LOCALIZAÇÃO DA INSTALAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTOS.	67
<b>FIGURA 23.</b> CONSTRUÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO.	68

<b>FIGURA 24.</b> MEDIDOR DE NÍVEL D'ÁGUA ELÉTRICO.	69
<b>FIGURA 25.</b> ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.	71
<b>FIGURA 26</b> PENEIRAS E DISPERSOR UTILIZADOS DURANTE O ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA	71
<b>FIGURA 27.</b> BOMBA DE PRESSÃO PARA VÁCUO.	73
<b>FIGURA 28.</b> MÁQUINA DE VÁCUO	73
<b>FIGURA 29.</b> EXECUÇÃO DE TRADAGEM PARA A DETERMINAÇÃO DO PERFIL DE UMIDADE.	74
<b>FIGURA 30.</b> PARCELAS PARA ENSAIO DE UMIDADE EM CAMPO.	75
<b>FIGURA 31.</b> DELIMITAÇÃO DE PARCELAS	75
<b>FIGURA 32.</b> AMOSTRAS DE PERFIL DE MONITORAMENTO DE UMIDADE, NA QUAL CADA CÁPSULA REPRESENTA 20CM DE PROFUNDIDADE, INICIANDO EM 20CM E TERMINANDO EM 440CM.	76
<b>FIGURA 33.</b> ENSAIO CTC	77
<b>FIGURA 34.</b> PAPEL FILTRO COM ANÁLISE DA CAPACIDADE DE ADSORÇÃO DA ARGILA DO SOLO EM ESTUDO	77
<b>FIGURA 35.</b> ANÉIS DE PVC PARA COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS.	79
<b>FIGURA 36.</b> AS CINCO PRINCIPAIS CATEGORIAS DO WEB OF SCIENCE.	82
<b>FIGURA 37.</b> DISTRIBUIÇÃO MUNDIAL DA PRODUÇÃO DE ARTIGOS SOBRE O TEMA DE RECARGA DE ÁGUAS.	84
<b>FIGURA 38.</b> MAPA BIBLIOMÉTRICO DA CATEGORIA PAÍSES, DIVIDIDO E CLUSTERS.	88
<b>FIGURA 39.</b> MAPA BIBLIOMÉTRICO DA CATEGORIA ORGANIZAÇÕES, DIVIDIDO EM CLUSTERS.	89
<b>FIGURA 40.</b> MAPA BIBLIOMÉTRICO DE AUTORES MAIS CITADOS, DIVIDOS EM <i>CLUSTERS</i> .	91
<b>FIGURA 41.</b> MAPA BIBLIOMÉTRICO DAS 45 <i>ALLKEYWORDS</i> DO TEMA RECARGA DE ÁGUAS.	93
<b>FIGURA 42.</b> <i>OVERLAY</i> VISUALIZATION DAS 45 <i>ALLKEYWORDS</i>	94
<b>FIGURA 43.</b> REGIÕES QUE MAIS ESTUDAM A RECARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL.	95
<b>FIGURA 44.</b> MAPA DE DOCUMENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.	98
<b>FIGURA 45.</b> MAPA DE DECLIVIDADE.	100
<b>FIGURA 46.</b> DECLIVIDADE EM PORCENTAGEM DE ÁREA.	101
<b>FIGURA 47.</b> MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO (MDE).	103
<b>FIGURA 48.</b> MAPA DE SUBSTRATO ROCHOSO DA ÁREA DE ESTUDO.	105
<b>FIGURA 49.</b> INTERCALAÇÕES DE ARENITOS E ARGILITOS DA FM ITAQUERI.	106

<b>FIGURA 50.</b> FRATURAS VISÍVEIS EM AFLORAMENTO DE SOLO SAPROLÍTICO DA FM. ITAQUERI.	107
<b>FIGURA 51.</b> LINHA DE SEIXOS QUE SEPARA O MATERIAL INCONSOLIDADO RESIDUAL DA FM ITAQUERI E O MATERIAL RETRABALHADO (SEDIMENTOS CENOZÓICOS).	108
<b>FIGURA 52.</b> MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS.	110
<b>FIGURA 53.</b> AMOSTRAS RETIRADAS A TRADO PRÓXIMAS AO P1.	111
<b>FIGURA 54.</b> ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA.	113
<b>FIGURA 55.</b> PERFIL DE SOLO A PARTIR DE TRADAGEM NO POÇO DE MONITORAMENTO P1.	115
<b>FIGURA 56.</b> PERFIL DE SOLO A PARTIR DE TRADAGEM NO POÇO DE MONITORAMENTO P4.	117
<b>FIGURA 57.</b> DADOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO DO CÓRREGO DO FAZARE.	119
<b>FIGURA 58.</b> POÇOS DE MONITORAMENTO DO CÓRREGO DO ESPRAIADO.	120
<b>FIGURA 59.</b> POÇOS DE MONITORAMENTO E MÉDIA DE CHUVAS MENSAS NA ÁREA DE ESTUDO.	122
<b>FIGURA 60.</b> VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM PARCELA DESCOBERTA NA ÁREA DE ESTUDO.	124
<b>FIGURA 61.</b> VALORES DE UMIDADE RELATIVA EM PARCELA COBERTA NA ÁREA DE ESTUDO.	125
<b>FIGURA 62.</b> DADOS DE UM PERÍODO DE 45 DIAS NA ESTAÇÃO METEREOLÓGICA EMBRAPA SÃO CARLOS.	127
<b>FIGURA 63.</b> FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO POÇO P1 E AS LINHAS DE TENDÊNCIA.	130
<b>FIGURA 64.</b> FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO POÇO P2 E AS LINHAS DE TENDÊNCIA.	131
<b>FIGURA 65.</b> FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO POÇO P3 E AS LINHAS DE TENDÊNCIA.	132
<b>FIGURA 66.</b> FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA SUBTERRÂNEA DO POÇO P4 E AS LINHAS DE TENDÊNCIA.	133
<b>FIGURA 67.</b> IMAGENS MULTITEMPORAIS EXTRAÍDAS DO GOOGLE EARTH. OS PONTOS TRACEJADOS EM BRANCO MARCAM A ÁREA URBANIZADA JÁ CONSOLIDADA E OS TRACEJADOS AMARELOS REPRESENTAM AS ÁREA EM EXPANSÃO.	136
<b>FIGURA 68.</b> CHUVA POUCO INTENSA GEROU ENXURRADA EM REGIÃO IMPERMEÁVEL, QUE ATINGIU SOLO DA REGIÃO DO CERRADO DA UFSCAR.	137
<b>FIGURA 69.</b> ESCOAMENTO SUPERFICIAL PROVENIENTE DE ESTRADA ASFALTADA.	138

**FIGURA 70.** GRÁFICO DE PORCENTAGEM DOS USOS E COBERTURAS DOS SOLOS NOS ANOS DE 2004, 2010 E 2018. 139

**FIGURA 71.** MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DE ESTUDO, NO ANO DE 2004. 142

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 1.</b> SUMÁRIO DOS MECANISMOS QUE CONDUZEM À FLUTUAÇÃO DO NÍVEL DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	30
<b>QUADRO 2.</b> LIMITAÇÕES DO MÉTODO WTF	35
<b>QUADRO 3.</b> CONCEITOS DE MAPA, PLANTA E CARTA GEOTÉCNICOS	40
<b>QUADRO 4.</b> DEFINIÇÕES DE TERMOS EMPREGADOS EM MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	40
<b>QUADRO 5.</b> TIPOS DE CARTAS GEOTÉCNICAS E SEUS CONCEITOS	41
<b>QUADRO 6.</b> AS 20 REVISTAS MAIS IMPORTANTES NA ÁREA DE RECARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.	85
<b>QUADRO 7.</b> OS DEZ ARTIGOS MAIS CITADOS NOS ÚLTIMOS 20 ANOS SOBRE RECARGA DE ÁGUAS.	86
<b>QUADRO 8.</b> CLASSES DE DECLIVIDADE E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.	101

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1.</b> ESTIMATIVA DOS RECURSOS HÍDRICOS DA TERRA.....	7
<b>TABELA 2.</b> PRINCIPAIS CLASSIFICAÇÕES GENÉTICAS DOS SOLOS.....	26
<b>TABELA 3.</b> PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PERFIL DE ALTERAÇÃO.....	27
<b>TABELA 4.</b> NÚMERO DE OBSERVAÇÕES QUALITATIVAS E QUANTITATIVAS EM CAMPO, EM FUNÇÃO DA ESCALA.....	42
<b>TABELA 5.</b> CTC – MÉTODO AZUL DE METILENO.....	78
<b>TABELA 6.</b> PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA MENSAL ACUMULADA NO PERÍODO DE MONITORAMENTO.....	134
<b>TABELA 7.</b> PORCENTAGEM POR ÁREA DO TIPO DE COBERTURA DO SOLO.....	139

## EQUAÇÕES

<b>EQUAÇÃO 1.</b> EQUAÇÃO HIDROLÓGICA.	5
<b>EQUAÇÃO 2.</b> A RECARGA DIRETA É CALCULADA COMO:	32
<b>EQUAÇÃO 3.</b> CÁLCULO PARA A CARGA TOTAL.	38
<b>EQUAÇÃO 4.</b> CÁLCULO DO GRADIENTE HIDRÁULICO.	38
<b>EQUAÇÃO 5.</b> MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA.	74
<b>EQUAÇÃO 6.</b> FÓRMULA PARA A CTC.	76
<b>EQUAÇÃO 7 -</b> MASSA ESPECÍFICA SECA (PD)	70
<b>EQUAÇÃO 8.</b> ÍNDICE DE VAZIOS (E)	79
<b>EQUAÇÃO 9.</b> POROSIDADE (N)	79

## LISTA DE SIGLAS

<b>ABAS</b>	Associação Brasileira de Águas Subterrâneas
<b>ANA</b>	Agência Nacional de Águas
<b>APREM</b>	Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>CTC</b>	Capacidade de troca catiônica
<b>CPRM</b>	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/ Serviço Geológico do Brasil
<b>CNRH</b>	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
<b>DAEE</b>	Departamento de Águas e Energia Elétrica
<b>EMBRAPA</b>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>IBBD</b>	Instituto Brasileiro de Bibliografia e Documentação
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>IBICT</b>	Instituto Brasileiro de Informação Científica e Tecnológica
<b>IGC</b>	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
<b>IPT</b>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<b>MDE</b>	Modelo de Elevação do Terreno
<b>M.I.</b>	Materiais Inconsolidados
<b>MMA</b>	Ministério do Meio Ambiente
<b>WTF</b>	Método de Flutuação da Superfície Livre / <i>Water Table Fluctuation</i>
<b>CMB</b>	Método do Balanço de Massa de Cloreto <i>Chloride Mass Balance</i>
<b>CRD</b>	Método da Precipitação Cumulativa / <i>Cumulative Rainfall Departure</i>
<b>NBR</b>	Normas Brasileira
<b>N.A.</b>	Nível d'água
<b>UNESCO</b>	Organização das Nações Unidas para a Educação, Ciência e Cultura
<b>W%</b>	Porcentagem de umidade
<b>SAAE</b>	Serviço Autônomo de Água e Esgotos
<b>SAG</b>	Sistema Aquífero Guarani
<b>SPT</b>	Sondagem a percussão

**UGRHI**

Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

**USP**

Universidade de São Paulo

**UNESP**

Universidade Estadual de São Paulo

**UFSCar**

Universidade Federal de São Carlos

**WOS**

*Web of Science*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS	3
1.1.1	OBJETIVOS GERAIS	3
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.2	JUSTIFICATIVAS	4
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>5</b>
2.1	CICLO HIDROLÓGICO E A INTERAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL	5
2.2	PRECIPITAÇÃO	9
2.3	INFILTRAÇÃO	10
2.4	RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	16
2.4.1	RELAÇÃO TEMPORAL	17
2.4.1.1	ESTIMATIVAS DE RECARGA	18
2.4.2	MATERIAIS GEOLÓGICOS	20
2.4.3	TOPOGRAFIA	22
2.4.4	VEGETAÇÃO E USO DO SOLO	23
2.4.5	PERFIL DE ALTERAÇÃO	25
2.5	FLUTUAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA EM AQUÍFEROS	29
2.6	MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE RECARGA DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS	31
2.6.1	<i>WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)</i>	31
2.7	DETERMINAÇÃO DE LINHAS DE FLUXO	35
2.8	O MAPEAMENTO GEOTÉCNICO COMO FERRAMENTA DA GEOLOGIA AMBIENTAL	39
2.9	SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DE ÁGUAS SUBSUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS	43
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1	MATERIAIS	49
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
3.2.1	LOCALIZAÇÃO E INFORMAÇÕES GERAIS	50
3.2.2	GEOMORFOLOGIA	52
3.2.3	GEOLOGIA	52
3.2.3.1	Grupo São Bento	53
3.2.3.1.1	FORMAÇÃO BOTUCATU	53
3.2.3.1.2	FORMAÇÃO SERRA GERAL	54
3.2.3.2	FORMAÇÃO ITAQUERI	54
3.2.3.3	Depósitos Cenozoicos	56
3.2.4	ABASTECIMENTO E CAPTAÇÃO DE ÁGUA	58
3.2.5	MATERIAIS INCONSOLIDADOS	59
3.2.6	CLIMA E VEGETAÇÃO	61
3.3	PROCEDIMENTOS TÉCNICOS	62

<b>3.3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BIBLIOMÉTRICA</b>	<b>62</b>
<b>3.3.2 GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS</b>	<b>65</b>
<b>3.3.2.1 MAPAS DE DECLIVIDADE E HIPSOMÉTRICOS</b>	<b>65</b>
<b>3.3.2.4 MAPAS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO</b>	<b>66</b>
<b>3.3.3 INSTALAÇÃO E MONITORAMENTO DOS POÇOS</b>	<b>67</b>
<b>3.3.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E VALIDAÇÃO DOS DADOS PRÉ-EXISTENTES</b>	<b>69</b>
<b>3.3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO</b>	<b>70</b>
<b>3.3.5.1 ENSAIO DE GRANULOMETRIA CONJUNTA</b>	<b>70</b>
<b>3.3.5.2 MASSA ESPECÍFICA DOS SÓLIDOS (PS)</b>	<b>72</b>
<b>3.3.5.3 MASSA ESPECÍFICA APARENTE SECA (PD)</b>	<b>73</b>
<b>3.3.5.4 ENSAIO DE UMIDADE EM CAMPO / PERFIL DE UMIDADE</b>	<b>74</b>
<b>3.3.5.5 ENSAIO DE CTC – MÉTODO DO PAPEL FILTRO</b>	<b>76</b>
<b>3.3.4.6 ÍNDICES FÍSICOS</b>	<b>78</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>80</b>
<b>4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA NO ÂMBITO MUNDIAL E NACIONAL</b>	<b>80</b>
<b>4.1.1 A EVOLUÇÃO CIENTÍFICA: ANÁLISE PRÉVIA E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA</b>	<b>80</b>
<b>4.1.2 PRINCIPAIS REVISTAS E ARTIGOS IMPORTANTES NA ÁREA</b>	<b>84</b>
<b>4.1.3 COLABORAÇÃO INTERNACIONAL E PRODUTIVIDADE</b>	<b>87</b>
<b>4.1.3.1 ASSUNTOS PRINCIPAIS DAS PESQUISAS E ALLKEYWORDS</b>	<b>92</b>
<b>4.1.4 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS APLICADAS NO BRASIL</b>	<b>94</b>
<b>4.2 DESCRIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b>	<b>96</b>
<b>4.2.1 MAPA DE DOCUMENTAÇÃO</b>	<b>97</b>
<b>4.2.2 MODELO DIGITAL DE TERRENO E CARTA DE DECLIVIDADE</b>	<b>99</b>
<b>4.2.3 MAPA DE SUBSTRATO ROCHOSO</b>	<b>104</b>
<b>4.2.3.1 FORMAÇÃO ITAQUERI</b>	<b>106</b>
<b>4.2.3.2 SEDIMENTOS CENOZOICOS</b>	<b>108</b>
<b>4.2.4 MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS</b>	<b>109</b>
<b>4.2.4.1 RETRABALHADOS HIDROMÓRFICOS</b>	<b>111</b>
<b>4.2.4.2 RETRABALHADOS ARENOSOS</b>	<b>112</b>
<b>4.2.4.3 ARENOSOS COM FINOS RESIDUAIS DA FORMAÇÃO ITAQUERI</b>	<b>113</b>
<b>4.2.4.4 ARENOSOS RESIDUAIS DA FORMAÇÃO ITAQUERI</b>	<b>115</b>
<b>4.3 AVALIAÇÃO DA FLUTUAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA</b>	<b>117</b>
<b>4.3.1 POÇOS DE MONITORAMENTO</b>	<b>117</b>
<b>4.3.1.1 MENSURAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO</b>	<b>121</b>
<b>4.3.2 PERFIL DE INFILTRAÇÃO</b>	<b>122</b>
<b>4.2.3 ESTIMATIVA DA RECARGA DIRETA DAS ÁGUAS SUB-SUPERFICIAIS</b>	<b>128</b>
<b>4.4 ANÁLISE MULTITEMPORAL DE IMAGENS DE SATÉLITE DO GOOGLE EARTH PRO</b>	<b>135</b>
<b>4.4.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO AO REDOR DE NASCENTES</b>	<b>135</b>
<b>4.4.2 O USO E OCUPAÇÃO ASSOCIADO A GESTÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS</b>	<b>138</b>
<b>5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>145</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre a escassez de água em um nível global começou a ganhar visibilidade na agenda política internacional apenas no final da década de setenta, graças à disseminação de discursos distribuídos pela ONU e pelo Banco Mundial (BM) sobre essa temática. A água é vital para a vida e saúde das pessoas, além de ser necessária para a manutenção dos ecossistemas, sendo um requisito básico para o desenvolvimento socioeconômico dos países. Porém, no mundo todo, os recursos hídricos e os ecossistemas relacionados que os mantêm, estão ameaçados pela poluição, pelo uso insustentável, pela urbanização, pelas mudanças no uso do solo e pelas mudanças climáticas.

Simultaneamente, pesquisa de águas subterrâneas tem aumentado constantemente, cobrindo uma variedade de tópicos, como o processo geoquímico e hidrológico das águas subterrâneas (WANG E CHENG, 2000; EL-FIKY *et al.*, 2010), interações entre águas subterrâneas, águas superficiais, uso da terra e mudanças climáticas (SOPHOCLEOUS, 2002; CHEN *et al.*, 2009; WANG E HEJAZI, 2011), características hidrogeoquímicas e de contaminação e qualidade da água (CHAE *et al.*, 2009; ALAM *et al.*, 2010), técnicas em águas subterrâneas de modelagem e avaliação (BRUNNER *et al.*, 2003; SINGH E MINSKER, 2008), e gestão e políticas de águas subterrâneas (AESCHBACH-HERTIG E GLEESON, 2012; CHOI *et al.*, 2013), e estudos sobre os lençóis freáticos foram revisados de diferentes pontos de vista (WELCH *et al.*, 2000; SCANLON *et al.*, 2002; MANDAL E SUZUKI, 2002; BÖHLKE, 2002).

Em escala global, as camadas mais superficiais e as propriedades dos materiais geológicos têm sido alteradas consideravelmente pelas atividades antropogênicas. Essa modificação tem impactado diretamente nas taxas de infiltração, resultando no desequilíbrio da razão entre a infiltração e o escoamento superficial. Sendo assim, a população brasileira, nas recentes décadas, testemunhou taxas crescentes de queda dos níveis de água dos aquíferos, a seca de zonas úmidas, a intrusão de água do mar e a deterioração geral da qualidade da água (KINZELBACH *et al.*, 1998; REICHARD E JOHNSON, 2005; FAMIGLIETTI E RODELL, 2013).

No Brasil, nos últimos 20 anos, cresceu a importância das investigações científicas direcionadas para a avaliação das potencialidades e das recargas dos sistemas hídricos, cujos enfoques priorizam a melhoria da qualidade de vida das populações e da biota que ocupam as áreas urbanas e rurais. Desse modo, para o planejamento territorial e o gerenciamento dos recursos hídricos eficiente é necessário obter informações adequadas sobre as condições

ambientais que controlam os processos de infiltração e de geração de escoamento superficial. Essas informações estão associadas à variabilidade dos materiais geológicos e as suas características geológico-geotécnicas, as chuvas e aos tipos de usos e manejos. A avaliação correta desses aspectos é fundamental, pois permite compreender e quantificar de forma adequada a infiltração e o escoamento superficial potencial frente a eventos de chuva.

A resolução nº. 22 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), de 24 de maio de 2002, se refere em seu art. 4, ao monitoramento dos recursos subterrâneos, e relata que os Planos de Recursos Hídricos, elaborados por bacia hidrográfica, devem contemplar o monitoramento da quantidade e qualidade dos recursos dos aquíferos, com os resultados devidamente apresentados em mapa (MAZIERO, 2005). Com esse exemplo, ressalta-se que a água subterrânea tem de ser alvo de crescente preocupação dos órgãos gestores, no que se refere ao seu uso, em uma análise sistêmica se verifica que as transformações demográficas modificam as relações do uso e ocupação do solo, que aliado ao incremento das áreas agropecuárias e das demandas industriais, tem provocado impactos na degradação dos recursos hídricos e perdas na diversidade ecológica no Brasil.

A ocupação urbana do município de São Carlos se deu de maneira desordenada e sem planejamento apropriado. Dessa forma, a região da margem esquerda do Córrego do Monjolinho sofreu intensa urbanização, em parte devido à existência da rodovia Washington Luís. Já a margem direita observou relativa conservação, com a presença da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), o Parque Ecológico Dr. Antônio Teixeira Vianna e a Embrapa. Um dos afluentes da margem direita do Monjolinho é o Córrego Espraiado. Sua nascente está localizada em uma área de cerrado preservado no campus da UFSCar e é responsável pela água superficial destinada a 15% do abastecimento público feito pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE).

Porém, por se tratar de uma região de expansão urbana determinada no Plano Diretor do município elaborado em 2016, essa região do Córrego do Espraiado (um dos efluentes do Rio Monjolinho) começou a sofrer nos últimos cinco anos uma rápida e intensa urbanização, podendo acarretar sérios problemas para as nascentes localizadas na área em estudo, propriamente dita, na região do cerrado da UFSCar.

A partir de uma análise bibliométrica minuciosa sobre o tema recarga de águas subterrâneas a partir da infiltração, pôde-se identificar diversas lacunas em estudos de estimativas de recargas com enfoque no gerenciamento dos recursos hídricos e, buscando minimizar as lacunas recorrentes neste tema, este trabalho objetivou compreender as zonas de recarga de águas subsuperficiais da região norte do município de São Carlos e mostrar os

resultados relacionados ao monitoramento da recarga de águas subsuperficiais, a partir de ferramentas como o mapeamento geotécnico baseado no monitoramento quantitativo de quatro poços de monitoramentos localizados próximos a duas nascentes no cerrado da região norte do município de São Carlos – SP, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos subterrâneos, seu uso sustentável e planejamento de ações de gerenciamento.

Baseado no exposto, e buscando minimizar as lacunas recorrentes nesse tema, justificou-se o desenvolvimento de uma pesquisa, no sentido de obter como resultado final, a proposição de procedimentos que envolvem trabalhos de campo e laboratoriais, os quais permitiram a combinação de dados de chuva, de poços de monitoramento, de usos e manejos, materiais geológicos e suas características geológicas e geotécnicas para a estimativa da recarga das águas subsuperficiais a partir do modelo de *Water Table Fluctuation (wtf)*. Além disso, o estudo possibilitou uma melhor visão para o planejamento territorial, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, seu uso sustentável e o planejamento de ações de gerenciamento.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 OBJETIVOS GERAIS**

Este trabalho visou contribuir para a compreensão das zonas de recarga de águas subsuperficiais da região norte do município de São Carlos- SP e, como esta pode afetar o abastecimento de água para a população carlopolitana. Essa compreensão foi obtida a partir da integração de dados geológico-geotécnicos de um mapeamento detalhe, em uma escala 1:1000; dados climáticos, de eventos pluviométricos e da profundidade do nível d'água com vista à adequada avaliação da recarga.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos são:

- i. Analisar a produção científica mundial e nacional, acerca da recarga de águas subterrâneas associadas a processos de infiltração;
- ii. Avaliar a distribuição das águas infiltradas ao longo do tempo e os efeitos na infiltração nos materiais inconsolidados da Formação Itaqueri e dos Sedimentos Cenozoicos;

- iii. Verificar a resposta dos poços de monitoramento em relação à eventos pluviométricos;
- iv. Analisar a recarga de água do aquífero livre em estudo, em um período de 365 dias a partir da aplicação do método *Water table fluctuation (WTF)*;
- v. Aplicar uma análise multitemporal dos efeitos do uso e ocupação do solo sobre as áreas de recarga.

## 1.2 Justificativas

A área de estudo deste trabalho foi selecionada por sua grande importância no contexto das águas superficiais regionais, visto que São Carlos está posicionada dentro do contexto hidrogeológico do Grupo Bauru, em especial a Formação Itaqueri e Sedimentos Cenozoicos.

Além disso esta região é uma macrozona de expansão urbana de acordo com a revisão do Plano Diretor de São Carlos, em maio de 2016. Tal área é considerada de grande potencial de expansão, uma vez que a cidade se encontra limitada nos demais sentidos devido à proximidade dos limites com outros municípios. Sendo assim, a área em estudo vem apresentando um aumento na concentração populacional nas últimas décadas.

Esse aumento populacional vem acompanhado de uma maior demanda na utilização da água, e, de uma maior influência da impermeabilização do solo, gerado pelos empreendimentos imobiliários; acarretando sérios problemas na infiltração da água até o nível do aquífero livre e na recarga das águas subsuperficiais a médio e longo prazo.

Apesar da grande importância socioeconômica dos aquíferos, há poucos estudos integrados destinados a avaliar as características da infiltração/descarga baseados em avaliações e ensaios de campo e de laboratório. Conseqüentemente, não há muitas informações técnicas sobre a dinâmica das águas nestas áreas, nas quais os arenitos e os materiais inconsolidados são aflorantes.

Os trabalhos desenvolvidos até a atualidade são, predominantemente, sobre o comportamento dos poços profundos que, em decorrência do grande uso, em alguns locais, apresentam rebaixamento intenso e variação da produção (ZUQUETTE *et al.*, 2009), e essas características de rebaixamento intenso dos poços também se refletem nas nascentes.

Portanto, a busca por respostas sobre a funcionalidade das águas subsuperficiais, na comunidade acadêmica, poderá servir como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos do município de São Carlos, SP.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo se encontram as informações levantadas na literatura, acerca dos trabalhos que dão referências ao estudo desenvolvido, desde a descrição de termos relevantes para o trabalho, até os conceitos mais amplos e de extrema importância para o entendimento dele.

### 2.1 Ciclo hidrológico e a interação da água subterrânea e superficial

O ciclo hidrológico é um processo natural de constante circulação da água no meio ambiente, tendo como principais variáveis deste ciclo: E: evaporação (mm/d); q: umidade específica do ar (gramas de vapor d'água por quilo de ar, ou g/kg); precipitação (mm); i: intensidade de chuva (mm/h); Q: deflúvio superficial ou vazão (m<sup>3</sup>/s); f: taxa de infiltração (mm/h); ET: evapotranspiração (mm/d).

Mccuen (1995) adota a precipitação como o início do ciclo, embora não exista um ponto inicial e um ponto final para o ciclo hidrológico. Partindo deste referencial, a água da chuva pode entrar diretamente em um corpo de água, migrar como escoamento superficial, infiltrar imediatamente no solo ou ficar armazenada em depressões na superfície e posteriormente infiltrar no solo ou evaporar. Parte significativa da água de chuva escoam superficialmente e é canalizada em canais superficiais que alimentarão os rios, mares e oceanos. A água que infiltra pode percolar até o nível de água ou permanecer na zona não saturada até que retorne ao fluxo subsuperficial. A água armazenada em lagos, mares e oceanos pode voltar à atmosfera pela evaporação, completando o ciclo hidrológico. As raízes das plantas também absorvem a água que através da evapotranspiração volta à atmosfera (Figura 1).

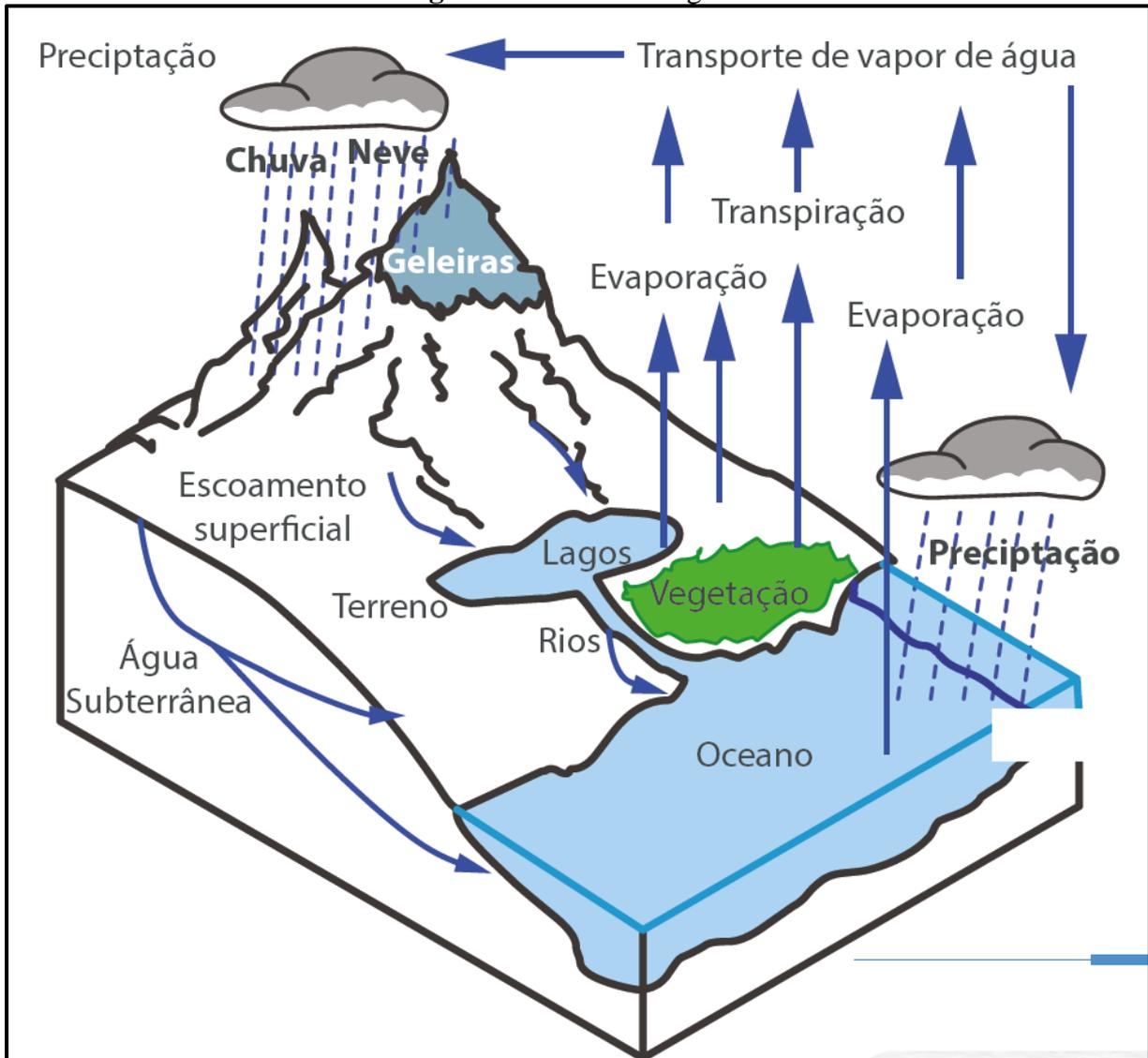
Portanto, qualquer definição dentro do ciclo hidrológico pode ser descrita a partir da equação hidrológica:

**Equação 1.** Equação hidrológica.

$$I - O = \Delta S$$

Na qual, I é o fluxo de entrada da água através da precipitação; O é o fluxo de saída da água através da evapotranspiração, escoamento superficial e subsuperficial; e  $\Delta S$  a variação no armazenamento nas várias formas de retenção, no volume de controle, ou seja, na bacia hidrográfica.

**Figura 1.** Ciclo hidrológico.



Fonte – MMA, 2018.

Entretanto, Villela e Mattos (1975) enfatizam que apesar de que possa parecer um mecanismo contínuo, com a água se movendo de uma forma permanente e com uma taxa constante, o movimento do ciclo hidrológico pode ser feito de maneira aleatória em cada uma das fases, variando tanto no espaço quanto no tempo. Estas variações podem provocar danos socioeconômicos à população, através de secas e enchentes inesperadas.

Atualmente, a demanda mundial por água é estimada, em torno de 4.600 km<sup>3</sup>/ano, e calcula-se que esta irá aumentar de 20% a 30%, atingindo um volume entre 5.500 e 6.000 km<sup>3</sup>/ano até 2050 (BUREK *et al.*, 2016). O uso da água no mundo aumentou em seis vezes ao longo dos últimos 100 anos (WADA *et al.*, 2016) e continua crescendo de forma constante, com uma taxa em torno de 1% ao ano (AQUASTAT, n.d.). Aproximadamente 65% da água

que cai sobre a superfície terrestre é armazenada ou evapora a partir do solo e das plantas (OKI e KANAE, 2006). Da água que permanece no solo, mais de 95% é armazenada na zona de aeração (ou vadosa, de baixa profundidade) e na zona saturada (lençol freático) do solo, excluindo a água que é retida nas geleiras (BOCKHEIM e GENNADIYEV, 2010) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Estimativa dos recursos hídricos da Terra.

<b>Item</b>	<b>Área (10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>)</b>	<b>Volume (km<sup>3</sup>)</b>	<b>Água total (%)</b>	<b>Água fresca</b>
<b>Oceanos</b>	361,30	1338000000,00	96,50	_____
<b>Água subterrânea</b>	_____	_____	_____	_____
<b>-Fresca</b>	134,80	10513000,00	0,76	30,01
<b>-Salina</b>	134,80	12870000,00	0,93	_____
<b>Umidade do solo</b>	82,00	16500,00	0,0012	0,05
<b>Gelo Polar</b>	16,00	24023500,00	1,70	68,60
<b>Outro gelo e neve</b>	0,30	340600,00	0,025	1,00
<b>-Lagos</b>	_____	_____	_____	0,26
<b>-Doce</b>	1,20	91000,00	0,007	_____
<b>- Salgado</b>	0,80	85400,00	0,006	_____
<b>Pântanos</b>	2,70	11470,00	0,0008	0,03
<b>Rios</b>	148,80	2120,00	0,0002	0,006
<b>Água biológica</b>	510,00	1120,00	0,0001	0,003
<b>Água atmosférica</b>	510,00	12900,00	0,001	0,04
<b>Água total</b>	510,00	1385984610,00	100,00	_____
<b>Água fresca</b>	148,80	35029210,00	2,50	100,00

**Fonte:** UNESCO, 2018.

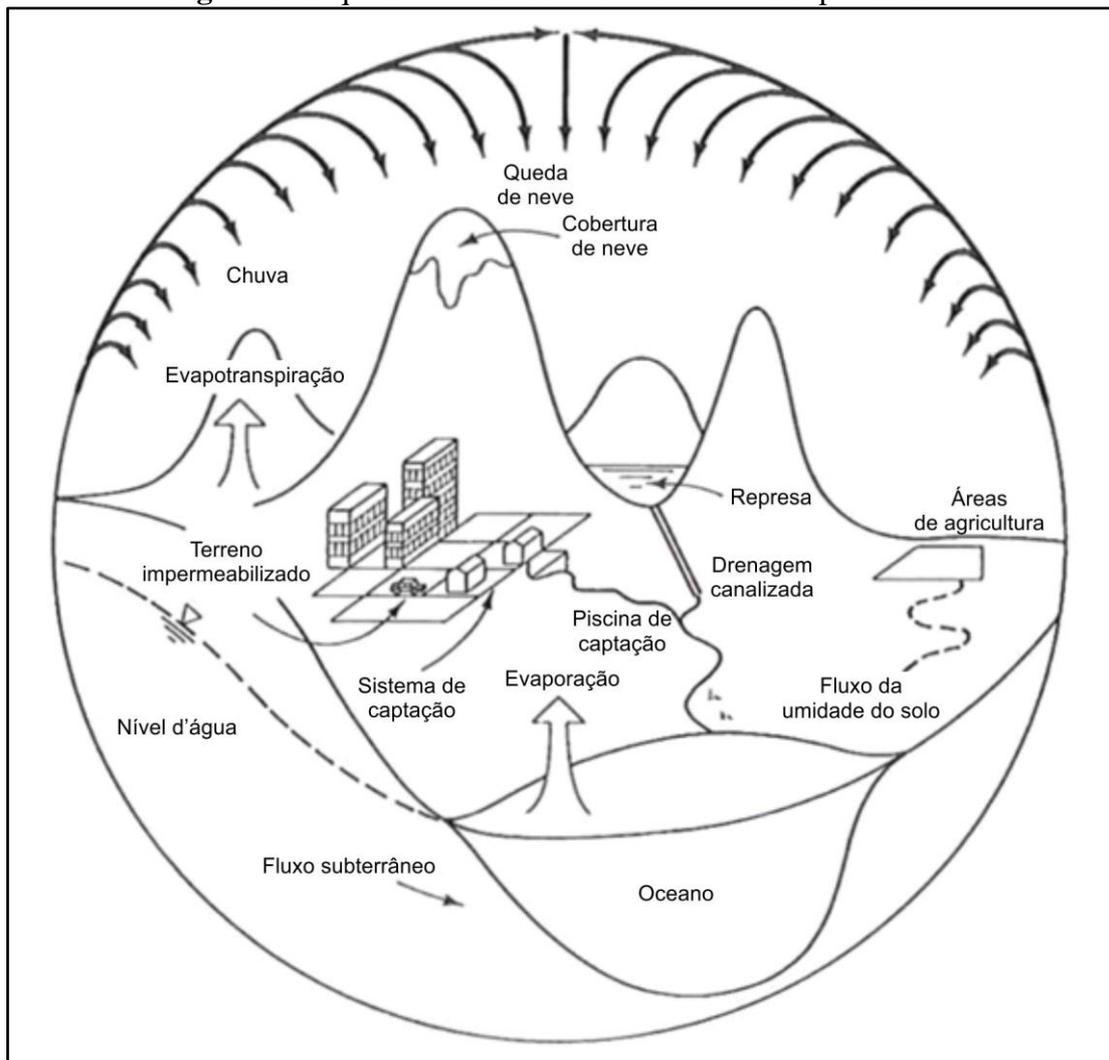
O homem tem acelerado as alterações no meio físico, afetando as características hidrológicas existentes. O desmatamento para agricultura, por exemplo, altera a taxa de infiltração e, conseqüentemente, o escoamento superficial, causando uma perda maior de solo.

Nestes últimos dois séculos a urbanização tem causado significativas alterações no ambiente. Além da retirada da vegetação, também é comum a impermeabilização das superfícies reduzindo o potencial de infiltração e conseqüentemente a recarga dos aquíferos, propiciando também que a água se acumule na superfície ocasionando enchentes com maior frequência. A nova superfície imposta pela urbanização favorece um aumento na velocidade do

fluxo superficial, aumentando o potencial erosivo do escoamento superficial. Algumas alterações antrópicas no meio ambiente são ilustradas esquematicamente na Figura 2.

As variáveis do ciclo hidrológico, tanto as que fazem parte do fluxo de entrada como de saída, podem ser estudadas separadamente ou em conjunto, visando um melhor conhecimento do ciclo; geração de dados necessários para os projetos e obras hidráulicas; fornecimento de subsídios ao planejamento e gerenciamento racional de recursos hídricos; e estudos sobre previsão (CHOW *et al.*, 1994).

**Figura 2.** Esquema de um ambiente alterado antropicamente.



**Fonte:** Modificado Mccuen (1995).

A precipitação, infiltração e evapotranspiração são as principais variáveis estudadas e monitoradas nos estudos de recarga de aquíferos, porém alguns métodos utilizados desprezam algumas destas variáveis. As águas superficiais, por interagirem com as águas subterrâneas,

também podem ser estudadas e monitoradas para a aplicação de alguns métodos de recarga. (COELHO, 2011).

A Agência Nacional de Águas (ANA), descreve águas subterrâneas como sendo o excedente de águas de chuvas que percorre camadas da superfície do solo e preenche todos os vazios de um estrato geológico, ou seja, é a ciência da ocorrência, distribuição e movimento da água abaixo da superfície da Terra.

Quando explorada, dispõe-se para o abastecimento humano, para a irrigação e indústria. Na utilização deste recurso para atividades humanas, observa-se que, em muitas regiões do mundo, ele assume um papel importantíssimo não apenas com relação ao abastecimento humano, mas também, no desenvolvimento econômico das regiões e áreas onde se encontram. Além destes três fatores que devem ser levados em conta, há também, a necessidade de se entender sua importância no ciclo hidrológico. Para tanto, Albuquerque (2007) é bastante enfático em dizer que as águas subterrâneas estão interligadas às águas superficiais.

“É preciso ter a consciência de que água subterrânea é um segmento do ciclo hidrológico, intimamente relacionadas com as águas fluviais. A exploração de um segmento tem reflexos imediatos na exploração do outro. Sem o conhecimento desta relação quantitativa, a gestão de recursos hídricos ficará seriamente comprometida, resultando em problemas futuros” (ALBUQUERQUE, 2007, p. 37).

## **2.2 Precipitação**

Segundo Barreto (2006), a precipitação é entendida como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. As precipitações representam o elo entre os fenômenos meteorológicos, propriamente ditos, e os escoamentos superficiais e subterrâneos.

A precipitação, ao contrário das outras variáveis meteorológicas, é um fenômeno descontínuo, que varia no espaço e no tempo. Para que a precipitação ocorra é necessário que haja ascensão de uma massa de ar na atmosfera, para que ela esfrie e alguns dos seus conteúdos úmidos condensem e caiam sobre a superfície terrestre (VILLELA e MATTOS, 1975; CHOW *et al.*, 1994).

De acordo com Tucci (2007), a precipitação é toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre, em suas diferentes formas, como, neblina, chuva,

granizo, orvalho, geada e neve. Entretanto, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia, devido a sua capacidade de produzir o escoamento. Da parcela de precipitação que atinge o solo, parte pode se transformar em escoamento superficial, parte é armazenada em depressões, e parte se infiltra no solo. Tudo vai depender de condições variáveis, como a quantidade de umidade já existente, das características do solo e da sua cobertura. Parte da água que infiltra alimenta os reservatórios subterrâneos que irão escoar e atingir rios e oceanos.

Existem várias possibilidades de medir a precipitação. A mais comum é a utilização de pluviômetros ou pluviógrafos. Também podem ser feitas medidas de precipitação através de radares meteorológicos ou imagens de satélite, mas erros associados a esses métodos, quando se deseja a quantificação exata, ainda são relativamente grandes (SANTOS *et al.*, 2001). A precipitação é medida como a altura da lâmina d'água que seria acumulada em superfície plana se nenhuma perda ocorresse (PAIVA e PAIVA, 2003).

### **2.3 Infiltração**

A infiltração é o processo em que a água penetra ou é absorvida nas camadas superficiais do solo, através das forças gravitacionais e capilares (HORTON, 1933). O movimento da água no solo desempenha um papel fundamental no escoamento superficial, recarga dos aquíferos, evapotranspiração, erosão do solo e transporte de íons e substâncias dissolvidas (RAWLS *et al.*, 1993). O conhecimento do processo de infiltração é de fundamental importância para o manejo e conservação do solo e da água, por ser determinante da ocorrência do escoamento superficial, responsável por processos indesejáveis, como a erosão e as inundações (BRANDÃO *et al.*, 2006).

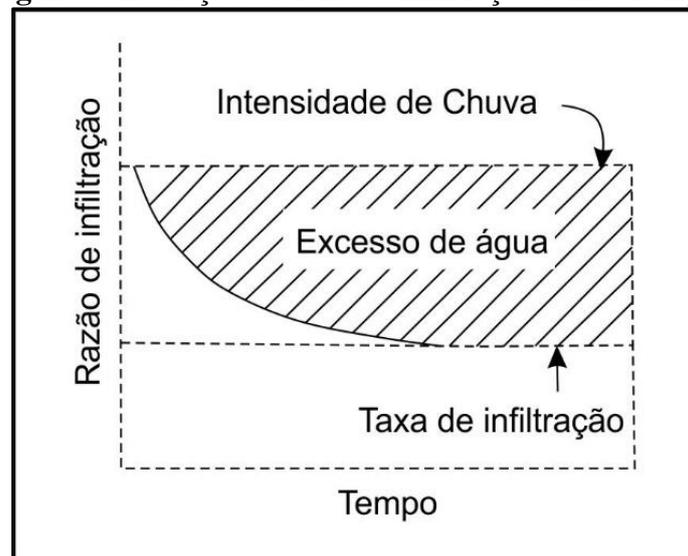
A infiltração pode apresentar significativa variação espacial e temporal em consequência das variações climáticas, de uso de solo, irrigação e heterogeneidades hidrogeológicas (SHARMA, 1989). Dunn e Mackay (1995) avaliaram a influência das alterações no uso do solo em grandes bacias hidrográficas (aplicando para a Bacia de Tyne, a nordeste da Inglaterra) e constataram que as variações podem ser significativas.

O valor da infiltração depende da ocorrência, intensidade e duração da precipitação, temperatura, umidade, velocidade do vento, características e espessura do solo (ou rocha acima do nível d'água), superfície topográfica, vegetação e uso do solo (MEMON, 1995).

Horton (1933) definiu o conceito de capacidade de infiltração como sendo a taxa máxima em que a chuva pode ser absorvida por um dado tipo de solo em uma determinada condição. Ele admitiu a hipótese de que a capacidade de infiltração seria exponencialmente decrescente com o tempo, de um valor máximo inicial até uma taxa constante.

De acordo com Coelho (2008), a taxa real também diminui exponencialmente com o tempo, à medida que o solo se torna saturado. O volume infiltrado é controlado pela intensidade e duração da precipitação (entrada de água), propriedades físicas do solo, declividade, vegetação e rugosidade da superfície. Geralmente a taxa de infiltração no início do processo é alta, decaindo rapidamente e tendendo, com o tempo, a um valor constante (Figura 3).

**Figura 3.** Evolução da Taxa de Infiltração com o Tempo.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

Parlange *et al.* (1985); Tucci (2007), citam que a variação da taxa de infiltração com o tempo pode ser influenciada pelas características das camadas superficiais do solo ou pela sequência de camadas. Se a quantidade de água (tanto resultado de precipitação como de processos antrópicos como de irrigação) for menor que a capacidade de infiltração do solo, todo volume irá infiltrar, no entanto, quando a quantidade de água disponível for maior que a capacidade de infiltração do solo, o excesso de água poderá se acumular na superfície do solo ou transformar-se em escoamento superficial.

Outro fator importante ligado à infiltração, diz respeito às chuvas, pois dependendo da intensidade, pode gerar escoamento superficial quando a capacidade de infiltração é excedida (GUERRA, 1994). Em outras palavras, a água que cai rapidamente na superfície do terreno

tende a infiltrar com uma certa velocidade, que não favorece a troca gradual de ar existentes nos poros do terreno pela água que tenta infiltrar.

Nesse processo, a água da chuva não consegue infiltrar-se devido à pressão causada pelo ar que tenta sair, com o acúmulo da água não infiltrada na superfície pode-se formar o fluxo superficial (VIEIRA, 1998). Desta forma, percebe-se que o solo possui uma capacidade limite de absorção de água, ou seja, nem toda água da chuva consegue penetrar no solo. No entanto, enquanto a intensidade da precipitação é menor que a capacidade de infiltração calculada, toda chuva infiltra (SILVEIRA *et al.*, 1993). Molinari e Vieira (2004) entendem que capacidade ou taxa de infiltração é o índice volumétrico de quanto o solo pode receber umidade entre seus poros num determinado tempo.

Silveira *et al.* (1993) conceitua a aplicação ao estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície, em termos de lâmina d'água por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo. Esta taxa depende de alguns fatores controladores, tais como: cobertura vegetal e de teor de matéria orgânica sobre o solo, características físicas do solo, estado da superfície, etc. que serão discutidos posteriormente no capítulo 2.4.

Para se conhecer o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica sob sua condição original (vegetação nativa) ou após intervenção antrópica, deve ser realizada uma análise do processo precipitação-vazão. Esta é feita pelo estabelecimento de relações quantitativas entre os processos hidrológicos no ciclo hidrológico. Ela deve ser realizada através de monitoramento e modelagem numérica, simultaneamente.

As séries temporais de vazão são o resultado da integração dos componentes do ciclo hidrológico e, conseqüentemente, das influências naturais e antrópicas numa determinada região, tendo fundamental importância como subsídio para as tomadas de decisão em relação à racionalização do uso da água e à conservação desse recurso (MORTATTI *et al.*, 2003).

Tal planejamento requer uma visão ampla sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e o conhecimento sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados.

Para EPA (1998) o processo de movimento da água é dinâmico, com alterações significativas em função do tempo e do espaço. O EPA (1998) divide o perfil de infiltração em cinco zonas, apresentado na Figura 4 (esquema considera um perfil homogêneo).

As principais características hidrológicas destes pacotes são:

1) Zona Saturada: Os espaços entre os poros são preenchidos por água. Dependente do intervalo de tempo em que ocorre a infiltração esta porção do perfil pode se estender de poucos milímetros a poucos centímetros;

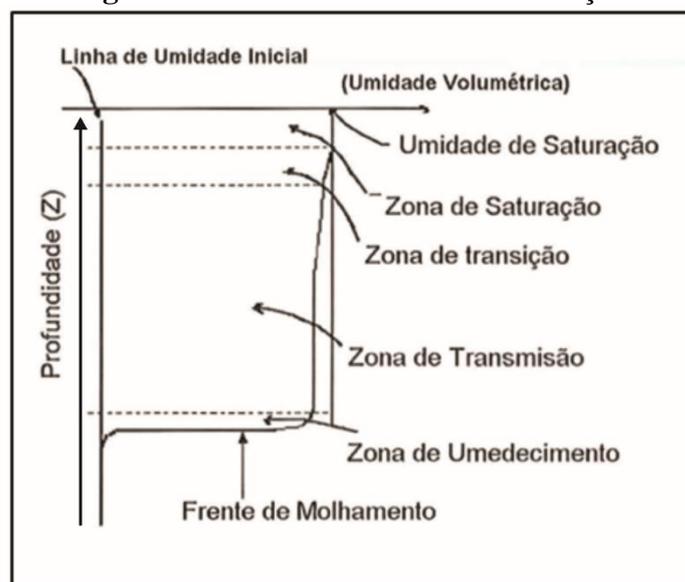
2) Zona de transição: Esta zona é caracterizada pelo rápido declínio da umidade em profundidade, sua extensão é geralmente de poucos centímetros.

3) Zona de Transmissão: Caracterizada pela pequena variação em profundidade da umidade. A variação do valor de umidade é função principalmente da força gravitacional.

4) Zona de Umedecimento: É caracterizada pela rápida diminuição da umidade em profundidade.

5) Frente de Molhamento: Limite entre o solo seco e o úmido.

**Figura 4.** Zonas do Processo de infiltração.



**Fonte:** Adaptado de Hillel (1982).

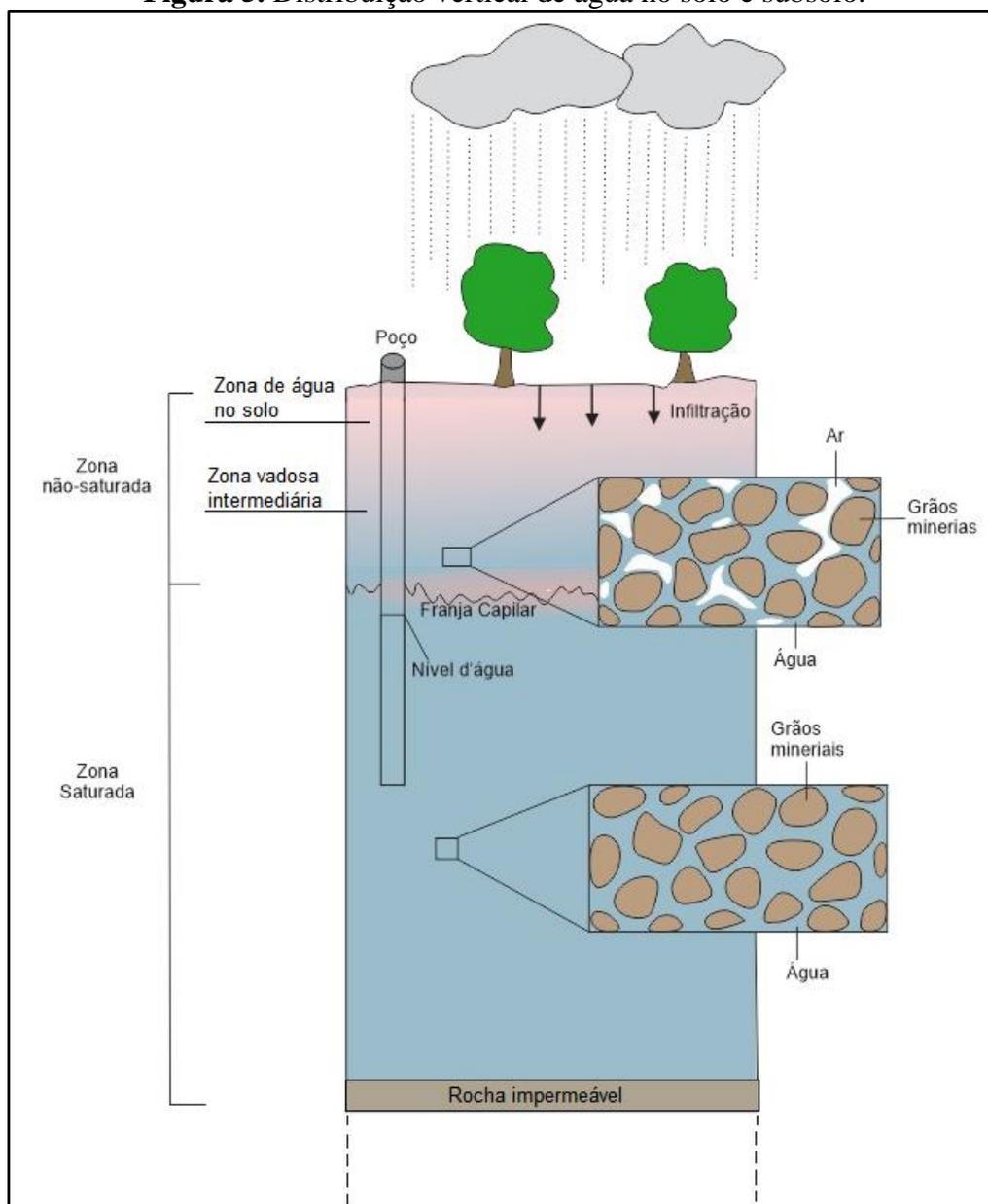
O movimento de infiltração da água está relacionado com as condições de umidade do perfil do solo. De acordo com essas condições, o movimento de infiltração da água pode ser dividido em duas zonas, denominadas de não-saturada e saturada. A zona não-saturada, também denominada de zona de aeração e, consiste de interstícios ocupados parcialmente por água e ar. Na zona saturada, todos os interstícios são preenchidos com água sob pressão hidrostática. Todd e Mays (2005) descrevem detalhadamente a distribuição vertical da água subterrânea, como mostra a Figura 5.

A zona não-saturada é ocupada por água vadosa, sendo geralmente subdividida em zona de água no solo, zona vadosa ou intermediária e, zona capilar. A zona de água no solo fica

situada entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno. Sua espessura varia de acordo com a cobertura vegetal, e a água contida nela é mantida por forças de tensão superficial, muitas vezes referida como água capilar.

A zona vadosa intermediária se estende desde a borda inferior da zona de água no solo até o limite superior da zona capilar. Sua espessura é bastante variável, podendo muitas vezes se fundir com um lençol freático, quando este for alto. Quando há excesso temporário de água vadosa esta pode migrar verticalmente por forças gravitacionais. A zona capilar se estende da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água. Sua espessura depende da distribuição de tamanho dos poros e da homogeneidade do terreno.

**Figura 5.** Distribuição vertical de água no solo e subsolo.



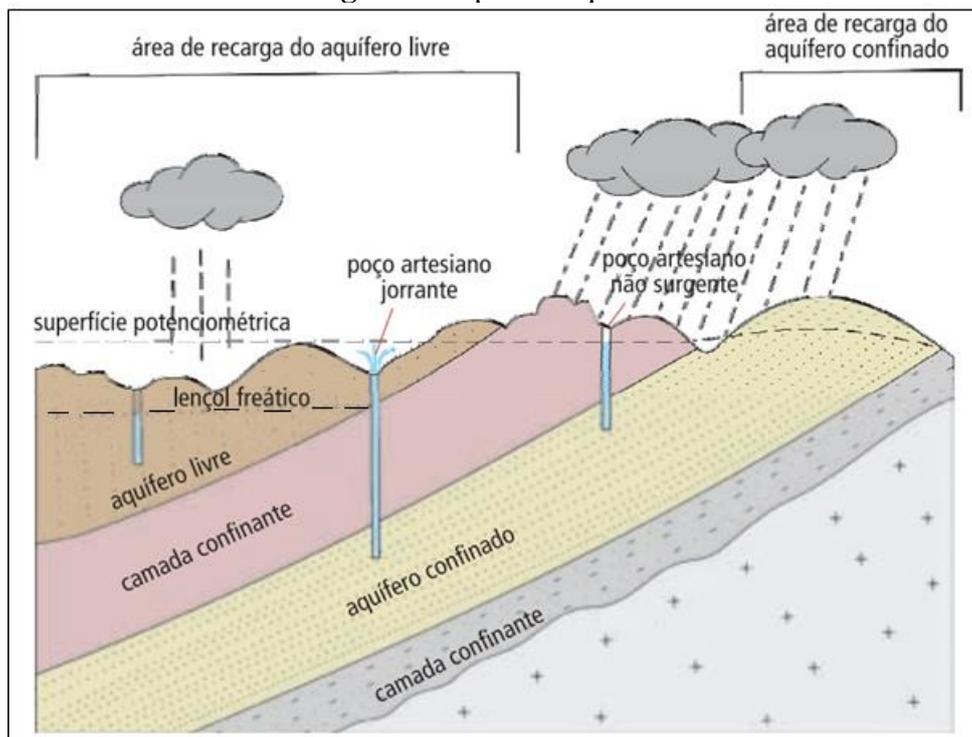
**Fonte.** Elaborado pela autora.

As partes inferiores desta zona se encontram praticamente saturadas, já nas partes superior apenas os menores poros estão preenchidos com água, fazendo com que o seu limite superior seja irregular. Como na zona saturada a água subterrânea preenche todos os interstícios, a porosidade efetiva fornece uma medida direta da água contida por unidade de volume, por isso, parte desta água pode ser removida da subsuperfície por drenagem ou bombeamento em um poço.

As águas subterrâneas na zona saturada formam os aquíferos, definido por Tucci (1993) como sendo “a formação ou grupo de formações geológicas que contêm água e permite que a mesma se movimente em condições naturais e quantidades significativas”. Essa quantidade deve ser suficiente para o aproveitamento econômico (LINSLEY e FRANZINI, 1978). Os aquíferos podem ser classificados como confinados e não confinados, como apresentado na Figura 6.

Os aquíferos não confinados, também denominados de freáticos ou livres, são aqueles cujo limite superior é a superfície de saturação e todos os pontos se encontram à pressão atmosférica. Os confinados ocorrem quando um estrato permeável está confinado entre duas unidades pouco permeáveis ou impermeáveis (LINSLEY e FRANZINI, 1978; TODD e MAYS, 2005; KARMANN, 2008; MANOEL FILHO, 2008).

**Figura 6.** Tipos de aquíferos.



**Fonte.** Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (2014).

## 2.4 Recarga das águas subterrâneas

Conforme visto no subcapítulo anterior, a precipitação, em geral, é o principal fenômeno responsável pela recarga, ela pode penetrar o solo diretamente e percolar para a zona de águas subterrânea. A recarga de aquíferos também pode ocorrer pela infiltração de rios, canais e lagos e por fenômenos induzidos por atividades humanas, como irrigação e a urbanização.

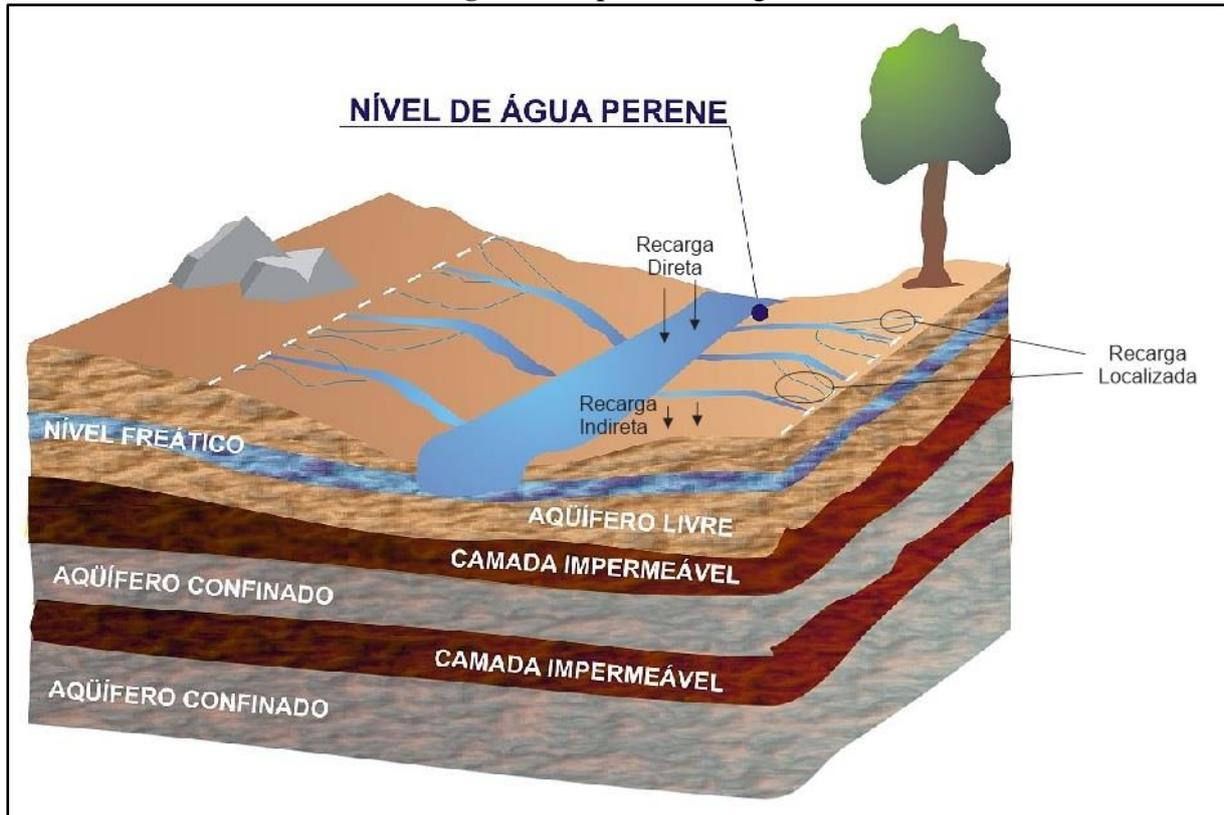
A definição de recarga de águas subterrâneas, a princípio, pode ser confundida com a definição de infiltração. Portanto, a infiltração é a água que percola da superfície para a zona não-saturada. O termo recarga, porém, é definido como uma parcela da infiltração que atinge a zona saturada, sendo responsável pela sua elevação, a recarga subterrânea direta é uma das componentes do ciclo hidrológico de maior dificuldade de quantificação numa área, sendo consequência das variabilidades temporal e espacial das chuvas e das características dos materiais geológicos superficiais e profundos, topografia, vegetação e uso do solo, que serão tratadas individualmente nos subcapítulos a seguir. Conceitualmente, Lerner *et al.* (1990) diferencia três tipos de recarga (Figura 7):

- Recarga direta: é aquela que abastece de água o aquífero pela percolação vertical direta que atravessa toda a zona não-saturada, isto é, o processo que acontece abaixo do ponto de impacto da precipitação por movimento vertical através da zona não-saturada. A recarga direta pode ser definida como a parcela da precipitação que vence a zona não-saturada e soma-se à reserva subterrânea. Refere-se à recarga proveniente da precipitação ou irrigação, que ocorre de maneira uniforme em grandes áreas;

- Recarga indireta: corresponde à percolação da água para os aquíferos por meio dos cursos d'água superficiais. Isto deve-se aos processos em que a recarga ocorre por características introduzidas pela urbanização, assim como por rios e depressões de superfícies topográficas (reservatórios, lagos, etc.);

- Recarga localizada: uma forma intermediária de recarga dos aquíferos é resultante de concentrações horizontais de água próximas à superfície na ausência de canais bem definidos. Ela é feita pelo acúmulo de água próximo ao solo, em superfícies planas, com ausência de canais bem definidos (Figura 7), é um processo pontual de recarga, na qual a água move-se em curtas distâncias lateralmente, antes da infiltração.

**Figura 7.** Tipos de recarga.



**Fonte.** Modificado de ABAS, 2004.

#### 2.4.1 RELAÇÃO TEMPORAL

Um dos fatores mais importantes é a diferença entre o tempo da entrada da água na zona saturada e a manifestação desta água como uma fonte de água efetivamente explorável (BALEK, 1988). Isto se deve ao fato de que a água que atinge o aquífero pode ser extraída subsequentemente por evapotranspiração (DE VRIES e SIMMERS, 2002).

Fetter (2001) afirma que o tempo de movimentação da água infiltrante é função da espessura da zona não-saturada e da condutividade hidráulica não-saturada vertical e pode ser desde poucas horas em regiões úmidas, solos muito grossos e nível da água raso até alguns anos em regiões áridas e níveis da água profundos.

A escala temporal é uma condição decisiva na interpretação da recarga da água subterrânea. Dependendo da escala utilizada, pode-se determinar se certo sistema local é considerado como parte da recuperação do reservatório em longo prazo (DE VRIES e SIMMERS, 2002). Os principais tipos de recarga com relação ao tempo são (BALEK, 1988):

- Recarga de curta duração: gerada depois de chuva intensa, principalmente em regiões com períodos secos e úmidos não definidos.

- Recarga Sazonal: ocorre regularmente em períodos de degelo, em regiões temperadas, ou períodos úmidos, em regiões com estações definidas.

- Recarga perene: pode ocorrer em partes úmidas dos Trópicos, onde existe um fluxo descendente quase permanente.

- Recarga histórica: aconteceu há muito tempo e contribuiu para a formação dos recursos de água subterrânea atuais.

Segundo De Vries e Simmers (2002), a recarga pode ser estimada por diversos modos dependendo da resolução temporal requerida. Para o propósito da estimativa da recarga direta, uma das técnicas mais apropriadas, segundo Healy e Cook (2002), é o estudo da variação de nível d'água do aquífero. Para estimar a recarga por este método, é necessário conhecer os valores do rendimento específico. Estes valores são obtidos em ensaios de campo e/ou laboratório. Uma vez obtido um valor confiável para o rendimento específico, a simples multiplicação deste valor pela elevação do nível do aquífero freático no período de interesse é suficiente para obter a altura equivalente de água adicionada à zona saturada.

De acordo com Lerner *et al.* (1990), os métodos existentes para a estimativa da recarga podem ser classificados em quatro tipos básicos, sendo que cada um deles pode ser aplicado nos vários estratos (superfície, zona não saturada e zona saturada): medidas diretas; balanço hídrico; aproximações darcynianas e técnicas com traçadores.

Scanlon *et al.* (2002) consideram as medidas diretas e as aproximações darcynianas como métodos de base física. Além disso, os autores incluem as modelagens numéricas como um dos métodos para a estimativa de recarga. Sendo assim, os métodos podem ser classificados entre: Balanço hídrico; de base física; técnicas com traçadores e modelagens numéricas.

Ressalta-se que qualquer um dos métodos para a estimativa da recarga possui suas potencialidades e limitações. O melhor método dependerá de fatores como o objetivo do estudo e das escalas espacial e temporal (SIMMERS, 1988; SHARMA, 1989; LERNER, *et al.* 1990; ROBINS, 1998).

#### 2.4.1.1 Estimativas de recarga

##### I – Medidas diretas

Dos métodos baseados em medidas diretas destaca-se a observação da variação do nível de água em poços de observação, o uso de lisímetros e, a aplicação de traçadores.

O uso de lisímetros não é um método prático de estimativa de recarga devido ao custo associado à sua construção e o tempo necessário para a sua estabilização. Outro fator negativo é o caráter estritamente localizado dos seus resultados.

De acordo com Eilers (2004), atualmente, muitos trabalhos têm sido publicados apresentando o uso de traçadores para a estimativa indireta de recarga. Esta técnica utiliza uma grande variedade de elementos químicos para caracterizar o fluxo de água na zona não saturada. Os chamados traçadores podem ser divididos em: (i) históricos, ou seja, análise de assinaturas decorrentes de um evento particular, por exemplo, testes nucleares; (ii) ambientais, entre eles, cloretos, nitratos, isótopos estáveis; e, (iii) artificiais, que são aplicados diretamente no local investigado, por exemplo, uso de trítio injetado.

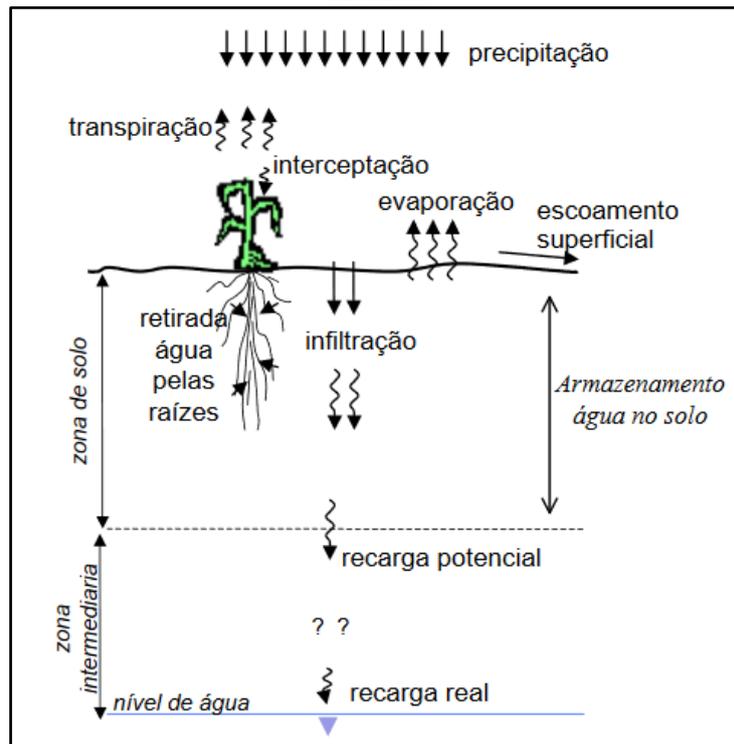
Os problemas associados a estes métodos estão relacionados com as incertezas decorrentes da amostragem e interpretação dos resultados, bem como, pelas inúmeras simplificações conceituais adotadas.

## II – Balanço hídrico

O balanço hídrico é o resultado da aplicação do princípio de conservação de massa, expresso pela equação da continuidade, na qual se considera o balanço dos componentes do ciclo hidrológico em uma área e intervalo de tempo específico (CALIJURI e CUNHA, 2013), que pode ser observado na Figura 8.

Segundo Cavalcanti (2002) as entradas e saídas de água do sistema e as direções de fluxo fazem parte do modelo conceitual. A recarga resulta da precipitação, a partir de corpos d'água superficiais e do tratamento sanitário. Já as saídas de água do sistema referem-se à evapotranspiração, aos corpos d'água superficiais e aos poços de abastecimento. O cálculo do balanço hídrico destina-se à avaliação de aspectos como: comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, impactos de mudanças climáticas, efeitos da mudança de uso do solo e padrões espaciais e temporais de oferta e demanda hídrica. Afirma-se ainda, que o balanço hídrico envolve a quantificação dos componentes do processo de transferência de água através da bacia (TUCCI e BELTRAME, 2004 *apud* CALIJURI e CUNHA, 2013).

**Figura 8.** Representação esquemática dos principais processos hidrológicos em um balanço hídrico.



**Fonte.** Eilers (2004).

### III – Aproximações darcynianas

Por fim, a recarga pode ser estimada utilizando-se métodos numéricos baseados na solução da equação de Darcy, combinado com a equação de conservação de massa. Esta metodologia permite a elaboração de modelos computacionais utilizados para simular o fluxo de água no meio não saturado em diferentes condições físicas. Embora a Lei de Darcy seja aplicável em condições de fluxo não saturado, o valor da condutividade hidráulica  $K$  varia significativamente em função do conteúdo volumétrico e do potencial total. As incertezas na determinação da interação de  $K$  com o conteúdo volumétrico, associado ao grande número de parâmetros exigidos por modelos mais complexos, dificultam a utilização de modelos em condições com pouca disponibilidade de dados.

#### 2.4.2 MATERIAIS GEOLÓGICOS

Os materiais geológicos exercem grande influência na recarga, principalmente nas porções superficiais, como apontado por Balek (1987). Nesta região é que são marcantes os

fenômenos de dinâmica das águas, e a característica destes materiais é que vai determinar a separação entre escoamento superficial e infiltração.

Para a geologia os fatores que são mais relevantes para a análise da interação entre rio e aquífero na dinâmica do fluxo de água subterrânea são (DINGMAN, 2002):

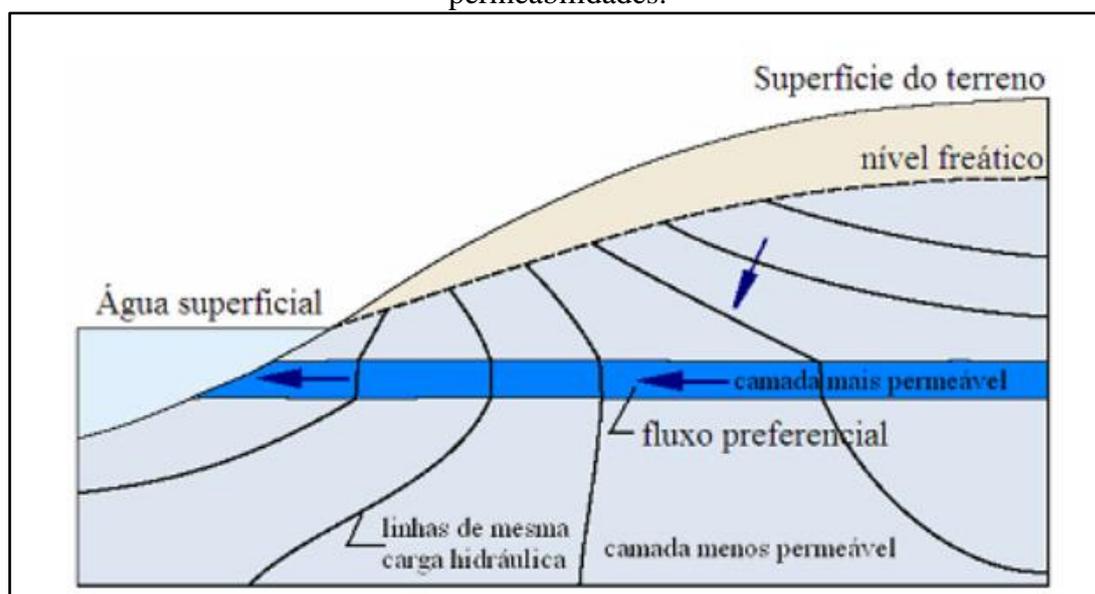
- Estrutura pedológica: relaciona-se com a disposição, os arranjos e a posição relativa das formações.

- Estratigrafia: relações geométricas entre as formações das camadas do solo (tipicamente em camadas);

- Litologia: relaciona-se com a composição mineral, a distribuição granulométrica e a forma das rochas ou grãos do solo, os quais controlam a distribuição da condutividade hidráulica

Esses três fatores estão diretamente relacionados ao modo como se distribuem espacialmente os aquíferos e às principais características do movimento da água subterrânea (FREEZE e CHERRY, 1979). Formações geológicas de diferentes permeabilidades podem afetar sobremaneira a distribuição das infiltrações e exfiltrações; por exemplo, numa camada altamente permeável, confinada entre camadas menos permeáveis, o fluxo de água subterrânea na direção do corpo superficial tende a seguir um caminho preferencial por essa camada, como representado na Figura 9, independentemente da configuração topográfica do terreno.

**Figura 9.** Fluxo preferencial de água subterrânea devido a camadas de diferentes permeabilidades.



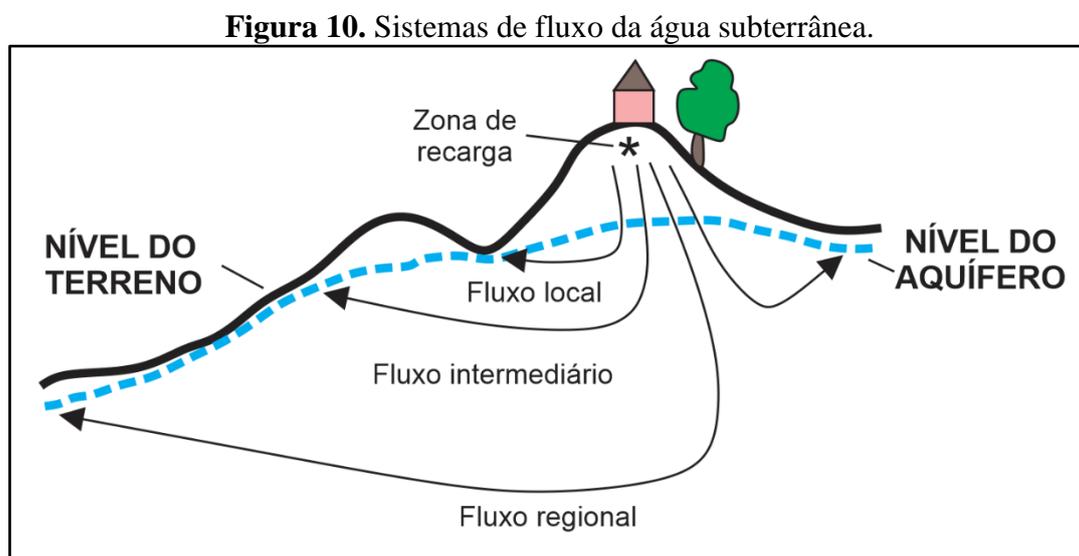
Fonte. Winter, 1998.

### 2.4.3 TOPOGRAFIA

A topografia é também mencionada por Scanlon *et al.* (2002), que afirma que a recarga deve ocorrer em altos topográficos e a descarga em baixos topográficos, em regiões úmidas; enquanto que em regiões áridas a recarga geralmente ocorre em baixos topográficos, como rios efêmeros e canais, que propiciam a acumulação de água e posteriores infiltração, percolação e recarga. Porém, em algumas situações na qual ocorrem significativas elevações do freático e intersecção entre a água superficial e subsuperficial, esse limite de recarga e descarga é variável.

A geologia e a topografia interferem de forma significativa na dinâmica de trocas entre os corpos superficiais e os aquíferos. Geralmente, em um aquífero não-confinado, a linha freática segue forma semelhante à da topografia do terreno, sendo, também, bastante dependente das características geológicas da região. Esses dois mecanismos, por outro lado, determinam apenas a distribuição espacial das zonas de recarga e descarga, e não as taxas em que elas ocorrem, as quais são mais influenciadas pelo clima. Dessa forma, os efeitos da topografia, geologia e clima, tornam-se o principal responsável pela interação entre águas superficiais e subterrâneas (TÓTH, 1970).

Já os efeitos da topografia na relação entre rio e aquífero pode criar um complexo padrão de fluxo da água subterrânea dominante em uma região que, por sua vez, exerce uma influência mútua nas águas superficiais e subterrâneas (FREEZE e CHERRY, 1979). Assim dependendo das características topográficas, os fluxos subterrâneos podem ser classificados em (Figura 10): 1- Sistemas de fluxo local; 2- Sistemas de fluxo intermediário; e 3 - Sistemas de fluxo regional.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

Assim os sistemas de fluxos locais respondem mais rapidamente ao movimento da água subterrânea, sendo as zonas de recarga e descarga bastante próximas (cerca de alguns quilômetros uma da outra). Os fluxos intermediários apresentam características entre as dos fluxos locais e dos fluxos regionais, estando as zonas de descarga entre 5 e 10 quilômetros dos locais de recarga. Por fim, Os sistemas de fluxos regionais ocorrem em zonas com maior capacidade de armazenamento e permeabilidade do que os fluxos locais, sendo as áreas de descarga muito distantes (50 quilômetros ou mais) das de recarga, respondendo, por isso, mais lentamente ao movimento da água subterrânea (SOPHOCLEOUS, 2002).

Segundo Winter (1998) os sistemas de fluxos locais são mais dinâmicos, portanto, têm uma maior ligação com os corpos superficiais. Entretanto, por serem de resposta mais rápida, sua contribuição, em termos de volume e ao longo do tempo, pode ser menos significativa que a contribuição dos sistemas de fluxos intermediários ou regionais.

#### 2.4.4 VEGETAÇÃO E USO DO SOLO

A vegetação também cumpre papel importante na recarga, uma vez que a atividade das raízes é variável em função das necessidades biológicas de cada espécie. Neste sentido, a vegetação influi diretamente no processo da evapotranspiração, alterando conseqüentemente os volumes de recarga. Diversos trabalhos apontam esta tendência, como o de Allison *et al.* (1990) em que verificou que a troca de eucaliptos por árvores de raízes curtas praticamente dobrou a recarga numa região da Austrália.

O estudo desenvolvido por Mendonça *et al.* (2009) mostrou que áreas com vegetação natural preservada ou com vegetação em recuperação apresentam uma maior capacidade de infiltração maior do que áreas com vegetação antropizada (cultivos agrícolas, áreas desmatadas, áreas com solo exposto, pastagens, entre outros). Segundo o autor a presença de árvores aumenta a quantidade de matéria orgânica nos solos, o que contribui com a manutenção da umidade dos mesmos e aumento da capacidade de absorção e infiltração de água.

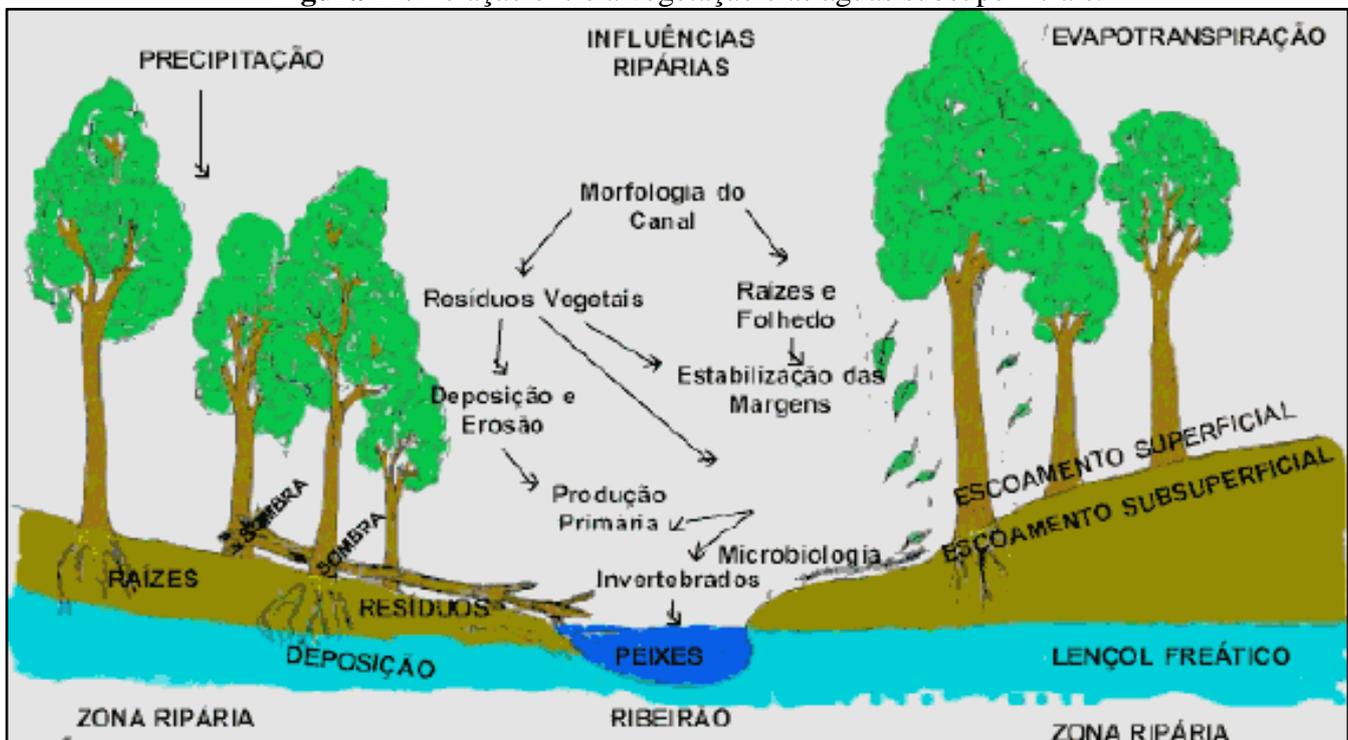
É importante ressaltar que qualquer alteração no padrão natural de uma área de recarga pode influenciar negativamente na recarga de aquíferos, como identificado no estudo de Adane e Gates (2014). Tais autores mostraram que em uma área de recarga de aquífero em Nebraska Sand Hills (localizada na porção central dos Estados Unidos) quando a pastagem natural

existente na área foi substituída por florestas plantadas compostas basicamente por coníferas a taxa de recarga do aquífero diminuiu substancialmente.

Outro estudo, desenvolvido por Souza (2014), identificou áreas favoráveis à recarga da água na APA Botucatu através da Análise Multicritério. Ao se tratar do uso e ocupação do solo, o autor afirma que os usos mais favoráveis à recarga de águas subterrâneas são aqueles relacionados à vegetação natural do local, bem como à vegetação de restauração. O autor afirma ainda que usos do solo relacionados ao cultivo de espécies exóticas (plantações de pinus e eucalipto, por exemplo) influenciam negativamente na recarga da água, devido às altas taxas de evapotranspiração dessas espécies

Sendo assim, a presença de florestas exóticas em áreas de recarga pode comprometer o abastecimento do aquífero, enquanto florestas naturais podem contribuir com esse processo. Mendonça *et al.* (2009) sustenta uma ideia complementar à apresentada por Souza (2014), afirmando que a infiltração de água em áreas desmatadas é comprometida, por conta da perda de umidade do solo e da perda da sua estrutura, reduzindo, assim, a recarga de aquíferos. A Figura 11 evidencia toda essa discussão em relação a influência da vegetação em relação aos recursos hídricos.

**Figura 11.** Relação entre a vegetação e as águas subsuperficiais.



**Fonte.** Adaptado de Lima (2008)

## 2.4.5 PERFIL DE ALTERAÇÃO

Para a classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração da rocha é importante definir quais os critérios de campo adotados para a identificação dos horizontes do perfil de intemperismo e tipos de solos transportados. Para tal, é importante saber quais as principais classificações genéticas de solos existentes na literatura (Tabela 2).

Os trabalhos de Deere e Patton (1971), De Mello (1972), Wolle *et al* (1985) e Pastore (1992) visam o mapeamento dos estágios de alteração da matriz no interior do maciço rochoso, quanto a atuação do intemperismo físico e químico. PASTORE (1995) propõe as principais características para a descrição de um perfil de alteração (Tabela 3).

As classificações de Deere e Patton (1971), Wolle *et al.* (1985) e Pastore (1992) talvez sejam as que melhor se apliquem, ou melhor, serviram de base para uma classificação adaptada às condições da área (Figura 12).

**Figura 12.** Classificação adaptada para o perfil de alteração.

<b>MATERIAL</b>	TRANSPORTADO																			
	<table><tr><td style="text-align: center;">RESIDUAL</td><td rowspan="5" style="font-size: 4em; vertical-align: middle;">{</td><td>• Orgânico</td></tr><tr><td></td><td>• Laterítico</td></tr><tr><td></td><td>• Saprolítico, com estruturas da rocha matriz</td></tr><tr><td></td><td>• Saprolito, Intervalo de transição solo/rocha</td></tr><tr><td></td><td>• Rocha {</td></tr><tr><td></td><td></td><td>- Muito alterada</td></tr><tr><td></td><td></td><td>- Alterada</td></tr><tr><td></td><td></td><td>- Sã</td></tr></table>	RESIDUAL	{	• Orgânico		• Laterítico		• Saprolítico, com estruturas da rocha matriz		• Saprolito, Intervalo de transição solo/rocha		• Rocha {			- Muito alterada			- Alterada		
RESIDUAL	{	• Orgânico																		
		• Laterítico																		
		• Saprolítico, com estruturas da rocha matriz																		
		• Saprolito, Intervalo de transição solo/rocha																		
		• Rocha {																		
		- Muito alterada																		
		- Alterada																		
		- Sã																		

A importância do perfil de alteração está no fato de que sua análise e entendimento não somente viabilizou a caracterização dos materiais inconsolidados e dos horizontes de alteração de rocha, como também permitiu a avaliação deles em relação à dinâmica superficial. Além do que, seu bom entendimento é útil na definição de pontos-chaves para a execução de amostragens deformadas e/ou indeformadas de materiais de solo e realização de ensaios *in situ*.

**Tabela 2.** Principais classificações genéticas dos solos.

AUTORES	CLASSIFICAÇÃO DOS HORIZONTES DE SOLO	OBSERVAÇÃO	ANO
VARGAS	- Solo residual maduro argiloso e poroso - Solo residual jovem, silto-arenoso c/ estruturas reliquiarias - Rocha alterada, cuja remoção abrigava a ao uso de explosivos	Classificação genética de solos tropicais	1953
VAZ	- Solo: superficial, homogêneo e isotrópico - Solo de alteração heterogêneo e anisotrópico - Rocha alterada mole, escavável à picareta - Rocha alterada dura e sã, escavável somente com explosivos	Baseada em Perfil de intemperismo	1969
DEERE & PATTON	Horizonte I de solo residual: - Solo orgânico (IA) - Solo laterítico (IB) - Saprolito, c/ estruturas reliquiarias da rocha matriz (IC) Horizonte II de rocha alterada: - Rocha alterada, c/ transição e presença de matacões (IIA) - Rocha alterada (IIB) Horizonte III de rocha sã	Voltada aos perfis de intemperismo em regiões de clima tropical	1971
DE MELLO	- Horizonte de solo maduro, residual ou coluvial - Horizonte de solo saprolítico, c/ estruturas reliquiarias e comportamento intermediário - Horizonte de rocha decomposta	Classificação pragmática	1972
VARGAS	- Horizonte I, de solo residual maduro - Horizonte II, de solo com vestígios das estruturas reliquiarias - Horizonte III, de solo com estruturas e matacões (saprolito) - Horizonte IV, de rocha alterada com zonas decompostas - Horizonte V, de rocha sã	Baseada em perfis de intemperismo	1974
NOGAMI	- Solo superficial, produzido por processos pedogênicos - Solo saprolítico, com estruturas da rocha matriz - Solo transportado, com aluviões e sedimentos neocenozóicos	Classificação restrita a solos	1978
VARGAS	- Solo residual, derivado do intemperismo intenso e profundo da rocha subjacente. Admite-se um horizonte inferior com estruturas reliquiarias da rocha matriz (saprolito) - Solos superficiais, derivados da evolução pedogenético de solos residuais e transportados	Baseada em propriedades e comportamento dos solos.	1985
WOLLE <i>et al.</i>	- Solo superficial, pode ser residual, coluvionar ou sedimentar - Solo residual maduro - Solo residual jovem ou solo saprolítico, c/ estruturas da rocha matriz - Saprolito, zona de transição entre solo e rocha, com matacões - Rocha alterada ou decomposta - Rocha fresca		1985
PASTORE	- Solo: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laterítico, predominando os processos pedológicos</li> <li>• Solo saprolítico, c/ estruturas reliquiarias da rocha</li> </ul> - Saprolito, com transição solo / rocha - Rocha: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Muito alterada</li> <li>• Alterada</li> <li>• Sã</li> </ul>	Perfis de intemperismo	1992

**Fonte.** Vaz (1996).

**Tabela 3.** Principais características do perfil de alteração.

PERFIL DE ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS
HORIZONTE DE SOLO ORGÂNICO (I)	a) pequena espessura; b) composto por areias, siltes e matéria orgânica; c) horizonte a pedológico
HORIZONTE LATERÍTICO (II)	a) solo residual ou transportado; b) composição e espessura variáveis (depende da rocha e da posição no relevo); c) horizonte b pedológico; d) formação de agregados instáveis; e) estruturas porosas; f) coloração avermelhada e amarelada.
HORIZONTE DE SOLO SAPROLÍTICO (III)	a) solo residual; b) estrutura reliquiar da rocha de origem contendo até 10 % de blocos de rocha; c) espessura e composição variáveis; d) minerais frequentes, caulinita, quartzo e mica; e) coloração branca, creme, roxa e amarela clara.
HORIZONTE SAPROLÍTICO OU SAPROLITO (IV)	a) transição entre o maciço rochoso e o maciço de solo; b) blocos ou camadas de rocha em variados estágios de alteração envolvidos por solo saprolítico; c) dimensões variáveis; d) elevada permeabilidade; e) difícil escavação; f) 10 a 90% de blocos de rochas
HORIZONTE DE ROCHA MUITO ALTERADA (V)	a) topo do maciço rochoso; b) minerais sem brilho; c) resistência reduzida quando comparado a rocha sã; d) a alteração da rocha é mais intensa ao longo das juntas e fraturas da rocha
HORIZONTE DE ROCHA ALTERADA (VI)	a) rocha com presença de minerais descoloridos, isto ocorre mais ao longo das juntas e fraturas do maciço; b) resistência maior do que o horizonte v
HORIZONTE DE ROCHA SÃ (VII)	a) rocha sã; b) minerais apresentam-se com brilho, sem sinais evidentes de alteração

**Fonte.** Pastore (1995).

#### 2.4.6 MACRO E MICROPOROSIDADE DO SOLO

Silva & Kay (1997) definem que o espaço do solo não ocupado por sólidos e ocupado pela água e ar compõem o espaço poroso, definido como sendo a proporção entre o volume de poros e o volume total de um solo. É inversamente proporcional à  $D_s$  e de grande importância direta para o crescimento de raízes e movimento de ar, água e solutos no solo. A textura e a estrutura dos solos explicam em grande parte o tipo, tamanho, quantidade e continuidade dos poros.

Os tipos de poros estão associados à sua forma, que por sua vez tem relação direta com sua origem. O tipo de poros mais característico são os de origem biológica, que são

arredondados e formados por morte e decomposição de raízes ou como resultado da atividade de animais ou insetos do solo, como minhocas, térmitas, etc... Outro tipo de poros apresenta forma irregular e de fenda formados por vários processos, tipo umedecimento e secagem, pressão etc. Poros arredondados tendem a ser mais contínuos e de direção predominante normal a superfície, ao contrário das fendas no solo (REINERT E RECHERT, 2006).

A classificação mais usual da porosidade refere-se à sua distribuição de tamanho. A mais usual é a classificação da porosidade em duas classes: micro e macroporosidade. A microporosidade é uma classe de tamanho de poros que, após ser saturada em água, a retém contra a gravidade. Os macroporos, ao contrário, após serem saturados em água não a retém, ou são esvaziados pela ação da gravidade. A funcionalidade desses poros fica evidente quando se considera que os microporos são os responsáveis pela retenção e armazenamento da água no solo e os macroporos responsáveis pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água no solo.

A separação da porosidade total em micro e macroporos é feita em laboratório, drenando-se a água dos macroporos usando uma sucção leve (-6kPa) em mesa de tensão ou coluna de areia e medindo-se o volume de água que permanece na amostra, que é igual ao volume de microporos. Conhecendo-se a  $P_t$ , calcula-se a macroporosidade por diferença.

Usando-se equação fundamental da capilaridade, o tamanho equivalente de poro à sucção de 6 kPa é de 50  $\mu\text{m}$ , sendo então o tamanho aproximado ao limite entre micro e macroporos.

Em solos arenosos há predominância de macroporos, enquanto em solos argilosos a tendência é predominar microporos. Nesse aspecto, a origem do tamanho de poros relaciona-se ao tamanho de partículas e são considerados de natureza textural ou porosidade textural. Quando as partículas se organizam em agregados, há a criação de poros no solo, geralmente poros grandes entre agregados, sendo considerados porosidade estrutural de acordo com Hamza & Aylmore (1992).

Em solos argilosos bem estruturados como muitos latossolos do Planalto Riograndense temos porosidade textural dentro dos agregados e estrutural entre agregados, e nesses solos a macroporosidade é uma boa indicadora da condição estrutural ou física do solo. A aeração dos solos refere-se à habilidade de um solo atender a demanda respiratório da vida biológica do solo. Para isso, há necessidade de contínua troca de oxigênio e  $\text{CO}_2$  entre a atmosfera e o solo e, para que isso ocorra, é de grande importância a presença de macroporos. Normalmente, considera-se que o espaço aéreo de 10 % de macroporos é suficiente para arejar o solo e satisfazer a demanda respiratório no solo (REINERT E RECHERT, 2006).

## 2.5 Flutuação do nível d'água em aquíferos

Medidas das flutuações do nível d'água em piezômetros ou em poços de observação são recursos importantes em muitos estudos de águas subsuperficiais e subterrâneas. Essas flutuações em aquíferos podem ser resultado de uma grande variedade de fenômenos hidrológicos, naturais ou induzidos pelo homem. Em muitos casos, pode haver mais que um mecanismo simultâneo, e para as medidas serem interpretadas corretamente, é importante conhecer os vários fenômenos.

O Quadro 1 apresenta um resumo destes mecanismos, classificando se eles são naturais ou induzidos pelo homem, se eles produzem flutuações em aquíferos confinados ou freáticos e se eles são de vida curta, a longo prazo, diários ou sazonais. Também se nota que alguns dos mecanismos operam sobre influências climáticas, enquanto outros não. Mudanças na pressão atmosférica podem produzir flutuações relativamente grandes em poços de observação ou piezômetros em aquíferos confinados (dezenas de centímetros). A relação é inversa; aumentos na pressão atmosférica criam rebaixamento no nível de água observado (FREEZE e CHERRY, 1979). No Quadro 1 a segunda coluna encontra-se destacada para ressaltar o foco em água superficial que estamos dando a esse estudo.

Também tem sido observado que mudanças na pressão atmosférica podem causar pequena flutuação do nível d'água em aquíferos freáticos (1 a 6 cm). À medida que aumenta a pressão do ar, o nível d'água no aquífero é rebaixado. Peck (1960) relaciona os efeitos das mudanças de pressões no ar aprisionado na zona não saturada do solo às flutuações do nível d'água. À medida que aumenta a pressão, o ar ocupa menos espaço, ocasionando o decréscimo do nível d'água.

Turk (1975) mediu uma flutuação diária de até 6 cm em um aquífero com uma granulometria bem-graduada e com nível d'água raso. Hare e Morse (1997) também observaram a variação do nível d'água em um aquífero freático. Eles isolaram uma porção do aquífero através de uma parede impermeável e de uma cobertura com argila. Comparou-se então a variação do nível na porção isolada com um poço livre, e verificou-se que o isolamento proporciona um maior efeito da variação da pressão atmosférica.

York *et al.* (2002) estudaram a interação entre o aquífero e a atmosfera em uma bacia a nordeste de Kansas nos Estados Unidos da América. Segundo eles, este estudo pode ser importante em regiões onde o nível d'água é raso (< 2 m), pois proximidade da água ao solo e

à vegetação provê água à evapotranspiração. Um modelo acoplado o aquífero e sua superfície atmosférica foi desenvolvido para estudar a interação entre a atmosfera e o aquífero em bacias hidrográficas, ao longo de décadas. Esse modelo mostrou que anualmente de 5 a 20% das águas subterrâneas sustenta a evapotranspiração, para a região estudada.

**Quadro 1.** Sumário dos Mecanismos que Conduzem à Flutuação do Nível de Água Subterrânea

	Freático	Confinado	Natural	Influência antrópica	Vida curta	Diário	Sazonal	Longo prazo	Influência climática
Recarga de aquífero (infiltração no subsolo)	✓		✓				✓		✓
Armadilha de ar durante a recarga de aquífero	✓		✓		✓				✓
Evapotranspiração e consumo freático	✓		✓			✓			✓
Efeito do armazenamento de margem perto do rio	✓		✓				✓		✓
Efeito da maré perto dos oceanos	✓	✓	✓			✓			
Efeito da pressão atmosférica	✓	✓	✓			✓			✓
Carregamento externo do aquífero freático		✓		✓	✓				
Terremotos		✓	✓		✓				
Bombeamento de água subterrânea	✓	✓		✓				✓	
Poço de injeção profundo		✓		✓				✓	
Recarga artificial: perda em reservatório, lagoas e aterros	✓			✓				✓	
Irrigação e drenagem agrícola	✓			✓				✓	
Drenagem geotécnica: minas à céu aberto, taludes, túneis...	✓			✓				✓	

Fonte. Modificado de Freeze e Cherry, 1979

A fração da evapotranspiração sustentada pelo aquífero é maior nos anos secos, quando a evapotranspiração excede a precipitação. Tanco e Kruse (2001) estudaram a flutuação do nível d'água na província de La Pampa na Argentina e desenvolveram uma metodologia para a previsão da relação entre a flutuação do nível d'água e a precipitação. Uma boa comparação entre as flutuações do nível d'água observadas e previstas foi verificada ao calcular as flutuações do nível nas estações de verão e de outono.

## 2.6 Métodos de estimativa de recarga de águas subsuperficiais

Existem muitos métodos para se realizar estimativas de recarga subsuperficiais, cada um deles assumindo premissas e incertezas. Maziero e Wendland (2005) enumeram os métodos mais utilizados e promissores para estimativa da recarga, atualmente, sendo o Método do Balanço de Massa de Cloreto (CMB – *Chloride Mass Balance*), o Método da Precipitação Cumulativa (CRD – *Cumulative Rainfall Departure*), o Método de Flutuação da Superfície Piezométrica (WTF – *Water Table Fluctuation*), a Modelação Subterrânea (GM – *Groundwater Modelling*), o Método EARTH (*Extended model for Aquifer Recharge and Moisture Transport through unsaturated Hardrock*) e o Método de Flutuação do Volume Saturado (SVF – *Saturated Volume Fluctuation*). Particularmente, os métodos baseados em relações entre precipitação e variações da superfície piezométrica têm um maior potencial de prever a recarga subterrânea (XU e BEEKMAN, 2003).

### 2.6.1 WATER TABLE FLUCTUATION (WTF)

O WTF é um método que assume a precipitação pluviométrica anual como fonte de recarga de um aquífero livre. Estudos relacionados à flutuação do nível da água subterrânea e avaliações de recarga pelo método WTF, ocorrem desde 1920, sendo que este método se mantém atual e amplamente aplicado por hidrogeólogos brasileiros e estrangeiros (DAMBRÓS, 2011).

É o método mais amplamente usado (MAZIERO, 2005), sendo aplicável somente aos aquíferos não-confinados e requer o conhecimento do rendimento específico ou porosidade drenável. As vantagens desta aproximação incluem sua simplicidade e uma sensibilidade aos mecanismos do movimento da água na zona não-saturada (HEALY e COOK, 2002). O método WTF pode ser usado de duas formas: para estimativas de eventos (dias, semana, mês) ou em períodos mais extensos (anos), sendo também possível à estimativa em escala local e regional (WAHNFRIED e HIRATA, 2005).

Nota-se que o método WTF, além de ser sensível à estimativa de recarga, supre algumas deficiências que os outros métodos apresentam. Assim, este e outros trabalhos serviram como

base de apoio para seleção do método WTF na busca da estimativa da recarga das águas subterrâneas. Portanto este método foi desenvolvido para determinar a recarga das águas subterrâneas a partir dos dados de monitoramento da variação (flutuação) do nível de água.

Este método possibilita estimar a recarga, a partir da relação entre a capacidade específica do meio penetrado pela perfuração na zona saturada e a variação anual da altura do nível da água. Destaca-se que este método tenha melhor resultado quando os níveis de água subterrânea mostram uma resposta rápida aos eventos de precipitação em áreas individuais de uma zona vadosa relativamente fina (HEALY e COOK, 2002). Portanto o método WTF baseia-se na premissa de que as elevações nos níveis da água subterrânea em aquíferos não-confinados (aquíferos livres) ocorrem devido à água de recarga subterrânea que chega à superfície livre (HEALY e COOK, 2002).

A Equação 2 assume que a água que atinge o nível freático entra imediatamente em armazenamento e que todos os outros componentes do balanço hídrico subterrâneo (evapotranspiração subterrânea, fluxo de base, entrada e saída de fluxo subsuperficial) são nulos durante o período de recarga. Para o método WTF, o rendimento específico ( $S_y$ ) de um aquífero livre é virtualmente igual ao coeficiente de armazenamento, sendo da ordem da macroporosidade do meio.

**Equação 2.** A recarga direta é calculada como:

$$R_d = \frac{S_y \cdot \Delta h}{\Delta t}$$

Em que:

$R_d$  = Recarga direta [ $LT^{-1}$ ];

$S_y$  = Rendimento específico [adimensional];

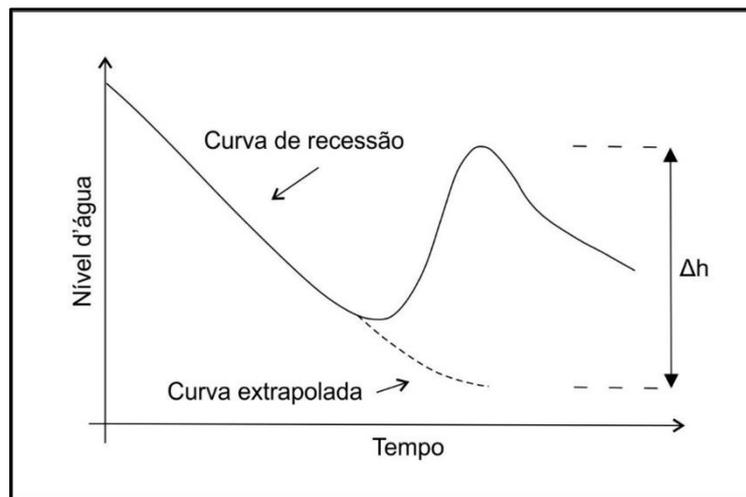
$\Delta h$  = Variação da altura do nível freático [L];

$\Delta t$  = Tempo de observação do nível [T].

Ressalta-se, ainda, que rendimento específico “expressa quanta água está disponível para uso humano”, enquanto que a retenção específica “expressa quanta água está retida na rocha (reservatório) após ser drenada por gravidade” (MAZIERO, 2005). Healy e Cook (2002) definiram que a aplicação da equação da recarga direta é para cada elevação individual do nível d’água, que determina uma estimativa da recarga direta, em que  $\Delta h$  é igual à diferença entre o pico da curva de variação de nível e o ponto mais baixo da curva de recessão antecedente

extrapolada até o instante do pico. A curva de recessão antecedente extrapolada é o tracejado que a curva do poço de monitoramento teria na ausência de elevação do nível d'água (Figura 13).

**Figura 13.** Obtenção da linha de tendência, que é um aumento do nível de água hipotético, em resposta à precipitação.  $\Delta h$  é igual à diferença entre o pico da elevação e o ponto baixo da curva de recessão extrapolada antecedente (linha tracejada) na hora do pico.



**Fonte.** Healy e Cook (2002).

Assim Moon et al (2004) afirmam que, geralmente, o nível d'água subterrânea varia de acordo com as características dos eventos de precipitação (quantidade, duração e intensidade) e de outras variáveis hidrogeológicas (topografia, espessura da zona não-saturada e composição dos materiais da Formação). O método WTF foi usado em vários estudos de recarga subterrânea e é descrito em detalhes por Healy e Cook (2002) e Maziero (2005), que trazem uma discussão teórica sobre os métodos que estimam a recarga do lençol freático.

Eles afirmam que a estimativa de recarga é extremamente importante para a gestão do sistema de águas subterrâneas e destacam a fácil aplicabilidade do método WTF. Este método é uma simplificação grosseira de um fenômeno complexo, ou seja, do movimento da água subterrânea e do lençol freático. Recomendam, ainda, o uso deste método quando necessário e destacam, para futuros estudos, seu uso para minimizar os erros quando a definição do rendimento específico e a inclinação da curva de recessão do hidrograma acusarem ausência de recarga.

Wahnfried e Hirata (2004) utilizaram o método WTF, o método do balanço hídrico e aproximação darcyniana para o estudo da recarga do aquífero sedimentar na Cidade

Universitária da Universidade de São Paulo (USP). Os autores concluíram que para a área estudada, o WTF foi o método que apresentou melhores resultados.

Foram realizados por Maziero (2005) estudos sobre aspectos quantitativos da água subterrânea em área intensamente urbanizada, no município de São Carlos/SP. Estes estudos demonstraram que a recarga estimada pelo WTF foi de 16,4% da precipitação pluviométrica ocorrida durante um ano hidrológico. Estes resultados apresentam subsídios para a discussão do uso racional dos recursos hídricos subterrâneos e estimulam o desenvolvimento de novas pesquisas em aquíferos sob centros urbanos ou em áreas rurais.

Sharda *et al* (2006) que realizou estudos na região semiárida localizada no oeste da Índia, e estimou a recarga em 7,3% e 9,7% da precipitação anual para os anos de 2003 e 2004, respectivamente, com a utilização do método WTF. Em outro estudo desenvolvido por Paiva (2006), estimou a recarga em uma unidade dendrítica de uma sub-bacia do Rio Piranga, localizado no estado de Minas Gerais. Segundo o autor, o estudo mesmo analisando dados de apenas um poço, manteve-se confiável devido à localização do mesmo, e sua taxa de recarga foi de 183,3 mm/ano. Mesmo assim, o dado manteve-se no esperado, quando comparado a resultados de outros pesquisadores.

Estudando a influência da precipitação e das características do solo na variação do nível da água subterrânea, Gouvêa (2009) concluiu diante dos resultados, que a partir da variação mensal do nível da água e da precipitação mensal acumulada, tem-se a não existência de uma relação imediata. Em períodos menores a correlação é maior, também encontrou a existência de um padrão de sazonalidade. Afirma que a evapotranspiração tem maior influência do que a porosidade na variação do nível da água. Para finalizar, a autora destaca a importância de estudos mais aprofundados sobre uso e cobertura do solo e infiltração.

Estudos realizados em áreas pertencentes ao Sistema Aquífero Guarani (SAG), elaborados por pesquisadores uruguaios e argentinos, obtiveram respostas distintas quanto à estimativa de recarga. Para Montañó e Carrion (1990), o valor global estimado foi de 3% da precipitação média anual, ou seja, 1300 mm para toda a área aflorante, portanto 39 mm/ano. Já Perez e Rocha (2002) encontram cerca de 170 a 190 mm/ano representando uma taxa de recarga estimada de 13,1% e 14,6% respectivamente. Por outro lado, Pacheco (2004), detalhando a área de Rivera/Uruguai, assumindo uma precipitação de 1400 mm/ano, estimou em 3,6% (isto representa 50,4mm). Silva Busso (1999) sugeriu como taxa de recarga, 3,5% da precipitação média anual.

Deste modo, analisando os resultados obtidos pelas fontes consultadas e referidas, destaca-se a unanimidade entre os autores ao afirmarem que se deve dar continuidade aos

trabalhos de observação e pesquisa para avançar no conhecimento sobre o comportamento dos aquíferos com o objetivo de subsidiar as políticas de gestão sustentável.

Assim método WTF é amplamente utilizado na determinação da recarga direta, pois oferece como vantagens a simplicidade e a sensibilidade aos mecanismos do movimento da água na zona não-satura (HEALY e COOK, 2002).

O método WTF pode ser visto como uma aproximação integrada e não como uma medida pontual quando comparado com os métodos aplicados na zona não-saturada. Segundo Healy e Cook (2002), o método WTF apresenta algumas limitações que podem ser observadas no Quadro 2.

#### Quadro 2. Limitações do método WTF

1 - O método é mais bem aplicado a níveis freáticos rasos que exibem súbitas elevações e declínios do nível d'água. Aquíferos profundos podem não exibir súbitas variações, resultado de frentes de umidade que tendem a dispersar-se ao percorrer longas distâncias verticais.
2 - As taxas de recarga variam substancialmente dentro de uma bacia, devido a diferenças na topografia, geologia, declividade da superfície do terreno, vegetação, arranjo das partículas sólidas, grau de cimentação e outros fatores. A maior dificuldade está na locação dos poços de observação que representem espacialmente as fontes de recarga.
3 - As taxas de recarga e descarga não podem ser constantes e iguais para o evento. Se a taxa de recarga for constante e igual à taxa de descarga, os níveis d'água não mudariam e o método WTF estimaria recarga nula.
4 - O nível da água subterrânea sofre alterações (sobe e desce) em resposta a muitos fenômenos diferentes e as flutuações nem sempre são indicativas de recarga ou descarga de água subterrânea
5 - A incerteza gerada por este método está relacionada à precisão com que o rendimento específico pode ser determinado e até que ponto as suposições inerentes ao método são válidas
6 - Arantes (2003), monitorando aquíferos muito rasos (< 2m) observou uma influência da ordem de centímetros nas mudanças na carga hidráulica devido às mudanças na pressão atmosférica.
7 - Healy e Cook (2002) concluíram que uma elevação do nível d'água representa os efeitos combinados da recarga para um evento de precipitação e da precedente condição de descarga.

**Fonte.** Adaptado de Healy e Cook, (2002) e Arantes (2003).

## 2.7 Determinação de linhas de fluxo

O nível d'água do lençol freático pode ser determinado a partir da instalação de poços que penetram na zona saturada a uma profundidade suficiente. A preparação de um mapa de níveis d'água requer a construção de poços de observação (Figura 14A; WINTER *et al.*, 1998).

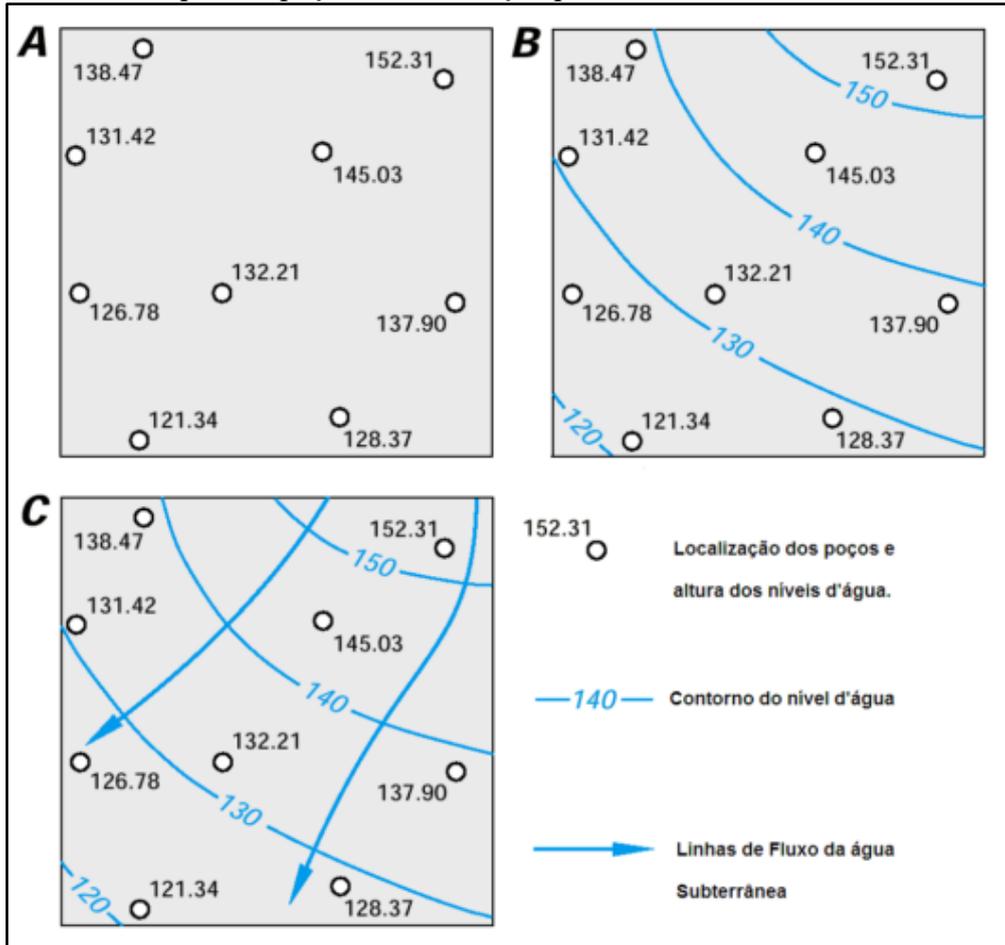
Se a profundidade da água é medida em vários poços ao longo de uma área de estudo, e se esses níveis de água tiverem uma referência comum, como o nível do mar, os dados podem ser interpolados para indicar a configuração do nível d'água (linhas equipotenciais – Figura 14B).

Além de vários usos práticos de um mapa do nível d'água do lençol freático, como calcular uma profundidade aproximada para um poço proposto, a configuração da superfície freática pode indicar a direção aproximada do fluxo. Linhas, normalmente perpendiculares aos contornos dos níveis d'água, indicam a direção do sistema de água subterrânea (linhas de fluxo – Figura 14C). A superfície freática se ajusta continuamente com as mudanças da recarga e os padrões de descarga. Então, para construir um mapa do nível d'água, devem ser feitas medidas do nível d'água aproximadamente ao mesmo tempo, e o mapa resultante só é representativo daquele tempo específico.

A profundidade da superfície freática é um importante fator no uso da superfície do solo e no aproveitamento dos suprimentos de água dos aquíferos livres (Figura 15). Onde a superfície freática está a pequena profundidade da terra pode se tornar “encharcada” durante a estação chuvosa e imprópria para uso residencial (HEAT, 1982).

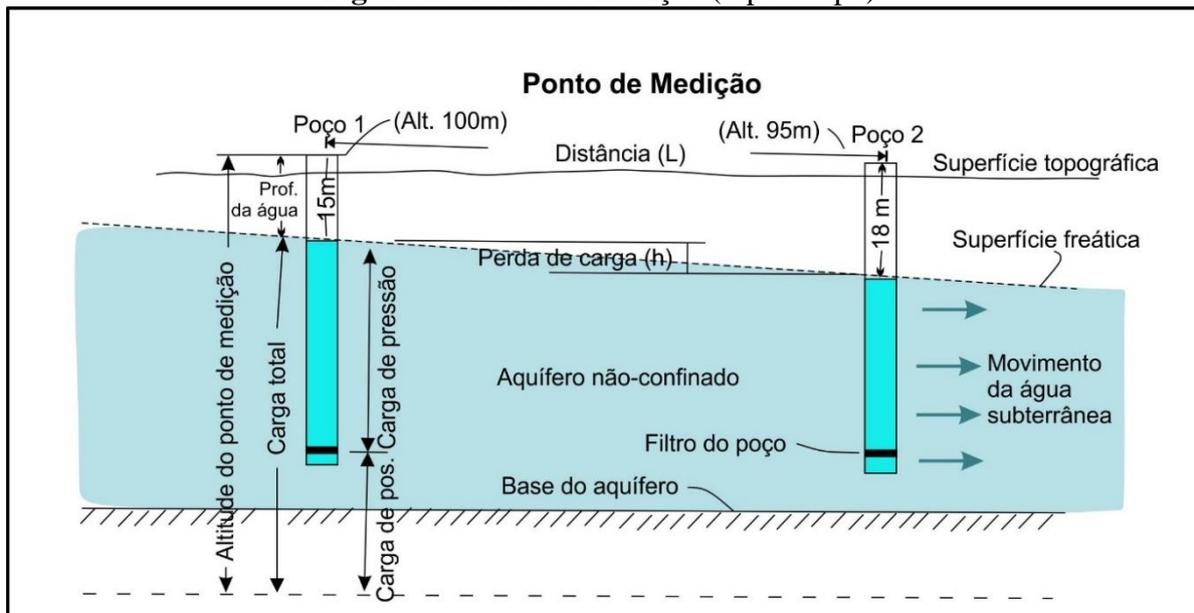
A direção da inclinação da superfície freática é também importante porque indica a direção do movimento da água subterrânea (Figura 15). A posição e a inclinação da superfície freática são determinadas medindo-se a posição do nível da água em poços em um ponto fixo (ponto de medição).

**Figura 14.** Exemplos de poços de observação para o monitoramento de níveis d'água.



Fonte. Winter *et al.* (1998).

**Figura 15.** Ponto de medição (topo a topo).



Fonte. Elaborado a partir de informações de Heat, (1982).

Água subterrânea move-se no sentido do decréscimo da carga total, que pode ou não coincidir com o decréscimo da carga de pressão. A equação para a carga total (ht) pode ser vista na Equação 3.

**Equação 3.** Cálculo para a carga total.

$$ht = z + hp$$

Na qual z é a carga de posição, ou seja, a distância do datum ao ponto onde a carga de pressão hp é medida. Sendo assim, quando todos os outros fatores são constantes, a velocidade com que a água subterrânea se movimenta depende do gradiente hidráulico (HEAT, 1982). O gradiente hidráulico é a variação, de carga por unidade, da distância em uma dada direção. Se a direção não é especificada, entende-se como aquela na qual a máxima taxa de redução em carga ocorre.

Se o movimento da água subterrânea é assumido ser no plano da Figura 10 – em outras palavras, se ela se move do poço 1 ao 2 – o gradiente hidráulico pode ser calculado a partir da informação dada na Equação 4. O gradiente hidráulico é hl/L, onde hl seria a perda de carga entre os poços 1 e 2 e L é a distância horizontal entre eles.

**Equação 4.** Cálculo do gradiente hidráulico.

$$\frac{hl}{L} = \frac{(100m - 15m) - (95m - 18m)}{780m} = \frac{85m - 77m}{780m} = \frac{8m}{780m}$$

De acordo com Heat (1982), o sentido do movimento da água subterrânea e o gradiente hidráulico, ambos, podem ser determinados se os seguintes dados estão disponíveis para três poços locados em um arranjo triangular qualquer, tal como mostrado na Figura 16.

1. A posição geográfica relativa dos poços;
2. A distância entre os poços;
3. A carga total de cada poço.

Os passos para a solução estão resumidos a seguir e ilustrados na Figura 16.

a. Identificar o poço que tem o nível de água intermediário (que é nem o mais alto nem o menor valor da carga hidráulica).

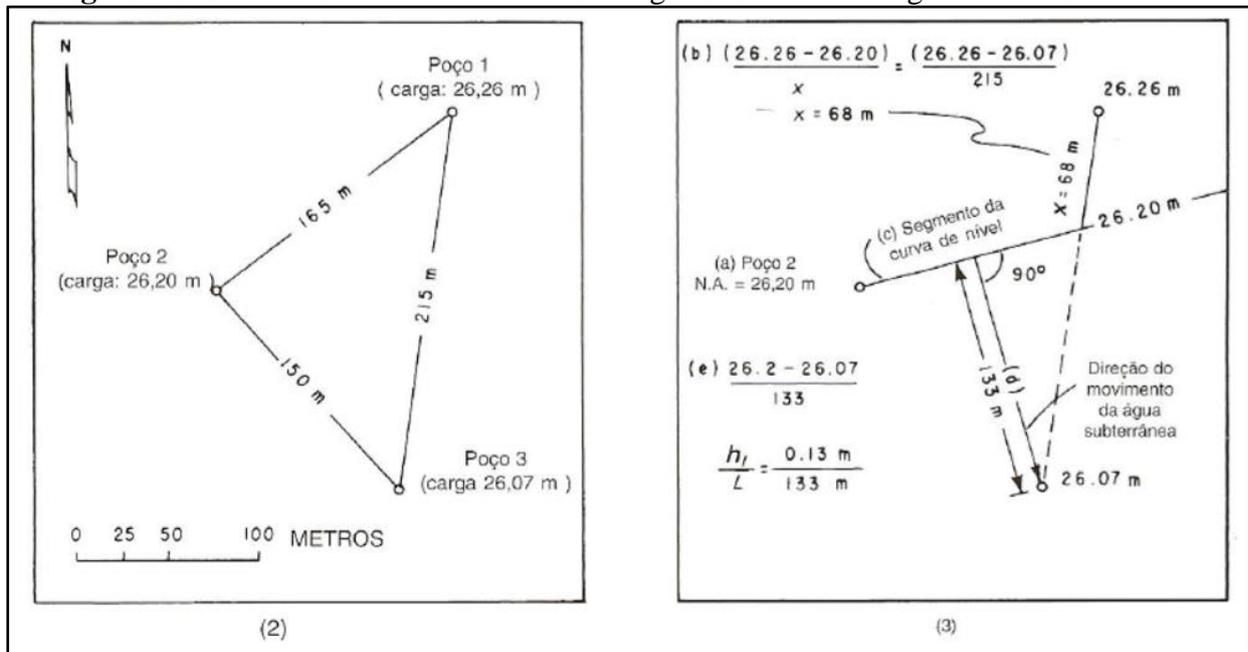
b. Calcular a posição, entre o poço tendo maior carga e o poço tendo a menor carga; na qual a carga é a mesma que no poço intermediário.

c. Desenhar uma linha reta entre o poço intermediário e o ponto identificado no passo b como sendo o que apresenta entre a maior carga e o tendo a menor carga. Esta linha representa um segmento da linha de nível de água em que a carga total é a mesma que no poço intermediário.

d. Desenhar uma linha perpendicular à curva de nível da água determinada acima e passando ou pelo poço com maior carga, ou pelo com menor carga. Esta linha é paralela à direção do movimento da água subterrânea.

e. Dividir a diferença entre a carga do poço e aquela da curva de nível da água, pela distância entre o poço e a curva de nível. A resposta é o gradiente hidráulico.

**Figura 16.** Calculando o sentido do fluxo da água subterrânea e o gradiente hidráulico.



Fonte. Heat, (1982).

## 2.8 O mapeamento geotécnico como ferramenta da Geologia Ambiental

O termo cartografia, aplicado num sentido mais amplo, como no contexto da Geografia, é definido como o estudo ou todas as preocupações voltadas para a elaboração de um mapa (SANCHEZ, 1973). Ainda para Sanchez (1981), a cartografia pode ser definida como:

*“A ciência que se preocupa com os estudos e as operações científicas, artísticas e técnicas resultantes de observações e medidas diretas ou explorações de documentações visando a obtenção de dados e informações para a elaboração de representações gráficas tipo: plantas, cartas, mapas, gráficos, diagramas e outras formas de expressão, bem como, de sua utilização”.*

Zuquette (2004) e Aguiar (1994) diferenciam mapas geotécnicos de plantas e cartas geotécnicas, cujas características principais são apresentadas, respectivamente, nos quadros 3 e 4. Tais autores explicam que um mapa (elaborado em escala pequena) ou uma planta (elaborada em escala grande) geotécnica correspondem ao registro cartográfico (ou espacialização) de determinadas características ou atributos do meio físico geológico. Assim, uma planta é, na verdade, um mapa de detalhe. Com base nestes conceitos, teoricamente, os conteúdos de mapas e plantas geotécnicos independem de quem os elabora.

**Quadro 3.** Conceitos de mapa, planta e carta geotécnicos

<b>TERMO</b>	<b>CONCEITO</b>
<b>Mapa Geotécnico</b>	Representação dos atributos geotécnico levantados, sem realização de análise interpretativa e sempre em escalas inferiores a 1:10.000.
<b>Planta Geotécnica</b>	Representação gráfica realizada em escalas grandes, maiores que 1:10.000, normalmente voltada para locais onde serão executadas obras específicas.
<b>Carta Geotécnica</b>	Representação dos resultados da interpretação dos atributos que estão em um mapa. Ex.: carta clinométrica obtida a partir do mapa topográfico, carta de escavabilidade, ect.

**Fonte.** Zuquete (2004).

**Quadro 4.** Definições de termos empregados em mapeamento geotécnico

<b>TERMO</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>
<b>Mapa</b>	Representação gráfica dos atributos do meio físico em determinada escala, sem análise interpretativa.
<b>Carta</b>	Diferencia-se do anterior por incluir análise interpretativa, destinada a fins práticos da atividade humana.
<b>Atributo</b>	Característica qualitativa ou quantitativa, que indica o componente de um sistema observado.
<b>Mapeamento Geotécnico</b>	Conjunto de processos sistemáticos de investigação dos atributos, imprescindíveis ao estabelecimento de unidades geotécnicas e passíveis de representação em documentos cartográficos.
<b>Cartografia Geotécnica</b>	Distinta do mapeamento geotécnico por apenas estabelecer as unidades geotécnicas, com bases em levantamentos executados anteriormente, sem etapa de investigação.

**Fonte.** Aguiar (1994).

Segundo Nakazawa *et al.* (1991), as cartas e/ou mapas geotécnicos correspondem à apresentação da dinâmica dos processos geológicos, bem como das características do meio físico, delimitando e homogeneizando áreas com problemas manifestos e potenciais.

Zuquette (1993) considera que a elaboração das cartas e/ou mapas geotécnicos corresponde a um processo que busca avaliar e retratar as características dos componentes do meio físico, e os comportamentos frente aos diferentes tipos de ocupação, contemplando o meio físico como um todo, avaliando suas limitações e seus potenciais.

Nakazawa *et al.* (1991) e Prandini *et al.* (1995) expõem que a cartografia geotécnica pode ser apresentada com diferentes designações, conforme a finalidade e a própria natureza do terreno. Desta forma, definem quatro tipos principais de cartas geotécnicas e seus respectivos conceitos (Quadro 5).

**Quadro 5.** Tipos de cartas geotécnicas e seus conceitos

<b>TIPO</b>	<b>CONCEITO</b>
<b>Cartas geotécnicas (propriamente ditas)</b>	Expõem as limitações e potencialidades dos terrenos, estabelecendo as diretrizes de ocupação frente às formas de uso do solo.
<b>Cartas de riscos geológicos</b>	Prepondera a avaliação de dano potencial à ocupação, frente a uma ou mais formas de uso.
<b>Cartas de suscetibilidade</b>	Informam sobre a possibilidade de ocorrência de um ou mais fenômenos geológicos e de comportamentos indesejáveis.
<b>Cartas de atributos ou parâmetros</b>	Apresentam informações geográficas de interesse ao uso e ocupação do solo.

**Fonte.** Nakazawa *et al.* (1991) e Prandini *et al.* (1995).

No âmbito nacional, a proposição metodológica de Zuquette (1987 e 1993) tem sido largamente utilizada. Tal metodologia se caracteriza pela elaboração de mapas geotécnicos, definindo um número mínimo de observações de campo, conforme a finalidade e a escala do trabalho (Tabela 4).

Com relação à obtenção dos atributos, Zuquette (1987 e 1993) atenta para as seguintes observações:

- qualitativas: dados de superfície, subsuperfície (poços e galerias);
- quantitativas: análise de campo, sondagens e ensaios geotécnicos;
- amostragem;
- áreas chaves;
- extrapolação e
- interpolação.

**Tabela 4.** Número de observações qualitativas e quantitativas em campo, em função da escala.

FINALIDADE	ESCALA	NÚMERO DE OBSERVAÇÕES		
		QUALITATIVA		QUANTITATIVA
<b>Básico</b>	1:250 000	Cristalino 1/10km <sup>2</sup>	Sedimentar	1/10km <sup>2</sup>
	1:100 000	4/10km <sup>2</sup>	3/10km <sup>2</sup>	2/10km <sup>2</sup>
<b>Regional</b>	1: 50 000	6/5km <sup>2</sup>	1/km <sup>2</sup>	3/10km <sup>2</sup>
	1: 25 000	3/km <sup>2</sup>	2/km <sup>2</sup>	1/10km <sup>2</sup>
<b>Detalhe</b>	1: 25 000	5/km <sup>2</sup>	4/km <sup>2</sup>	14/10km <sup>2</sup>
	1: 10 000	15/km <sup>2</sup>	15/km <sup>2</sup>	10/km <sup>2</sup>

**Fonte.** Zuquette, (1993).

Com relação às escalas de trabalho, Zuquette (1987 e 1993) propõe que a escala geral/básica seja menor que 1:100.000; a escala regional esteja entre 1:100.000 e 1:25.000, enquanto a de semi-detalhe /detalhe deve estar entre 1:25.000 e 1:2.000.

Os ensaios de laboratório, sugeridos por Zuquette (1987 e 1993) que permitem a caracterização prévia dos materiais inconsolidados, são:

- granulometria;
- limite de plasticidade e de liquidez;
- massa específica dos sólidos;
- compactação;
- mineralogia;
- comportamento laterítico;
- caracterização dos agregados;
- densidade relativa.

Na década de noventa, o mapeamento geotécnico se voltou para os aspectos ambientais, buscando uma melhor compreensão dos processos geológicos, juntamente com as ações antrópicas e o relacionamento como o meio físico (KOPEZINSKI, 1998). Segundo Zuquette e Nakazawa (1998) as cartas geotécnicas são instrumentos de aplicação que devem expressar os diferentes comportamentos desempenhados por um terreno, diante de usos do solo predeterminados, através de uma compartimentação em zonas ou unidades geotécnicas, cada qual com orientações técnicas preventivas e corretivas dos problemas característicos, previamente identificados.

## 2.9 Sustentabilidade e Gestão de águas subsuperficiais e subterrâneas

O termo sustentabilidade, é originário do Latim sus-tenere, que significa sustentar ou manter. Para a CMMAD/ONU (1991), a sustentabilidade, do ponto de vista socioeconômico-ambiental, entende que: uma sociedade sustentável é aquela que satisfaz suas necessidades sem diminuir as perspectivas das gerações futuras. Ou seja, a incorporação da conservação ambiental ao crescimento econômico e a equidade social (ESPINOSA, 1993).

Rebouças (2004) descreve o que entende por sustentabilidade: como uma condição de longo-tempo de uso racional dos recursos naturais, em geral, e da água, em especial. Da mesma forma, o autor ainda determina sua opinião a respeito das diferentes formas de presença da água subterrânea, colocando que: é um recurso renovável por meio do ciclo hidrológico, apresenta uma grande variabilidade, tanto no espaço como no tempo.

Conway (1997) diz que a sustentabilidade só ocorre se a taxa de extração da água ficar abaixo da taxa de recarga de onde a água foi retirada. Em outra oportunidade em sua obra cita a frase de Ajit Banarjee: “A tecnologia só é boa se for sustentável e só é sustentável se incluir pessoas, porque as pessoas são partes do meio ambiente.” A gestão participativa foi bem-sucedida porque se baseou na crença de que as pessoas são importantes e devem ser envolvidas nas soluções dos problemas. A sustentabilidade é apenas um dos indicadores de um ecossistema, sendo eles: “produtividade (rendimento), estabilidade (constância de produtividade em face de flutuação), sustentabilidade (capacidade de o sistema manter a produtividade) e equidade (igualdade de distribuição aos beneficiários)” (CONWAY, 1997).

Pesquisadores, como Veiga (2006), propõem três objetivos que um sistema sustentável deve atender, sendo eles: (1) preservação do potencial da natureza para a produção de recursos renováveis; (2) limitações do uso de recursos não renováveis; (3) respeito e realce para a capacidade de autodepuração dos ecossistemas naturais. Para Tuinhof *et al.* (2002), a sustentabilidade é a preservação do potencial atendendo a sua própria oferta e não a demanda que se tem destes recursos. Para estes autores, este controle é entendido como um círculo virtuoso e ele só ocorre se houver a participação dos usuários, nas decisões tomadas quanto à gestão da demanda e da oferta do recurso.

Dentre outros conceitos, a gestão trata de princípios como a equidade e eficiência na alocação dos recursos hídricos, nos seus serviços e na sua distribuição. Ela também prevê a administração da água com base em bacias hidrográficas, e a necessidade de abordagens de gestão integrada, elencando assim, a necessidade de equilibrar o uso da água entre as atividades

socioeconômicas e o meio ambiente (CONICELLI e HIRATA, 2016). Além disso, a gestão da água trata da formulação, estabelecimento e implementação de políticas de recursos hídricos, com base na legislação e nas instituições vigentes.

A gestão integrada dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos é parte significativa da solução para o atendimento da demanda mundial. No estado de São Paulo, o controle sobre as águas é feito baseado no controle quantitativo e qualitativo; o primeiro é realizado pelo DAEE que concede a licença de perfuração e a outorga de uso; já a qualidade é gerenciada pela CETESB e pela Secretaria da Saúde. Porém, muitos usuários optam por captar e utilizar-se da água sem o conhecimento das legislações. Este é um dos motivos pelos quais não se tem com precisão a quantidade de poços explorados.

De acordo com Hager *et al* (2002) a gestão dos recursos hídricos é a primeira a sofrer com as atribuições da gestão política do país. Entretanto, a gestão das águas subsuperficiais e subterrâneas sofre duplamente: pelas atribuições políticas, e consequentes cortes orçamentários, e pelo não entendimento pela maior parte das pessoas sobre o seu papel e importância dentro do contexto dos recursos hídricos, sendo relegada constantemente ao segundo plano.

Há pesquisadores que apresentam outro entendimento sobre a dimensão ecológica de uso sustentável e gestão das águas subterrâneas. É o caso de Kazmann, (1988, *apud* KALF e WOOLLEY, 2005) que entende os depósitos de águas subterrâneas como sendo recursos não renováveis, nas condições de regiões de baixíssima pluviometria, citando como exemplo similar os reservatórios de petróleo e gás. Nesta linha de entendimento deve-se priorizar o conhecimento do período que ainda poderá ser explorado o recurso, para ser tomada providência pelos indivíduos que serão afetados no futuro, alertando, igualmente, que as águas subterrâneas devem ser utilizadas de forma eficiente e não de forma irresponsável.

Os autores, Kalf e Woolley (2005), preferem priorizar estudos referentes ao tempo de duração de um reservatório subterrâneo, ao invés de pensar em como usar de forma sustentável as águas subterrâneas. Obviamente, esta preferência recai em situações vividas pelos pesquisadores, pois se trata de regiões áridas e/ou semiáridas.

Em todo o mundo as águas subterrâneas estão se tornando cada vez mais importante, sendo fonte de abastecimento seguro para o uso doméstico, industrial e agrícola. No Brasil mais de 50% do abastecimento público é feito por água subterrânea (Rebouças, 2003), sendo que no Estado de São Paulo cerca de 70% dos municípios são totais ou parcialmente abastecidos por água subterrânea (HIRATA *et al*, 2007). Dentre as inúmeras vantagens desse recurso destaca-se que ele é uma fonte segura de água em períodos de seca, onde as águas superficiais ficam

escassas, ele é menos vulnerável à contaminação, possui água de excelente qualidade natural e que na maioria dos casos dispensa qualquer tipo de tratamento, além disso, o aquífero apresenta uma gigantesca capacidade de armazenamento.

Entretanto, a grande importância do recurso subterrâneo para o desenvolvimento social e econômico da população contrasta com a deficiência no conhecimento do potencial e o estágio de exploração dos aquíferos no país, que coloca assim, grandes desafios para a adequada gestão da água. De outra parte, o gerenciamento efetivo dos recursos hídricos subterrâneos pode ser comprometido com a crescente ilegalidade dos poços de captação de água. A estimativa é que no Estado de São Paulo, no qual apresenta 44 milhões de habitantes, a maioria dos poços existentes (mais de 70%) é clandestina (FUSP, 2002). Essa ilegalidade da exploração implica em problemas associados à falta de sustentabilidade (ou superexploração) das extrações de água subterrânea (sobretudo para uso no abastecimento público urbano); aos conflitos entre usuários, causando a perda do recurso e aumento dos custos de exploração; e à contaminação de aquíferos pela degradação induzida pelo bombeamento não planejado.

Ações de controle adotadas para a gestão da água superficial têm sido, quando aplicadas para as águas subterrâneas, pouco efetivas no mundo inteiro. Esse cenário torna-se emblemático particularmente no Estado de São Paulo, onde a exploração se faz por centenas a milhares de usuários individuais e a fiscalização, sem apoio do proprietário do poço e da sociedade, não é efetiva (Foster et al, 2004). Assim, ações que levem ao controle da exploração, baseado em processos de licenciamento e outorga para as águas subterrâneas, terão que lançar mão de mecanismos de participação e comunicação social, envolvendo todo o grupo de interessados, além das instituições responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

Ademais, o funcionamento de um aquífero não é entendido pelo usuário comum e pela sociedade em geral, gerando as relações de causa e consequência (ação e reação) que são geralmente lentas, o que dificulta as discussões sobre os problemas e soluções por parte dos usuários. Assim, o Estado tem que tomar atitudes, muitas vezes, antes que os problemas aparentes existam, dificultando ter o apoio da sociedade (CORNICELLI e HIRATA, 2016).

O não engajamento do usuário e do estado nas questões relativas às águas subterrâneas está associado à falta da percepção do problema e de suas causas por parte do usuário afetado. Isso constitui em um grave entrave à gestão das águas subterrâneas. Os impactos que sofrem as águas subterrâneas não são visualmente aparentes (difícil correlação entre causa e efeito no espaço e no tempo), o que reduz a percepção do problema por parte do usuário, da sociedade e dos órgãos de governo. Os conflitos pela água subterrânea (superexploração e poluição) ocorrem, mas, sobretudo nas áreas urbanas, essa falta “aparente” de conflito não mobiliza a

sociedade por mais controle e, sem essa pressão, o estado não fiscaliza os usuários e o cumprimento das leis.

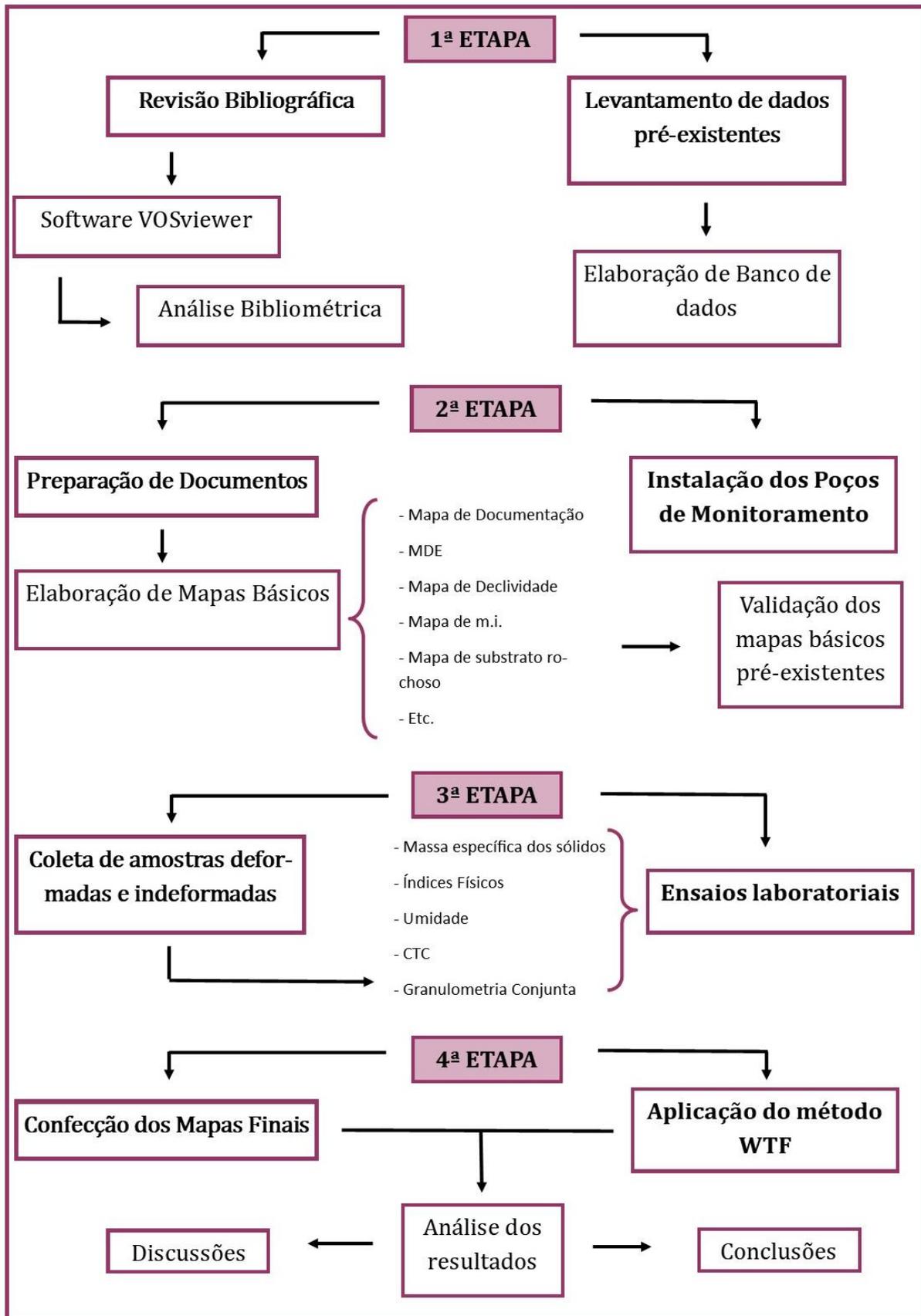
Para que realmente ocorra a gestão dos recursos naturais é fundamental conhecer o que se quer gerenciar. Na Lei Nº. 9.984 de 2000, está contido uma frase que diz: “não se gerencia o que não se conhece”. Este é mais um argumento da necessidade de estudos que visam conhecer a dinâmica das águas subterrâneas, para posteriormente definir seu plano de gestão.

No Brasil, o cumprimento das leis e resoluções referidas, se fiscalizadas e obedecidas, em médio e longo prazo, poderá ter não só um retorno maior em termos econômicos, como segurança de disponibilidade dos recursos naturais. No momento o grande desafio nacional reside na aplicação da legislação vigente, pois se deve ter em mente que o espaço geográfico brasileiro é um dos maiores portadores, senão o maior, de recursos hídricos subterrâneos representados por diversos domínios hidrogeológicos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, a presente pesquisa foi desenvolvida e aplicada em quatro etapas principais: no levantamento bibliométrico feito no *software VOSviewer*, nos trabalhos de campo para validação do mapeamento geotécnico, nos ensaios em campo e laboratoriais, no monitoramento do nível freático e pluviométrico e na estimativa da recarga a partir do método WTF. Além disso, neste capítulo será abordado também a caracterização da área de estudo e a descrição de todos os procedimentos técnicos. As etapas apresentadas podem ser observadas no fluxograma da Figura 17.

**Figura 17.** Fluxograma de etapas de trabalho.



Fonte. Elaborado pela autora.

### 3.1 Materiais

Para a realização deste trabalho foi utilizado um referencial bibliográfico, disponível a partir de pesquisas em bases virtuais como o *Web of Science* e bibliotecas físicas da USP – São Carlos, UFSCar – São Carlos e UNESP – Rio Claro. Destaca-se uma grande quantidade de teses e dissertações disponíveis sobre o tema, além de artigos e periódicos tanto no âmbito internacional quanto nacional, que de acordo com a análise bibliométrica que abrange artigos de 1964 até 2019, pode-se chegar a uma porção de 2486 artigos da área em estudo.

Utilizou-se cartas topográficas adquiridas no IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo) com escala 1:10.000. As folhas utilizadas foram: Folhas do Projeto São Carlos/Ribeirão Preto I, SF-23-V-C-IV-3-SO-F e SF-23-V-C-IV-3-SE-E.

Outros *shapefiles* utilizados foram:

- Shape de Rodovias do Estado de São Paulo, adquiridos no site do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), em formato shapefile, em escala 1:50.000;
- Mapa de Municípios do Estado de São Paulo, também adquiridos no site do IBGE, em formato shapefile, em uma escala 1:50.000;
- Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, em uma escala 1: 100.000, do ano de 2000, adquirido do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC);
- Cartas Pedológicas, Geológicas e de Materiais Inconsolidados da tese do Fagundes (2010), na qual estão apresentadas em uma escala 1:25000;
- Dados de sondagem SPT feitas no Campus da UFSCar, obtidos através de pedido para a Prefeitura do Campus;
- Dados pluviométricos da região em estudo, adquiridos no site da EMBRAPA e do INMET;

Todas essas cartas foram digitalizadas e seus dados foram vetorizados, georreferenciados e tratados nos softwares *ArcGIS 10.5* (ESRI, 2018), *CorelDraw X8*. Os levantamentos bibliográficos foram tratados no programa *VOSViewer*.

### 3.2 Caracterização da área de estudo

Esse subcapítulo de caracterização da área de estudo aborda os aspectos gerais da área, visando uma melhor compreensão das características climáticas, geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas. Esta etapa é de fundamental importância para o estudo, visto que permite a obtenção de informações acerca da geologia local e de condicionantes da dinâmica da água de maneira mais efetiva.

#### 3.2.1 LOCALIZAÇÃO E INFORMAÇÕES GERAIS

A área de estudo está localizada na região central do Estado de São Paulo, no município de São Carlos, ao norte da cidade, compreendida entre as latitudes 7566000 e 7569000 m N e as longitudes 201000 e 205000 W, da zona UTM 23S (Figura 18); abrangendo uma parte da zona de expansão urbana do município, definida pelo plano diretor de São Carlos (PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS, 2016), e atinge aproximadamente 10 km<sup>2</sup> de área.

Inseridas nessa área de pesquisa encontram-se quatro nascentes de extrema importância para o município, sendo as duas nascentes do córrego do Espriado e as duas nascentes do córrego do Fazare, ambas localizadas dentro da área da UFSCar. No subcapítulo 3.2.4 é abordado com mais profundidade acerca dessas nascentes e sobre a intensa utilização antrópica delas.

O principal acesso à área de estudo é pela Rodovia Engenheiro Thales de Lorena Peixoto Júnior (SP-318), em direção a cidade de Ribeirão Preto; e o principal ponto de referência para a chegada ao local é a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

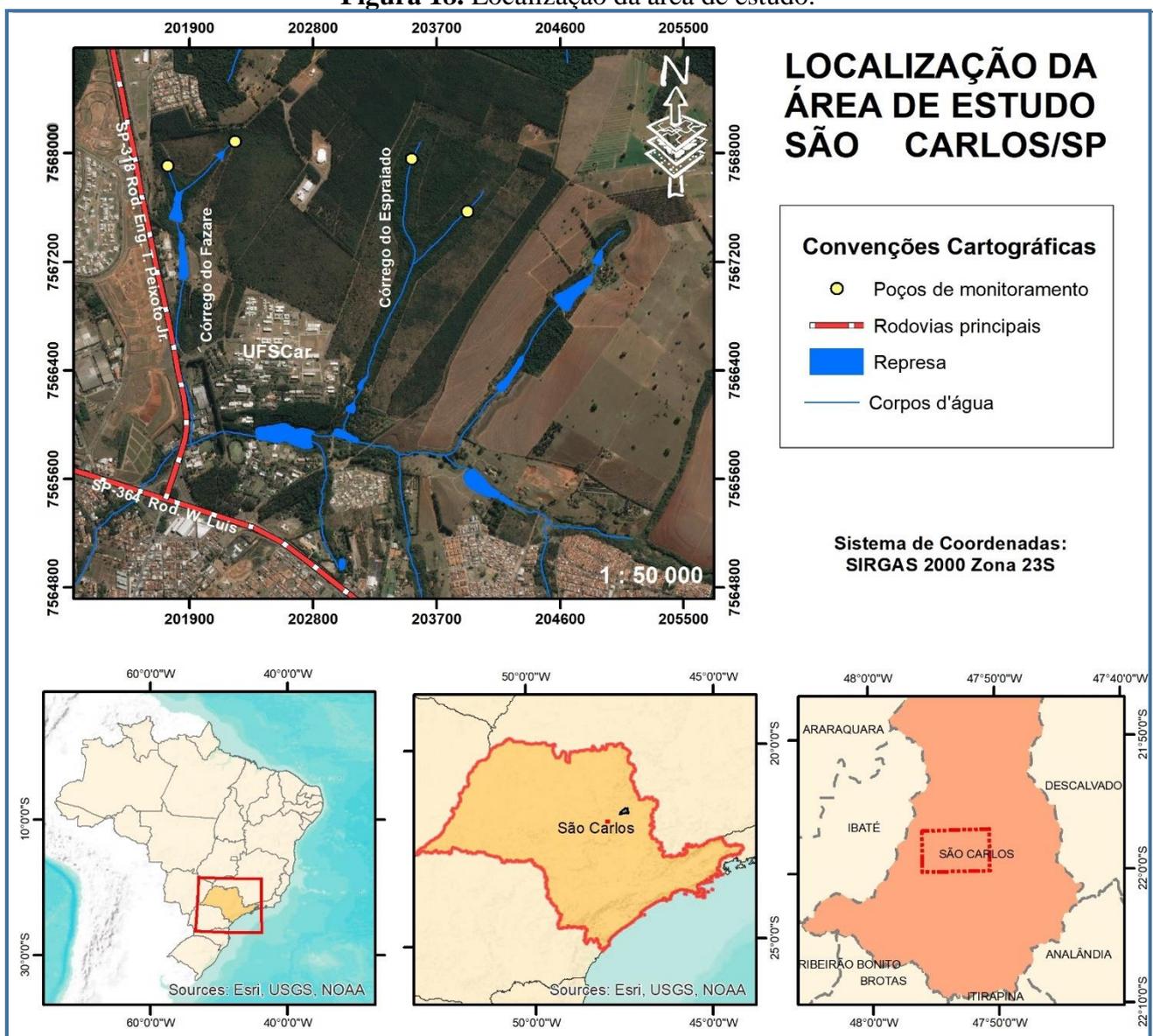
São Carlos é considerado o principal centro urbano da região, conhecida também por sua abundância em indústrias *hightech*, conhecida assim, como Capital da Tecnologia. A cidade limita-se a norte por Rincão, Santa Lúcia, e Luiz Antônio, a sul por Ribeirão Bonito, Brotas e Itirapina, a leste por Descalvado e Analândia, e a oeste por Ibaté, Araraquara e Américo Brasileiro.

O município de São Carlos, conta com cerca de 1137 km<sup>2</sup> (IBGE, 2016) de superfície total, encontra-se a aproximadamente 269 quilômetros da capital do estado de São Paulo.

Segundo dados do último levantamento censitário, o município de São Carlos conta com uma população de 247 mil habitantes, sendo que 98,4% da população é urbana (IBGE,2017).

Trata-se de um município com grande valor acadêmico, tecnológico e industrial, no qual atividade industriais diversificadas (motores, compressores, herméticos para refrigeração, lápis, têxteis, embalagens, tintas), indústrias *high tech*, universidades (Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Universidade de São Paulo – USP, etc.) e centros e institutos de pesquisa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, Associação Instituto de Ecologia e Gerenciamento Ambiental – AIIEGA, etc.) se encontram instalados na cidade.

**Figura 18.** Localização da área de estudo.



Fonte. Elaborado pela autora.

### 3.2.2 GEOMORFOLOGIA

A região de São Carlos pertence a província geomorfológica das Cuestas Basálticas, segundo Almeida (1964). Troppmair (1983) insere São Carlos na sétima região ecológica do Estado de São Paulo, ou seja, no reverso da borda do Planalto Ocidental, acompanhando as cuestas basálticas, com altitudes entre 800-900m, inserindo a região de São Carlos na província geomorfológica das cuestas basálticas e de arenito, localizada entre as províncias do Planalto Ocidental e a Depressão Periférica Paulista. As cuestas representam a borda dos derrames basálticos da Bacia do Paraná.

A sudeste da cidade de São Carlos, nota-se a formação de degrau destacado na topografia, devido à maior resistência à erosão do Arenito Botucatu silicificado, que aí ocorre sotoposto aos magmatitos básicos (ZUQUETTE, 1981).

As formas de relevo predominantes na região do município de São Carlos são as colinas amplas e colinas médias. As colinas amplas estão relacionadas aos sedimentos cenozoicos da Formação Itaqueri e às intrusivas básicas; já as colinas médias estendem-se sobre os sedimentos cenozoicos e coberturas residuais da Formação Botucatu e Pirambóia (NISHIYAMA, 1991). De acordo com Fagundes (2010), a região é constituída por dois grupos de encostas predominantemente suaves (declividades menores que 15°), separadas por uma zona de escarpas com declividades que variam de 45 a 70°.

### 3.2.3 GEOLOGIA

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná, que abrange uma grande área do estado de São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Algumas litologias dessa bacia intracratônica são encontradas aflorantes na região: Formação Botucatu e Formação Serra Geral, do Grupo São Bento e, Formação Itaqueri, do Grupo Bauru. Recobrimo essas rochas se encontra um material retrabalhado areno-argiloso, que varia de pouco centímetros até valores acima de 20 metros (NISHIYAMA E ZUQUETTE, 1994). Esses sedimentos descritos por Nishimaya e Zuquete em 1994 são correspondentes aos depósitos dos sedimentos Cenozoicos.

### 3.2.3.1 Grupo São Bento

De acordo com White (1908) este Grupo formado predominantemente por arenitos sotopostos às rochas da Formação Serra Geral; porém Soares (1973) interpretou um novo arranjo estratigráfico, no qual o Grupo São Bento passou a se referir às rochas das Formações Botucatu, Pirambóia e Serra Geral. Estratigraficamente, o Grupo São Bento encontra-se acima do Grupo Passa Dois e seus sedimentos são considerados como Triássico Médio ao Jurássico Inferior (IPT, 1981).

#### 3.2.3.1.1 FORMAÇÃO BOTUCATU

A primeira citação sobre a Formação Botucatu foi de Gonzaga de Campos (1889, *apud* BUSS *et al.*, 1984). A maior parte dos autores, baseada em uma gama variada de indícios, admitiu que esta unidade tem características de ambiente desértico, predominando a deposição eólica.

A Formação Botucatu apresenta-se com espessura em torno de 150m, na faixa em que ocorre na região (ZUQUETTE, 1981). Além disso, o autor ressalta que existem dificuldades para a determinação de tal faixa, visto que os contatos se apresentam encobertos por materiais coluvionares face a localização geográfica; e também ao grande número de *sills* cortando a formação, acarretando em problemas para a diferenciação entre os derrames sobrejacentes da Formação Serra Geral e dos corpos intrusivos. Outra característica na região, que dificulta a determinação da faixa Botucatu é a presença de enormes corpos de arenitos interderrames, cujas deposições devem ter acontecido entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior.

Nishiyama e Zuquette (1994), em seus trabalhos realizados na região de São Carlos, em uma escala de 1:100.000, mostram que cerca de 60% do município corresponde ao afloramento da Formação Botucatu, apresentando situação de aquífero livre, onde a recarga é considerada direto.

De acordo com Zuquette (1981) essa formação é constituída, predominantemente, por arenitos de granulometria fina a média, com teores de argila variáveis e estratificação cruzada de médio a elevado porte. Esses arenitos podem se apresentar muito friáveis ou silicificados e, apresentando, também, corpos conglomeráticos na base.

Uma das características marcantes do arenito Botucatu na região é a formação de escarpas verticais a subverticais, sustentadas por arenitos intensamente silicificados, que originam desníveis topográficos superiores a 200 metros (MURO,2000).

#### 3.2.3.1.2 FORMAÇÃO SERRA GERAL

As primeiras citações dessa unidade litoestratigráfica foram feitas por Derby (1878) e designa as rochas vulcânicas de caráter básico com extensa distribuição em toda área da Bacia do Paraná, tanto na forma de derrame, quanto de corpos intrusivos (REBOUÇAS, 1994 e PFEIFFER, 1993). Zuquette (1981) define a Formação Serra Geral na região de São Carlos, como sendo composta por derrames basálticos e arenitos eólico interderrames, de idade juru-cretácea.

A Formação Serra Geral é recoberta em discordância angular, geralmente muito discreta, pelas várias formações que constituem o Grupo Bauru, e por sedimentos cenozoicos.

#### 3.2.3.2 FORMAÇÃO ITAQUERI

A área da Serra de Itaqueri é tradicionalmente reconhecida pelos sedimentos da Formação Itaqueri que a recobrem (ALMEIDA E BARBOSA, 1953; IPT, 1981; MELO E PONÇANO, 1983; LADEIRA, 2001). Esta formação ocorre, na área, ora sobreposta aos basaltos da Formação Serra Geral ora aos arenitos eólicos da Formação Botucatu, pertencentes ao Grupo São Bento de idade juro-cretácica.

Nos trabalhos que se sucederam, a unidade foi por vezes mantida neste grupo (AB'SÁBER, 1969; HASUI e SADOWSKI, 1972; SOARES *et al.*, 1980; BRANDT NETO *et al.*, 1981; BARCELOS *et al.*, 1983), a ele correlacionada, mas com possibilidade de ser mais jovem (PONÇANO, 1981), ou ainda referida como cenozoica, pós-Grupo Bauru (COTTAS E BARCELOS, 1981; PONÇANO *et al.*, 1982; BRANDT NETO,1984). A dificuldade na determinação de seu posicionamento estratigráfico deve-se à ausência de continuidade espacial destes materiais com os demais do Grupo Bauru.

Almeida e Barbosa (1953) atribuíram a designação de Formação Itaqueri para os depósitos areno-conglomeráticos que recobrem as serras de Itaqueri, Santana, São Carlos e Cuscuzeiro, situando-a estratigraficamente sob a Formação Marília, com a qual constituiria o

Grupo Bauru. Esta Formação apresenta uma espessura de até 125 m, caracterizada pela alternância de arenitos com matriz argilosa, folhelhos, conglomerados e arenitos intensamente silicificados, destacando a predominância dos primeiros.

Zuquette (1981) define em seu trabalho a Formação Itaqueri como sendo Formação Bauru, e a descreve como arenitos argilosos de coloração marrom-avermelhada, com alguns níveis argilosos e espessuras de no máximo 40 metros; tornando-se muitas vezes de difícil identificação, face a semelhança aos sedimentos cenozoicos que lhe estão superpostos.

Santos e Ladeira (2006) dizem que material se apresenta afetado pelo desenvolvimento de perfis de paleossolos de até 8 m de espessura truncados em seu topo. Uma silicificação afetou todo o pacote, sendo menos intensa em direção à base. Sobreposta discordantemente a este pacote, ocorre uma sequência de camadas lenticulares conglomeráticas irregulares de 1 a 5 m de espessura. Tais conglomerados são inconsolidados ou cimentados por ferro e compostos sobretudo por seixos de sílex e quartzito, além de gnaiss, basalto e granito. Existem camadas alternadas de material arenoso e argiloarenoso, friáveis, mostrando estrutura maciça e muito raramente plano-paralelas e cruzadas.

Sendo assim, o contato dessa Formação com a Formação Serra Geral se dá por uma discordância erosiva, sendo caracterizado por possuir, em sua parte basal, um conjunto conglomerático de seixos de basalto e de arenito, ou um regolito fóssil.

Ladeira *et al.* (2012) descrevem de maneira mais detalhada, em um de seus artigos, os arenitos silicificados da Formação Itaqueri, como sendo um pacote sedimentar com cores amareladas e avermelhadas predominantes, possuindo forte resistência ao golpe do martelo, muitas vezes sendo impossível parti-lo, exceto ao longo de fraturas. Os afloramentos deste material raramente apresentam mais de 10 metros de espessura. A silicificação diminui do topo para a base, sendo que no topo são observadas algumas feições indicativas de antigos solos, tais como marcas de raízes (Figura 19) e estruturas poliédricas preservada.

**Figura 19.** Porosidades de raízes apresentando feições de redução (mais esbranquiçadas) no arenito da Formação Itaqueri silicificada.



**Fonte.** Ladeira *et al.* (2012).

### 3.2.3.3 Depósitos Cenozoicos

Os depósitos cenozoicos tiveram origem por meio do retrabalhamento dos materiais do Grupo Bauru, e de outras formações com razoável competência em meio aquoso e pouco transporte (MURO,2000). Zuquette (1981) alega que os depósitos cenozoicos da região de São Carlos se apresentam mal selecionados, pouco coerentes, com estruturas incipientes; constituindo um depósito superficial de grande extensão.

O domínio dos sedimentos indiferenciados cenozoicos relacionados ao retrabalhamento de outras rochas, geralmente associados a superfícies de aplainamento, ocorre em 6.200 km<sup>2</sup> de área, o que representa 2,5% do território total do estado de São Paulo. Esse domínio é composto apenas por uma unidade geológico-ambiental (DCSR), que engloba as coberturas sedimentares existentes na zona continental, originadas da erosão de variadas rochas que sofreram apenas uma fase de retrabalhamento, através de um pequeno transporte em meio não ou pouco aquoso (CPRM, 2010).

São sedimentos formados principalmente a partir da erosão de arenitos conglomerados que ocorrem nas regiões do entorno, cuja composição das camadas é areia fina e grossa, não ou

pouco estratificada, contendo níveis subordinados de cascalho e materiais argilo-arenosos e ferruginosos. Ocorrem no domínio, de forma localizada, esparsas e aleatórias lateritas sob a forma de blocos e fragmentos soltos sobre a superfície topográfica (CPRM, 2010).

Segundo Soares (1973) os depósitos cenozoicos podem ser subdivididos em terciários e quaternários. Os depósitos terciários são normalmente arenosos, com alguma porcentagem de argila e às vezes, fossilífero, ocorrendo normalmente em áreas com altitudes superiores a 900 metros, geralmente sobre arenitos da Formação Itaqueri.

Já os depósitos quaternários são descritos por Soares (1973) também como arenosos, com presença de cascalhos e, frequentemente, são encontrados nas bases das encostas, ocupando níveis entre 700 e 900 metros. Campanelli (2012) caracteriza os depósitos Quaternários como materiais sedimentares (sedimentos de granulação fina e argilas) e matéria orgânica depositados recentemente pela ação dos rios, ao longo de áreas de fundos de vale (planícies aluvionares).

Um fato interessante é que nas regiões em que o relevo altera de colinas amplas e suaves a planaltos e baixos platôs, observa-se fraca densidade de canais de drenagem. Mesmo com essa variação, o potencial para ocorrência de erosão laminar e de movimentos naturais de massa é baixo, podendo essas áreas ser utilizadas para agricultura ou pastagens, construção de estradas e loteamentos.

De acordo com CPRM (2010) o manto de intemperismo mostra ser profundo e formado por camadas sedimentares pouco consolidadas que apresentam alto grau de escavabilidade, facilitando a instalação de sistemas de irrigação, drenagens ou transporte de água e esgotos, no caso de urbanização com loteamentos. Na implantação de obras de infraestrutura, como estradas ou gasodutos, não há necessidade de executar cortes profundos nem instalação de muitas obras de transposição de drenagens.

Nesse domínio, os tipos de relevo, solos e de sedimentos são favoráveis a que os aquíferos subterrâneos sejam permanentemente recarregados com bom volume de água. Nas áreas em que as características topográficas favorecem a retenção de águas das chuvas, é possível a existência de aquíferos subterrâneos próximos à superfície com boa homogeneidade e hidrodinâmica lateral, fácil acesso e de baixo custo para exploração.

Mas, o predomínio de solos areno-quartzosos, altamente permeáveis, com muito baixa capacidade de reter e eliminar poluentes, devido à alta porosidade e permeabilidade das camadas superficial e subsuperficial. As áreas em que o relevo é do tipo plano e suave ondulado, associado a solo e subsolo com granulometria grosseira, são favoráveis a que defensivos

agrícolas, sejam os utilizados em áreas agrícolas ou aqueles provenientes de vazamentos acidentais, alcancem rapidamente o lençol de água subterrânea.

### 3.2.4 ABASTECIMENTO E CAPTAÇÃO DE ÁGUA

O Plano Estadual de Recursos Hídricos, instituído pela Lei Estadual nº 9.034, de 27 de dezembro de 1994, com a finalidade de auxiliar as atividades de gestão dos recursos hídricos do Estado de São Paulo, dividiu o estado em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) (CETESB, 2007). A área de estudo está localizada na Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 13, referentes à unidade Tietê/Jacaré. Esta unidade é definida pelas bacias hidrográficas de cursos d'água afluentes ao rio Tietê no trecho, de cerca de 140 km, entre as barragens de Ibitinga e Barra Bonita, dos quais se destacam os rios Jacaré-Pepira, Jacaré-Guaçu e Jaú pela margem direita e os rios Bauru e Lençóis pela margem esquerda.

Com relação ao abastecimento de água potável no município de São Carlos (SP), as cabeceiras do rio do Monjolinho fornecem água para o abastecimento público de 19% da cidade. A sub-bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão contribui com 40% do abastecimento, sendo o restante da água obtida através de fontes subterrâneas do aquífero Guarani – poços profundos perfurados (SÃO CARLOS, 2017).

O sistema de captação de água do município de São Carlos (SP), construído entre 1958 e 1960, era composto, inicialmente, por duas estações de captação: uma delas localizada na confluência do rio do Monjolinho com o córrego do Espraiado, conhecida como Captação do Espraiado, e outra nas proximidades da desembocadura do córrego Santa Maria Madalena, conhecida como Captação do Galdino (SAAE, 2011 *apud* SOUZA, 2011).

Em 1969, o município iniciou a captação de água subterrânea proveniente do Aquífero Guarani e em 1971 foi inaugurada a captação de água do ribeirão do Feijão, localizada em área mais preservada (SOUZA, 2011). Com relação ao tratamento da água captada pelo município, a Estação de Tratamento de Água (ETA) de São Carlos (SP) foi fundada em 1959 e recebe água proveniente das captações do ribeirão do Feijão e do Espraiado. Iniciou suas atividades realizando o tratamento de 210 litros/segundo de água e, atualmente, efetua o tratamento de até 540 litros/segundo de água (SAAE, 2012).

Nas proximidades do campus da Universidade Federal de São Carlos, antes da malha urbana de São Carlos (SP), encontra-se a Captação do Espraiado (estação de captação de água

para consumo humano), a qual capta água do rio do Monjolinho (vazão de captação de 180 litros/segundo) e do córrego do Espraiado (vazão de captação de 40 litros/segundo). Esta estação corresponde a 15% da captação de água utilizada na cidade, sendo que uma das vantagens a ela associada refere-se à sua proximidade (cerca de 5 km) em relação à Estação de Tratamento de Água (ETA) (CÔRTEZ, 2000)

Ainda em relação à caracterização geral da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, é importante ressaltar que o município de São Carlos (SP) possui uma lei municipal – Lei N° 13.944, de 12 de janeiro de 2006 – que dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município (APREM) e que tem como um de seus objetivos a promoção do pleno desenvolvimento da função social de abastecimento da população, por meio da proteção e recuperação da qualidade e da quantidade das águas superficiais que compõem as APREM, principalmente através de iniciativas de recomposição da vegetação ciliar, ripária ou de galeria e da implantação de atividades compatíveis com a proteção e recuperação dos mananciais (SÃO CARLOS, 2006). Parte da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, especificamente a montante da estação de captação de água do Espraiado, encontra-se enquadrada nesta lei.

É importante ressaltar que, a partir da data em que essa lei municipal das APREM entrou em vigor no município de São Carlos (SP), tornou-se proibida a reserva e a armazenagem de efluentes industriais nas duas áreas de mananciais delimitadas pela lei (porção da bacia hidrográfica do rio do Monjolinho localizada a montante da estação de captação de água do Espraiado e também a bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão), bem como a disposição final de resíduos sólidos provenientes do sistema de coleta do município.

Em relação a vulnerabilidade das águas subterrâneas, o IG/CETESB/DAEE (1997) caracteriza a área como de médio-alta vulnerabilidade, e algumas manchas de alto-baixa vulnerabilidade. De acordo com Muro (2000) os aquíferos Botucatu e Itaqueri, por serem mais permeáveis, estão mais suscetíveis à contaminação biológica e química, podendo haver a contaminação do lençol freático.

### 3.2.5 MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Os principais materiais inconsolidados (m.i.) encontrados na área de estudo descritos por Fagundes (2010) a partir das orientações de Zuquette e Gandolfi (2004) são quatro m.i.

retrabalhados, sendo eles o aluvião, o colúvio arenoso, o colúvio areno-argiloso, e o arenoso, e; dez tipos de materiais inconsolidados residuais da Formação Itaqueri, da Formação Serra Geral e da Formação Botucatu (Figura 20).

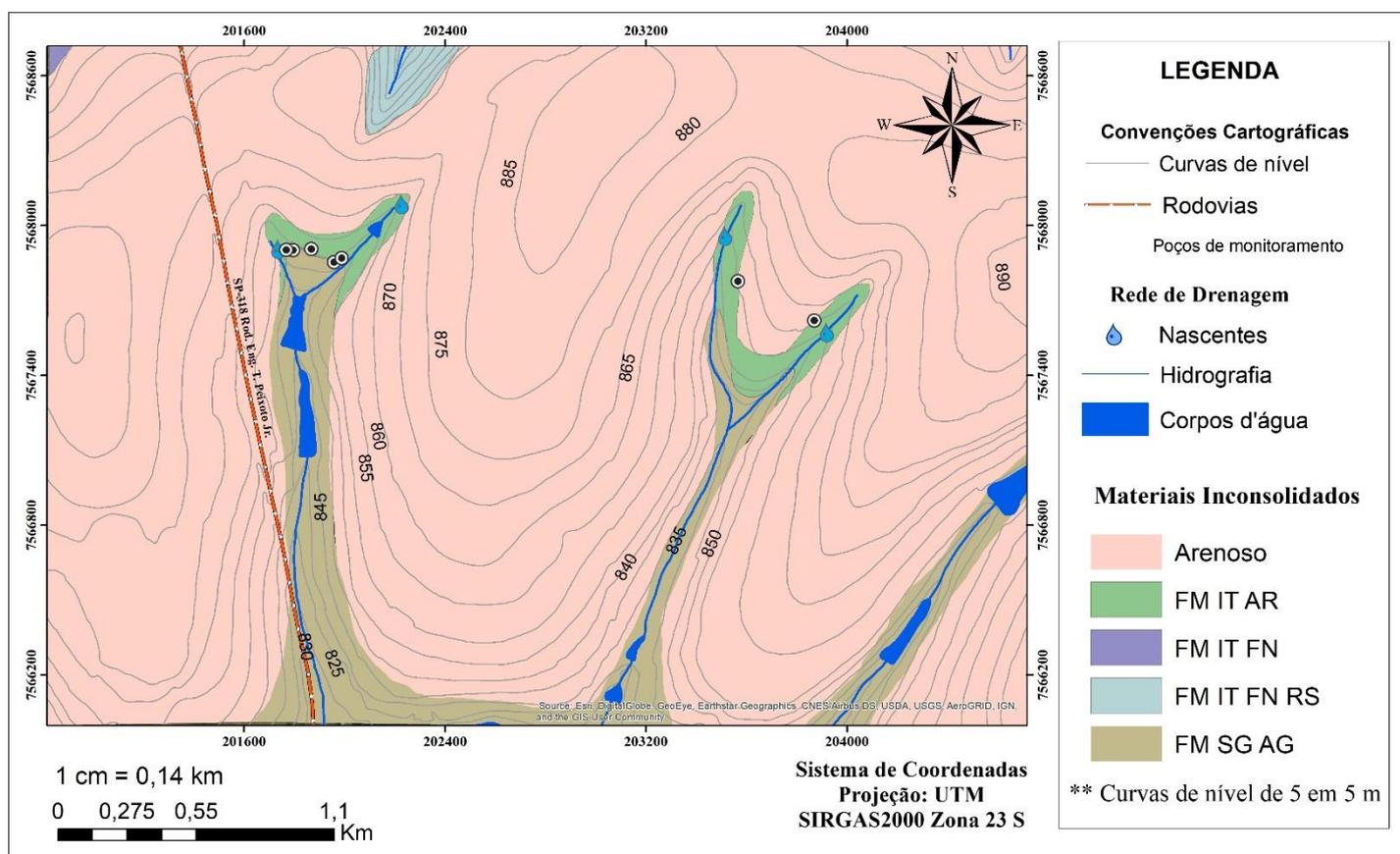
No recorte feito dentro da área de estudo Fagundes (2010), focado na área de pesquisa desta dissertação, identificou-se apenas quatro tipos diferentes de m.i., o retrabalhado arenoso, o m.i. da formação Itaqueri arenoso residual, o m.i. da Formação Itaqueri fino residual e o m.i. da Formação Serra Geral argiloso.

De acordo com Fagundes (2010), os materiais arenosos retrabalhados ocorrem nas porções mais elevadas, separados dos residuais finos por uma camada de seixos (linha de seixo) com espessuras que podem variar de alguns centímetros até superiores a 0,5m. Agora os materiais arenosos com finos da Formação Itaqueri (FM IT AR) aparecem geralmente recobrando os residuais arenosos, já os residuais finos dessa mesma Formação (FM IT FN RS), são originários das alterações das litologias finas (siltitos, argilitos, etc.) da Formação Itaqueri. Encontrados nas encostas suaves, com espessuras que podem atingir 5 metros, repousam sobre litologias da Formação Itaqueri com condutividade hidráulica muito baixa.

Os m.i. argilosos da Formação Serra Geral são materiais originados das alterações dos basaltos e diabásios, podendo atingir 10 m de espessura, constituídos de minerais de argila e óxidos e hidróxidos de ferro.

Santos e Ladeira (2006) alegam que os materiais da Formação Itaqueri compõem cerca de 65 m de espessura, tendo um perfil de alteração laterítico típico com mais de 40 m de espessura, constituído, da base para o topo, por horizonte caulínico, horizonte mosqueado e ferricrete maciço. Estas sequências deposicionais afetadas por perfis de alteração distintos indicam dois processos de formação de solos desenvolvidos em diferentes ambientes, associados a superfícies geomorfológicas regionais. O primeiro afeta a porção superior da Formação Itaqueri silicificada e o outro os materiais da Formação Itaqueri não silicificada.

**Figura 20.** Mapa de materiais inconsolidados da área em estudo.



**Fonte.** Adaptado de Fagundes (2010).

### 3.2.6 CLIMA E VEGETAÇÃO

O clima da região, segundo a classificação internacional de Koeppen (1948), enquadra-se entre o Grupo Aw, dos climas tropicais quentes e o Grupo Cwa, dos climas mesotérmicos com características bem definidas no inverno (período de estiagem) e verão (períodos de chuva). Segundo o DAEE, a precipitação anual média da região é de 1883 mm entre o período de 1959 e 2015. Zuquette et al. (2006), caracteriza a região com uma umidade relativa média de 78,2% e a média anual das temperaturas mínima e máxima de 7,5 °C e 25,9 °C, respectivamente.

De acordo com Oliveira (1996), a vegetação predominante na região é de cerrado e cerradão, caracterizado pela formação não florestal herbáceo-lenhosa, herbáceo-arbustiva com árvores perenifólias. As características dos cerrados são: plantas de pequeno porte, bastante desuniformes, com ocorrência de gramíneas, associado a solos arenosos. O cerradão é composto

por árvores de médio porte e arbustos, associados a solos (MURO, 2000). Zuquette (1981) descreve em seu trabalho que nas encostas, os solos da Formação Serra Geral, associam-se a outro tipo de vegetação, caracterizada por árvores de médio porte e arbustos.

O cerrado foi a vegetação original predominante, ocorrendo nos terrenos arenosos do planalto. O cerradão e a mata tropical semidecídua constituíam a vegetação primitiva em áreas de solos de textura argilosa. A cultura do café possibilitou ao município se tornar um centro econômico e cultural no apogeu do ciclo do café, porém Nishiyama (1991) ressalta que nesse período a vegetação primitiva foi rapidamente retirada.

Graças a condições naturais dos terrenos (declividades acentuadas), que raros núcleos podem apresentar algum tipo de vegetação que não foi convertida para a cultura pecuária e canavieira, ou áreas de reflorestamento. A área em estudo é uma exceção em comparação a maior parte da região, visto que é uma área com regiões em recuperação e outras regiões totalmente recuperadas, na qual o cerrado está presente.

### **3.3 Procedimentos técnicos**

#### **3.3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E BIBLIOMÉTRICA**

O levantamento bibliográfico permite a caracterização da área de estudo, além da construção da base teórica para a investigação dos parâmetros físicos dos ambientes em análise; assim como procedimentos para o estudo de dinâmica da água no solo. Este tópico foi desenvolvido tendo como base a revisão bibliográfica de temas específicos, que fundamentam teoricamente a pesquisa, destacando:

- I-** Recarga de águas subterrâneas;
- II-** Infiltração;
- III-** Escoamento superficial;
- IV-** Monitoramento de recarga de águas subsuperficiais;
- V-** Gestão de águas subsuperficiais e subterrâneas.

O termo “bibliometria”, foi usado pela primeira vez em 1922 por E. Wyndham Hulme, antecedendo à data a qual se atribui a formação da área de Ciência da Informação, com a conotação de esclarecimento dos processos científicos e tecnológicos por meio da contagem de documentos. Hulme pressupõe que após isso, o termo *Statistical Bibliography* foi ignorado por vinte e dois anos, até ser usado por Gosnell, em 1944, em um artigo sobre obsolescência da literatura, sem o reconhecimento de seu uso prévio. Consta da literatura sobre Bibliometria (PAO, 1989) que existiu um intervalo de cerca de vinte anos, até 1962, quando o termo *Statistical Bibliography* foi mencionado pela terceira vez, por L. Miles Raisig, em um estudo sobre análise de citações, intitulado *Bibliography in Health Sciences*.

Okubo (1997) afirma que as abordagens bibliométricas são baseadas na noção de que a produção de conhecimento é a essência da pesquisa científica e, nesse contexto, a literatura científica é a manifestação constituinte do conhecimento. Okubo esclarece que os dados e indicadores bibliométricos podem servir como ferramentas ao menos para a descrição e expressão de questões que surgem no mundo da Ciência. Tague-Sutcliffe (1992) salienta que a bibliometria “é o estudo dos aspectos quantitativos dos processos de produção, disseminação e uso da informação registrada”. O autor acrescenta que a “Bibliometria desenvolve medidas e modelos matemáticos visando à sua utilização em estudos de prospecção e tomadas de decisão”.

Hyland (1999) investiga, do ponto de vista quantitativo e qualitativo, como as práticas de citação acadêmica contribuem para a construção de uma área do conhecimento. Com base na análise de citações em um corpus em meio eletrônico, composto por 80 artigos de periódicos e entrevistas com autores renomados, o autor verifica a variabilidade contextual de citações em oito áreas. Suas conclusões sugerem que as convenções para a produção textual, em cada comunidade discursiva, apresentam formas distintas típicas de negociação e validação do conhecimento.

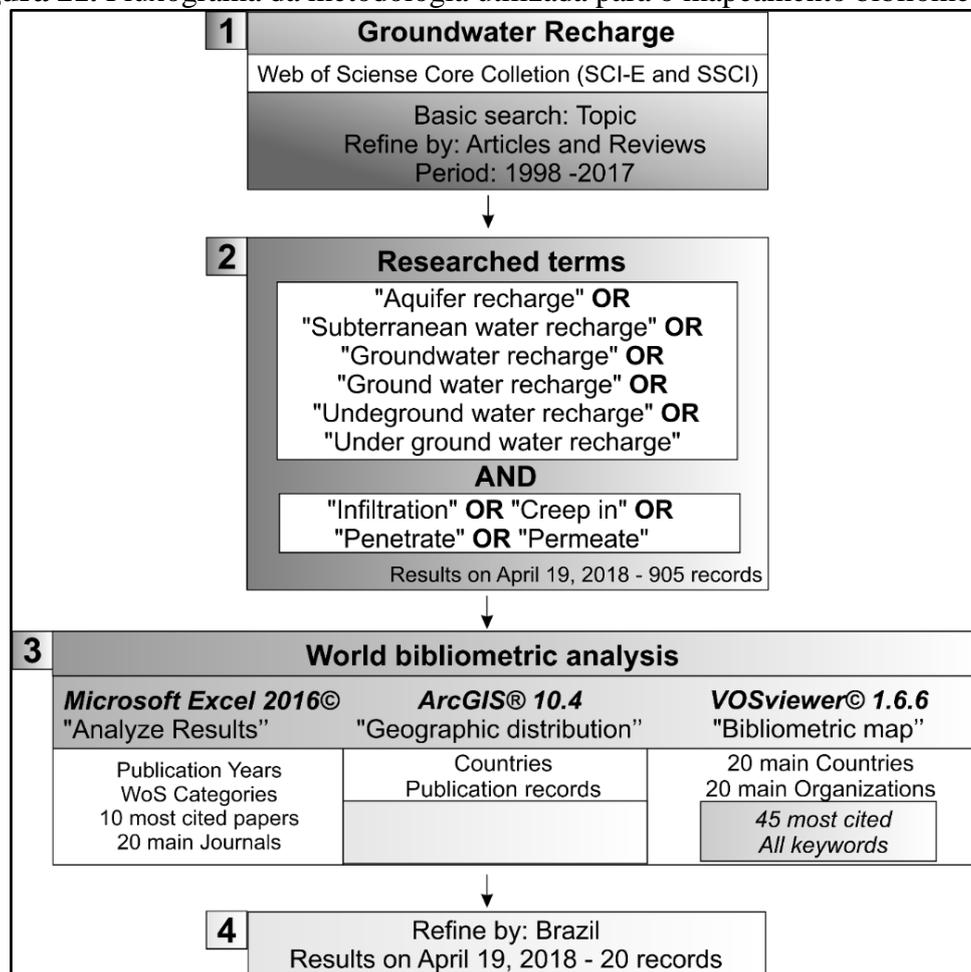
A pesquisa bibliométrica foi realizada a partir da utilização da base de dados *on-line* da *Web of Science*®, escolhida por ser considerada uma base de dados multisetorial e multidisciplinar, sendo extensivamente utilizada por acadêmicos (AZEVEDO *et al.*, 2005). Os dados utilizados neste estudo foram coletados do *Science Citation Index Expanded (SCI-E)* e do *Social Sciences Citation Index (SSCI)* em banco de dados da *ISI Web of Science (WOS)*; <http://isiknowledge.com>) da Thomsom Reuters. Apenas artigos e *reviews* foram utilizados para a análise de dados (FU *et al.*, 2013), visto que são os documentos mais representativos nos resultados de busca, computando 883 artigos (97,6%) e 22 *reviews* (2,4%).

A coleta de dados foi realizada no dia 19 de Abril de 2018 e o período de pesquisa compreendeu os anos de 1998 a 2017, pois a grande maioria dos estudos na área foram

publicados neste intervalo de tempo. A análise consistiu na aplicação de termos que abordam o tema central “recarga de águas subterrâneas”, no campo tópico (Etapa 1). Foram utilizados operadores booleanos e termos sinônimos para recuperar todos os trabalhos relacionados ao tema central (Etapa 2). Posteriormente houve a análise dos documentos a partir das informações transferidas da plataforma *Web of Science*.

As informações transferidas incluíam os nomes dos autores, título, ano de publicação, *Author keywords*, *KeyWords Plus*, resumo, Categorias da Web of Science e nomes de *Journals* que publicaram os artigos (CHUANG *et al.*, 2007). A síntese da metodologia empregada é apresentada na Figura 21.

**Figura 21.** Fluxograma da metodologia utilizada para o mapeamento bibliométrico.



Fonte. Elaborado pela autora.

Os mapas bibliométricos foram desenvolvidos com base na análise de coautoria, com o apoio do *software VOSviewer* versão 1.6.6 © (WALTMAN e VAN ECK, 2016), com o objetivo de discutir as redes de colaboração entre países, organizações e autores. O *software* citado está

disponível gratuitamente para interessados em desenvolverem uma pesquisa bibliométrica e pode ser usado para a construção e análise de mapas bibliométricos.

O *VOSviewer* apresenta funcionalidades de clusterização, calculando a força de conexão entre os membros do *cluster* e Jan van Eck e Waltman (2010) consideram a técnica de agrupamentos e a representação gráfica deste *software* muito mais eficientes, pois não geram problemas na sobreposição de informações como outros softwares. Esse software é ainda pouco conhecido entre os pesquisadores, mas nos últimos anos nota-se um grande aumento de publicações que o utilizaram como método de análise. Desde 2010, com a criação do *VOSviewer*, apenas 85 trabalhos que usassem esse meio foram publicados na base de dados WoS, mas dentre esses 85, 55 foram publicados nos últimos 3 anos.

Além disso, uma ferramenta gráfica foi utilizada, o *software Microsoft Excel 2016*®, para organizar e revelar padrões das características da produção científica em escala global e no Brasil, a partir de tabelas de classificação. A distribuição geográfica dos países mais produtivos foi analisada pelo ArcGIS® 10.4 e, a referência para a geração dos intervalos foi baseada nos valores de publicação para categorizar as classes de mapeamento.

Para a investigação dos tópicos das pesquisas mais populares, suas tendências e lacunas de conhecimento, as *Keywords Plus* e *Authors Keywords* foram analisadas conjuntamente. As *Keywords Plus* fornecem termos adicionais de pesquisa, que foram extraídos dos títulos dos artigos citados e das notas de rodapé (GARFIELD, 1990) e incluem termos importantes (BOUDRY *et al.*, 2018). O banco de dados (Web of Science) usa essas palavras-chave para melhorar a recuperação de informações (MILANEZ *et al.*, 2013).

### 3.3.2 GERAÇÃO DE MAPAS TEMÁTICOS

#### 3.3.2.1 Mapas de Declividade e Hipsométricos

Para a elaboração da base topográfica foram utilizadas as folhas topográficas apresentadas na seção materiais. Estas folhas foram georreferenciadas e articuladas para a vetorização das curvas de nível, que foram digitalizadas de 5 em 5 metros no software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017) e posteriormente foram melhoradas para uma escala de 1:1000 com curvas de 1 em 1 metro. A partir da digitalização das curvas de nível foi elaborado um modelo numérico do terreno (MNT) e, a partir deste, gerados os mapas hipsométrico e de declividade.

No software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2017), através da ferramenta Create TIN, foi adicionado o shapefile “Curvas\_Nivel”, “Pontos\_Cotados” e “Drenagem com sentido de fluxo” e em seguida foi gerado um novo arquivo em formato TIN. A partir deste arquivo foi possível desenvolver os mapas hipsométrico e de declividade, ambos sendo um modelo digital de elevação hidrográfico correto. Para a digitalização da hidrografia, também foram utilizadas as folhas topográficas georreferenciadas apresentadas anteriormente.

#### 3.3.2.4 Mapas de Uso e Ocupação do solo

O mapa de uso e ocupação foi gerado a partir da análise de imagens de satélite multi-temporais referentes aos anos de 2004, 2010, 2014 e 2018, a partir do software Google Earth pro.

A área de estudo foi separada em 5 categorias de uso diferentes, sendo a primeira uma “cobertura arbórea”, representada por uma formação vegetal composta predominantemente por elementos arbóreos que incluem as matas ciliares que acompanham os cursos d’água, além de área de cerrado quando esta apresentar vegetação de maior porte. Nesta classe pode-se incluir também as formações arbóreas plantadas, como pinus e eucalipto, porém, optou-se neste trabalho de separar essas plantações e nomeá-las como “Eucaliptos”.

A terceira área são as regiões de “cobertura herbácea arbustiva”, caracterizada pela presença de formação herbácea e/ou arbustiva. Nessas áreas, o solo está coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas, cuja altura pode variar de alguns decímetros a alguns metros. Dentro dessa categoria se pode incluir áreas de pasto melhoradas ou cultivadas destinadas ao pastoreio e também inclui áreas remanescentes de cerrado.

A quarta categoria são as áreas de “solo exposto”, ou seja, regiões de intervenção antrópica que foram terraplenadas ou aradas, constituindo áreas em transição de uso ou uma fase intermediária do mesmo uso ou ainda áreas onde processos erosivos expuseram o solo. E a quinta e última categoria, são as “áreas construídas”, constituída por extensões de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não-agrícolas. Estão incluídas nessa categoria áreas urbanas de uso residenciais, comerciais e de serviços, além de condomínios residenciais e ocupações esparsas, com baixa concentração de edificações como chácaras residenciais e de lazer, pequenos sítios, localizados distantes da mancha urbana principal ou ao longo de rodovias e vias de acesso.

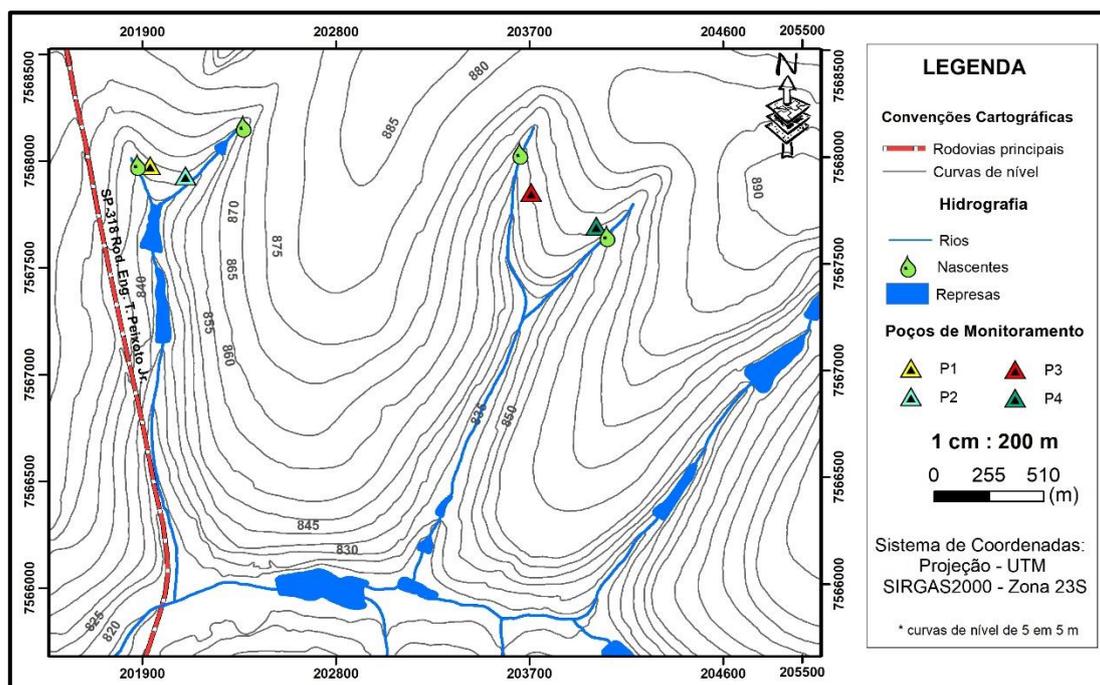
Todas essas categorias de Uso e Ocupação foram geradas se baseando nos mapas da Coordenadoria de Planejamento Ambiental, da Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo.

### 3.3.3 INSTALAÇÃO E MONITORAMENTO DOS POÇOS

Os dados utilizados neste trabalho são provenientes de quatro piezômetros instalados para o monitoramento de água subterrânea das sub-bacias do Córrego do Espriado e do Córrego do Fazare (Figura 22). Os outros três piezômetros instalados na área em estudo foram utilizados exclusivamente para confirmação de dados e de sentido de fluxo da água. Os piezômetros estão dispostos perpendicularmente às margens dos córregos, em distâncias que variam de 50 m a 200 m. As profundidades dos piezômetros variam de 2,5 m a 4,8 m. Por estarem localizados em regiões muito próximas ao curso d'água, esses poços tornam-se suscetíveis às variações do nível d'água desses córregos.

A distribuição espacial dos poços considerou alguns fatores principais, como a existência de áreas livres da impermeabilização, facilidade de acesso, além da necessidade de amostrar toda sua extensão.

**Figura 22.** Mapa topográfico da área de estudo, com localização da instalação dos poços de monitoramentos.



Fonte. Adaptado de Fagundes (2010).

Os piezômetros são de tubo de PVC branco de 4” de diâmetro, revestidos na porção inferior (altura de 1,5 m) com geotêxtil que atua como filtro (Figura 23A). O pré-filtro (altura de 1,5 m) utilizado foram pedriscos de arenito, e acima destes 1,5 metros utilizou-se areia grossa em mais 1/3 da extensão do furo e o restante foi preenchido com areia fina (Figura 23B). Os tubos de PVC, possuem tampas (*caps*) em ambas as extremidades, evitando a entrada de material sólido. Na extremidade superior do tubo de PVC, ou seja, na superfície do terreno, utilizou-se o próprio material escavado (argiloso) com a finalidade de proteção (Figura 23 C e D).

O monitoramento do nível d’água foi realizado mensalmente durante os períodos de secas e quinzenalmente durante os períodos chuvosos, com o auxílio de um medidor de nível do tipo sensor elétrico com fita milimetrada (Figura 24).

Para uma melhor análise dos resultados, dados pluviométricos foram coletados da Estação Meteorológica EMBRAPA Sudeste, localizada a menos de um quilômetro dos piezômetros e dados pluviométricos da Estação Meteorológica do INMET, localizado dentro do campus da UFSCar.

**Figura 23.** Construção dos poços de monitoramento.



**Fonte.** Autora.

**Figura 24.** Medidor de nível d'água elétrico.



**Fonte.** Autora.

### 3.3.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E VALIDAÇÃO DOS DADOS PRÉ-EXISTENTES

No subcapítulo 2.8 ocorreu a apresentação de uma fundamentação clara e objetiva sobre o termo “mapeamento geotécnico”, que segundo Zuquette (1978) é definido como um conjunto de processos sistemáticos de investigação dos atributos, imprescindíveis ao estabelecimento de unidades geotécnicas e passíveis de representação em documentos cartográficos.

Nesse trabalho, o mapeamento se caracteriza pela elaboração de mapas geotécnicos na escala 1:1000 para a validação dos mapeamentos já existentes, ou seja, trata de fazer a reanálise e uma recharacterização do meio físico-geológico, baseado em trabalhos anteriores feitos na região elaborados em escalas inferiores e validá-los a partir de trabalhos de campo.

Esse mapeamento se destina ao planejamento e gestão do uso do solo e de medidas profiláticas relacionadas a recarga de águas na região. De acordo com Pejon (1992) e Zuquette (1993), os trabalhos de mapeamento geotécnico devem ter uma estrutura metódica, obedecendo a uma sequência de três fases:

1ª – Esquematização do problema a ser investigado, com a definição de uma hipótese de trabalho e, definição de atributos do meio físico a serem analisados em função de sua importância para a finalidade do estudo, e sua inter-relação com os demais atributos do estudo.

2ª – Fase de indução e criação, além de inclusão de hipóteses. O raciocínio analógico conduz a um processo classificatório para a divisão da área em unidades homogêneas, com base nas propriedades e relações dos atributos anteriormente escolhidos. Esse é o princípio básico do mapeamento geotécnico.

3ª – Utilização de métodos experimentais para a comprovação de hipóteses ou conjecturas iniciais para verificação e validação das unidades mapeadas anteriormente. Quando necessário, devem ser feitos ensaios *in situ* ou laboratoriais.

As informações obtidas a partir dos trabalhos de campo e ensaios devem ser devidamente registradas, organizadas e agrupadas, de maneira a permitir a compreensão dos mapas quando estes forem gerados. Pejon (1992) destaca que o estabelecimento de unidade homogêneas ou aceitavelmente heterogêneas para a finalidade de um mapeamento, é uma das tarefas mais difíceis dentro das etapas destacadas anteriormente.

### 3.3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Foram realizados vários ensaios visando a caracterização física dos materiais, para o conhecimento do perfil de solo presente em cada área próxima aos piezômetros. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da EESC-USP, São Carlos e no Laboratório de Geotecnia da UFSCar do Campus de São Carlos, de acordo com as normas da ABNT. Os ensaios compreenderam a obtenção da massa específica dos sólidos, a análise granulométrica conjunta e o ensaio de capacidade de troca catiônica (método do papel filtro).

Esses ensaios são feitos em amostras coletadas a cada 10 cm, em todo o perfil onde foi feita a perfuração a trado, próximo aos poços de monitoramento, até atingir o nível freático. Com os dados obtidos é possível classificar o solo de acordo com as normas da ABNT.

#### 3.3.5.1 Ensaio de granulometria conjunta

Este ensaio foi feito com base na norma da ABNT- NBR 7181/84 e teve por objetivo a determinação da análise granulométrica de solos, a partir da combinação do ensaio de sedimentação e peneiramento.

A análise da composição granulométrica conjunta foi feita a partir da observação dos diferentes tamanhos de grãos que tem sua definição auxiliada por um conjunto de peneiras; e averiguou-se a sedimentação por meio das partículas de solo que ficarão em suspensão dentro da proveta, devido a ação da gravidade.

Resumidamente, o ensaio é dividido em duas etapas principais. Na primeira etapa, a fase da sedimentação, o material é peneirado em uma peneira com abertura de 2mm (#10) e , posteriormente, uma solução de 250ml de água + solo + defloculante de uma solução de hexametáfosfato de sódio que foi transferida juntamente com o material peneirado e colocado no dispersor mecânico por 15 minutos (Figura 25). Na segunda etapa, na fase do peneiramento, após o ensaio de sedimentação (Figura 26), realiza-se uma lavagem da suspensão (solo + água + defloculante) na peneira de abertura de 0,074mm (#200), leva-se a porção retida para a estufa até secagem completa e depois resfria-se a amostra até a temperatura ambiente, após esse procedimento pesa-se a massa de sólidos retida na peneira #200 e realiza-se o peneiramento com auxílio do conjunto de peneiras.

**Figura 26** Peneiras e dispersor utilizados durante o ensaio de granulometria conjunta



Fonte. Autora.

**Figura 25.** Ensaio de sedimentação.



Fonte. Autora.

### 3.3.5.2 Massa específica dos sólidos ( $\rho_s$ )

A densidade relativa dos grãos será determinada utilizando o material que passou na peneira #40, cuja abertura de malha é de 0,425 mm, segundo a ABNT-NBR 6508/84. O índice massa específica dos sólidos será determinado empregando-se um frasco de vidro chamado picnômetro (balão volumétrico) (Figura 27). Utilizar-se-á cerca de 100 g do solo a ser analisado, seco em estufa a 105°C, onde será colocado 25 g em quatro picnômetros de 250 ml.

Homogeneizar e pesar com resolução de 0,01g uma quantidade em torno de 50g (argiloso e siltosos) ou de 60g (arenosos), para balão de 500cm<sup>3</sup>; (M1). Colocar em um recipiente e imergir em água destilada (12 horas). Deixa-se então o picnômetro em repouso até que a temperatura do mesmo se equilibre com a do ambiente e com o conta-gotas, será adicionada água destilada até coincidir com a marca de referência. Em seguida enxuga-se a parte externa do picnômetro e ele será auxiliado do termômetro, determina-se a temperatura T do conteúdo do picnômetro para medir a massa do mesmo cheio de água (M<sub>3</sub>) até a marca de referência utilizando a curva de calibração correspondente.

Utilizar conta-gotas para colocar no nível da base do menisco na marca do balão. Pesar o conjunto (Balão, solo e água) (M<sub>2</sub>) e determinar a temperatura. Fazer duas determinações e tomar a média.

Equação 5.

$$\rho_s = \frac{M_1 \times 100 / (100 + w)}{[M_1 \times 100 / (100 + w)] + M_3 - M_2} \rho_{w,T}$$

M<sub>1</sub> = Solo úmido;

M<sub>2</sub> = Balão + solo + água, T.

M<sub>3</sub> = Balão + água;

w = umidade inicial;

$\rho_{w,T}$  = massa específica da água na temperatura de ensaio, T

**Figura 27.** Bomba de pressão para vácuo.



**Fonte.** Autora.

**Figura 28.** Picnômetro + solo + água



**Fonte.** Autora.

### 3.3.5.3 Massa específica aparente seca ( $\rho_d$ )

Assentar o cilindro de cravação, cujo interior deve estar levemente lubrificado com óleo, na superfície do terreno devidamente nivelada e isenta de partículas soltas. Montar o restante do equipamento e iniciar a cravação do cilindro, por intermédio da queda livre do soquete de cravação, tomando o cuidado de manter a haste na posição vertical. A cravação deve ser contínua até que o cilindro fique com sua borda superior 1,0 cm abaixo da superfície do terreno.

Desmontar o conjunto de cravação e com auxílio de pá e picareta escavar o terreno circunvizinho ao cilindro. Cortar o solo por baixo do cilindro, a uma profundidade de no mínimo 5 cm abaixo da sua borda inferior. Utilizando a espátula, remover o excesso de solo e rasar ambas as faces do corpo-de-prova, com auxílio de régua biselada.

A  $\rho_d$  é obtida pela razão entre a massa de um solo seco ( $M_s$ ) e o respectivo volume total ( $V$ ). Nesse caso o teor de umidade do solo é zero ( $w=0$ ).

**Equação 6.** Massa específica aparente seca.

$$p_d = M_s/V$$

#### 3.3.5.4 Ensaio de umidade em campo / Perfil de umidade

Fez-se o monitoramento do perfil de umidades ao longo do tempo através de amostragens deformadas com auxílio de um trado. As amostras extraídas eram colocadas em sacos plásticos e, em seguida, acondicionadas em caixas térmicas para evitar perdas por evaporação, sendo a determinação de umidade feita em laboratório (Figura 29).

**Figura 29.** Execução de tradagem para a determinação do perfil de umidade.



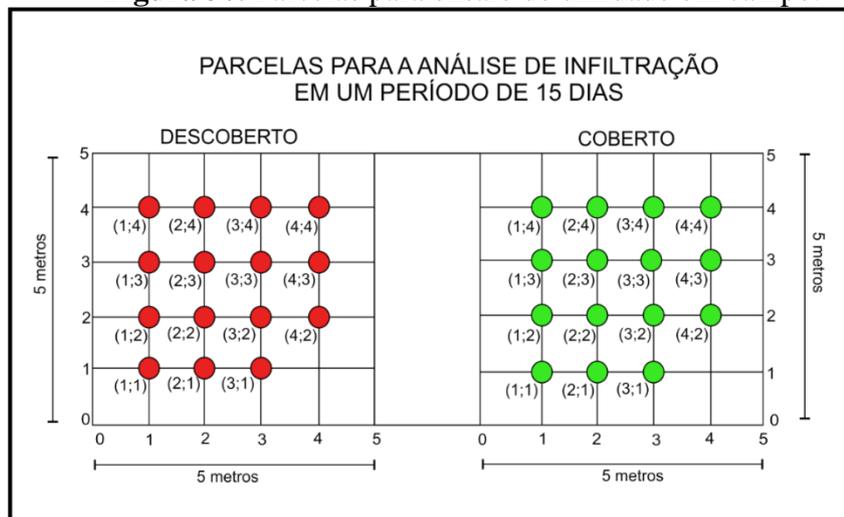
**Fonte.** Elaborada pela autora.

O monitoramento do perfil de umidades perdurou 15 dias, na data de 01/02/2018 a 15/02/2018 e foi realizado em duas parcelas localizadas entre os piezômetros P1 e P2, do córrego do Fazare, sendo que uma das parcelas foi mantida descoberta e outra foi coberta com uma lona para evitar que a chuva infiltrasse no solo (Figura 30 e 31). Além disso, foram feitas canaletas ao redor dessa área coberta, para que houvesse uma menor influência do escoamento superficial na mesma.

Esse período de 15 dias foi escolhido com base em dados pluviométricos existentes anteriormente ao início dos estudos, nos quais mostram que o mês de fevereiro é o mês com maior número de eventos de chuvas, e portanto, seria de mais fácil observação a variação de umidade no solo.

Essa determinação de umidade foi realizada a partir da elaboração de 3 réplicas de cada material amostrado, sendo que o mesmo foi coletado 5 cm a cada 15cm de solo, até atingir a camada de seixos localizada na parte superior do nível d'água. Essas réplicas foram pesadas e colocadas em estufa com uma temperatura de 105°C por um período de 24 horas, e após esse procedimento, todas foram pesadas novamente para obtenção de um valor de umidade do solo (Figura 32).

**Figura 30.** Parcelas para ensaio de umidade em campo.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

**Figura 31.** Delimitação de parcelas



**Fonte.** Elaborado pela autora.

**Figura 32.** Amostras de perfil de monitoramento de umidade, na qual cada cápsula representa 20cm de profundidade, iniciando em 20cm e terminando em 440cm.



**Fonte.** Autora.

#### 3.3.5.5 Ensaio de CTC – Método do Papel Filtro

O método baseia-se em linhas gerais no procedimento descrito por Beaulieu (1979), com modificações propostas por Pejon (1992) referentes à fração granulométrica utilizada para o ensaio e à concentração da solução de azul de metileno. Beaulieu (1979) utilizou partículas de dimensões inferiores a 0,50mm e a adaptação proposta por Pejon (1992) sugere a utilização de amostras que passam na peneira de 2,00mm, de modo que seja possível a obtenção de um índice de adsorção de azul de metileno global (Figuras 33 e 34), o que evita a necessidade de execução do ensaio de granulometria.

A capacidade de troca de cátions é calculada de acordo com a equação 6:

**Equação 7.** Fórmula para a CTC.

$$CTC = \frac{V * C * 100}{M}$$

Onde: CTC = Capacidade de Troca de Cátions (meq/100g ou Cmol/kg)

V = Volume da solução de azul de metileno (ml)

C = Concentração da solução (N)

M = Massa de solos seca (g)

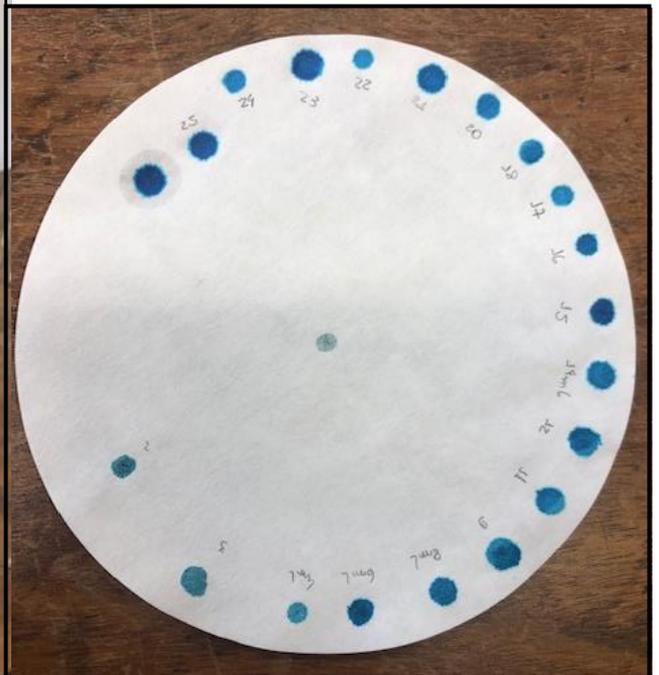
Como os solos tropicais apresentam a fração argilosa constituída predominantemente por minerais de baixa capacidade de adsorção, Pejon (1992) propôs a alteração da concentração da solução de azul de metileno de 10g/l por uma concentração de 1,5g/l, o que permite maior precisão nas determinações.

**Figura 33.** Ensaio CTC



**Fonte.** Autora.

**Figura 34.** Papel filtro com análise da capacidade de adsorção da argila do solo em estudo



**Fonte.** Autora.

A leitura obtida a partir do papel filtro é baseada nos estudos de Grim e Guven (1978) e pode ser observado na tabela 5.

**Tabela 5.** CTC – método azul de metileno.

Mineral	CTC(meq/100g)
Caulinita	3-15
Ilita	10-40
Clorita	10-40
Alofano	35-50
Esmectita	60-150
Vermiculita	100-150
Sepiolita-Paligorsquita	20-30
Pirofilita	4
Talco	1

**Fonte.** Grim e Guven (1978).

#### 3.3.4.6 Índices Físicos

Os índices físicos são analisados a partir de amostras indeformadas. Para retirar as amostras indeformadas foram utilizados anéis feitos de PVC, com bordas biseladas. Estes apresentam dimensões distintas, no qual o tamanho depende do ensaio a ser executado. Para obtenção dos índices físicos foi utilizado um anel com dimensões de 7,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 35). Essas amostras foram coletadas a cada 10cm de profundidade no primeiro um metro do perfil de alteração, para uma melhor avaliação das mudanças desses índices (Figura 35).

**Figura 35.** Anéis de PVC para coleta de amostras indeformadas.



**Fonte.** Autora.

Os índices físicos calculados após a coleta das amostras indeformadas e posterior pesagem, cálculo do volume de solo e água presentes nas amostras são: a massa específica seca ( $\rho_d$ ) (Equação 7), os índices de vazios ( $e$ ) (Equação 8), e porosidade ( $n$ ) (Equação 9).

**Equação 8** - Massa específica seca ( $\rho_d$ )

$$\frac{\gamma_s}{1+e}$$

**Equação 9.** Índice de vazios ( $e$ )

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

**Equação 10.** Porosidade ( $n$ )

$$\frac{e}{1+e}$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são abordadas as análises bibliométricas sobre o tema da pesquisa, sendo analisadas as informações resultantes obtidas a partir da aplicação das técnicas apresentadas na metodologia, bem como discussão destes dados quanto aos temas abordados nos capítulos anteriores. Além disso, neste capítulo constam os diagnósticos a respeito dos dados do monitoramento da flutuação do nível do lençol freático referentes aos córregos do Fazare e do Espriado, no período de um ano, além de toda a discussão referente aos problemas gerados pelo aumento da urbanização ao redor de áreas de nascentes, a caracterização detalhada da área após validação dos mapas e discussões a respeito dos períodos de chuvas e secas na região em estudo.

Quanto às discussões sobre esta temática no âmbito científico se reconhece que a aplicação do método WTF no Brasil se intensificou a partir da década de 2000. Sendo estes norteadores da aplicação deste método nas sub-bacias hidrográficas representativas. Destaca-se que estudos sobre a recarga das águas subterrâneas são importantíssimas para os processos de gestão e uso deste recurso, seguindo os preceitos da sustentabilidade. Porém para determinação da recarga e realização das análises de modo sistemático é necessário a aplicação de algumas técnicas laboratoriais que possibilitam melhor compreensão da pesquisa.

### 4.1 Análise Bibliométrica no âmbito mundial e nacional

#### 4.1.1 A EVOLUÇÃO CIENTÍFICA: ANÁLISE PRÉVIA E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

O primeiro artigo indexado no banco de dados WoS, foi publicado em 1967, por Smith, L.O, no *Journal Water Resources Research*, intitulado “*Infiltration in sands and its relation to groundwater recharge*”. O segundo artigo surgiu sete anos após o anterior. Ao avaliar a base de dados da WoS, nota-se que apenas a partir da década de 90 as publicações nesta área se tornaram constantes.

Desde a primeira publicação (1967) de um artigo sobre a recarga de águas subterrâneas até o final da década de 90, mais especificamente, 1997, o total de publicações indexadas na

plataforma *WoS* (entre 1967 a 2017) representavam 9,9% de todas as publicações referentes, ou seja, os 20 últimos anos refletem 90,1% de todas as publicações indexadas na plataforma *WoS*. Isto se deve ao aumento da preocupação mundial sobre este tema em questão, que vem surgindo nas últimas décadas, visto que a quantificação da recarga de água subterrânea é uma pré-condição vital para uma gestão eficiente dos recursos hídricos (MOON *et al.* 2004, DEWANDEL *et al.* 2010), particularmente em regiões semi-áridas (SCANLON *et al.* 2006, SMERDON *et al.* 2010) e áreas onde há superexploração (HUGMAN *et al.* 2012), ou seja, a extração de água do aquífero é superior à sua reposição natural.

Esta pesquisa foi relacionada às cinco categorias principais de acordo com o *Web of Science (WoS Categories): Water Resources, Geosciences multidisciplinary, Environmental Sciences, Civil Engineering e Environmental Engineering*. A evolução das publicações entre os anos de 1998 a 2017, associada as cinco principais áreas de pesquisa podem ser observadas na Figura 35.

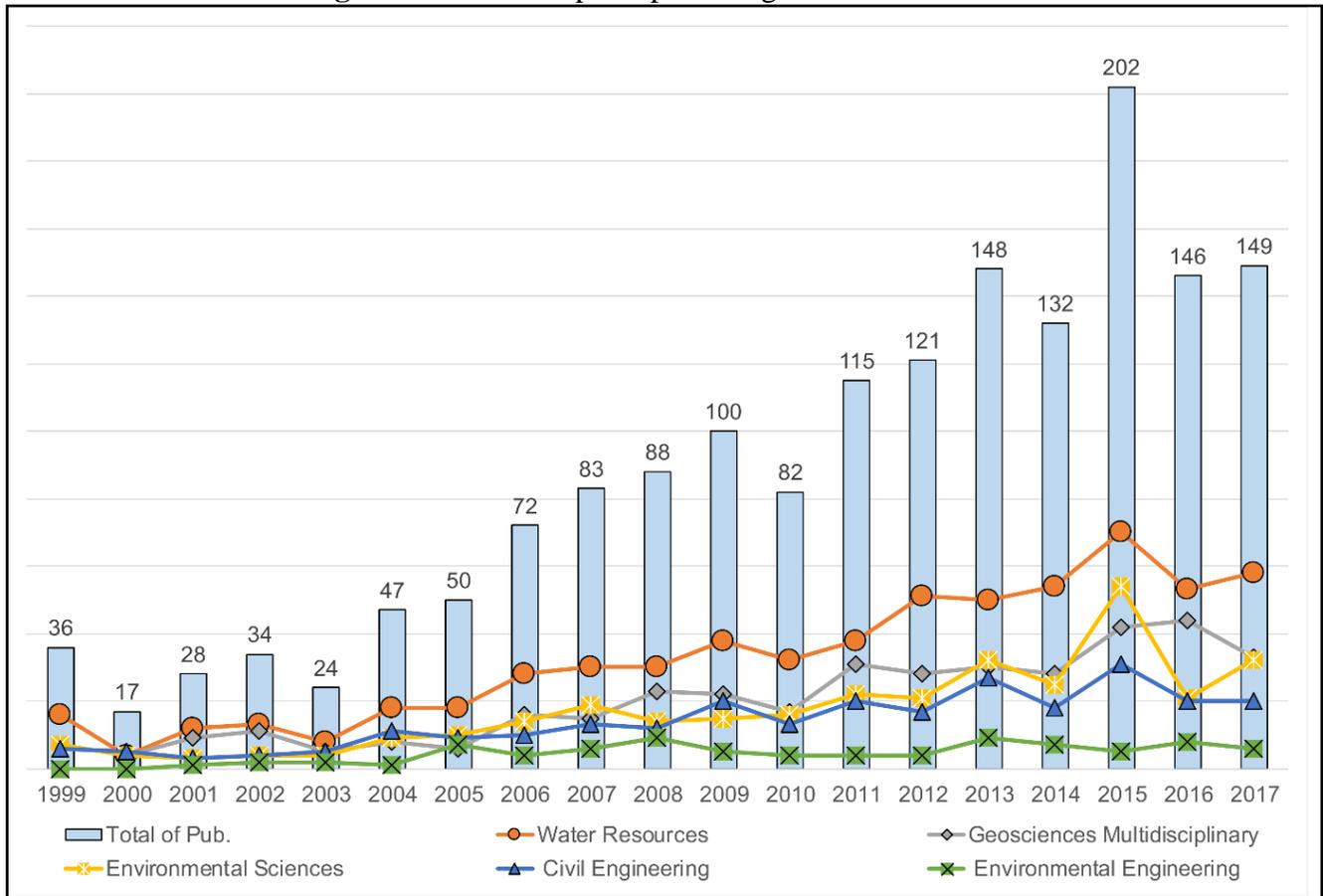
Nos dez primeiros anos visíveis na Figura 36, as publicações ocorreram de forma contínua, contudo, nota-se um aumento expressivo do número de publicações a partir de 2006. Antes desse período, apesar de apresentarem alguns anos com picos, sempre totalizaram valores inferiores a 50 publicações. A partir do ano de 2009, vê-se uma tendência de aumento mais linear das publicações, que refletiram nos últimos 5 anos, apontando um crescimento acentuado no número de artigos e *reviews* mostrando, assim, que realmente, essa temática representa uma das fronteiras para a pesquisa relacionadas à água subterrânea.

A área de *Environmental Engineering* acumulou o menor número de publicações, não apresentando durante os 20 últimos anos nenhum crescimento representativo, dentre os temas mais publicados nesta categoria estão os artigos com enfoque em contaminação de águas e geoquímica de águas, tendo em vista que esse tema se caracteriza como uma área menor dentro do contexto da engenharia ambiental.

Já a área de *Civil Engineering* foi a segunda com menor número de publicações, de acordo com a Figura 36, embora apresente alguns aumentos significativos nos anos de 2013 e 2015. Esse crescimento visível de publicações na área, nos últimos anos, pode ser justificado pelo crescimento da preocupação mundial com a crise hídrica. De acordo com Hu *et al.* (2010), esta categoria visa artigos de manejo e gestão sustentável dos recursos hídricos, além de se caracterizar pelas aplicações matemáticas como a elaboração de modelos numéricos para a simulação e cálculos de balanços hídricos (DUSSAILLANT *et al.*, 2004); o melhoramento de algoritmo para o cálculo de evapotranspiração (WU *et al.*, 2012); ou para cálculos do

rebaixamento artificial do nível d'água para os obras de engenharia e mineração (SHOURIAN e DAVOUDI ,2017).

**Figura 36.** As cinco principais categorias do Web of Science.



**Fonte.** Elaborada pela autora.

Na categoria *Environmental Sciences*, os trabalhos se referem, em geral, a estudos mais voltados para a estimacão da recarga das águas subterrâneas e de recargas artificiais dos aqferos. A segunda categoria com maior número de publicaes foi a *Geosciences Multidisciplinary*, que teve como sede a publicao de artigos, como o próprio nome da categoria diz, multidisciplinares, baseados no desenvolvimento de recursos hídricos a partir da geomorfologia e geologia, no monitoramento e modelagem de recarga de guas, no mapeamento de águas subterrâneas e na influência da urbanizao na manuteno dos recursos hídricos, além da gestão e manejo desses recursos.

*Water Resources* foi a categoria do WoS que teve o maior número de publicaes nos últimos 20 anos além disso, esta área de pesquisa teve um aumento gradual desde o ano de 2003 e se manteve em crescimento até o ano de 2015, mas nos últimos dois anos sofreu uma leve

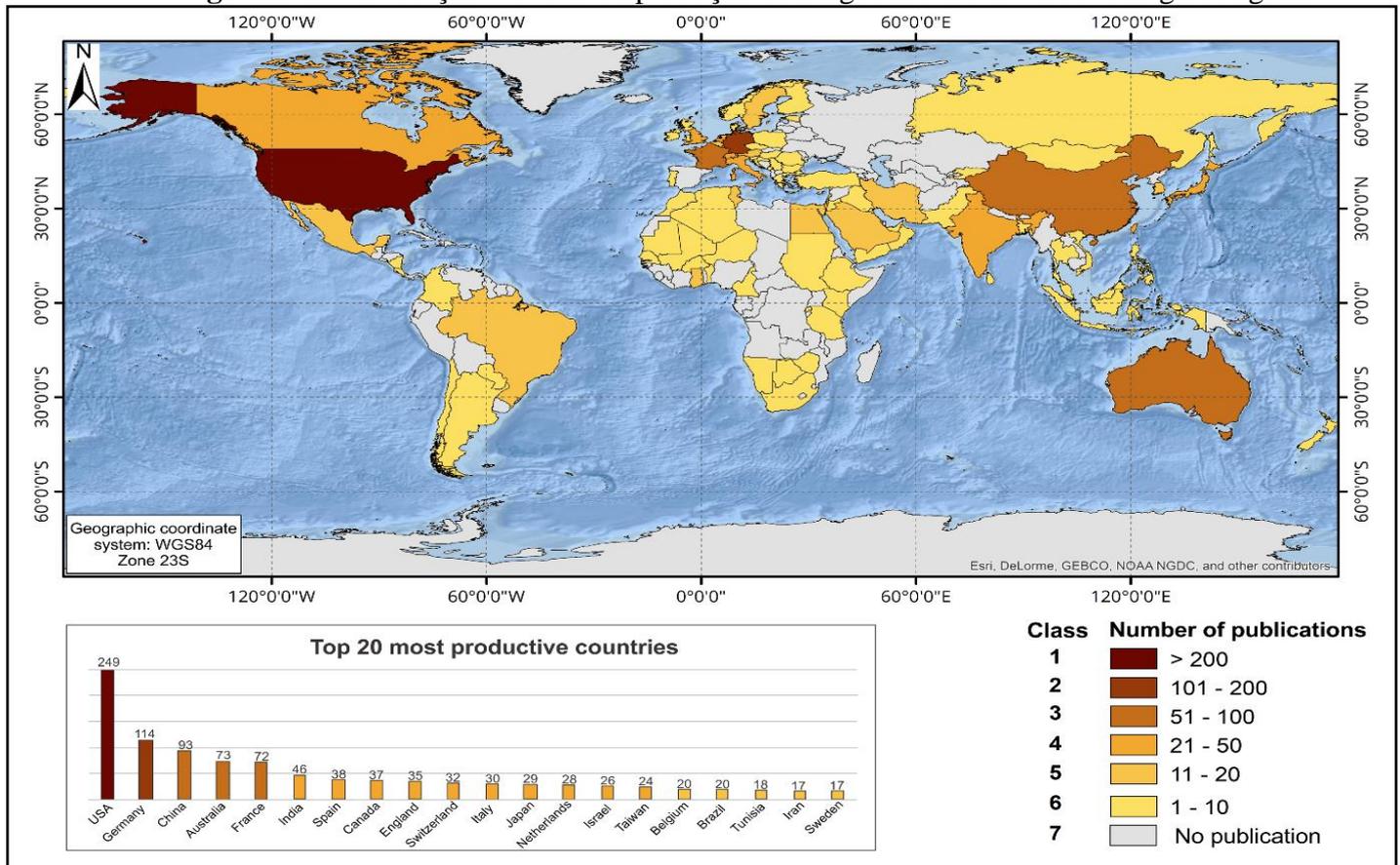
queda de publicações. Os principais assuntos tratados nesta categoria do WoS foram modelagem de recursos hídricos, análise e monitoramento do balanço hídrico, mecanismos para recarga de águas subterrâneas, geoquímica de águas e manejo e gestão de recursos hídricos.

A distribuição mundial das publicações sobre a temática de recarga de águas subterrâneas, dos últimos 20 anos, apresenta-se de maneira heterogênea (Figura 37). No total, essa repartição abrange 96 países distintos, englobando cinco continentes. Os EUA se destacam em relação ao número de publicações e, sozinhos, totalizam 27,4% de toda a produção mundial. A grande quantidade de periódicos a serem publicados na língua inglesa, bem como a economia norte-americana, podem justificar a liderança americana (OKUBO,1997). A Alemanha, China, Austrália e França ficam com 38,8% das publicações e isso se refletirá explicitamente nas discussões das próximas categorias.

Ao fazer a análise da Figura 37, a classe 1 (> 200 publicações) é composta unicamente pelos EUA, com um total de 249 artigos. A Classe 2 (101-200 publicações) é composta, também, por um único país, a Alemanha, com um total de 114 publicações sobre recarga de águas subterrâneas. A Classe 3 (51-100) representa a China, Austrália e França, com 93, 73 e 72 artigos publicados, respectivamente. A Classe 4 (21 – 50) apresenta dez países produtores, dentre os quais cinco são europeus (Espanha, Inglaterra, Suíça, Itália e Países Baixos), quatro são asiáticos (Índia, Japão, Israel e Taiwan) e o Canadá, norte americano.

A Classe 5 (11 – 20) é composta por 11 países, entre eles o Brasil, que ocupa a 18ª posição no *ranking* dos 20 países mais produtivos do mundo, e corresponde a 2,2% de toda a produção mundial. A última classe (Classe 6), que representa países que contém publicações entre 1 até 10, contempla um total de setenta países, dentre eles podemos está o México, Portugal, Argentina, Croácia e Rússia.

**Figura 37.** Distribuição mundial da produção de artigos sobre o tema de recarga de águas.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

#### 4.1.2 PRINCIPAIS REVISTAS E ARTIGOS IMPORTANTES NA ÁREA

Os artigos indexados nessa área foram publicados em um total de 203 revistas diferentes. As 20 revistas que mais publicaram sobre o assunto, conforme listado na Quadro 6, somam cerca de 65,8% do total de publicações. A *Journal of Hydrology* é a revista que mais publica na área, representando aproximadamente 10,6% do total, posteriormente temos: *Hydrogeology Journal* (8,1%), *Hydrological Processes* (7,3%), *Environment Earth Sciences* (5,6%) e *Water Resources Research* (3,4%).

Destaca-se também que dentre as 20 revistas mais importantes na área de recarga de águas subterrâneas, dez são revistas americanas e dez são revistas europeias, divididas em quatro países: Países Baixos, Alemanha, Inglaterra e Suíça.

**Quadro 6.** As 20 revistas mais importantes na área de recarga de águas subterrâneas.

RANK	JOURNAL	COUNTRY	NP*	RANK	JOURNAL	COUNTRY	NP*
1	J. of Hydrology	NETH	96	11	Sci. of the Total Envir.	NETH	18
2	Hydrogeology J.	USA	73	12	Water Resour. Manag.	NETH	18
3	Hydrological Processes	USA	66	13	Arabian J. of Geosc.	GER	16
4	Envir. Earth Sci.	USA	51	14	Hydrological. Sci. J.	ENG	16
5	Water Resour. Res.	USA	31	15	Envir. Geology	USA	13
6	Hydro. & Earth S. Sci.	GER	27	16	Water	SWI	12
7	Vadose Zone J.	USA	24	17	Desal. and Water Treat.	USA	11
8	J. of Hydrologic Eng.	USA	23	18	Appllied Geoch.	England	9
9	Water Sci. and Tech.	England	23	19	Envir.Sci. & Tech.	USA	9
10	Water Research	England	20	20	Ground Water	USA	9

\*NP – Número de publicações; Desal – Desalination; Envir – Environmental; Eng – Engineering; Geoch – Geochemistry; Geosc – Geosciences; Hydro. – Hydrology; J – Journal; Manag – Management; Res – Research; Resour – Resources; Sci – Sciences; S – System; Tech - Technology; Treat – Treatment.

**Fonte.** Elaborada pela autora.

Os artigos mais antigos, dentre os mais citados, foram publicados no ano de 2001 e tiveram 213 e 104 citações, e abordaram os efeitos da urbanização nos fluxos de água em bacias mais e menos urbanizadas e sobre o aumento a longo prazo de um lençol freático localizado em uma região semiárida, respectivamente. Okubo (1997) ressalta que a tendência de número de citações está diretamente ligada a idade do artigo publicado e nesta área não foi diferente, pois os dois artigos mais citados são do ano de 2002, e apresentam 389 e 335 citações, respectivamente, além de contemplar temas muito atuais como o uso da estimação da flutuação do nível de água para estimar uma recarga subterrânea e sobre recargas artificiais aplicadas nas áreas de engenharia civil e hidrogeologia.

Em análise ao Quadro 7, nota-se que mesmo nos artigos mais antigos, ainda sendo os mais citados, está ocorrendo uma mudança nesse padrão, visto que dois artigos dos anos de 2011, e um de 2012 estão no top 10 de citações.

Healy e Cook (2002) e Price (2011) foram os dois artigos de maior importância para este trabalho, entre o top 10 mais citados, visto que Healy e Cook (2002) abordam o tema sobre recarga de águas subterrâneas e *water table fluctuation* diretamente neste artigo, além de trazer abordagens muito importantes sobre a recarga de águas subterrâneas correlacionadas a eventos pluviográficos. Já Price (2011), traz conceitos sobre gestão, gerenciamento e conservação de águas subterrâneas, atrelados a conceitos de uso e ocupação do solo urbano e seus principais efeitos sobre as águas.

**Quadro 7.** Os dez artigos mais citados nos últimos 20 anos sobre recarga de águas.

<b>RANK</b>	<b>YEAR</b>	<b>ARTICLE TITLE</b>	<b>JOURNAL</b>	<b>AUTHORS</b>	<b>T.C.</b>
1	2002	<i>Using groundwater levels to estimate recharge</i>	<i>Hydrogeology Journal</i>	Healy, RW; Cook, PG	389
2	2002	<i>Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering</i>	<i>Hydrogeology Journal</i>	Bouwer, H	335
3	2001	<i>Effects of urbanization on streamflow in the Atlanta area (Georgia, USA): a comparative hydrological approach</i>	<i>Hydrological Processes</i>	Rose, S; Peters, N.E	213
4	2003	<i>A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain</i>	<i>Hydrological Processes</i>	Kendy, E et al.	127
5	2008	<i>Methanogenic pathways of coal-bed gas in the Powder River Basin, United States: The geologic factor</i>	<i>International Journal of Coal Geology</i>	Flores, R. M et al.	115
6	2011	<i>Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: A review</i>	<i>Progress in Physical Geography</i>	Price, K.	110
7	2011	<i>Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management</i>	<i>Hydrology and Earth System Sciences</i>	Mango, L. M et al.	110
8	2001	<i>Long-term rise in a sahelian water-table: the Continental Terminal in South-West Niger</i>	<i>Journal of Hydrology</i>	Leduc, C; Favreau, G; Schroeter, P	104
9	2006	<i>Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward?</i>	<i>Hydrogeology Journal</i>	Holman, I. P.	101
10	2012	<i>Ecohydrological consequences of drought- and infestation- triggered tree die-off: insights and hypotheses</i>	<i>Ecohydrology</i>	Adams, H. D. et al.	96

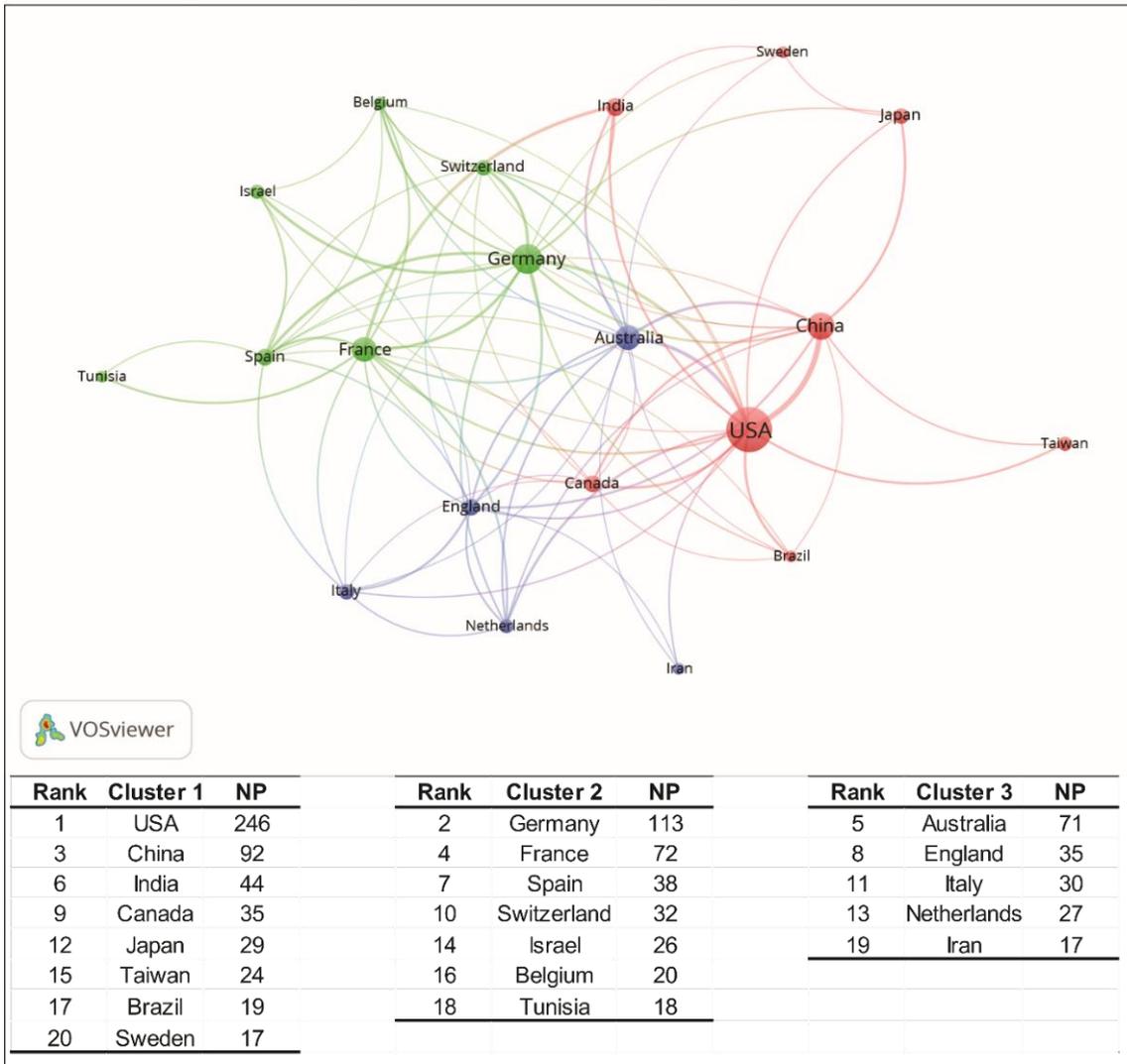
**Fonte.** Elaborado pela autora.

#### 4.1.3 COLABORAÇÃO INTERNACIONAL E PRODUTIVIDADE

As redes de colaboração foram analisadas a partir de três parâmetros diferentes, sendo o primeiro critério os países em si, o segundo as organizações que representam esses países e o terceiro, os autores com maiores números de citações de cada país. As figuras 38, 39 e 40 apresentam as redes com linhas, cuja largura representa o total de publicações feitas em parcerias, e as cores indicam o *cluster* que a determinado item pertence. As redes apresentam apenas os países, organizações e autores que mais publicam na área de recarga de águas subterrâneas, respectivamente.

O mapa bibliométrico apresentado na Figura 38 mostra os 20 países mais produtivos, e foram distribuídos em 3 *clusters* diferentes. Relacionado aos estudos científicos voltados para a recarga de águas subterrâneas, é notável a contribuição dos EUA e da China, visto que publicaram uma quantidade considerável de estudos e, em parceria, foram publicados um total de 23 artigos, sendo o link mais marcante do mapa, o que explica o fato de ambos pertencerem ao mesmo cluster. A Alemanha, juntamente com a França, forma o segundo *link* mais forte do mapa, totalizando sete publicações em conjunto. A Austrália é o quinto país com maior número de publicações, e ela apresenta publicações em conjunto com as outras quatro potências acima dela. Ao observar a Figura 38, pode-se notar que a Austrália, França e Alemanha estão no centro dos *clusters* e, isso implica que esses países fazem uma mais colaboração com outros países e outros *clusters*.

**Figura 38.** Mapa bibliométrico da categoria países, dividido e clusters.

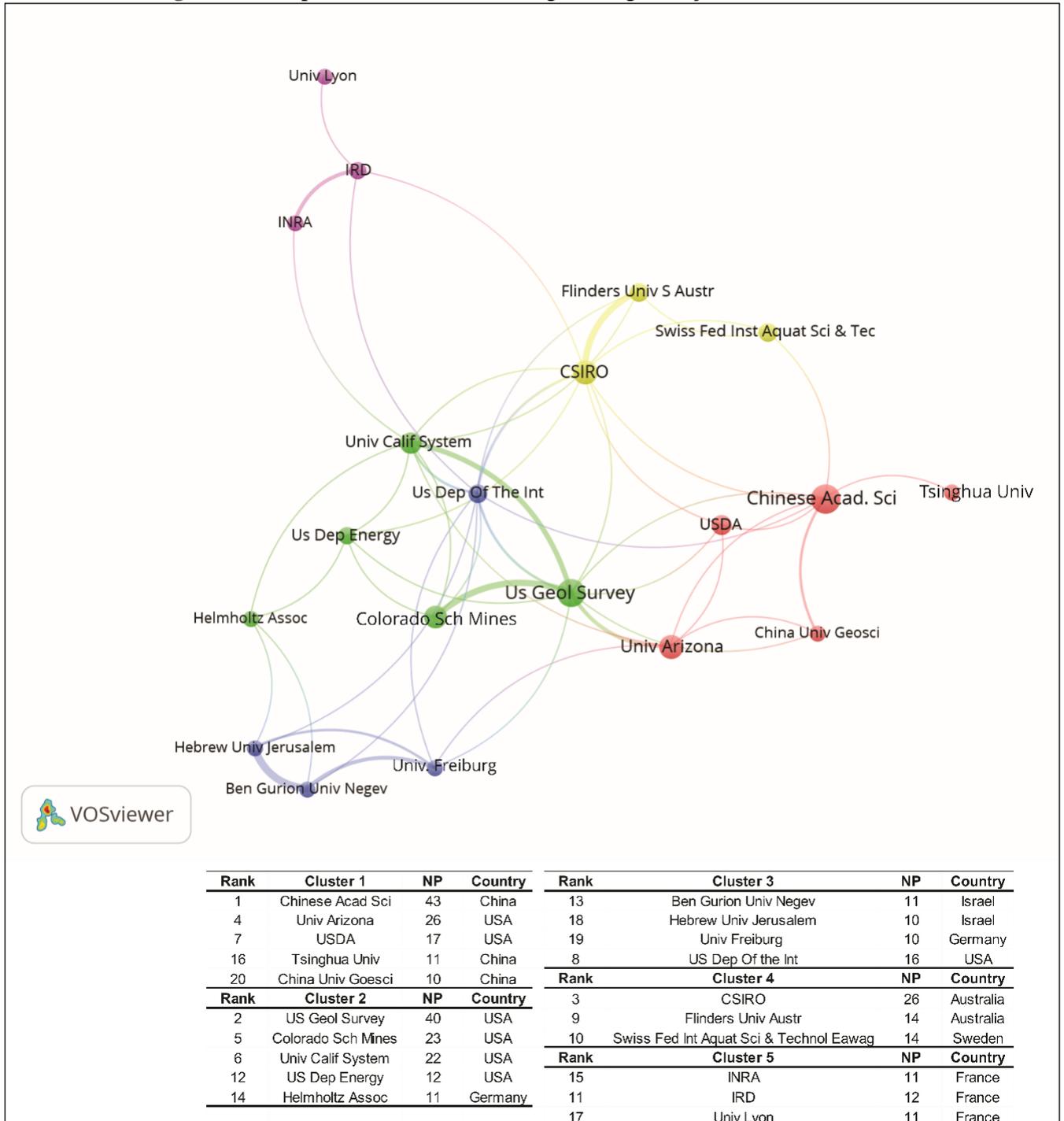


**Fonte.** Elaborado pela autora.

A Figura 39 apresenta a colaboração entre as 20 organizações mais produtivas nesta área, divididas em cinco *clusters*. A distribuição das instituições ocorreu de maneira parcialmente heterogênea, entretanto o *Cluster 5* (rosa) é totalmente homogêneo, representado unicamente por instituições francesas, mas os outros clusters nunca estão isolados.

No *Cluster 1* (vermelho), a *Chinese Academic Sciences* é a mais produtiva e estabelece relações colaborativas com outras duas instituições chinesas que possuem um número inferior de produções, além de manter relações com a Universidade do Arizona e com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), que são instituições muito conhecidas por suas grandes publicações. No *Cluster 2* (verde) se tem o destaque de instituições americanas, associadas a um centro de pesquisa alemão.

**Figura 39.** Mapa bibliométrico da categoria organizações, dividido em clusters.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

O *Cluster 3* (azul) apresenta duas instituições israelenses, uma germânica, uma americana, sendo o agrupamento mais heterogêneo dentre todos no estudo. Ressalta-se também que todas as instituições deste cluster apresentam uma média de publicações bem semelhantes. E por último, o *Cluster 4* (amarelo), é constituído por duas instituições australianas e uma sueca,

com um destaque para o número de publicações da CSIRO, que é uma organização nacional de pesquisa australiana.

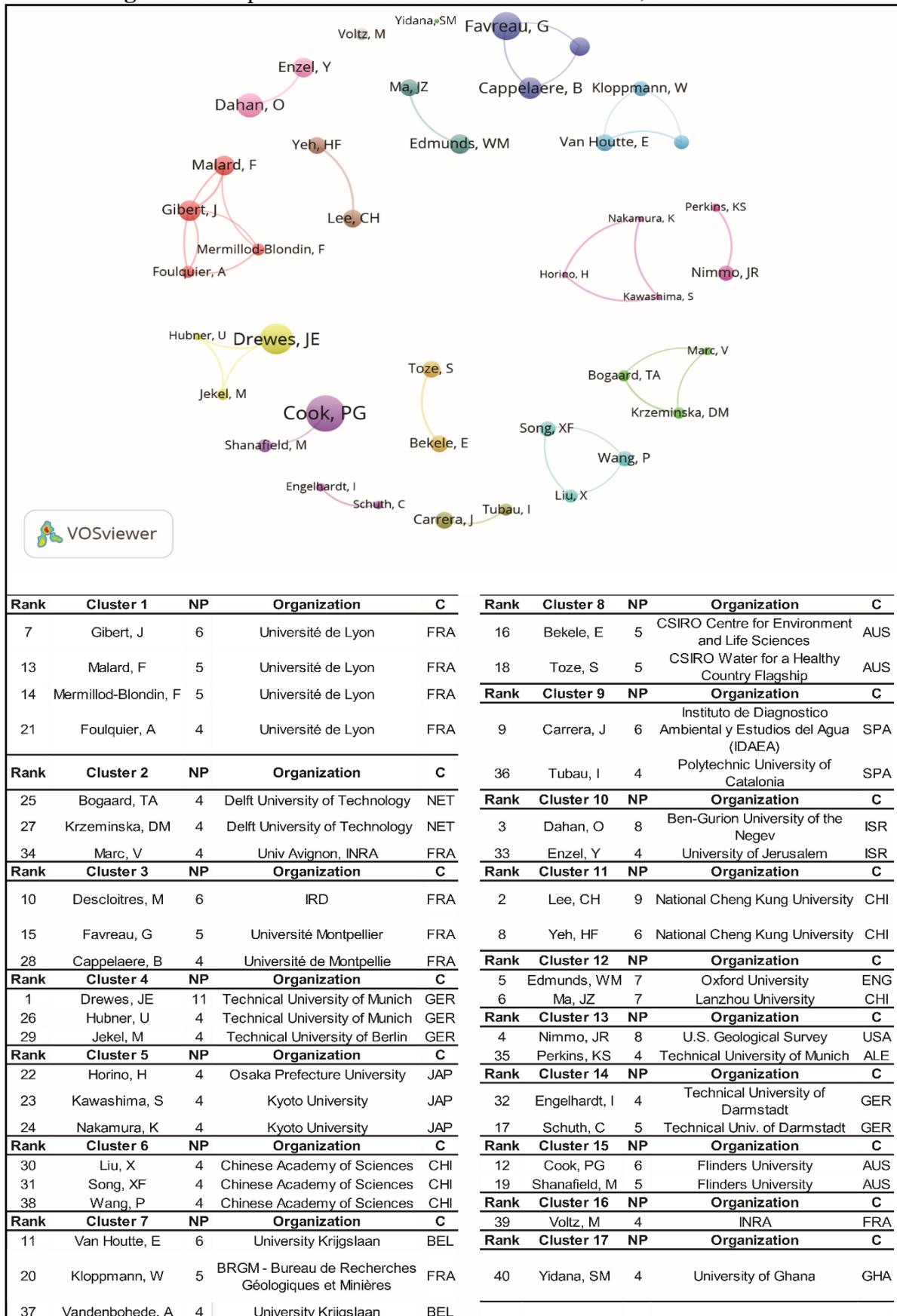
A Figura 40 mostra um detalhamento baseado na relação entre os 40 principais autores que publicam nessa área. A diferenciação nesta figura não se dá somente pela espessura da linha, mas também pelo tamanho do símbolo que representa cada autor, demonstrando a quantidade de citações que o mesmo obteve ao longo da vida, publicando nesta área.

Uma importante discussão sobre esta figura é que a partir da análise dos 17 *clusters*, pode-se concluir que os EUA, apesar do grande número de publicações, produzem nesta área majoritariamente em coautoria, não sendo representado nos clusters dessa categoria de autores principais mais citados, com exceção do Nimo, J.R., que no caso é o quarto autor que mais publica como autor primário e, além disso, as redes de colaboração, podem ser resultado da pesquisa desenvolvidas por autores, de outras instituições que não possuem um número tão significativo de publicações.

Ao contrário da França, que se mantém em todos os mapas como referência na área e tem seu destaque aumentado expressivamente neste mapa bibliométrico, apresentando 3 dos 17 clusters, unicamente franceses, e mais dois em que o país está vinculado. Além da França, o país europeu que teve destaque na área de recarga de águas subterrâneas foi a Alemanha. Um fato interessante é que Nimo, J.R. além de ser o único americano autor principal, ele aparece em colaboração por instituições, como o Serviço Geológico Americano, que está bem no meio do mapa de instituições (Figura 40), logo é uma das que mais colaboram com as instituições de outros países, o que elucida o fato do EUA também estar no meio do mapa de colaboração por país e comprova que a colaboração é marcada por outros autores, além dos que mais publicam.

O autor mais citado na área em estudo foi o alemão Drewes, G.E. A Ásia também teve uma alta representatividade em autorias na área, totalizando quatro clusters uniformemente deles, sendo representados por Japão, China e Israel. Inclusive, o segundo autor mais citado na área de recarga de águas é o chinês Lee, C. H. A Austrália foi representada por dois clusters no mapa em estudo, referentes ao CSIRO e a Universidade de Flinders.

Figura 40. Mapa bibliométrico de autores mais citados, divididos em *clusters*.



Fonte. Elaborado pela autora.

#### 4.1.3.1 Assuntos principais das pesquisas e allkeywords

De acordo com Zhang et al (2016), a WoS é considerada uma das principais fontes bibliográficas de informação e os registros presentes nessa base incluem dois tipos de palavras-chave: as *author keywords*, que são aquelas fornecidas pelos autores originais, e as *Keywords Plus*, que são extraídas dos títulos das referências citadas pela Thomson Reuters. O mapa bibliométrico (Figura 41) gerado neste trabalho foi baseado nas *allkeywords*, ou seja, na combinação das *author keywords* e das *keywords plus*.

As *Keywords Plus* fornecem termos adicionais de pesquisa e são palavras ou frases que aparecem com frequência nos títulos dos artigos citados pelos autores em suas bibliografias e não necessariamente no título do artigo, em palavras-chave do mesmo e em suas notas de rodapé (GARFIELD, 1990; GARFIELD e SHER, 1993). Garfield afirmou também que os termos das *Keywords Plus* são capazes de capturar o conteúdo de um artigo com maior profundidade e variedade (GARFIELD, 1990). Portanto, os termos do *Keywords Plus* foram usados para identificar tendências de pesquisa em uma variedade de campos científicos, desde pesquisa de pentaclorofenol (HUANG, AO, & HO, 2008) até pesquisa relacionada à transferência de genes (WEN, YU e HO, 2009).

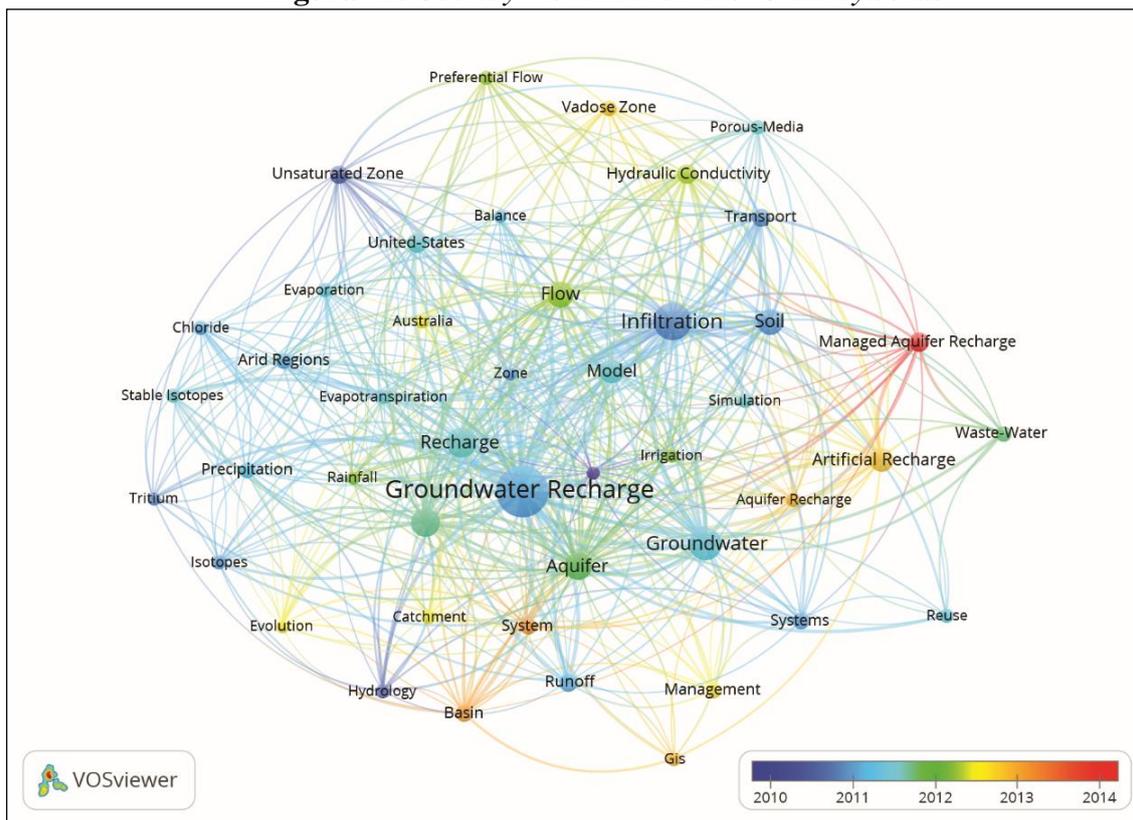
Um importante passo antes de se darem início às análises principais foi uma análise preliminar para a elaboração de um *thesaurus* (ROGET, P. 1852), no qual se gera uma lista de palavras agrupadas de acordo com a similaridade de significado e, geralmente, listadas em ordem alfabética. As palavras agrupadas foram as seguintes: *System/systems*, *EUA/United States*, *soil/soils*, *aquifer/aquifers*.

Nas figuras 41 e 42 se verifica a presença de 3 clusters principais, nos quais, a expressão *groundwater recharge* conecta esses três grupos, e é o termo que apresenta o maior número de ocorrências (363) na área, fazendo uma média de 880 ligações com outras sentenças relevantes para o campo em estudo.

Analisando as *allkeywords* se observa que os EUA e a Austrália têm um maior número de estudos e publicações, voltados para a área de geoquímica de águas e hidrologia (*cluster* vermelho). Já o *Cluster* Azul é uma área que mais foca em estudos sobre modelagem e simulações de fluxo de águas, e o *Cluster* Verde trata de um assunto que, atualmente, está mundialmente em alta, o monitoramento, gestão e manejo de águas subterrâneas associados aos sistemas de informações geográficas (GIS).



**Figura 42.** *Overlay* visualization das 45 *allkeywords*



**Fonte.** Elaborado pela autora.

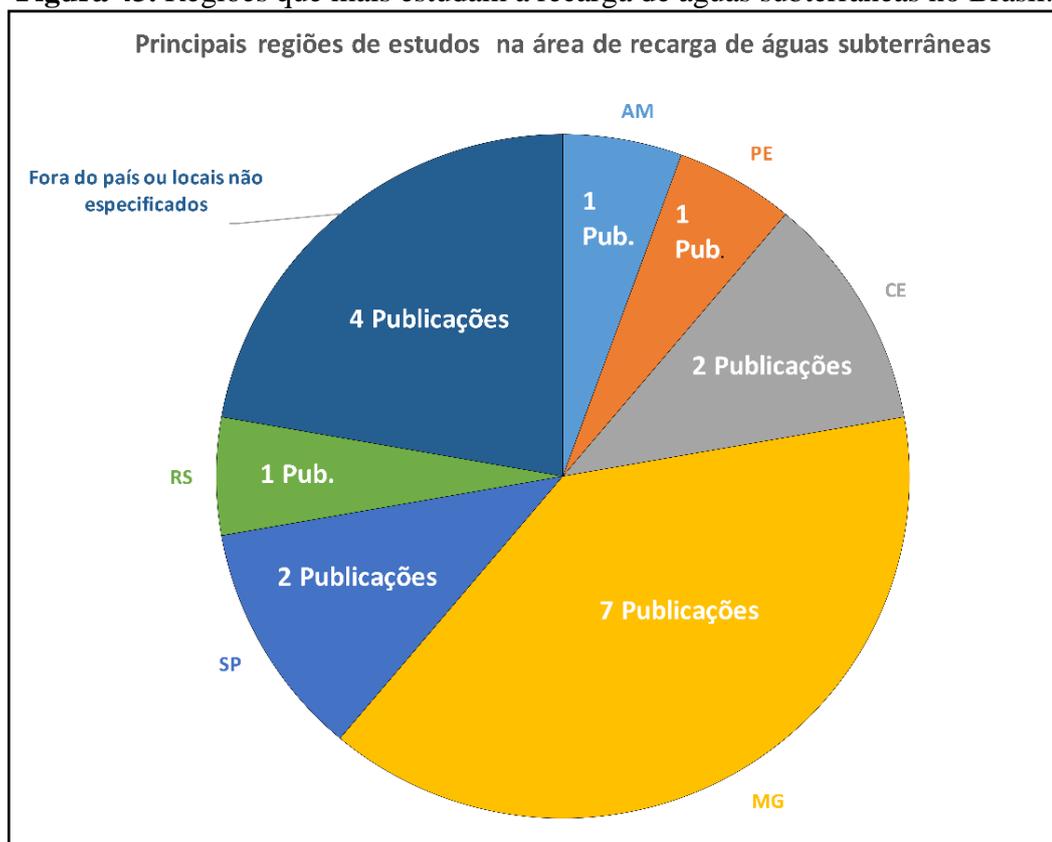
#### 4.1.4 ANÁLISES BIBLIOMÉTRICAS APLICADAS NO BRASIL

O Brasil é o 18º país no ranking dos que mais publicam sobre o tema de recarga de águas subterrâneas, contudo um montante de apenas vinte artigos foi indexado na plataforma *Web of Science*. O primeiro artigo indexado foi no ano de 1999 e, apenas após sete anos, um novo artigo com esse tema foi para publicação. Foi no ano de 2017, contudo, que com a preocupação global referente à crise hídrica, os trabalhos tiveram um aumento substancial, com seis artigos publicados.

Esse primeiro artigo, de 1999, é o mais citado (46 vezes) até então, e foi baseado em um estudo sobre a precipitação interna e o fluxo de chuva em sistemas agroflorestais e florestas primárias na Amazônia Central, sendo publicado pela *Hydrological Processes*. Os estudos foram comandados pela Embrapa de Manaus e duas Universidades Alemãs (Braunschweig e Bayreuth). O Brasil fez parcerias em artigos com as principais potências na área de pesquisa de recarga de águas subterrâneas, sendo elas EUA, Alemanha, China, Austrália e França.

Ao fazer a análise desses artigos brasileiros, dividindo-os por regiões do Brasil (Figura 43), nota-se um predomínio de pesquisas na região de Minas Gerais (MG). Essas pesquisas foram vinculadas a quatro universidades brasileiras: a Universidade Federal de Lavras, a Universidade Federal de Ouro Preto, a Universidade Federal de Viçosa, todas mineiras e, a Universidade de São Paulo. Cinco dos sete artigos sobre a região de MG são exclusivamente de colaborações brasileiras, e dois apresentam participação de universidades dos EUA.

**Figura 43.** Regiões que mais estudam a recarga de águas subterrâneas no Brasil.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

A justificativa principal dos estudos ocorridos na região sudeste brasileira é a presença de uma importante região de cabeceira que engloba as bacias hidrográficas é a Região da Serra da Mantiqueira (RSM). Muitos rios são originários da RSM, e alimentam importantes reservatórios de usinas hidrelétricas do país (BESKOW *et al.*, 2009; VIOLA *et al.*, 2014). Na RSM, pode-se encontrar os últimos remanescentes da Mata Atlântica no Brasil. Geralmente esse bioma é o mais rico em diversidades de espécies, compreendendo até 8% do total de espécies do mundo (MYERS *et al.*, 2000). Infelizmente, apesar dessa grande diversidade, Mata Atlântica é um dos ecossistemas mais ameaçados no planeta (COLOMBO e JOLY, 2010;

MYERS *et al.*, 2000). Levando em consideração esses recursos, a RSM deve ser considerada uma área prioritária para a conservação no Brasil (PINTO *et al.*, 2017).

A segunda região com maior número de publicações foram áreas fora do país, ou não especificadas pelo autor, sendo entre elas Portugal, Austrália, América do Sul e China. O artigo sobre estudos de gestão de águas para o desenvolvimento de políticas de bioenergia, voltado para a América do Sul, foi o nono artigo brasileiro publicado e o mais diversificado em nacionalidades, tendo a participação de instituições latino-americanas, como a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da Universidade Federal de Pernambuco, o Instituto Nacional de *Tecnología Agropecuaria de Buenos Aires* (Argentina), além de parceria com instituições norte americanas como o *Centro de Investigación y Docencia Económicas* (CIDE – México), a *Thompson Rivers University* (Canadá) e três universidades estadunidenses: *Michigan, New Hampshire e Arizona*.

Os estudos realizados pela Universidade Federal do Ceará em parceria com a Faculdade de Tecnologia do Cariri, a Universidade de São Paulo, a Universidade Estadual de São Paulo e a Universidade de Potsdam (Alemanha), foram voltados para a região da Chapada do Araripe. O desmatamento com seus efeitos de alterações na estrutura do solo e na recarga dos aquíferos da Chapada do Araripe pode ser a causa da redução nas vazões de fontes que surgem na encosta (Mendonça, 2009). Esse fenômeno foi identificado por Kemper, Gonçalves e Bezerra (1995). Estudos realizados por Mendonça (2001), de áreas preservadas na Floresta Nacional do Araripe (Flona) para áreas desmatadas, mostraram um aumento na densidade aparente dos solos e uma redução na matéria orgânica, umidade, porosidade e condutividade hidráulica. A alteração destes parâmetros levou à redução na capacidade de infiltração e a um possível esgotamento do solo com conseqüente empobrecimento florestal. Nesta mesma área, Leite, Figueiredo e Silva (1990) observaram uma redução na água disponível no solo das áreas desmatadas em comparação com áreas preservadas.

#### **4.2 Descrição e interpretação da área de estudo**

Este subcapítulo aborda uma descrição mais detalhada dos materiais geológicos presentes na área de estudo, enfocando as particularidades de cada um em uma escala local de 1:1000. Esta é considerada uma etapa fundamental do trabalho, pois permitiu a obtenção da variabilidade destes materiais tanto em termos de distribuição em área quanto em profundidade,

além de fornecer subsídios para o estabelecimento dos condicionantes para a dinâmica das águas de maneira mais realista, no tocante às propriedades dos materiais geológicos.

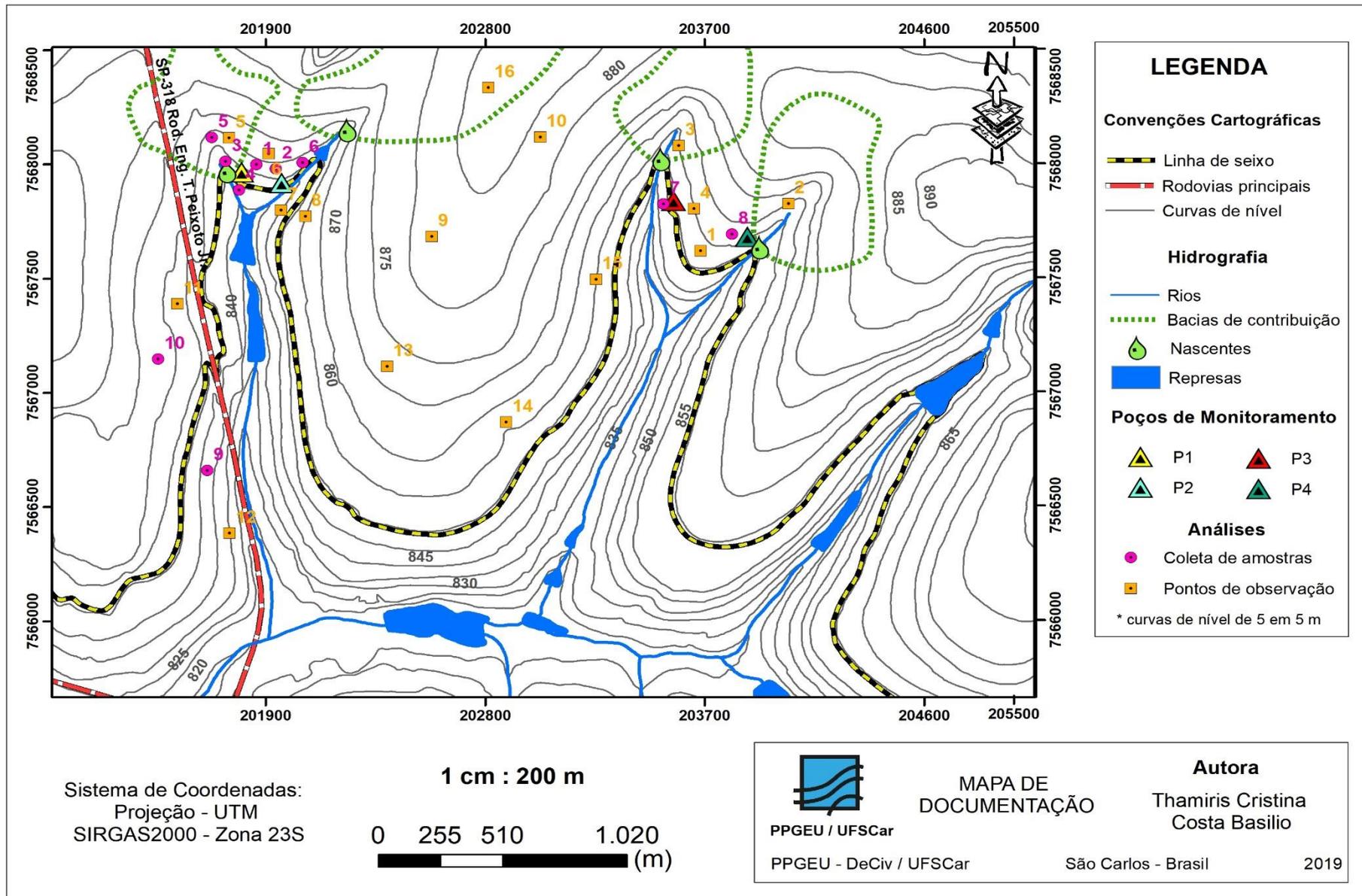
Sendo assim, a partir de fotointerpretação, trabalhos de campo e de laboratório, a área de estudo foi representada por meio dos mapas que serão citados ao longo deste subcapítulo. Tais mapas permitiram a individualização de subáreas com características semelhantes em termos de dinâmica das águas, orientando, por conseguinte os trabalhos de campo posteriores.

Deve-se ressaltar, também, a importância desta etapa para a definição do modelo conceitual de infiltração e fluxo subsuperficial da área, uma vez que a variabilidade dos materiais geológicos condiciona estas características. É considerada, portanto, o ponto de partida para trabalhos de modelagem hidrogeológica posteriores.

#### 4.2.1 MAPA DE DOCUMENTAÇÃO

O Mapa de documentação (Figura 44) foi o primeiro documento cartográfico elaborado e contém as seguintes informações referentes à área: limite da área em estudo; rede hidrográfica (Córrego do Espraiado e Córrego do Fazare) e suas respectivas nascentes; curvas de nível de cinco em cinco metros geradas em mapeamento do IGC em uma escala 1:10 000, que foi detalhada no trabalho para curvas de 1 em 1 metro para melhor adequação a escala de mapeamento 1:1000. Além disso, estão presentes nesse mapa de documentação, os pontos cotados; uma parte do perímetro urbano de São Carlos (SP); as principais rodovias (SP 318 – Rodovia Engenheiro Thales de Lorena Peixoto Jr.); a localização dos poços de monitoramento e bacias de contribuição; os pontos de observação e descrição de perfil de solo, os locais de coletas de amostras; as áreas de campo experimental onde ocorreram os ensaios de infiltração de área coberta e descoberta e, os pontos de observação para a validação do mapeamento geotécnico.

Figura 44. Mapa de documentação da área de estudo.



Fonte. Elaborado pela autora

#### 4.2.2 MODELO DIGITAL DE TERRENO E CARTA DE DECLIVIDADE

O mapa de declividade (Figura 45) tem o objetivo de demonstrar as inclinações de uma área em relação a um eixo horizontal e serve como fonte de informações das formas do relevo, das aptidões agrícolas, riscos de erosão, restrições no uso e ocupação, dinâmica de contaminantes em um meio e o sentido de fluxo de águas.

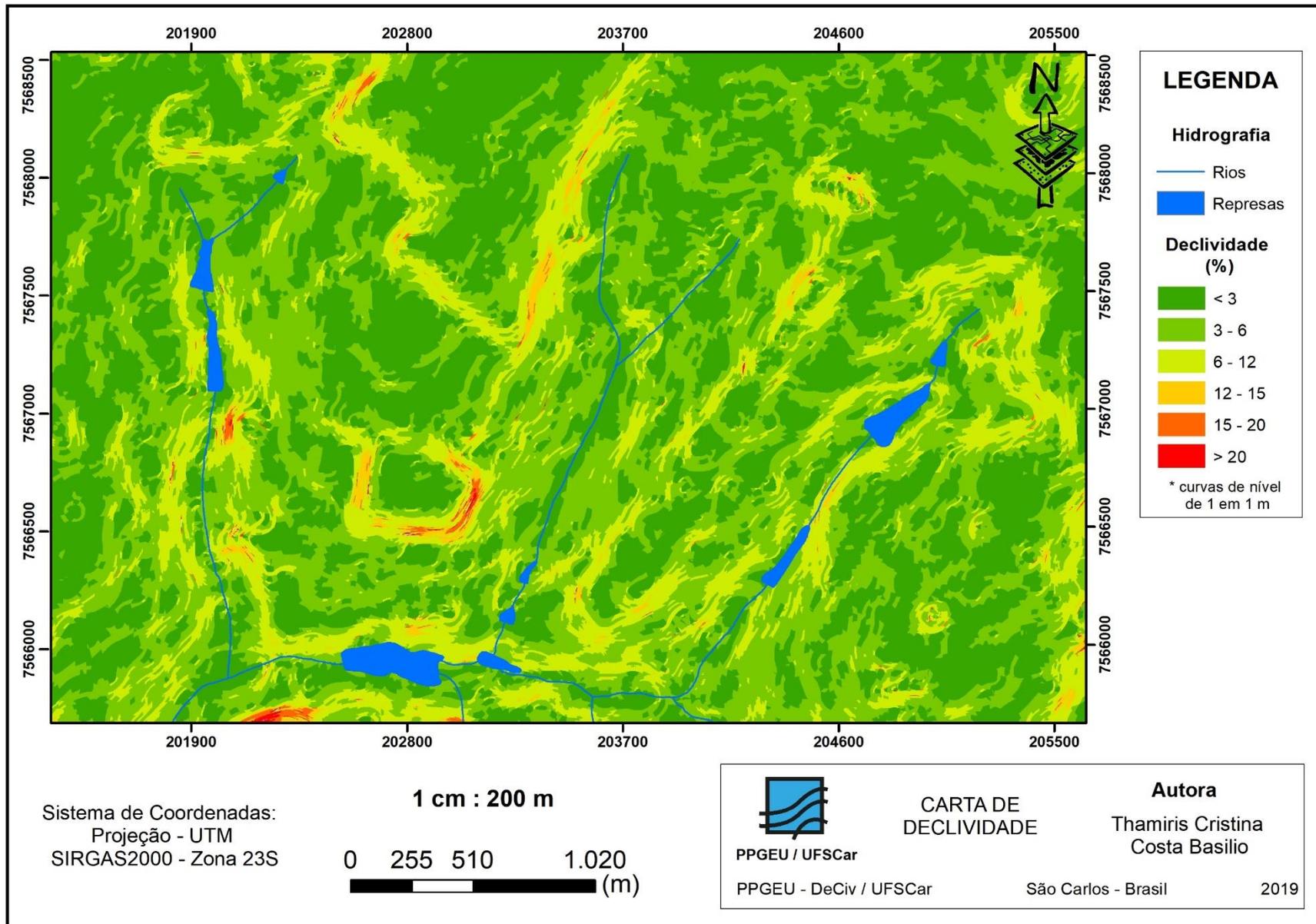
A declividade de um terreno tem fundamental importância na avaliação da vulnerabilidade das águas subsuperficiais, pois esta condiciona o tempo de permanência de um contaminante em uma determinada área. Além disso, é uma das variáveis usadas na avaliação do escoamento superficial e a infiltração do terreno. Segundo Rubim (1996), o escoamento superficial só ocorre quando a intensidade da precipitação é maior que a capacidade de infiltração do solo, ou seja, a capacidade de infiltração é controlada pela intensidade de chuvas. Em uma carta topográfica, é possível verificar a declividade através da proximidade das curvas de nível. Quando estas estiverem mais próximas, a declividade será maior e quanto mais afastada, menor será a declividade.

Outros fatores que devem ser considerados em conjunto com a declividade são as interferências no escoamento, como exemplo, os cordões de nível para a agricultura, que aumentam o tempo de concentração de água no local. Outro fator importante é a cobertura vegetal, que pode interceptar a precipitação e diminuir a velocidade da infiltração e a extensão de um escoamento superficial.

Para a definição do intervalo do mapa de declividade, foram levados em conta os trabalhos de Lepsch *et al.* (1991), Ross (1995) e De Biase (1970) e EMBRAPA (2006) (Quadro 8), sendo adaptadas as classes segundo a realidade da área de estudo, que não possui declividades muito superiores a 20°.

As classes de declividade adotadas foram as seguintes: < 3%, 3 – 6%, 6 – 12%, 12 – 15%, 15 – 20% e > 20% (Figura 45). As porcentagens, em área, da declividade, podem ser observadas no gráfico da Figura 46, na qual as maiores ocorrências são das classes 0-3% (39,69% da área) e 3-6% (41%) de declividade, que representam as áreas com menores potenciais de escoamento superficial e menor fragilidade ambiental. Na área em estudo não foram observados locais com declividades superiores a 30%, ou seja, com potenciais de escoamento superficial muito altos e conseqüentemente, com áreas com alta fragilidade ambiental, de acordo com EMBRAPA (2006).

Figura 45. Mapa de declividade.

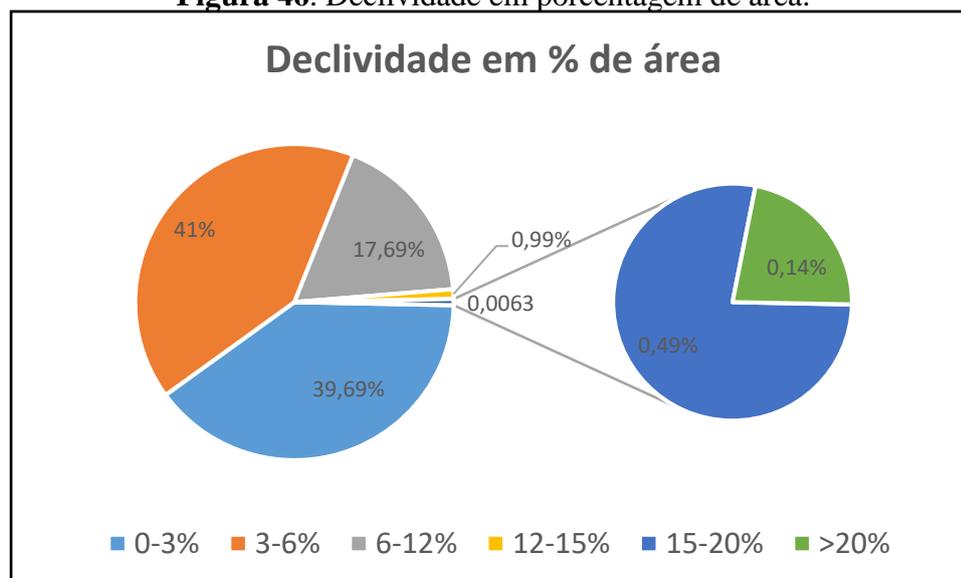


**Quadro 8.** Classes de declividade e principais características.

Classes	Características	Escala de vulnerabilidade
0 – 3%	Relevo plano, com escoamento superficial muito lento e com ausência de erosões laminares e lineares.	Muito Baixa
3 – 6%	Declives suave-ondulado; escoamento superficial lento a médio; ausência de problemas de erosão linear e laminar	Baixa
6 – 12%	Superfícies inclinadas, com relevo ondulado; escoamento superficial médio a rápido; suscetível a processos erosivos.	Média
12 – 20%	Relevo moderadamente ondulado, com maior inclinação do terreno do que nos níveis inferiores, áreas propícias a problemas de erosão.	Alta
20 – 30%	Grande inclinação do terreno; fortemente ondulado, o parcelamento do solo é permitido somente em áreas com declividade de até 30%; áreas com predomínio de problemas com erosão	Muito Alta
> 30%	Áreas com fragilidade ambiental muito alta; encostas são os limites para o corte raso da vegetação.	Muito Alta

**Fonte.** Adaptado de Lepsch *et al.* (1991), Ross (1995), De Biase (1970) e EMBRAPA (2006)

**Figura 46.** Declividade em porcentagem de área.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

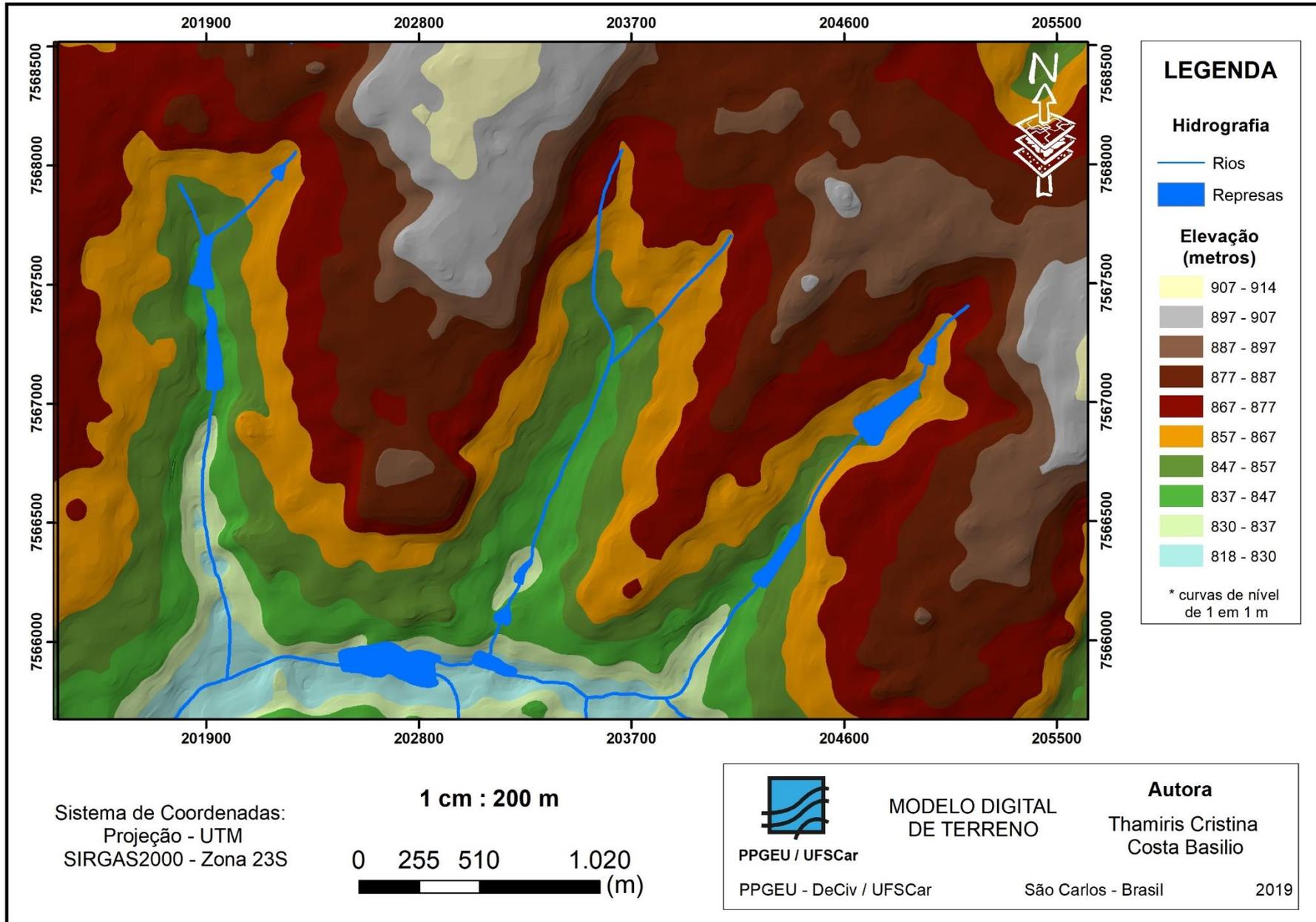
As classes de 0-3% e de 3-6% são as mais representativas na área, seguidas dos relevos de declividade de 6-12%, essas áreas estão associadas as regiões mais planas (0-3%), com declives suave-ondulados (3-6%) a inclinados (6-12%). Essa interpretação leva-se a crer que a área em estudo está localizada em um relevo de fragilidade ambiental muito baixa a média.

A Formação Itaqueri ocupa 80% das regiões de declividade de 6-12%, por se tratar de uma Formação que está aflorando mais próximo dos canais dos Córregos do Fazare e Espriado, e os Sedimentos Cenozoicos estão localizados, em sua maioria, nas regiões de declividade de 0-6%, ou seja, em locais mais planos e de menor fragilidade ambiental.

Mapas hipsométricos (Figura 47) são mapas que representam a elevação de um terreno através de cores, o MDE está subdividido em 10 classes, em intervalos de 10 metros, definidos a partir da cota de cada curva de nível em relação ao nível do mar. Esse intervalo foi definido por ter se mostrado mais satisfatório para a representação das diferenças de altitude da área de estudo. Essa carta foi utilizada juntamente com o mapa de declividade para se ter uma visão mais detalhada de toda a superfície do terreno da área que foi estudada. Ambos os mapas foram gerados a partir de curvas de nível de 1 em 1 metro, adaptadas das curvas de 5 em 5 metros elaboradas pelo IGC (Figura 44).

A partir da geração do mapa hipsométrico têm-se a confirmação das informações sugeridas por Soares (1973) e Campanelli (2012) que afirmam que a Formação Itaqueri se apresenta em cotas de 700 a 900 metros e os Depósitos Cenozoicos aparecem em altitudes superiores a 800m.

Figura 47. Modelo digital de elevação (MDE).



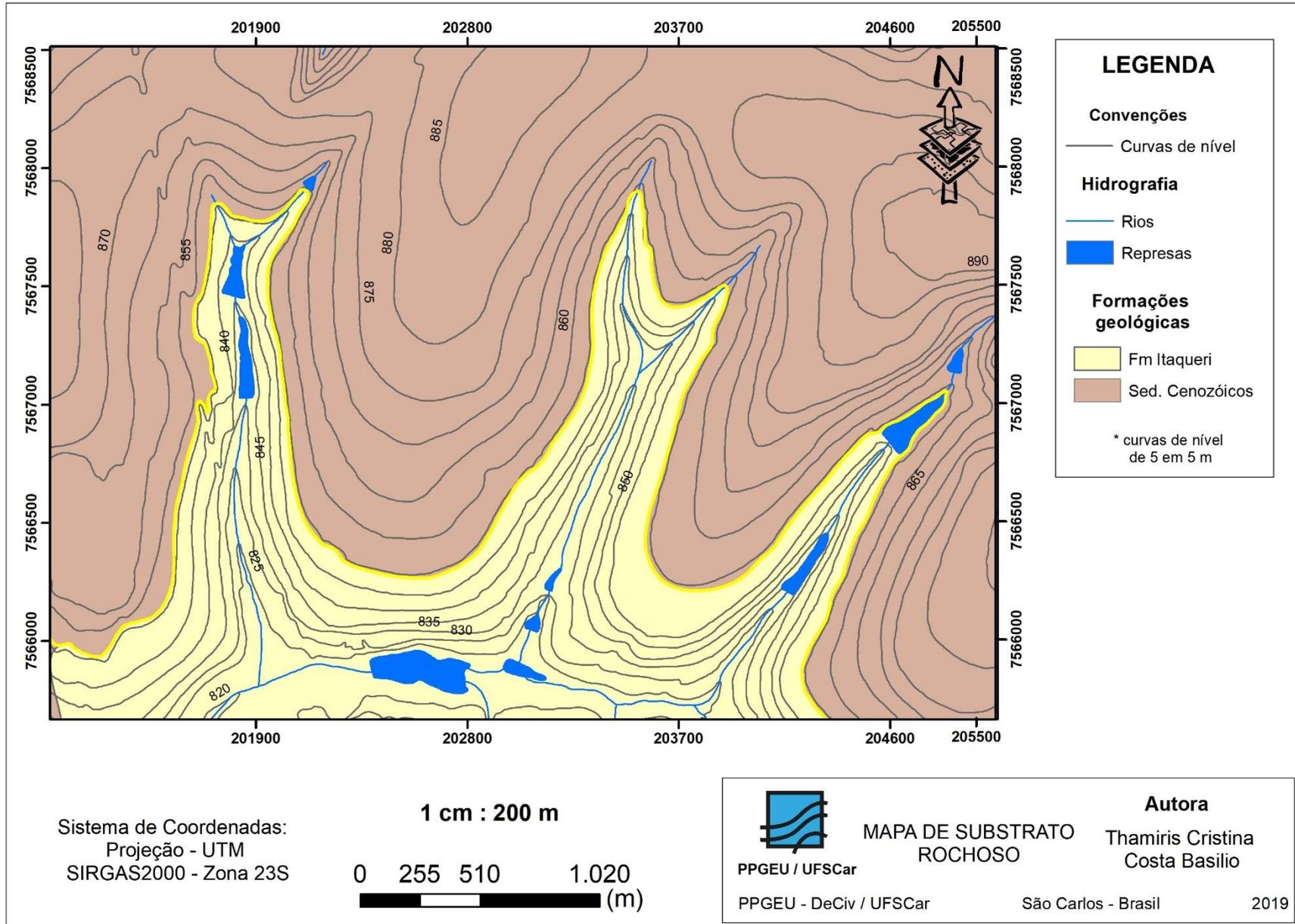
### 4.2.3 MAPA DE SUBSTRATO ROCHOSO

A análise prévia de mapas elaborados em escalas menores de trabalho, acabou fornecendo informações de que aproximadamente 5% da área em estudo era composta pela Formação Itaqueri e cerca de 20% da área pela Formação Serra Geral, sendo todo o restante (75%) da área era formada por um “grupo arenoso”, sem nome definido e sem identificação mais detalhada.

Porém, com o prosseguimento das atividades, foi constatado que ao invés de aproximadamente 90% da área em estudo era composta por este material arenoso, uma parcela inferior representava este pacote, com cerca de 63% de aparecimento na extensão em estudo e, que a Formação Serra Geral não estava aflorante na área, mas sim, a Formação Itaqueri, que representava uma parcela de 37% no local, como pode ser observado na Figura 48.

Essas distintas variações de composição na área em estudo podem ser explicadas pela escala de mapeamento feita pelos trabalhos anteriores como, por exemplo, de Fagundes (2010) que em sua pesquisa fez um mapeamento geológico-geotécnico de escala 1:25000, não analisando mais detalhadamente áreas menores, como a área estudada neste trabalho.

**Figura 48.** Mapa de substrato rochoso da área de estudo.



#### 4.2.3.1 Formação Itaqueri

Essa Formação Itaqueri tem idade Cretácica e recobre cerca de 37% de toda a área em estudo. As litologias encontradas nessa formação geológica são arenitos com fino, siltitos e argilitos, intercalados e com espessuras variáveis. A Figura 49 mostra essa intercalação de litologias.

**Figura 49.** Intercalações de arenitos e argilitos da Fm Itaqueri.



**Fonte.** Failache (2018).

Como Fagundes (2010) comenta, a Formação Itaqueri pode se apresentar diretamente sobreposta a Formação Botucatu, ou seja, as águas percoladas da Formação Itaqueri atingem diretamente o Aquífero Botucatu, isso, na área em estudo. Porém, em algumas regiões do município a Formação Itaqueri está sobreposta a Formação Serra Geral, isto porque o derramamento basáltico da Formação Serra Geral não é uniforme por todo o município de São Carlos, sendo assim, hora a Formação Itaqueri apresenta-se sobreposta a Formação Botucatu, hora ela se apresenta depositada acima da Formação Serra Geral. Essa característica ocorre em face da intertrape gerada pelo derrame basáltico do Botucatu que intrude a formação Botucatu.

Uma característica que foi observada em campo é que as camadas da Formação Itaqueri, com textura areno-siltosa tem uma granulação variando de fina a média, com coloração castanho claro. Essa camada apresenta níveis altos de fraturamento, possibilitando

a elevação da capacidade de infiltração no solo a partir da percolação, não somente intergranular, mas também nas fraturas (Figura 50).

**Figura 50.** Fraturas visíveis em afloramento de solo saprolítico da Fm. Itaqueri.



**Fonte.** Autora

Porém, de acordo com Lemos (2010), essa camada areno-siltosa da Formação Itaqueri é composta por lentes de argilas expansivas, que podem apresentar relevante empastilhamento e gretas de contração. Essas lentes argilosas, quando em presença com a água se expandem e as gretas se fecham, sendo assim, essas áreas lenticulares não representam efetivamente um canal de percolação, como as fraturas das camadas areno-siltosas.

As regiões que apresentam as fraturas representam uma alta vulnerabilidade das águas presentes nas formações inferiores (Aqüífero Botucatu), visto que assim como ocorre a percolação fácil de água, ocorre também a percolação de contaminantes, porém, as regiões que apresentam as lentes de argilas expansivas podem colaborar com a impermeabilização do solo, evitando que fontes de contaminação ultrapassem sua camada e cheguem ao aqüífero.

#### 4.2.3.2 Sedimentos Cenozoicos

Os sedimentos descritos por Fagundes (2010) como um “grupo arenoso”, na verdade, são identificados como Sedimentos Cenozoicos, ou seja, um material arenoso retrabalhado que sobrepõe a Formação Itaqueri na área em estudo.

Esses materiais ocorrem nas porções mais elevadas topograficamente e são separados do material residual da Fm. Itaqueri por uma camada com espessuras variáveis, de alguns centímetros até locais com espessura superiores a meio metro (Figura 51). Essa mudança espessural pode ser observada em diferentes pontos da área em estudo, no mapa de documentação localizado no Apêndice A pode-se observar que no ponto de observação 9 a linha de seixo tem cerca de 50 cm e no ponto de observação 6 a linha apresenta 12cm.

**Figura 51.** Linha de seixos que separa o material inconsolidado residual da Fm Itaqueri e o material retrabalhado (Sedimentos Cenozóicos).



**Fonte.** Autora.

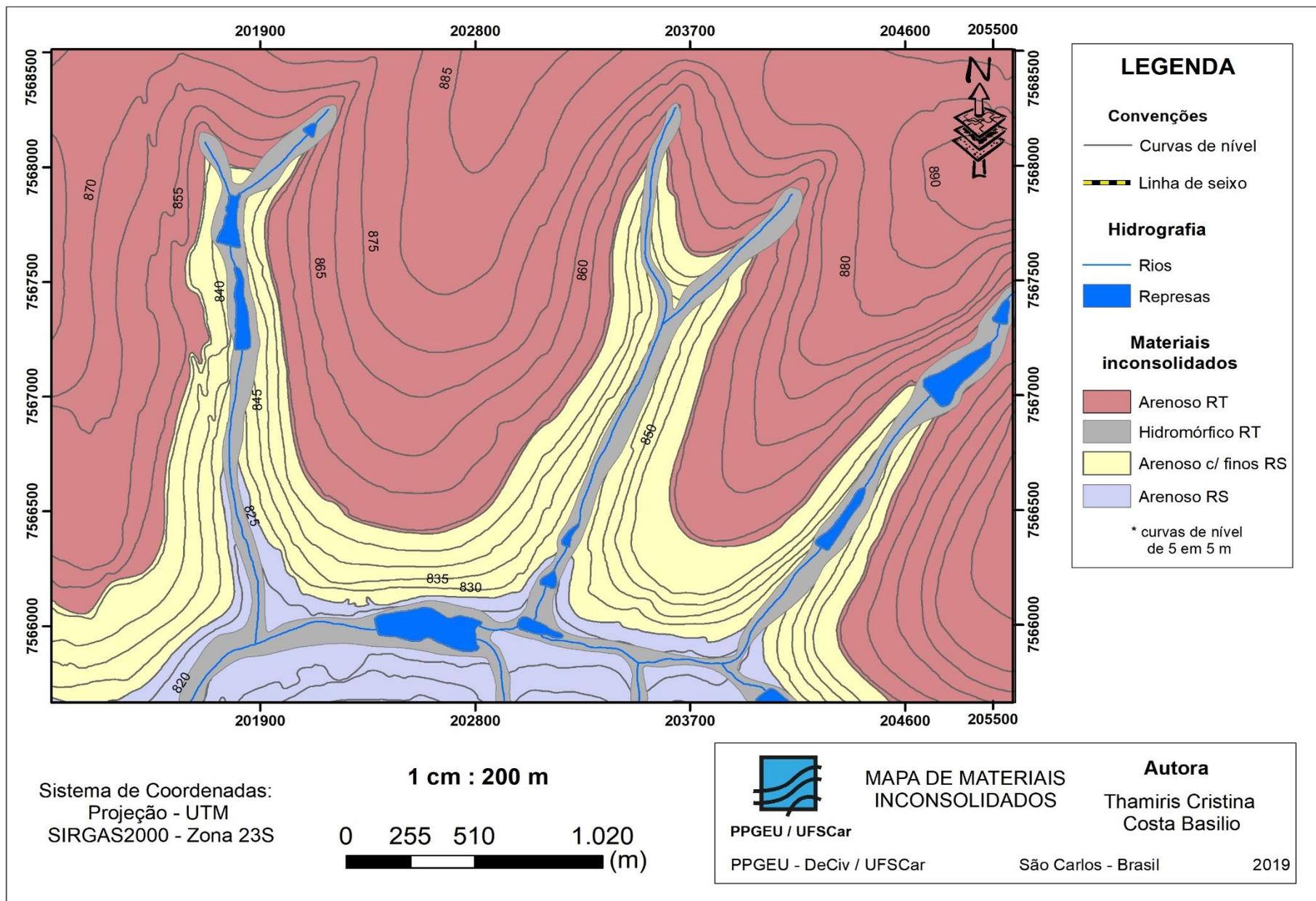
Na área não foram encontrados Sedimentos Cenozoicos Terciários, visto que estes aparecem geralmente em cotas superiores a 900m e a área de estudo não atinge esses níveis, portanto, toda a área estudada é composta por sedimentos arenosos retrabalhados, pertencentes aos Sedimentos Cenozoicos Quaternários.

#### 4.2.4 MAPA DE MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Os materiais inconsolidados (Figura 52) têm como características básicas os aspectos geotécnicos em relação à origem, a textura, a espessura e ao comportamento do manto de alterações dos materiais. Zuquette (1987) define os m.i. como sendo todo o material sobrejacente à rocha, seja ele residual ou transportado.

A caracterização desses materiais foi feita a partir de análise de perfis de alteração dos materiais, ensaios laboratoriais de granulometria conjunta, ensaios de azul de metileno para análise da capacidade de trocas catiônicas dos materiais, ensaios de densidade específica dos sólidos e ensaios com amostras indeformadas para análise dos índices físicos dos tipos de materiais.

**Figura 52.** Mapa de materiais inconsolidados.



#### 4.2.4.1 Retrabalhados Hidromórficos

Trata-se de materiais geológicos caracterizados pela sobreposição de camadas sedimentares muito recentes, de natureza heterogênea e localizam-se nas regiões mal drenadas das planícies aluvionares, próximos aos córregos do Fazare e do Espraiado responsáveis pela sua deposição. Esse tipo de material inconsolidado representa 4,09% de toda a área de estudo.

De acordo com Palma (2004), o nível de água geralmente encontra-se em profundidades inferiores a dois metros e a declividade menor do que 2%. Ao relacionar essa informação obtida por Palma (2004) e as perfurações a trado feitas nessa região de material hidromórfico, confirma-se que o nível d'água na área estudada, encontra-se em torno de 0,40m no P1 e 1,5m no P2.

Texturalmente, há uma variação lateral e em profundidade, entre areias, siltes e argilas, apresentando cores acinzentadas mais clara a mais escuras, chegando a uma coloração cinza chumbo e preta, dependendo da porcentagem de concentração de matéria orgânica. Os sedimentos hidromórficos dessa área possuem em sua superfície uma espessa camada de matéria orgânica, composta por folhas, galhos, gravetos, etc., de coloração escura e em processo de decomposição.

Próximo ao poço de monitoramento P1, efetuou-se uma tradagem para análise do perfil de alteração do solo próximo a nascente do Fazare e, foi observado que há cerca de cinco metros da nascente, em uma profundidade de 120cm, dá-se início a um horizonte de turfa, com muita matéria orgânica e que vai clareando, ou seja, diminuindo sua porcentagem orgânica, de acordo com a profundidade (Figura 53).

**Figura 53.** Amostras retiradas a trado próximas ao P1.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

#### 4.2.4.2 Retrabalhados arenosos

Os materiais inconsolidados retrabalhados arenosos preservam as características mineralógicas do material original, apresentando em sua maioria uma mistura desse material arenoso com sedimentos mais argilosos. Essa semelhança gera uma grande homogeneidade textural dentro do perfil de alteração, dificultando a diferenciação entre os materiais retrabalhados e residuais quando a linha de seixo (Figura 51) não está presente ou quando não há estruturas que indiquem a rocha original ou o seu transporte.

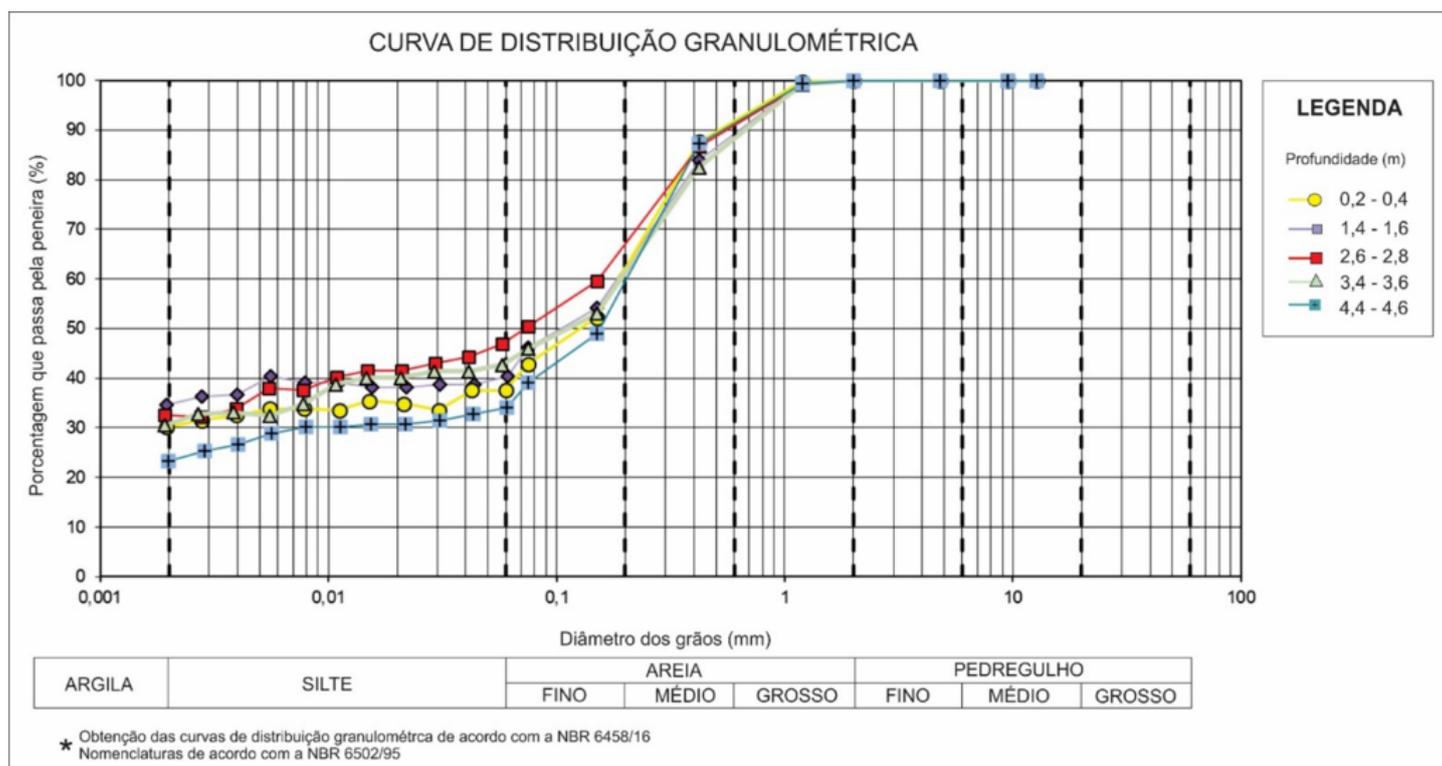
Este tipo de material é comum em toda área de estudo, encontrando-se principalmente nas regiões mais planas com declividade entre 0-6%, além disso, esse é o material mais recorrente em toda a área de estudo, representando 63,69% de toda ela. De acordo com Palma (2004) esse tipo de material, areno-argiloso, é geralmente formado por materiais inconsolidados da Formação Serra Geral, transportados e misturados com os materiais inconsolidados da Formação Botucatu.

Ensaio de granulometria conjunta endossam a homogeneidade textural dos sedimentos tanto retrabalhados, quanto residuais e podem ser observados na Figura 54, que apresenta a curva granulométrica dos m.i. Os sedimentos retrabalhados arenosos são caracterizados a partir da análise granulométrica por apresentarem uma média de 60% de areia, 10% de silte e 30% de argila, dentre essas areais, cerca de 30% são de granulometria média, 20% fina e 10% grossa, tratando-se de um solo de areia média, fina, grossa, argiloso amarelado, de acordo com a NBR 6502/95 e é classificado de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) de Arthur Casagrande (1930) como areia argilosa do tipo SP (areia mal graduada).

Esse solo apresenta uma massa específica dos sólidos variando de  $\rho_s$ : 2,66 – 2,74 g/cm<sup>3</sup> e índice de vazios na ordem de  $e = 0,75$ . Ao se tratar da capacidade de troca catiônica (CTC) desse tipo de m.i, pode-se dizer que ela varia de 62 a 84 meq/100g, que de acordo com Grim e Güven (1978) refere-se ao intervalo pertencente ao Grupo dos Argilominerais Esmectitas.

O Grupo das esmectitas são constituídos por duas folhas de silicato tetraédricas (T) e uma folha central octaédrica de aluminato (O) unidas entre si por átomos de oxigênio comuns a ambas as folhas (Fonseca et al 2016), sendo a montmorillonita o argilomineral mais popular deste grupo. São argilas que apresentam a propriedade de aumentar várias vezes o seu volume inicial quando se adiciona água.

**Figura 54.** Ensaio de granulometria conjunta.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

A habilidade de maior importância tecnológica desses materiais é a capacidade de intercalar moléculas neutras ou espécies quimicamente carregadas no espaço interlamelar (Fonseca et al, 2017). É possível intercalar desde cátions metálicos, aprisionar poluentes como metais pesados e contaminantes radioativos, biomoléculas utilizadas na liberação controlada de medicamentos e até polímeros orgânicos.

Sendo assim, a presença desse grupo de argilominerais é de extrema importância quando se trata de contaminação do lençol freático, tornando a área menos vulnerável a contaminação, uma vez que o íon de ódio que se hidrata muito facilmente esteja presente em quantidades apreciáveis, enquanto que se outros íons, como cálcio ou potássio forem os predominantes, sua hidratação pouco intensa não permite uma grande separação das camadas, não sendo tão eficiente assim para efeitos de contaminação.

#### 4.2.4.3 Arenosos com finos residuais da Formação Itaqueri

Os materiais inconsolidados arenosos com finos residuais da Formação Itaqueri representam 24,12% da área estudada. Esse tipo de material encontra-se nas áreas de encostas

suaves (declividade de 6-12%), com espessura de até 5 metros, sendo originários da alteração das litologias finas (siltitos e argilitos), a textura varia de 50 a 55% de areia, sendo que há a prevalência da areia média (30-35%), 20% de areia fina e 5% de areia grossa, o silte apresenta uma variação de 10-15% e a argila de 25-30%, sendo assim, de acordo com a NBR 6502/95 trata-se de uma areia média, fina, grossa argilosa alaranjada (Apêndice F), e de acordo com a SUCS seria um solo de areia argilosa do tipo SP também.

Essa porcentagem de 55% de areias no ensaio de granulometria demonstra que esse solo é altamente permeável e, por se tratar de uma declividade suave ondulada, sua infiltração é muito maior do que o escoamento superficial, facilitando assim a recarga indireta do aquífero.

Os m.i. com finos residuais da Fm. Itaqueri apresentam uma massa específica dos sólidos variando de  $\rho_s$  2,72 a 2,75 g/cm<sup>3</sup> e índice de vazios na ordem de  $e=0,75$ . Em relação a CTC desse tipo de material, varia de 104 a 110 meq/110g e, de acordo com Grim e Güven (1978), com esses valores, pode-se dizer que os argilominerais pertencem ao Grupo das Vermiculitas.

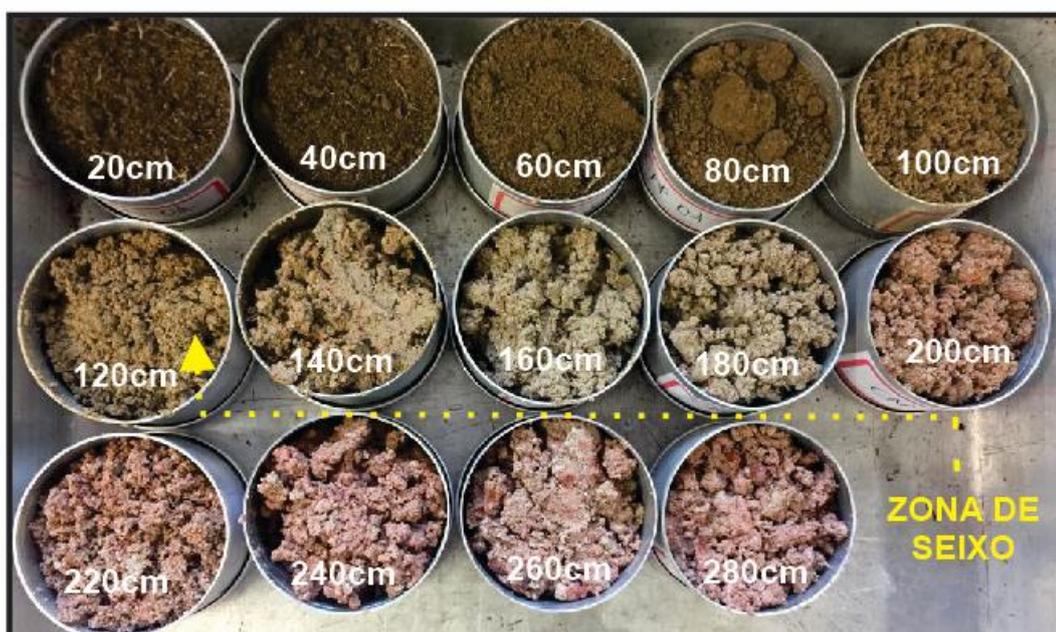
A vermiculita,  $(Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4 O_{10}] [OH]_2 4H_2O$ , é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal (Ugarte et al, 2008). A presença de moléculas de água localizadas no espaço interlamelar da estrutura da vermiculita conferem a propriedade de piro-expansão, quando aquecida a uma temperatura acima de 250°C, a vermiculita se expande abruptamente na direção normal à superfície das placas. A expansão gera consequências como o aumento do volume do argilomineral, diminuição de sua densidade, aumento de sua área superficial e diminuição de sua CTC significativamente (SOUZA-SANTOS, 1975b). Essa característica de expansão da vermiculita a torna um impermeabilizante em áreas arenosas, quando submetida a temperatura adequada, diminuindo a vulnerabilidade local.

Porém, quando se refere a essas argilas expansivas, como a vermiculita, ou a esmectita (item anterior), deve-se atentar que em áreas próximas a nascentes nem sempre essa impermeabilização do meio é eficiente para efeitos de contenção de contaminação. Isto porque, ao gerar uma área impermeabilizada por argilas, próximo aos córregos, em uma declividade acima de 6%, tem-se o risco de diminuição da infiltração e consequente aumento do escoamento superficial, que levará essa água (contaminada ou não) diretamente para os córregos, fazendo com que a contaminação vire um agente direto.

Na Figura 55 é possível observar, claramente, a mudança do tipo de solo ao longo da profundidade de um perfil. As amostras da figura são referentes a tradagem feita para a

abertura do poço de monitoramento P1, próximo a nascente do Fazare. As amostras de 20 a 100 cm, que estão localizadas cima da região da zona de seixo representam os materiais retrabalhados arenosos descritos no subitem 4.2.4.2 deste capítulo, já as amostras de 120 a 180cm representam os m.i. arenosos com finos residuais da Formação Itaqueri especificados neste subcapítulo. A partir dos 2 metros de profundidade nota-se uma região mosqueada, mais avermelhada e com uma quantidade de areia bem mais evidente. Esse nível mosqueado é o saprolito, ou seja, uma alteração das rochas areníticas da Formação Itaqueri. O nível saprolítico não foi aflorante na região em estudo.

**Figura 55.** Perfil de solo a partir de tradagem no poço de monitoramento P1.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

#### 4.2.4.4 Arenosos Residuais da Formação Itaqueri

Esses materiais localizam-se nas regiões mais altas do Planalto de São Carlos (entre 800 e 1000m de altitude) e representam 8,10% da área de estudo. Apresentam uma textura predominantemente de areia fina a média e em alguns pontos podendo apresentar lentes de areia grossa intercaladas de lentes de areia fina.

A análise granulométrica conjunta (Figura 54) apresentou uma distribuição diferente, no qual, o valor das areias subiu em relação aos m.i arenosos com finos, chegando a faixa de 65 a 70%, sendo que cerca de 40% são compostos por areia média, 25 de areia fina e 5% de

areia grossa. O silte cai para a margem de 5 a 10% e as argilas caem para 20 a 25%. De acordo com a NBR 6502/95 trata-se de uma areia média, fina, argilosa avermelhada (Apêndice F).

Ao atingir os materiais inconsolidados da Formação Itaqueri, a porcentagem de areia dobra, passando para 70% de material arenosos e 20% de material argiloso, demonstrando que os m.i residuais tem uma capacidade de infiltração muito superior aos m.i retrabalhados, que apresentam em torno de 35% de material arenoso e 25% de material argiloso.

A massa específica dos sólidos está em torno de  $2,76 \text{ g/cm}^3$  e o índice de vazios sobe para  $e=0,86$ . A CTC desse m.i varia de 94-102 meq/100g, ou seja, de acordo com Grim e Güven (1978), os argilominerais pertencentes a esse pacote de m.i pertence a uma transição entre Montmorillonitas e Vermiculitas.

Os arenosos residuais da Formação Itaqueri por aparecerem em regiões acima dos 800m de altitude, não estavam próximos

Já na Figura 56 é possível observar, claramente, a mudança do tipo de solo ao longo da profundidade de um perfil. As amostras da figura abaixo são referentes a tradagem feita para a abertura do poço de monitoramento P4, próximo a nascente do Córrego do Espriado. A figura abaixo mostra que de 20 a 260cm tem-se um material retrabalhado de Depósitos Cenozóicos,.

A linha de seixo que separa os materiais retrabalhados do residuais está dentro deste perfil em uma profundidade de 280cm. A partir dos 3 metros de profundidade dá-se início aos m.i. da Formação Itaqueri, no qual, de 300 a 360cm tem-se os m.i. arenosos da Formação Itaqueri, descrito nesse subcapítulo e, que não pode-se ser observado no perfil de solo feito no poço de monitoramento P1. A partir dos 3,80 metros de profundidade há o aparecimento dos materiais inconsolidados arenosos com finos da Formação Itaqueri, que se estendem até os 480cm deste perfil. A região mosqueada, na qual se dá o início do saprolito, não foi observada nesse perfil, visto que o nível d'água foi atingido antes do início desta camada. Vale ressaltar que o nível saprolítico não foi aflorante na região em estudo.

**Figura 56.** Perfil de solo a partir de tradagem no poço de monitoramento P4.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

### 4.3 Avaliação da flutuação do nível d'água

#### 4.3.1 POÇOS DE MONITORAMENTO

Os quatro poços construídos para o monitoramento contínuo da flutuação do nível d'água tiveram um acompanhamento quinzenal em períodos de chuvas e mensal em períodos de estiagem, baseado na metodologia aplicada por Coelho (2011). As características da área descritas no capítulo de materiais e métodos (capítulo 3.2) mostram que os córregos estão próximos um do outro (1,5 km) facilitando uma análise geral e também reduzindo custos para os trabalhos periódicos em campo.

Por se encontrar em área de aquífero livre, a aplicação do método *WTF* foi feita com o objetivo de estimar a recarga efetiva para a área. Os eventos de precipitação servirão de comparação para a análise junto a variação da flutuação do nível do lençol freático.

O Apêndice G representa o comportamento da variação da flutuação do nível da água subterrânea dos quatro poços de monitoramento durante o intervalo de 12 meses. É possível notar, ao analisar o Apêndice H, que a variação do N.A. apresenta comportamento semelhante em todos os poços, com rebaixamento e subida do lençol para um mesmo período do ano, em resposta à precipitação.

Os quatro poços apresentaram rápidas respostas, em função as características descritas no item anterior (4.2), aos principais eventos de chuva durante o período de estudo, ocorrendo elevações do nível estático provocadas pelas precipitações dos meses de novembro a março e um rebaixamento visível nos meses de abril a agosto, chegando a apresentar 0 mm de precipitação no mês de julho tanto de 2017, quanto de 2018, de acordo com os dados do pluviógrafo instalado no campus da UFSCar, localizado a 800m dos poços de monitoramento (dados do INMET).

Uma boa correlação entre níveis de água em poços de monitoramento está associada a diferentes fatores, além da precipitação (quantidade, duração e intensidade). As variáveis hidrológicas, a topografia, a espessura da camada não saturada e a composição dos materiais da zona saturada e não saturada da formação, são alguns dos outros fatores que influenciam nas flutuações do nível estático das águas subsuperficiais (MOON et al., 2004). Portanto, uma análise mais consistente, de pelo menos algumas destas variáveis foi realizada neste trabalho para o melhor conhecimento do comportamento do aquífero.

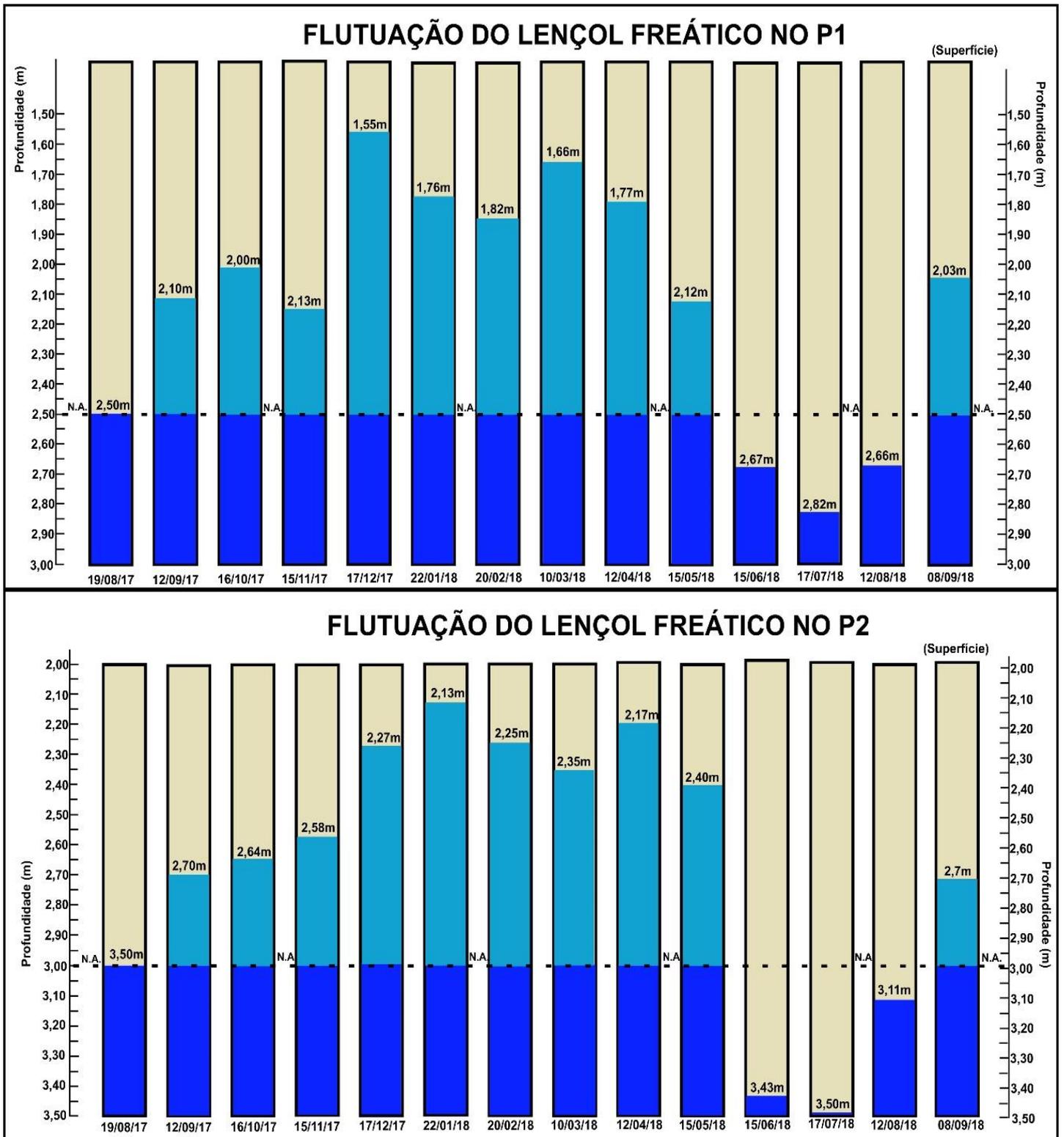
Buscando encontrar as causas pelo qual ocorreram estes dois tipos de variações durante o monitoramento, foram realizadas investigações de alguns fatores que podem influenciar na ocorrência destes três diferentes conjuntos de sistemas.

Primeiramente, nota-se que a mudança de comportamento acontece de acordo com a espessura da camada não-saturada do solo. Nos primeiros dois poços (P1 e P2) referentes ao Córrego do Fazare, a menor espessura da camada não-saturada foi a do poço P1, com média de 1,70m e P2 com média de 2 metros Já nos dois poços do Córrego do Espreado (P3 e P4) os poços apresentam média de 3,50 e 4 metros da camada não-saturada, respectivamente.

Os dados apresentados anteriormente mostram uma forte correlação entre os níveis de água dos poços e a espessura da camada não-saturada. Isso acontece porque a água precipitada que chega a zona saturada necessita de umidade para permitir a formação de água gravitacional, necessária para vencer as tensões superficiais entre a água e os grãos, atingindo assim níveis mais profundos pela força da gravidade. Como no período de estiagem a umidade da zona não-saturada do solo é menor, as camadas mais espessas necessitam de uma maior quantidade de água para atingir a camada saturada do solo.

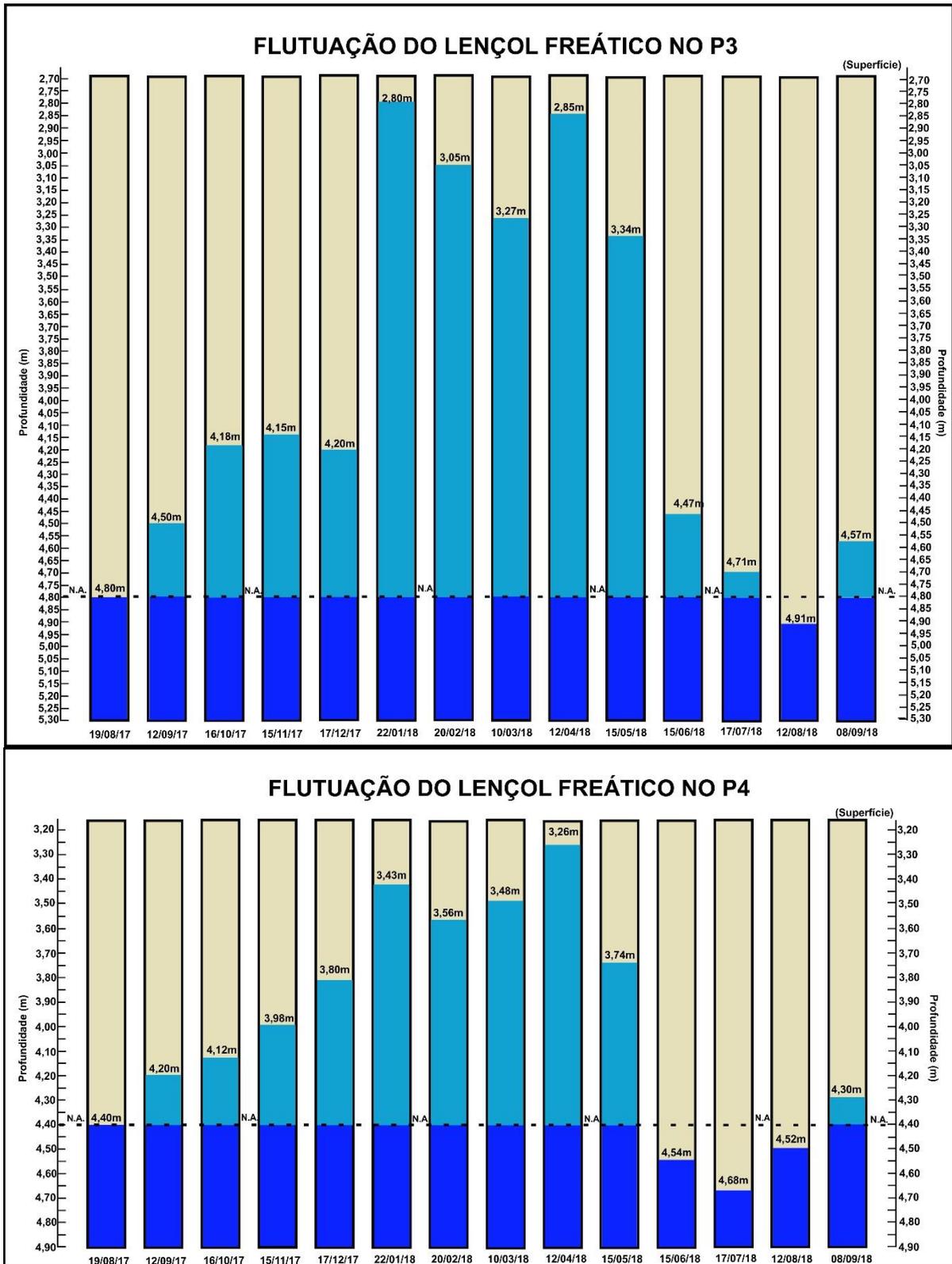
Esses dados serão relacionados um pouco mais a frente com os eventos de precipitação da área. Os dados desses eventos de precipitação estão sendo coletados das estações meteorológicas da EMBRAPA Sudeste e do INMET, localizados a menos de um quilômetro da área. Já o monitoramento dos poços foi executado e registrado *in situ* por meio de um medidor elétrico de nível d'água

**Figura 57.** Dados dos poços de monitoramento do Córrego do Fazare.



Fonte. Elaborado pela autora.

**Figura 58.** Poços de monitoramento do córrego do Espreado.



Fonte. Elaborado pela autora.

#### 4.3.1.1 Mensuração dos poços de monitoramento

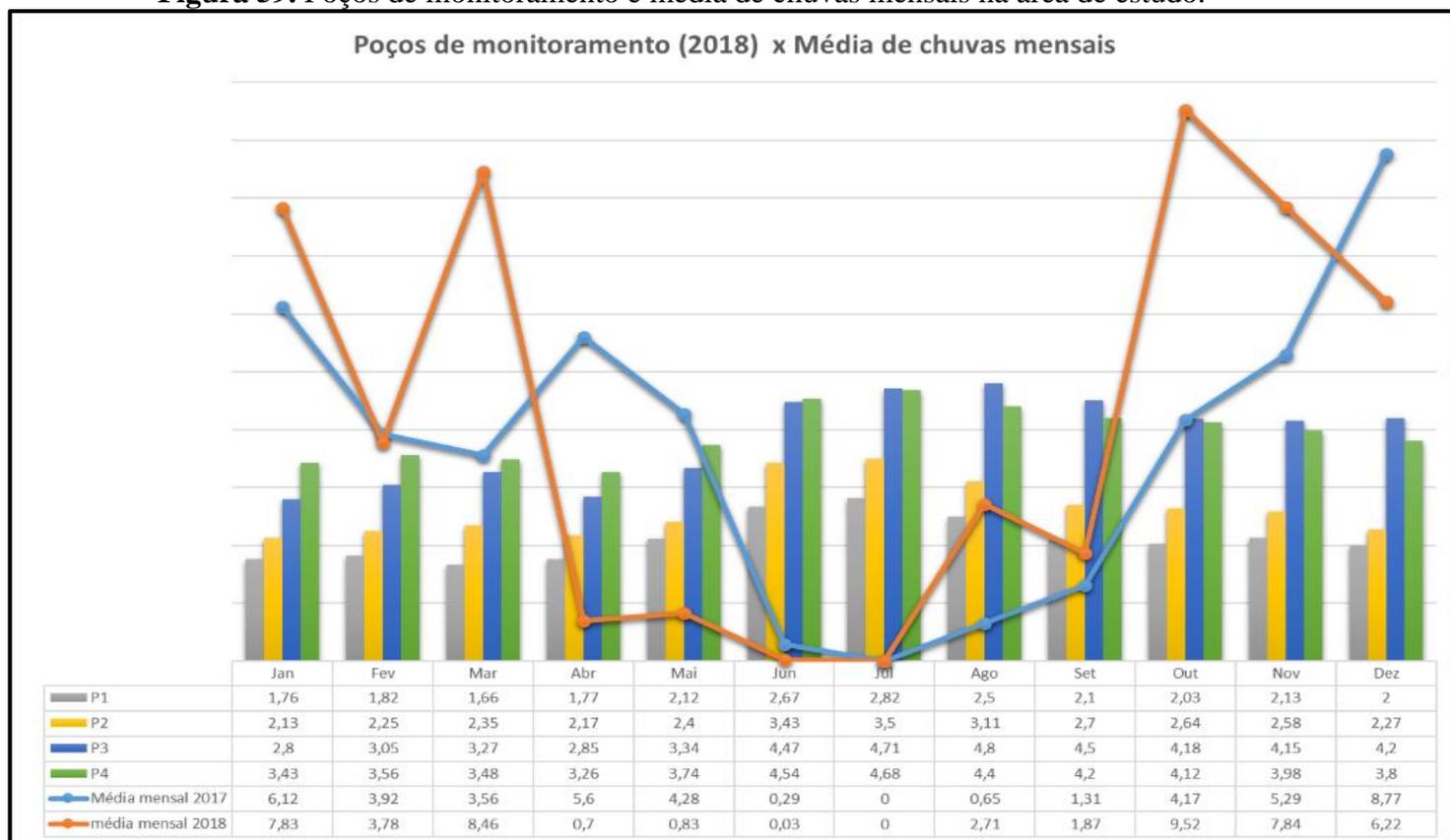
A primeira medição feita nos quatro poços de monitoramento, sendo P1 e P2 referentes ao córrego do Fazare e P3 e P4 ao córrego do Espraiado, foi no dia 19 de agosto de 2017 e os poços apresentavam profundidade no N.A. de 2,50m; 3,50m; 4,80m e 4,40m; respectivamente. A partir desta data deu-se início a um período de maiores constâncias de pluviosidade, aumentando, conseqüentemente, diminuindo a profundidade desses níveis d'água.

O P1 nos meses de outubro, novembro e dezembro de 2017 subiu até atingir uma média de 2 metros de profundidade e tendo seu primeiro e maior pico marcado no dia 17 de dezembro de 2017, quando atingiu 1,55 metros, subindo 0,95cm de altura. Nos meses de junho, julho e agosto, o nível d'água baixou consideravelmente, atingindo sua maior profundidade no dia 17/07/18, quando chegou a 2,82 m. Pode-se observar essa mudança e seus picos na Figura 59.

O poço P2 teve seu pico de elevação do nível d'água em 22 de janeiro de 2018, atingindo 2,13 metros e, seu dia de maior profundidade do nível d'água em 17 de julho de 2018, chegando a 3,50m, ou seja, 1,37 metros de diferença de seu maior pico. O P3 também teve seu pico máximo em 22 de janeiro de 2018, atingindo 2,80 m de profundidade e sua maior profundidade no mês de agosto, atingindo 4,91m. Já o P4 teve seu maior pico em abril, atingindo 3,26m e seu mais profundo dado em junho de 2018, chegando a 4,68 metros. Dos quatro poços de monitoramento apenas o P4 teve seu maior pico registrado em abril, mas sua maior profundidade continuou entre os meses de julho e agosto, seguindo o padrão dos outros poços de monitoramento.

Portanto a flutuação do nível da água subterrânea nos poços de monitoramento apresenta correlação em relação à precipitação pluviométrica em uma série de longa duração. Isto significa a existência de outros fatores que podem influenciar na flutuação do nível da água subterrânea, uma vez que a precipitação pluviométrica foi à principal responsável pela flutuação do nível. Sendo assim, validou as premissas do método WTF que estima a recarga a partir dos eventos de precipitação pluviométrica em aquífero livre.

**Figura 59.** Poços de monitoramento e média de chuvas mensais na área de estudo.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

### 4.3.2 PERFIL DE INFILTRAÇÃO

Foi realizado também, um ensaio de infiltração natural no solo, em um período chuvoso na região em estudo. Durante o período de 15 dias corridos, após 24 horas da instalação da cobertura de lona no solo, deu-se início as tradagens e a medição da umidade do solo. Com as informações obtidas a partir das tradagens e dos ensaios de umidade do solo no mês de fevereiro de 2018, ocorrerá a discussão sobre a diferença de umidade tanto superficial quanto em profundidade, da parcela coberta e da descoberta avaliadas. As figuras 60 e 61 apresentam os dois gráficos gerados durante esse período.

Os perfis tradados tiveram uma profundidade de 2,5 metros, em média, visto que alguns foram interrompidos um pouco mais superficialmente, pois a camada de seixos incapacitou a passagem do trado manual. Sendo assim, utilizou-se a média de 2,25m para que todas as perfurações tivessem a profundidade igual na análise.

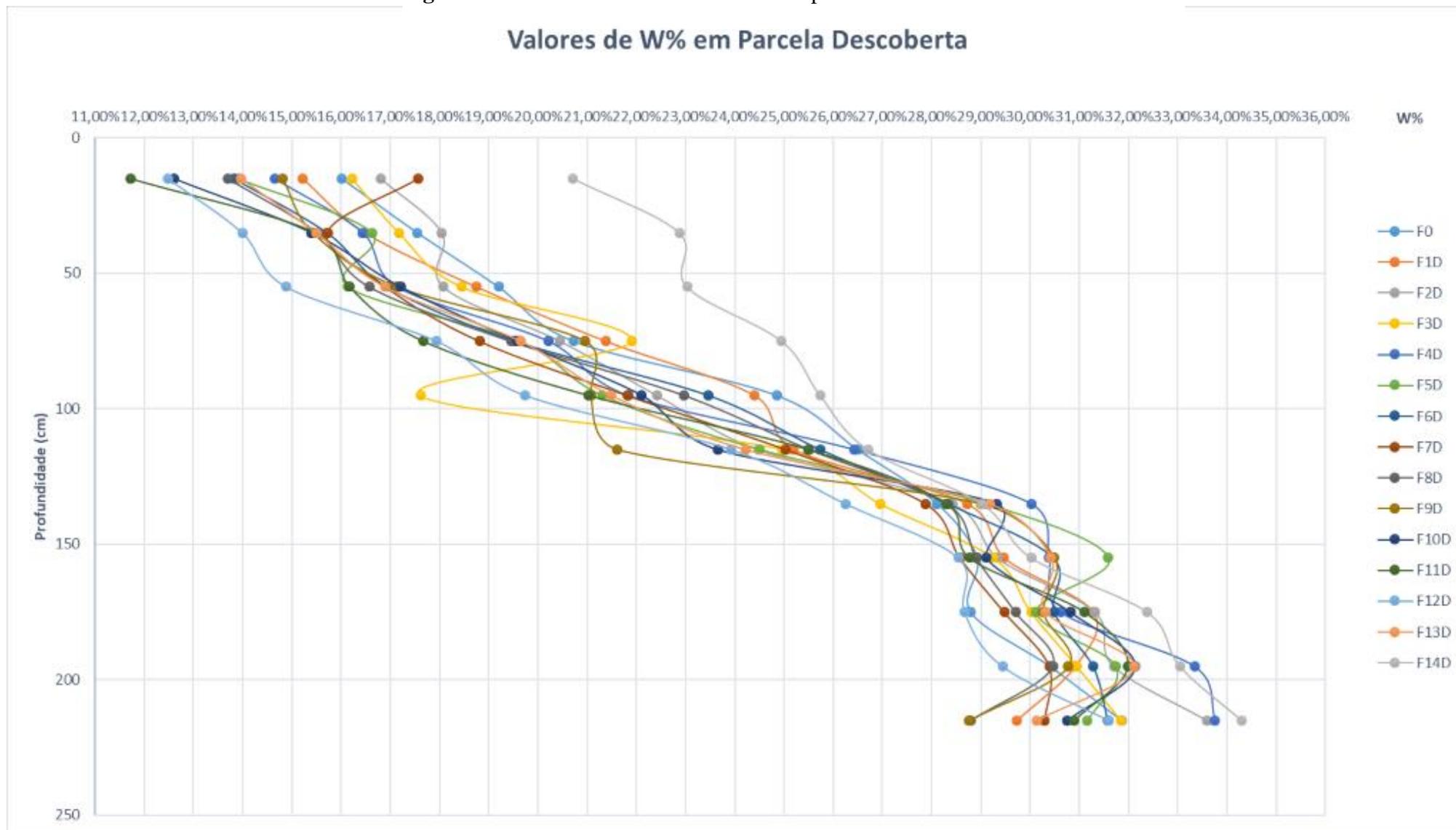
Ao comparar a porcentagem de umidade (W%) da parcela coberta e da descoberta, na profundidade 0 a 0,15 metros, constata-se que a média das umidades dos quinze dias foram de 14,95 e de 16,37%, respectivamente. Roldi Guariz *et al.* (2009) comentam em seu artigo, sobre a variação da umidade do solo de acordo com diferentes tipos de vegetação, que uma média de variação entre parcelas de 3 a 5% de W são variações intensas que podem diferenciar até mesmo uma região de pastoreio e uma região arbórea.

Quando se inicia a análise das regiões mais profundas do perfil do solo, nota-se que aproximadamente aos 50 cm de profundidade, em ambas as parcelas passam a apresentar umidade em torno de 3% maior do que nos primeiros 50 metros. Ao se aproximar dos 2,25 metros de profundidade pode-se concluir que as parcelas descobertas têm uma umidade entre 32-35% e nas parcelas cobertas essa umidade torna-se menor, chegando a no máximo de 31,5%.

Visto que tanto o sol, quanto a chuva incidiram diretamente nas parcelas cobertas, esse solo superficial teve uma variação de W% muito maior do que na parcela que permaneceu coberto com a lona e, por isso, nota-se dias de grande umidade do solo superficial (dia 14/02/2018 – F14D), constatando que esses dias foram de chuvas mais intensas e dias de menores umidades (11/02/2018 –F11D), que prevaleceu o sol intenso diretamente na vegetação e no solo.

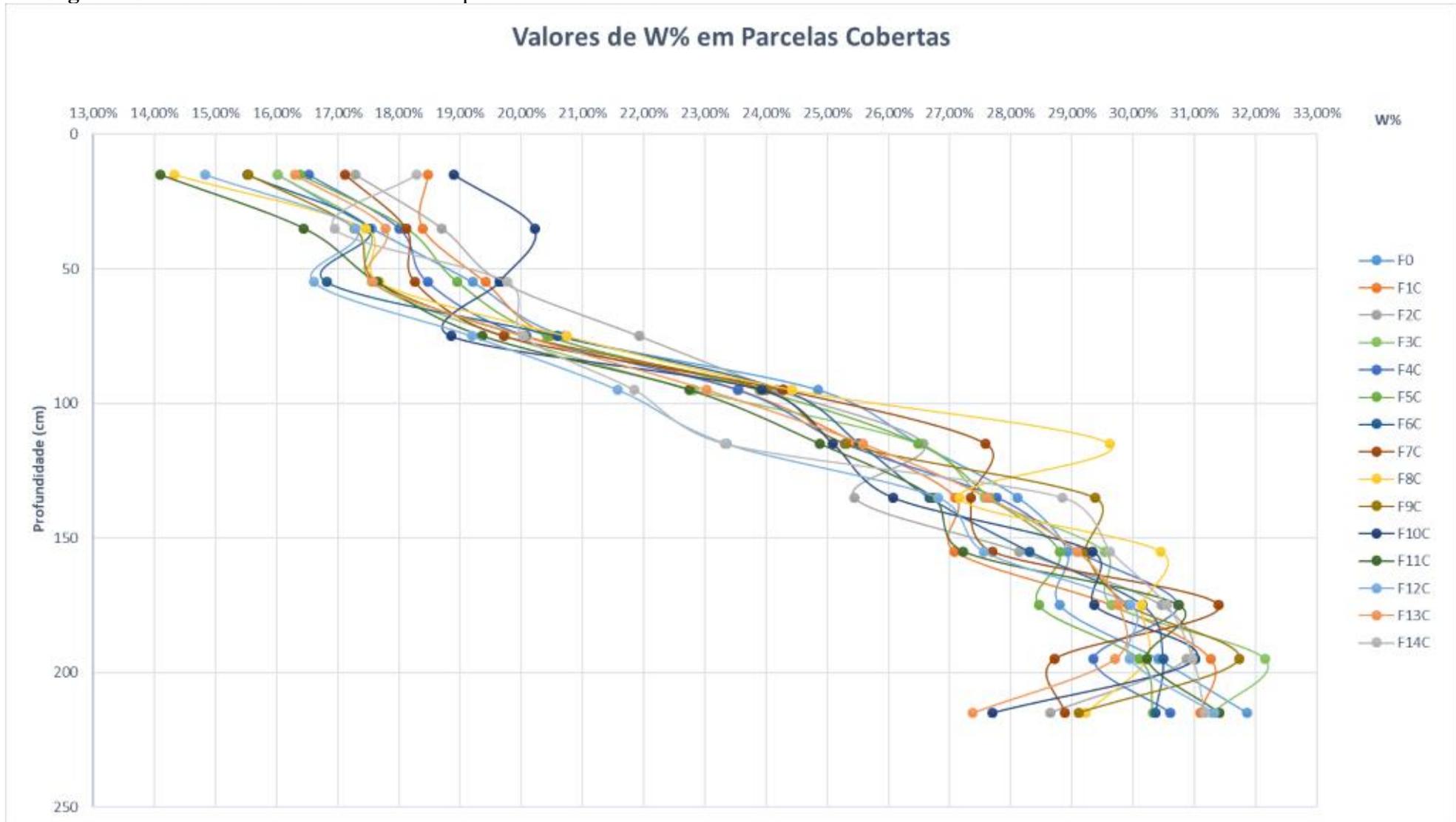
Observa-se que apesar da parcela descoberta apresentar, nas camadas de solo mais superficiais, uma umidade inferior à da parcela coberta, ainda assim, a parcela descoberta apresenta porcentagens maiores de umidade nas camadas mais profundas do perfil do solo. Isto deve-se pelo fato da parcela coberta ter um efeito de evapotranspiração da água mais intenso, visto que com a lona cobrindo a área do perfil de solo estudado, se vaporiza e descondensa permanecendo na região da lona e voltando mais rapidamente ao solo, umedecendo a superfície e a deixando com uma umidade mais constante que a da outra parcela, superficialmente. Porém, assim como o sol incide diretamente na parcela descoberta, a chuva também, facilitando a infiltração da água no solo.

**Figura 60.** Valores de umidade relativa em parcela descoberta na área de estudo.



Fonte. Elaborado pela autora.

**Figura 61.** Valores de umidade relativa em parcela coberta na área de estudo.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

#### 4.3.2.1 Perfil de infiltração e dados de eventos pluviométricos

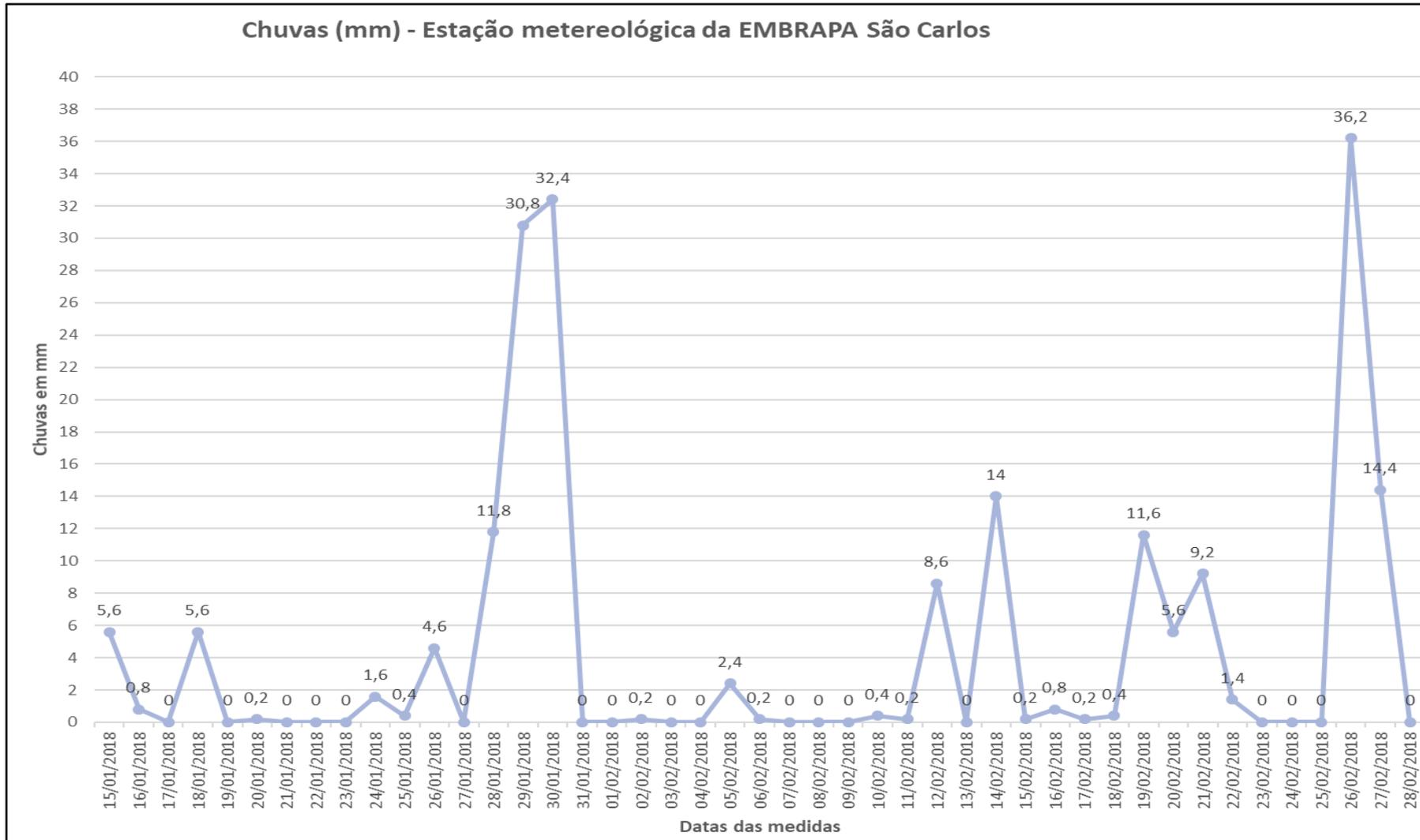
Confirmam-se todas essas análises feitas a partir do perfil de infiltração, ao comparar esses dados com os dados da estação meteorológica automática da EMBRAPA São Carlos, localizada há de 1,5km da área de monitoramento e do INMET, localizado a 800m. Ao verificar a Figura 50, pode-se concluir que as datas com maiores quantidades de chuvas ocorreram, com certeza, nas mesmas datas destacadas pela mudança de umidade no perfil de infiltração (Apêndice H), ou seja, nos dias 05/02/2018, 12/02/2018 e 14/02/2018. Sendo esta última data a que teve maiores aumentos na umidade do perfil do solo e na qual a estação meteorológica computou chuva de 14mm.

O final do mês de janeiro e todo o mês de fevereiro é marcado por chuvas intensas e com altos índices, como por exemplo no dia 30/01/2018 com 32,4mm e no dia 26/02/2018 com 36,2mm. No subcapítulo 2.4 foi visto que os materiais geológicos exercem grande influência na recarga das águas, principalmente nas porções superficiais, como apontado por Balek (1987).

Nestas regiões que são marcantes os fenômenos de dinâmica das águas, são as características dos materiais inconsolidados que determinam a separação entre escoamento superficial e infiltração. Como a área está recoberta em torno de 70% por sedimentos cenozoicos e ao aprofundar no perfil, chega-se a camadas da Formação Itaqueri, sendo que além disso 30% do Itaqueri está aflorante na área de estudos, sem nenhuma camada sobreposta a ela, podem-se afirmar algumas coisas.

Analisando esses dados, pode-se dizer que a área de estudo tem uma maior propensão a infiltração do que a escoamento superficial, visto que depósitos de sedimentos não-consolidados, como os Sedimentos Cenozoicos, que são compostos por areias média a finas, apresentam porosidade muito mais elevada do que rochas magmáticas, por exemplo. A porosidade também tende a ser maior em materiais com pouca variação no tamanho dos grãos, como nas camadas de areia uniformes da Formação Itaqueri, do que naqueles com grande variação granulométrica, onde partículas menores se alojam entre grãos maiores (IRATANI e EZAKI, 2009).

**Figura 62.** Dados de um período de 45 dias na Estação Metereológica EMBRAPA São Carlos.



**Fonte.** Elaborado pela autora a partir de dados da EMBRAPA São Carlos, 2018.

#### 4.2.3 ESTIMATIVA DA RECARGA DIRETA DAS ÁGUAS SUB-SUPERFICIAIS

O método escolhido para a estimativa da recarga direta foi o *WTF*, que é baseado na análise da variação temporal do nível freático, como descrito nos materiais e métodos. Ele foi selecionado pela disponibilidade dos dados necessários para a sua aplicação, facilidade de utilização e registros de bons resultados na literatura (MILLAR, 1988; HEALY e COOK, 2002; MAZIERO e WENDLAND, 2005; BARRETO, 2006).

Maziero e Wendland (2005), utilizaram o método *WTF* para estimar a recarga direta de um aquífero, em zona central do município de São Carlos-SP, em 12 poços rasos, com profundidade de 4 a 13 m. No Apêndice I pode-se observar a flutuação do nível d'água, durante o período de doze meses, dos quatro poços de monitoramento instalados na área de estudo.

Esta técnica consiste em identificar os períodos em que não há recarga direta, observando a precipitação ocorrida no período e mudanças bruscas na elevação da declividade do nível do aquífero. Gomes (2008) utilizou uma função do tipo exponencial para extrapolar as curvas de recessão dos níveis dos poços, entretanto, Healy e Cook (2002) afirmam não haver um tipo específico de função. Para este trabalho foi adotada a função potencial utilizada por Barreto (2006) e Wendland et al. (2007), apresentada na Equação 2 do capítulo materiais e métodos. Sendo ela;

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Onde R é a recarga direta

Sy = rendimento específico

$\Delta h$  = flutuação nível freático;  $\Delta t$

$\Delta t$  = tempo (período monitorado)

Para a determinação do  $\Delta h$ , deve-se somar as diferenças dos picos de ascensão e dos pontos mais baixos da curva extrapolada antecedente à recessão, na hora do pico (HEALY e COOK, 2002). Considera-se subjetiva a extrapolação da curva de recessão, pois não há padronização da equação gráfica, apenas tenta-se melhor acomodar a curva entre o processo de defasagem e o início da variação do nível.

O rendimento específico, para Millar (1988), é um parâmetro equivalente à macroporosidade do material, que pode ser determinado pela diferença entre os conteúdos de água no solo na saturação e na capacidade de campo. A determinação dos índices de porosidade nesta pesquisa se faz importante, pois indicam a máxima quantidade de água que uma rocha pode conter quando saturada, funcionando como um reservatório.

Para a aplicação do método WTF foi necessário a obtenção de alguns dados que não foram possíveis a coleta neste trabalho. Sendo assim, a partir do método do perfil instantâneo feito no trabalho de Fagundes (2010), em um trecho comum a área de estudo deste trabalho, pode-se obter características da porosidade do material dos Sedimentos Cenozoicos e da Formação Itaqueri. Considerando que as características de ambos os materiais são bem semelhantes, constatado até por muitos autores a dificuldade da diferenciação dos mesmos, quando a linha de seixo não está presente; pode-se utilizar os dados de porosidade obtidos por Fagundes (2010) sem maiores ressalvas.

A porosidade ( $e$ ) dos materiais varia de 0,770 nos Sedimentos Cenozoicos a 0,817 na Formação Itaqueri. Como para os cálculos do método WTF é necessária uma variável constante para geração da recarga total, foi imprescindível fazer uma média desses dois valores para chegar a um valor utilizável. Sendo assim, foi utilizado o  $e=0,794$ . Os valores do coeficiente de rendimento específico ( $S_y$ ) utilizados foram obtidos através de dados da literatura, assim como fizeram Barreto (2006) e Wendland *et al.* (2007).

Para o cálculo da recarga do período no poço de monitoramento P1, utilizou-se o rendimento específico ( $S_y$ ) a partir dos dados de Fagundes (2010), no qual obteve-se um valor de 0,2. A fórmula a seguir demonstra o que foi feito para a obtenção dos dados finais.

( $\Delta h$ ) é o somatório de todas  $dh$  no período estudado. Onde:  $\Delta h = 1,10\text{m}$

Onde:  $\Delta h = 0,15+0,79+0,16$

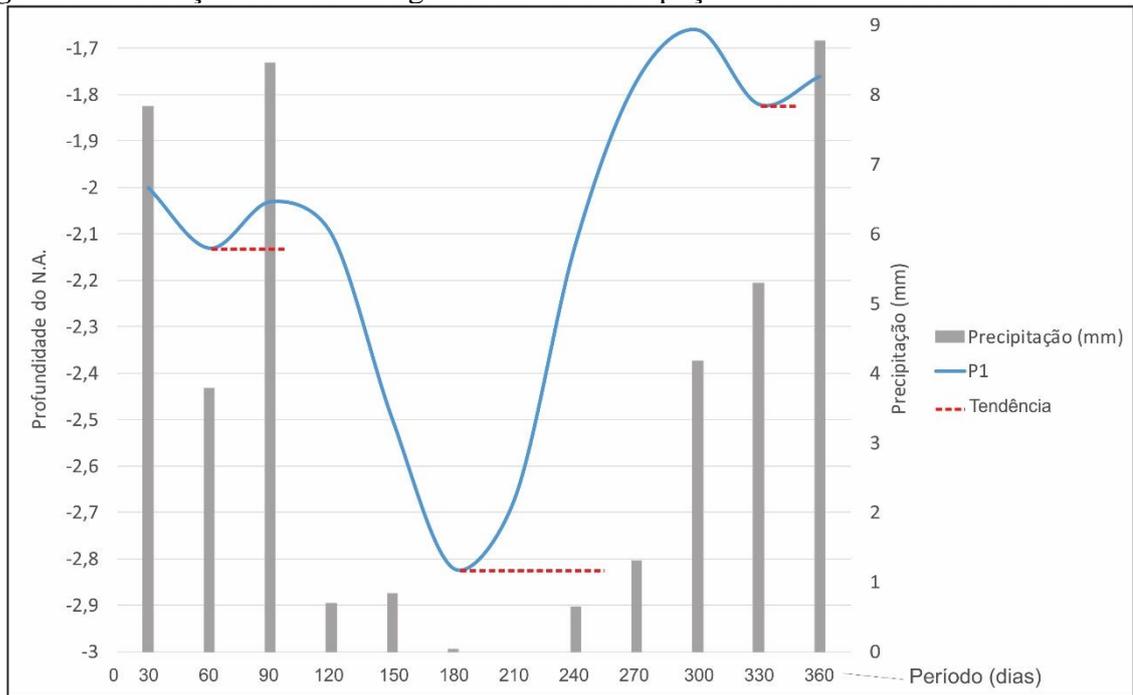
( $\Delta t$ ) = 365 dias

$$R = 0,794 * (1,10 * 1000) / 365 \text{ dias}$$

$$R = 220 \text{ mm/período de 365 dias}$$

Sendo, assim, foi possível determinar a diferença de altura com o pico de flutuação do nível da água subterrânea e a base da curva de recessão. Identificaram-se neste caso (P1) em três recessões significativas, como observado na Figura 63.

**Figura 63.** Flutuação do nível da água subterrânea do poço P1 e as linhas de tendência.



**Fonte.** Elaborado pela autora

Para o cálculo da recarga do período no poço de monitoramento P2, utilizou-se o rendimento específico ( $S_y$ ) como sendo a variável  $e=0,794$  no período de 365 dias ( $\Delta t$ ), de acordo com a Equação 2.

( $\Delta h$ ) é o somatório de todas  $dh$  no período estudado. Onde:  $\Delta h = 1,55m$

Onde:  $\Delta h = 0,22+1,33 = 1,55$

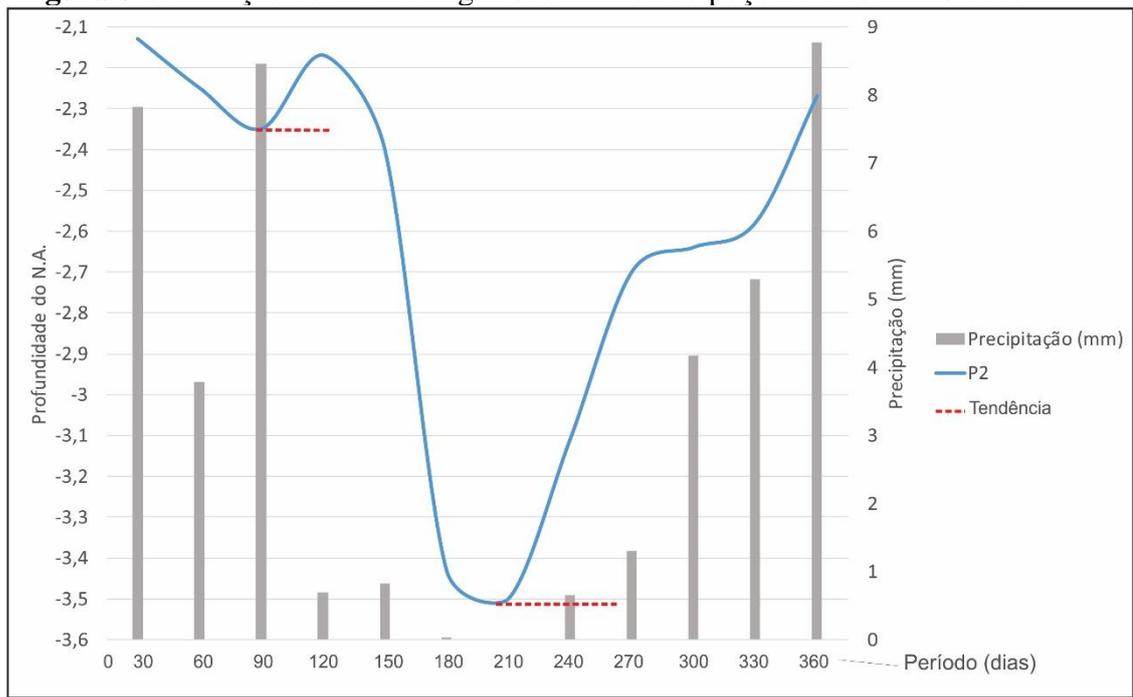
( $\Delta t$ ) = 365 dias

$$R = 0,2 * (1,55 * 1000) / 365 \text{ dias}$$

$$R = 310 \text{ mm/período de 365 dias}$$

Identificaram-se neste caso (P2) duas recessões significativas, como observado na Figura 64.

**Figura 64.** Flutuação do nível da água subterrânea do poço P2 e as linhas de tendência.



**Fonte.** Elaborado pela autora

Para o cálculo da recarga do período no poço de monitoramento P3, utilizou-se o rendimento específico ( $S_y$ ) como sendo a variável  $e=0,794$  no período de 365 dias ( $\Delta t$ ), de acordo com a Equação 2.

( $\Delta h$ ) é o somatório de todas  $dh$  no período estudado. Onde:  $\Delta h = 2,42m$

Onde:  $\Delta h = 0,47+1,95 = 2,42$

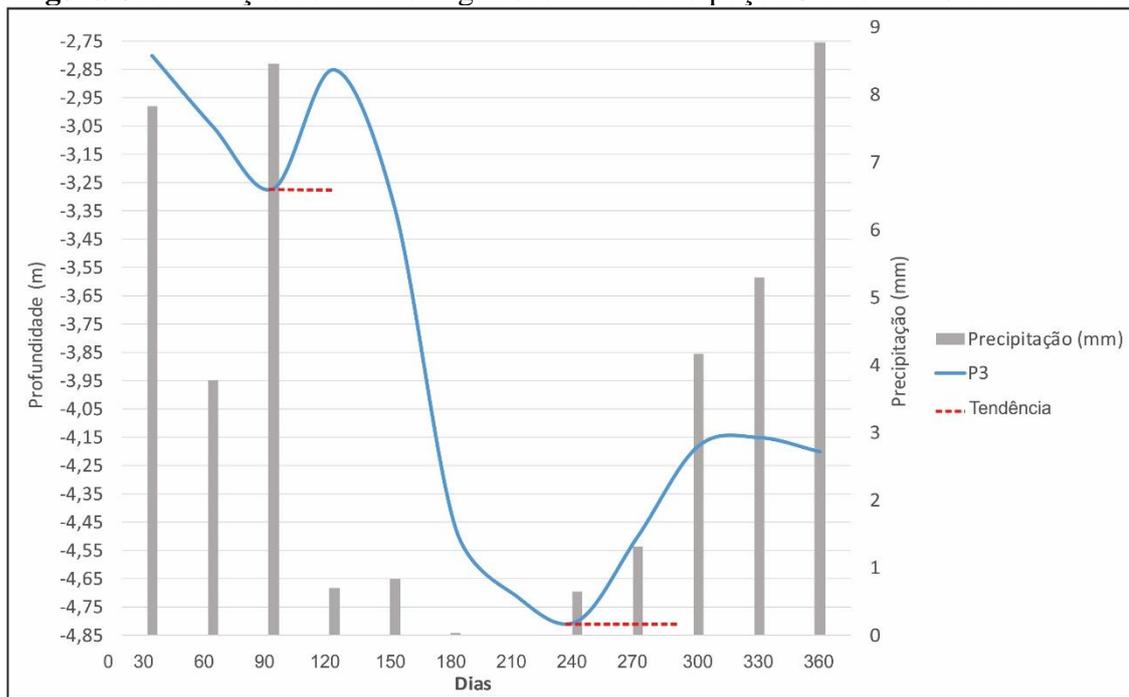
( $\Delta t$ ) = 365 dias

$$R = 0,2 * (2,42 * 1000) / 365 \text{ dias}$$

$$R = 484 \text{ mm/período de 365 dias}$$

Identificaram-se neste caso (P3), duas recessões significativas, como observado na Figura 65.

**Figura 65.** Flutuação do nível da água subterrânea do poço P3 e as linhas de tendência.



**Fonte.** Elaborado pela autora

Para o cálculo da recarga do período no poço de monitoramento P4, utilizou-se o rendimento específico ( $S_y$ ) como sendo a variável  $e=0,794$  no período de 365 dias ( $\Delta t$ ), de acordo com a Equação 2.

( $\Delta h$ ) é o somatório de todas  $dh$  no período estudado. Onde:  $\Delta h = 1,55m$

Onde:  $\Delta h = 0,13+1,42 = 1,55$

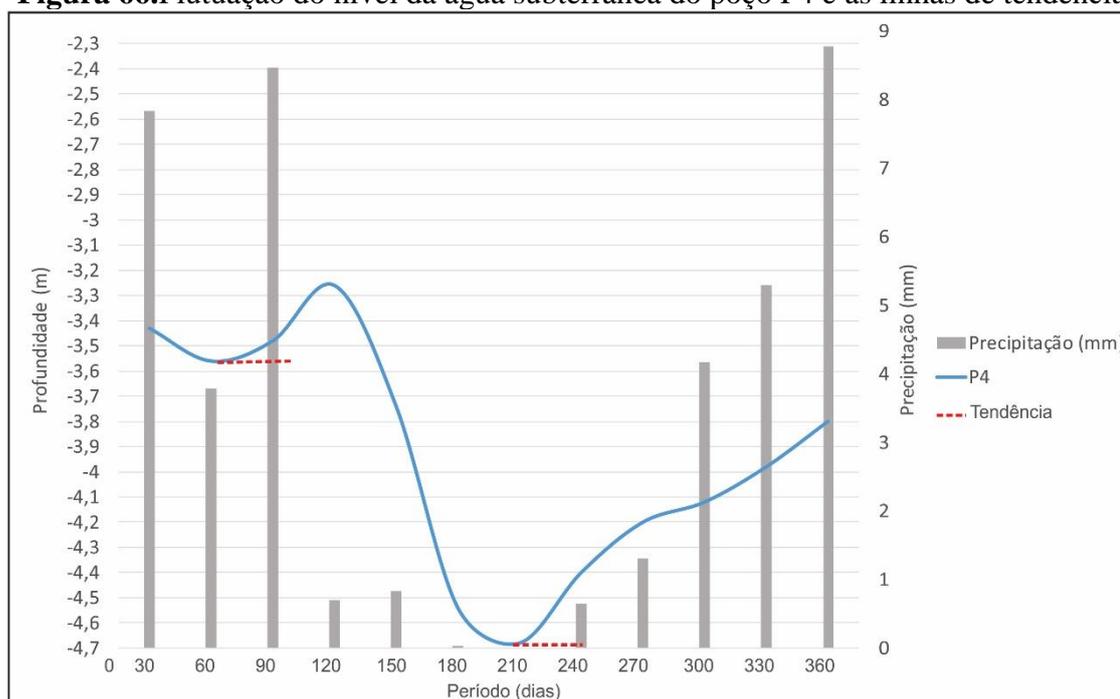
( $\Delta t$ ) = 365 dias

$$R = 0,2 * (1,55 * 1000) / 365 \text{ dias}$$

$$R = 310 \text{ mm/período de 365 dias}$$

Identificaram-se neste caso (P3), duas recessões significativas, como observado na Figura 66, os poços de monitoramento P3 e P2 obtiveram exatamente a mesma quantidade de recarga direta durante o período.

**Figura 66.** Flutuação do nível da água subterrânea do poço P4 e as linhas de tendência.



**Fonte.** Elaborado pela autora

De acordo com o método WTF a recarga direta para a bacia pode ser estimada a partir da média aritmética da recarga direta encontrada para cada poço de observação considerado. Sendo assim, a recarga direta da área em estudo foi de 331mm/período.

A precipitação anual do período foi de 1338,8mm, ou seja, a recarga direta da área correspondeu uma média 16% no P1, 23% no P2 e P4 e 36% no P3 da recarga anual da área em estudo. Essa recarga, atingindo porcentagens maiores que 25%, são recargas de alto padrão, evidenciando mais uma vez, que os tipos de materiais inconsolidados da área, com porcentagens superiores a 50% de granulometrias de areia média a fina, representam uma maior facilidade na infiltração de água, colaborando com a recarga das águas. Outro motivo dessa recarga direta ser alto é porque a Formação Itaqueri está aflorante em cerca de 37% da área em estudo e nos outros 63% é recoberta apenas por sedimentos cenozoicos, que atingem geralmente profundidades de no máximo dois metros.

Considerando os registros pluviométricos do INMET durante o período de monitoramento, a precipitação/período, que teve um valor referente de 1338,8mm foi inferior ao valor médio anual registrado na série histórica de 1912-2004, de Heldwein et al. (2009), que foi de 1712,4mm e também inferior ao valor médio registrado pela CPRM (1994), que apresentava um valor de 1769 mm. Na Tabela 3 pode-se observar as precipitações mensais acumuladas durante todo o período avaliado, com ocorrência de estiagens nos meses de junho

e julho de 2018. Pode-se dizer que houve uma maior precipitação no verão (619,8mm), seguido da primavera (512,5mm), outono (155,4mm) e o menor no inverno (50,1mm).

**Tabela 6.** Precipitação pluviométrica mensal acumulada no período de monitoramento.

Meses	Precipitação (mm)	Meses	Precipitação (mm)
<b>Ago/17</b>	21,6	Fev/18	130,4
<b>Set/17</b>	56,2	Mar/18	216,8
<b>Out/17</b>	146,6	Abr/18	12,6
<b>Nov/17</b>	201,4	Mai/18	34,2
<b>Dez/17</b>	274,8	Jun/18	0,4
<b>Jan/18</b>	243,6	Jul/18	0,2

**Fonte.** INMET

Sendo assim, ao comparar os dados do INMET, com os dados obtidos pelas observações dos poços de monitoramento, conclui-se que os períodos de maior recarga direta das águas subterrâneas ocorreram no verão e os períodos de maior rebaixamento desse nível se referem aos meses de inverno.

Destaca-se que autores como Montaño e Carrión (1990), Silva Busso (1999), Perez e Rocha (2002) e Pacheco (2004) também realizaram estudos referente à recarga de água subterrânea em áreas do SAG aflorantes sendo que os valores encontrados variam de 3 a 3,6% da precipitação média anual.

Na bacia hidrográfica do Ribeirão da Onça, em São Carlos/SP, Barreto(2006), Wendland *et al.* (2007), Barreto *et al.* (2009) e Gomes (2008), estimaram valores de recarga, tanto superficial quanto profunda (WENDLAND 2007, GOMES, 2008) da ordem de 14 a 38%, da precipitação média anual, estes dados foram obtidos pelo método WTF.

Portanto, a estimativa de recarga de aquíferos livres pelo método WTF, apresenta confiabilidade, pois os resultados obtidos neste trabalho vão ao encontro com resultados obtidos em trabalhos de outros pesquisadores.

### **5.3 Análise multitemporal de imagens de satélite do Google Earth Pro**

#### **4.4.1 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO AO REDOR DE NASCENTES**

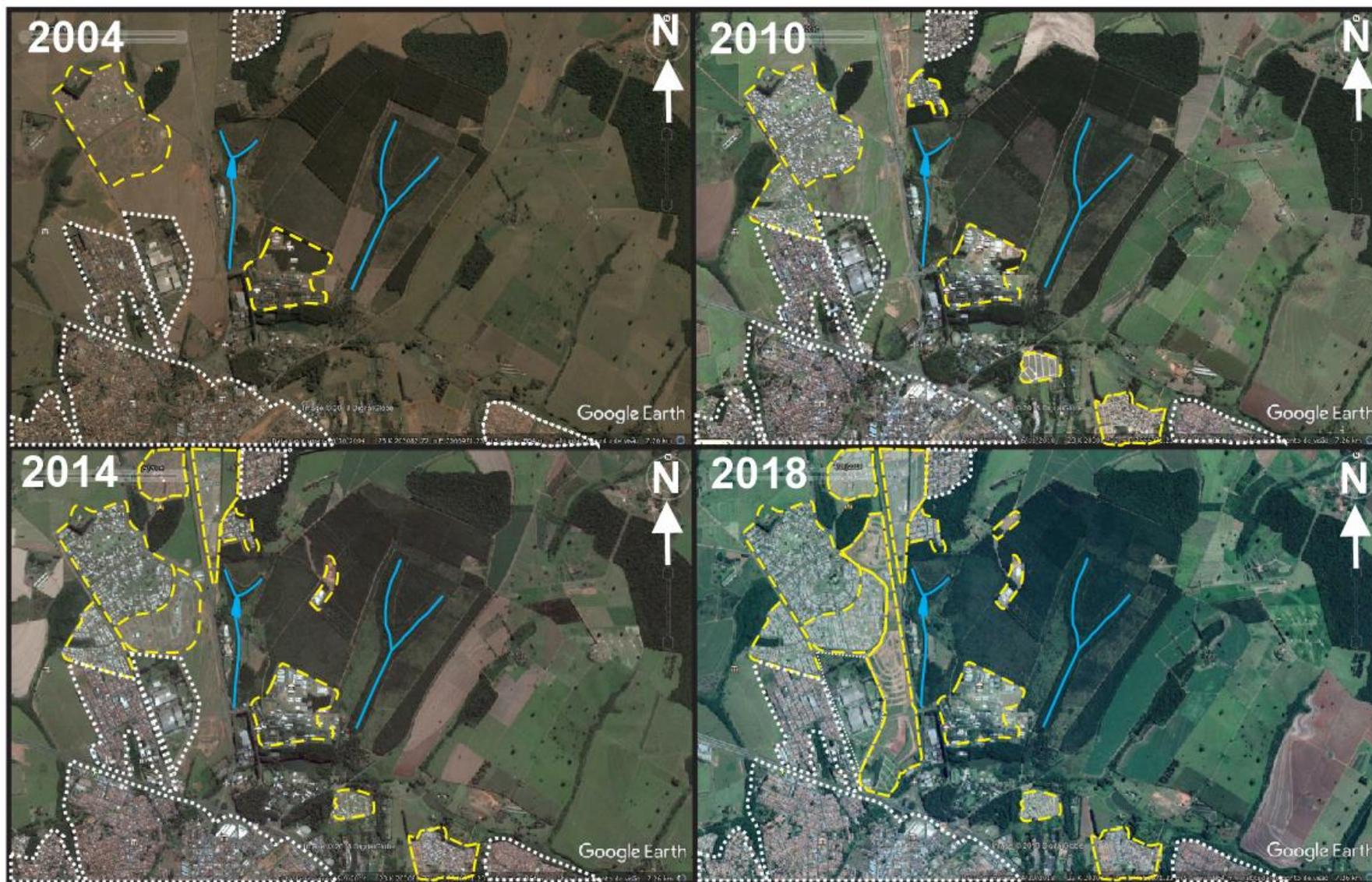
Nesse subcapítulo será feita uma análise comparativa entre o uso e ocupação do solo de 2004, 2010, 2014 e 2018. Esses mapas são caracterizados como um atributo de grande relevância, pois seu tipo de uso interfere nas condições de compactação e/ou impermeabilização das camadas superficiais, influenciando diretamente os processos de infiltração.

De acordo com os autores Amaral e Ribeiro (2009), a combinação de condicionantes naturais e antrópicos permitem analisar a probabilidade e a ocorrência de inundação, enchente e alagamento. Entre os condicionantes naturais estão os que já foram citados anteriormente, como as formas de relevo; características do solo e teor de umidade; características da rede de drenagem; existência ou falta de cobertura vegetal; intensidade, duração e frequência das precipitações. Já os fatores antrópicos são evidenciados pelo uso e ocupação irregular nas planícies e margens de cursos d'água, pela disposição inadequada de resíduos sólidos próximos a rede de drenagem, mudanças nas características da bacia hidrográfica e dos canais de drenagem, como vazão, canalização de canais e impermeabilização do solo.

Na Figura 67 pode-se observar a mudança na densidade de urbanização da área em estudo. Em 2004 apenas uma pequena parcela da área apresentava uma área urbanizada já consolidada (tracejados brancos) e duas outras novas concentrações (tracejados amarelos) de em estágio de construção, porém, em 2010, nota-se que essas duas áreas já sofreram um grande aumento de construções e mais quatro pontos começaram a desenvolver novas áreas construídas.

As diferenças entre as imagens de satélite dos anos de 2010 para 2014 não foram muito expressivas, porém, ao verificar a mudança de 2014 para 2018 tem-se uma grande e alarmante mudança em relação a construções civis. De acordo com o Plano Diretor de São Carlos, está prevista uma expansão urbana nessa região em estudo, expansão essa, voltada para a construção de condomínios residências de grande porte. Por isso, essas grandes novas áreas tracejadas em amarelo representam locais no qual esses condomínios serão ou já foram instalados.

**Figura 67.** Imagens multitemporais extraídas do Google Earth. Os pontos tracejados em branco marcam a área urbanizada já consolidada e os tracejados amarelos representam as área em expansão.



**Fonte.** Elaborado pela autora

Em situações em que os empreendimentos imobiliários são instalados em áreas próximas a córregos e nascentes são necessárias algumas medidas para se evitar as chances de contaminação dos recursos hídricos, além do rebaixamento do lençol freático gerado pela perfuração, legal ou ilegal, de poços tubulares profundos para a utilização dos condôminos.

Uma estrada próxima a nascente do Córrego do Fazare foi asfaltada no ano de 2014, devido a demanda gerada pelo aumento da circulação de automóveis no local. Esse aumento da densidade de automóveis que passam pela região aumenta o potencial de gotejamento de combustíveis fósseis na pista, acarretando um aumento na fragilidade ambiental do local.

Com a maior circulação de carros, a probabilidade do aumento de acidentes envolvendo derrame de combustíveis fósseis é grande, sendo assim, a chance do carregamento de contaminantes para o rio também aumenta. A Figura 68 mostra esta estrada secundária (asfaltada recentemente), que gerou uma impermeabilização local do solo em um momento de evento pluviométrico, não muito intenso, acarretando enxurradas na área asfaltada. Essas águas da superfície impermeabilizada chegam até a área de cerrado (menos de 4m de distância) e geram um alto grau de infiltração e escoamento superficial (Figura 69).

**Figura 68.** Chuva pouco intensa gerou enxurrada em região impermeável, que atingiu solo da região do Cerrado da UFSCar.



Fonte. Autora.

**Figura 69.** Escoamento superficial proveniente de estrada asfaltada.



**Fonte.** Autora.

As águas desse escoamento superficial mostrado na Figura 68 é levado diretamente até a área de nascente (100 metros de distância), podendo gerar grandes contaminações, provenientes de óleos combustíveis ou produtos químicos provenientes dessa estrada. Sendo assim, uma área que já apresenta uma vulnerabilidade alta, visto que seu solo é arenoso e o nível d'água é bastante raso (cerca de 1m de profundidade), torna-se altamente vulnerável quando colocada ao lado de uma estrada asfalta sem o mínimo de intervenções civis necessárias para a proteção das águas subterrâneas.

### 5.3.2 O USO E OCUPAÇÃO ASSOCIADO A GESTÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS

Neste trabalho foram gerados três mapas de uso e ocupação que podem ser vistos nas figuras 71, 72 e 73, referentes aos anos de 2004, 2010 e 2018, respectivamente. Os três mapas

foram gerados a partir de Imagens de Satélite do Google Earth, sendo que o mapa de uso e ocupação de 2018 foi composto por trabalhos de campo para sua melhor interpretação.

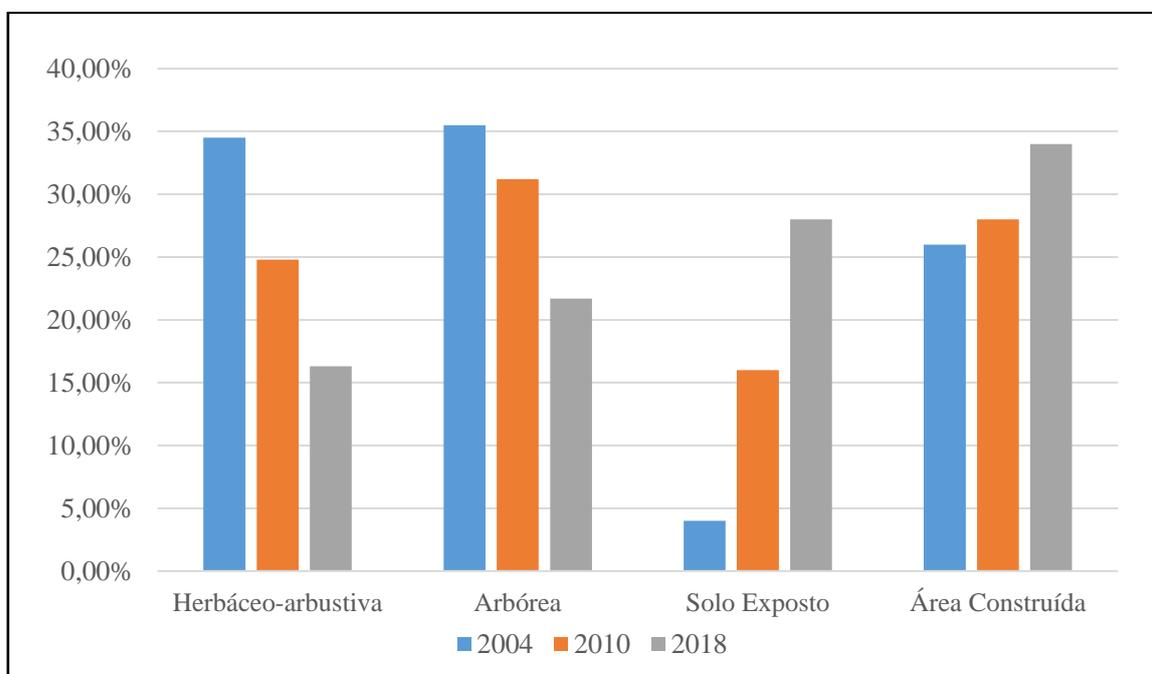
Na Tabela 7 e na Figura 70, pode-se observar a porcentagem de cada tipo de cobertura ao longo dos anos de 2004, 2010 e 2018. Vale ressaltar que na tabela e na figura a categoria “Eucalipto” foi adicionada a categoria “Arbórea” para a melhor visualização do todo, visto que, mesmo os eucaliptos sendo introduzidos artificialmente no local, ele faz parte da categoria arbórea.

**Tabela 7.** Porcentagem por área do tipo de cobertura do solo.

CATEGORIA/ANO	2004	2010	2018
<b>Herbáceo-arbustiva</b>	34,5%	24,8%	16,3%
<b>Arbórea</b>	35,5%	31,2%	21,7%
<b>Solo Exposto</b>	4%	16%	28%
<b>Área construída</b>	26%	28%	34%

**Fonte.** Elaborado pela autora.

**Figura 70.** Gráfico de porcentagem dos usos e coberturas dos solos nos anos de 2004, 2010 e 2018.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

O mapa de cobertura do solo do ano de 2004 apresenta uma vasta área de cobertura herbácea-arbustiva e arbórea, que somadas contabilizam 70% da área de estudo que em 14 anos foram substituídas por regiões de solo exposto, sobrando apenas 40% de vegetação herbácea-arbustiva e arbórea na área. Ao longo dos 14 anos analisados, a área construída no local aumentou apenas 4%, porém o solo exposto na imagem de 2004 corresponde a 4% de toda a área e, na imagem de 2018, esse solo exposto ganhou uma proporção enorme, atingindo 28% de toda a área. A maior parte desse solo exposto do ano de 2018 é relacionado aos grandes empreendimentos imobiliários que estão sendo instalados no local.

A aumento da presença de área urbana diminui a capacidade potencial de infiltração, devido a elevada taxa de impermeabilização do solo e também à compactação que ocorre nas áreas que deveriam ser permeáveis. Essa diminuição da infiltração ocasiona o aumento do escoamento superficial e aumenta o potencial de erosão em uma área que, de acordo com sua declividade plana a pouco ondulada (0-3%), não deveria ter esses tipos de feições.

Um dos usos inadequados evidenciados na imagem de satélite de 2018 é que nas áreas de preservação permanente, ao redor do Córrego do Espraiado, há a presença do solo exposto, caracterizado pela retirada completa da cobertura vegetal ao longo dos cursos d'águas, lugar onde deveria existir mata ciliar. Apesar de se ter uma área do cerrado que está 100% recuperada no ano de 2018, na qual houve a substituição de cobertura herbácea arbustiva por cobertura arbórea e, que em outras regiões o cerrado começa a ocupar áreas que anteriormente eram de eucaliptos plantados para comercialização, ou de solo exposto, observa-se que em oito anos, a porcentagem de solo exposto na área aumentou 700%.

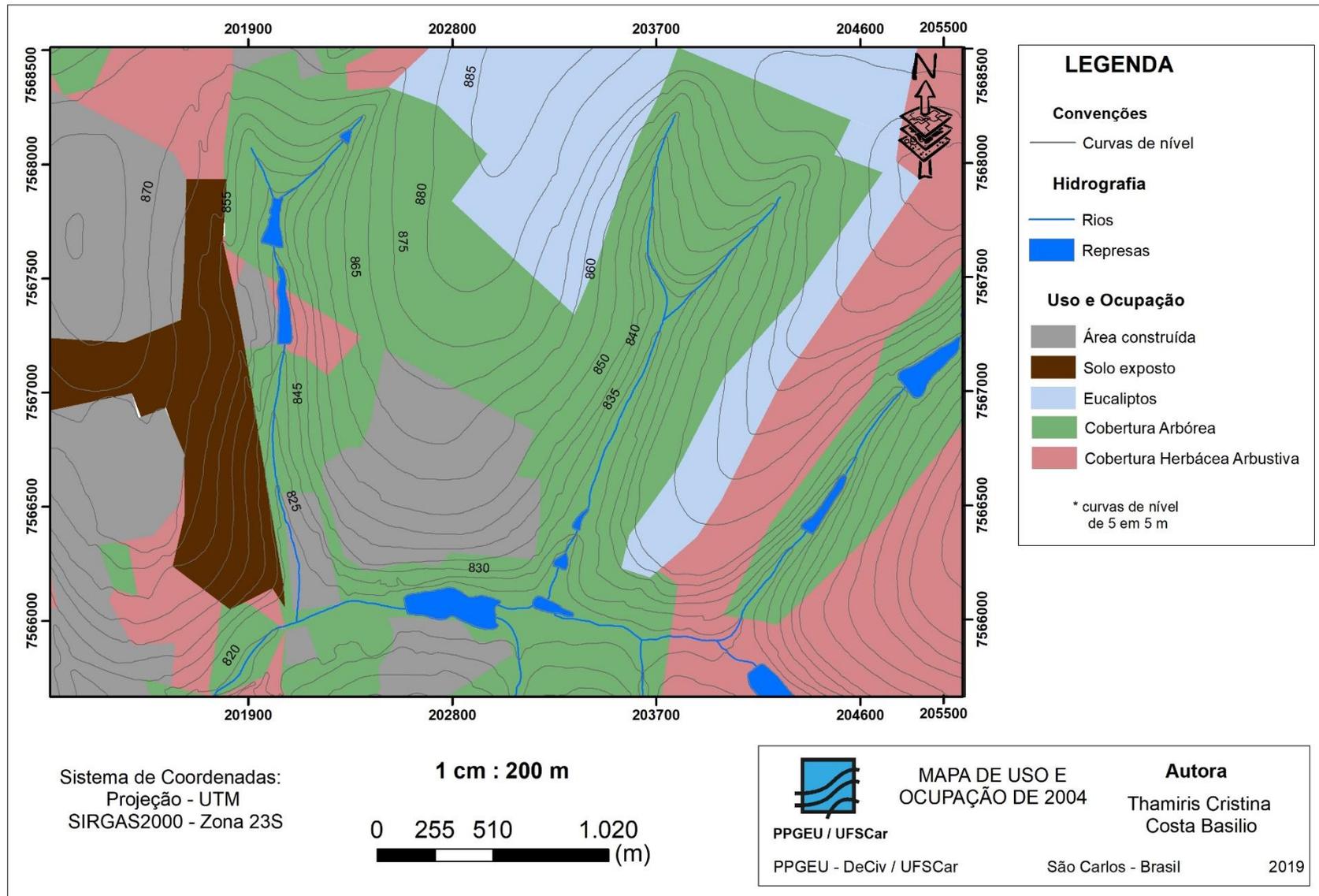
A supressão de mata ciliar - que protege as margens dos rios, lagos e nascentes - provoca sérios problemas de assoreamento dos corpos d'água, carregamento de materiais e resíduos que comprometem a qualidade das águas. Nas áreas de nascentes e cabeceiras, o desmatamento acarreta o progressivo desaparecimento do manancial. Sendo assim, é necessária uma maior fiscalização, por parte do governo, para o cumprimento da legislação das APP de 50 m das nascentes, medidas de recuperação da vegetação nessas áreas e também programas de conscientização sobre a importância das Mata Ciliares em APP, para a proteção das nascentes.

Lima (2008) comenta em seu trabalho que regiões de solos expostos próximos a nascentes implica na diminuição da vazão dessas, em médio e em longo prazo, acarretando consequentemente a eliminação gradativa dos rios alimentados por essa nascente. Vale lembrar que o Córrego do Espraiado é usado para captação de uso humano e, essa estação corresponde a 15% da captação de água utilizada na cidade, sendo que uma das vantagens a ela associada

refere-se à sua proximidade (cerca de 5 km) em relação à Estação de Tratamento de Água (ETA) (CÔRTEZ, 2000).

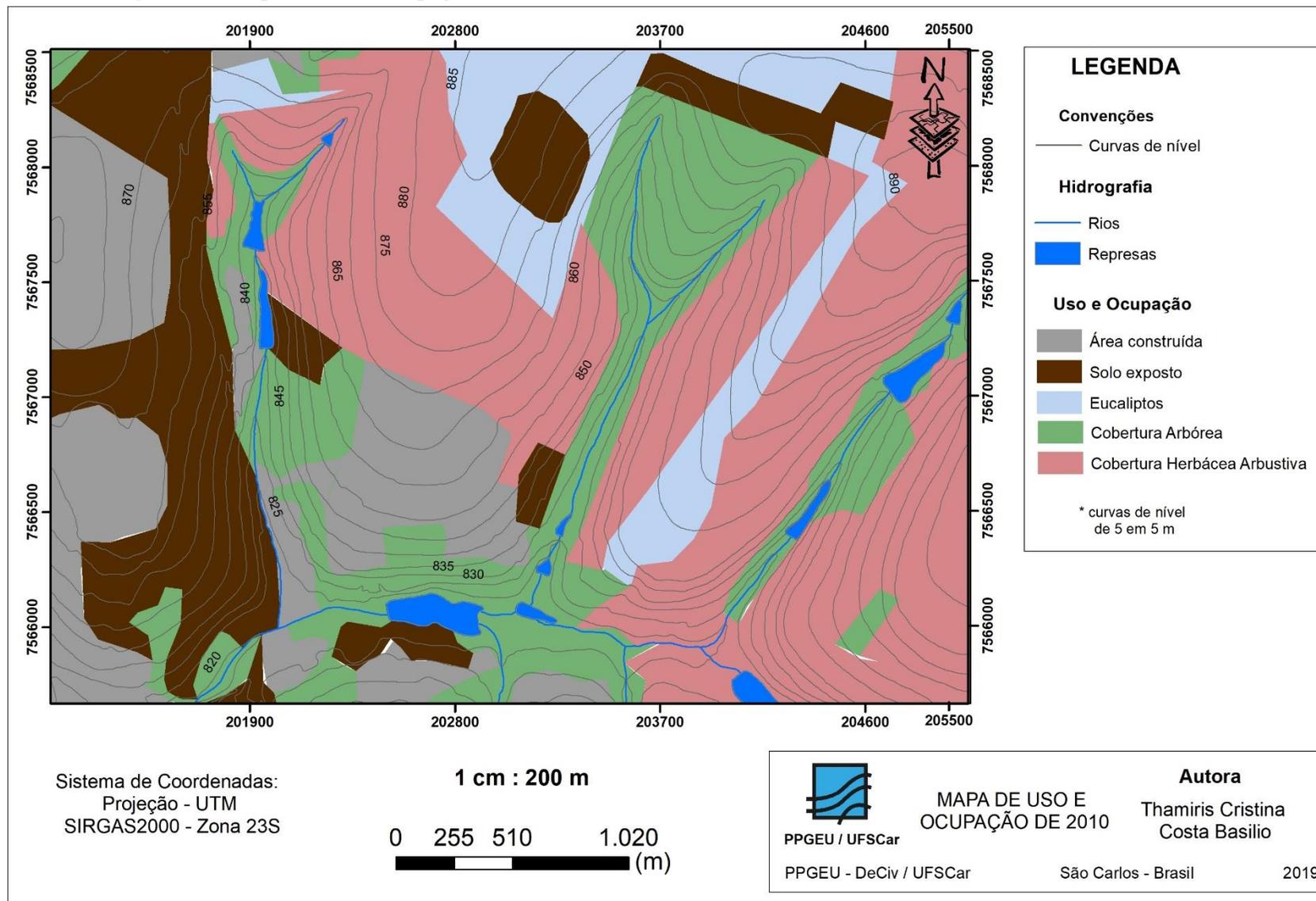
Trabalho de autores como Faria (2000), Tucci (2002) e Mendes e Lima (2007) já trataram de assuntos relacionados à influência das coberturas vegetais nos fluxos das águas. Linhares (2005), ao realizar um estudo no rio Ji-Paraná, em Rondônia, constatou que, entre os anos de 1984 e 2001, o desflorestamento que ocorreu de até 55% nas APP's ocasionou um incremento nas taxas de deflúvio na região.

**Figura 71.** Mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo, no ano de 2004.



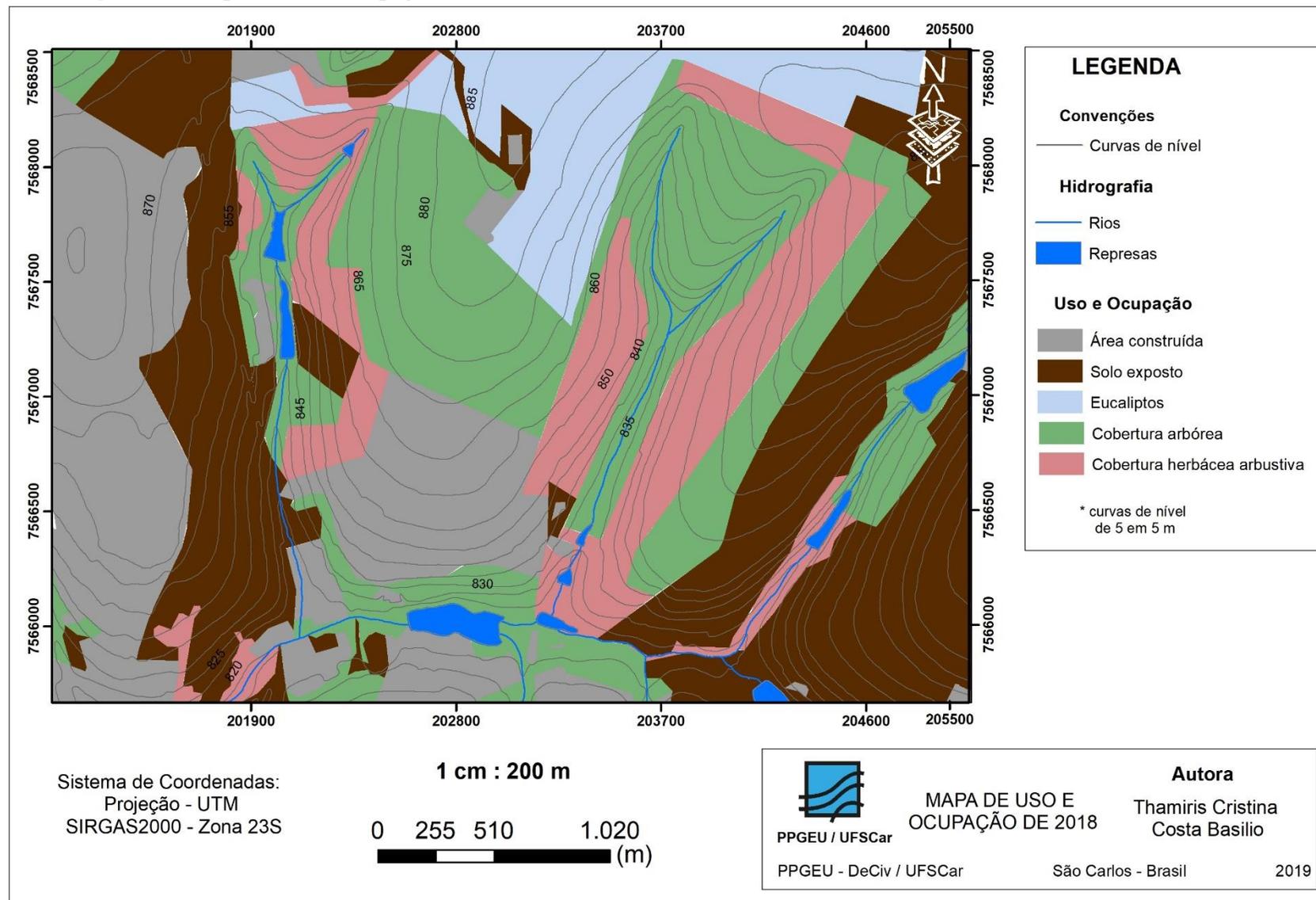
**Fonte.** Elaborado pela autora.

**Figura 72.** Mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo, no ano de 2010.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

**Figura 73.** Mapa de uso e ocupação do solo na área de estudo, no ano de 2018.



**Fonte.** Elaborado pela autora.

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do expressivo crescimento da busca do conhecimento dos aspectos dos recursos hídricos, os estudos baseados nesse meio ainda apresentam muitas lacunas. Por meio de uma análise bibliométrica pôde-se observar que estes estudos tiveram seu aumento a partir do ano 2009, com uma ampliação a partir de 2015. A revisão de literatura contribuiu também para um melhor entendimento de diversos fatores envolvidos na caracterização de aquíferos, possibilitando o entendimento de fenômenos e técnicas inerentes à quantificação da água subterrânea, assim como permitiu avaliar os métodos e técnicas a serem empregadas nas circunstâncias de realização deste estudo.

A frequência do monitoramento dos níveis, adotada nesta pesquisa, foi satisfatória para acompanhar as mudanças na elevação do aquífero provocadas pelos eventos de chuvas, principalmente quando as campanhas foram quinzenais. A utilização do método WTF para determinação da estimativa de recarga efetiva apresentou resultados positivos e satisfatórios que mostraram as reais informações da flutuação dos níveis das águas subsuperficiais ocorrentes nos locais de pesquisa e que acompanharam os resultados obtidos por outros pesquisadores da área.

Deste modo, considera-se que a recarga direta, que foi de 1338,8mm/ano, resulta principalmente do comportamento de alguns fatores, entre eles: a precipitação, a espessura da camada não-saturada do solo, a elevação do terreno, o uso do solo, a geologia, o clima e os índices pluviométricos. A maioria dos fatores exerceu grande influência no comportamento de recarga, com exceção da topografia, visto que a área de estudo é em sua maioria plana, com declividade da ordem de 0-6% em 81% da área em estudo. A função potencial utilizada por Barreto (2006) e Wendland *et al.* (2007) para a extrapolação da curva de recessão mostrou-se adequada, tendo em vista que os valores entre os dados observados e os dados calculados nesse trabalho foram da mesma ordem de grandeza.

Considera-se que estudos que buscam identificar a recarga de aquíferos livres são fundamentais nas tomadas de decisões quanto ao gerenciamento sustentável de uma bacia hidrogeológica. Portanto, os avanços obtidos relativos à série histórica de eventos pluviométricos e de estimativa de recarga, possibilitarão compreender cada vez melhor as inter-relações rio-aquífero, sua importância funcional na manutenção do fluxo de base, dos cursos de água, bem como nas dinâmicas organizacionais complexas e singulares do Ciclo Hidrológico.

A gestão deve dar subsídios a todos os interessados nos recursos hídricos, partindo do governo, com sua estrutura legal e institucional, passando pelo usuário privado e sociedade civil. Todos possuem motivações diferentes e específicas, como o consumo, a prestação de serviços ou a fiscalização, porém todos devem possuir o mesmo objetivo que é a proteção da qualidade e quantidade dos recursos disponíveis.

Com a finalização dessa pesquisa, algumas recomendações serão inseridas nesse capítulo em busca de colaborar com futuras pesquisas e com a gestão dos recursos hídricos:

- 1) O monitoramento sistemático das águas subsuperficiais por um período mais longo, utilizando equipamentos como *dataloggers*, a fim de dar subsídios na tomada de decisões quanto à utilização deste recurso;
- 2) A determinação do coeficiente de rendimento específico ao longo da profundidade dos poços monitorados, através da coleta de amostras não-deformadas do solo nas profundidades que compreendem as faixas de variação do nível do aquífero freático, para que os resultados da recarga pontual sejam mais exatos;
- 3) A aplicação de outras técnicas de estimativa de recarga, concomitantemente ao WTF, para que os resultados possam ser comparados, dentre elas o Método do Balanço de Massa de Cloreto, o Método da Precipitação Cumulativa, o Método EARTH, ou o Método de Flutuação do Volume Saturado;
- 4) A realização de análises geoquímicas das águas, para a verificação de possíveis fontes de contaminação.

## REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, A.N. Formações quaternárias em áreas de reverso de cuestas em São Paulo. **Geomorfologia**, 16:1-11. 1969.

AESCHBACH-HERTIG, W.; GLEESON, T. Regional strategies for the accelerating global problem of groundwater depletion. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 12, p. 853, 2012.

AGUIAR, R.L. **Análise do mapeamento geotécnico nos processos de gestão ambiental**: bases conceituais para aplicação no Distrito Federal - DF. São Carlos, SP. 88p. (Monografia - Escola de Engenharia de São Carlos/USP). 1994.

ALAM, M.; RAIS, S.; ASLAM, M. Role of Azadirachta indica (neem) biomass in the removal of Ni(II) from aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**. V, 21; (1-3); p. 20-227. 2010.

ALBUQUERQUE, A. C. L. S. **Estimativa de recarga da Bacia do Rio das Fêmeas através de métodos manuais e automáticos**. Dissertação de mestrado em Engenharia Florestal. Universidade de Brasília. 116 p. 2009.

ALBUQUERQUE, J. P. T. Água subterrânea no planeta água. **Estudos geológicos**. V 17 (1). p. 23 – 39, 2007.

ALLISON, G.B. *et al.* Land clearance and river salinisation in the western Murray Basin, Australia. **Hydrogeology Journal** [S.I.], v. 119, p. 1–20, 1990.

ALMEIDA, F.F.M. & BARBOSA, O. **Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro**, Estado de São Paulo. BoI. DNPM/IDGM, 143:96p. 1953.

ALMEIDA, F.F.M. **Geologia do Estado de São Paulo**. Instituto Geog. Geol. 1964.

ARANTES, E.J. **Emprego de infiltrômetros na caracterização da interação entre rio e aquífero**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 88 f. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT Coleção**. São Paulo: ABNT, 2015. Disponível em: <<<http://www.abntcolecao.com.br>>>. Acesso em: 08 ago. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS "**NBR 15495-2** - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulares - Parte 2: desenvolvimento", 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. "**NBR 6508**" – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,9 mm – Determinação da Massa Específica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 7181/84**: análise granulométrica: solo. **Rio de Janeiro**, 1984.

ASTM, D. 3385-03. Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer. In: **American Society for Testing and Materials**. 2003.

AUSTRALIA (País). **Department of Primary Industries**. 2006. Disponível em:<<http://www.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/glenregn.nsf/696c4532f2cc03304a256718003e5c09/57bcc21ea3987fb64a256aa1000a04c1?OpenDocument>>. Acesso em: 30/06/2017.

AZEVEDO, P.G., MESQUITA, F.O., YOUNG, R.J. Fishing for gaps in science: a bibliographic analysis of Brazilian freshwater ichthyology from 1986 to 2005. **J. Fish Biol.** 76, 2177–2193. 2005.

BALEK, J. Groundwater recharge concepts. In: **Estimation of natural groundwater recharge**. Springer, Dordrecht, 1988. p. 3-9.

BARCELOS, L.H. *Et al.* A Formação Itaqueri: um exemplo de tectofácies. In: Simpósio Regional De Geologia, 4., São Paulo. **Atas**. São Paulo: SBG, p.245-252. 1983.

BARRETO, C.E.A.G. **Balço hídrico em zona de afloramento do sistema aquífero Guaraní a partir de monitoramento hidrogeológico em bacia representativa**. Dissertação de mestrado. Área: Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC/USP. 249 p. 2006.

BONACIN SILVA, A. L. **Caracterização ambiental e estudo do comportamento do chumbo, zinco e boro em área degradada por indústrias cerâmicas - região dos lagos de Santa Gertrudes, SP**. Dissertação de Mestrado. UFSCar. São Carlos, SP. 2015.

BOUDRY, C.; BOUDOUIN, D.; MOURIAUX, F. International publication trends in dry eye disease research: A bibliometric analysis. **The Ocular Surface**. 16 (2018). 173e179. 2018.

BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BRANDT NETO, M. **O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2v. (Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo). 1984.

BRANDT NETO, M., COIMBRA, A.M., BARELLI, N. e SPILLER, L.R. Sedimentos da Serra de Itaqueri. In: **A Formação Bauru No Estado De São Paulo E Regiões Adjacentes**, São Paulo. Coletânea de trabalhos e debates. São Paulo: SBG, p.63-80.1981.

BRUNNER, P. *et al.* Using Remote Sensing to regionalize local precipitation recharge rates obtained from the Chloride Method. **Journal of Hydrology**. 2003.

BUSS, D.F.; BAPTISTA, D.F.; NESSIMIAN, J. L. Bases conceituais para a aplicação de biomonitoramento em programas de avaliação da qualidade da água de rios. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro. V. 19 (2). P. 465-473. 2003.

CABRAL JR., M. *et al.* **Revisão estratigráfica do nordeste do Estado de São Paulo.** In: SIMPÓSIO SOBRE AS BACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS, 2., Rio Claro. Resumos Expandidos. Rio Claro: UNESP, p. 134 – 136. 1992.

CALIJURI, M. C. E CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental, Conceitos, Tecnologia e Gestão.** Editora Elsevier, São Paulo, 2013.

CAMPANELLI, L.C. **Zoneamento (Geo)Ambiental Analítico da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho – São Carlos- SP.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. Programa de pós-Graduação em Engenharia Urbana. 2012.

CARVALHO JR., W.; LAGACHERIE, P.; CHAGAS, C. S.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B. A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment. *Geoderma*, v. 232, p. 479-486, 2014.

CAVALCANTI, M. A. M. P, **A modelagem matemática associada aos sistema de informação geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios.**Tese de Doutorado. São Paulo, 2002.

CHEN, X. *et al.* The impact of land use and land cover changes on soil moisture and hydraulic conductivity along the karst hillslopes of southwest China . **Environmental Earth Sciences.** V , 59 (4); 811-820. 2009.

CHOI, S. *et al.* Electrodialysis for desalination of brackish groundwater in coastal areas of Korea . **Desalination and Water Treatment.** V.51 (31-33); p. 6230-6237. 2013.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1994). **Applied Hydrology.** McGraw- Hill: New York, 584p.

CHUANG, K.Y.; HUANG, Y.L.; HO, Y.S. A bibliometric and citation analysis of stroke-related research in Taiwan. **Scientometrics**, 2007;72:201–12.

CÔRTEZ, M. R.; RIGHETTO, G. M.; LEONELLI, G. C. V.; FERNANDES, A. C. de A. Uso e ocupação da terra na área urbana. In: ESPÍNDOLA, E. L. G.; SILVA, J. S. V.; MARINELLI, C. E.; ABDON, M. M. A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho. São Carlos: **Ed. Rima**, 2000.

COTTAS, L.R. & BARCELOS, J.H. Novas considerações sobre a região de Itaqueri da Serra. In: Simpósio Regional De Geologia, 3., Curitiba. **Atas.** Curitiba: SBG, v.2, p.70-76.1981.

COELHO, V.H.R. **Monitoramento e análise da variação do nível d'água para estimativa de recarga do aquífero livre da Bacia do Rio Gramame – PB.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Centro de Tecnologia. João Pessoa, Paraíba. 2011.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO (CMMAD/ONU). **Nosso Futuro Comum.** Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 2 ed. 1991.

CONICELLI B.P. e HIRATA R. **Novos paradigmas na gestão das águas subterrâneas.** XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 18p. 2016.

CONWAY, G. **Produção de alimentos no século XXI: biotecnologia e meio ambiente**. São Paulo: Estação Liberdade, 1997.

CÔRTEZ, M. R. et al. **A bacia hidrográfica do rio do Monjolinho**. São Carlos: Ed. Rima, 2000.

COSTA, W. E. **Expansão da mancha urbana e suas consequências sobre os mananciais do rio do monjolinho e do ribeirão do feijão da cidade de São Carlos, SP**. Universidade Federal de Itajubá. Programa de pós-graduação em meio ambiente e recursos hídricos. Dissertação de mestrado. Itajubá – MG. 127 pg. 2010.

DAMBRÓS, C. **Recarga e flutuação do nível da água subterrânea em sub-bacias com floresta e campo nativo**. 2011.119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

DAMBRÓS, C.; FARIAS, P. V. da C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Estimativas de recarga através da flutuação do nível de água subterrânea em bacias representativas no Sistema Aquífero Guarani no Rio Grande do Sul. **Anais...** Conferência “A gestão do Sistema Aquíferos Guarani: um exemplo de cooperação. São Paulo/SP, 2011. [1]

DAMBRÓS, C.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L. Comportamento do nível da água subterrânea em sub-bacia representativa em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Anais...** XIV World Water Congress. Recife/PE. 2011. [2]

DE BEAULIEU, J. L. À propos de la concentration du pollen à l'aide de la liqueur de Thoulet dans les sédiments minéraux. **Pollen et spores**, 1979.

DE CARVALHO, Maria Martha. Análises bibliométricas da literatura de química no Brasil. **Ciência da Informação**, v. 4, n. 2, 1975.

DERBY, O. A. Geologia da região diamantífera da Província do Paraná no Brasil. **Archivos do Museu Nacional**, v. 3, p. 89-96, 1878.

DUNN, S. M.; MACKAY, R. Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 171, n. 1, p. 49-73, 1995.

ESPINOSA, H.R.M. Desenvolvimento e meio ambiente sob nova ótica. **Ambiente**, Vol. 7, n. 1, p. 40-44, 1993. FONSECA, C. G et al. Na<sup>+</sup> as a probe to structural investigation of dehydrated smectites using NMR spectra calculated by DFT. **Applied Clay Science**, v. 126, p. 132-140, 2016.

**ESRI** – Environmental Systems Research Institute. ArcGIS for the desktop 10.5 Redlands, CA: ESRI, 2017.

EILERS, V. H. M. Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2004.

EPA – Environmental Protection Agency. **Estimation of Infiltration rate in the vadose zone: Application of Selected Mathematical Models**. V. 1 e 2. 1988.

FAGUNDES, J. R. T. **Estudo integrado das características geológico-geotécnicas com vista à avaliação de recarga de aquífero: região de São Carlos-SP**. 2010. (Tese

Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FAMIGLIETTI, J. S.; RODELL, M. Water in the balance. **Science**, v. 340, n. 6138, p. 1300-1301, 2013.

FARIA, A. P. Influência da vegetação nos processos fluviais de bacias de 1º ordem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1. p. 59 - 68. 2000.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. Fourth Edition. Prentice Hall. 598p. 2001.

FIGUEIREDO, L. M.. **Distribuição da literatura geológica brasileira: estudo bibliométrico**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1972.

FONSECA, C.G et al. Structural and thermodynamic investigation of the hydration-dehydration process of Na<sup>+</sup>-Montmorillonite using DFT calculations. **Applied Clay Science** v. 143, p. 212–219, 2017.

FOSTER, S; GARDUÑO, H; KEMPER, K. The 'Cotas': **Progress with Stakeholder Participation in Groundwater Management in Guanajuato**. World Bank-GWMATE. Washington (DC, USA). 16p. 2004.

FREEZE, R.A. e CHERRY, J. A. **Groundwater**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. NJ. 604 pp. 1979.

FU, Hui-Zhen; WANG, Ming-Huang; HO, Yuh-Shan. The most frequently cited adsorption research articles in the Science Citation Index (Expanded). **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 379, n. 1, p. 148-156, 2012.

FU, H.Z.; WANG, M.H.; HO, Y.S. Mapping of drinking water research: a bibliometric analysis of research output during 1992–2011[J]. **Sci Total Environ**. 443:757–765. 2013.

FUSP (Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo). Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. In: **Caderno Técnico Institucional**, São Paulo. 2002.

GRIM, R.E., GÜVEN, N. Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and uses. **Elsevier**, NY. 1978.

GOMES. L. H. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do balanço hídrico em zona saturada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos: USP, São Carlos. 2008

GARFIELD, E. KeyWords Plus™ - ISIS breakthrough retrieval method. 1. Expanding your searching power on current-contents on diskette, **Current Contents**, 32, 5–9. 1990.

GOUVÊA, T. H. **Análise estatística da influência da precipitação e de características do solo na variação do nível d'água em área de recarga do Aquífero Guarani**. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

GRAEPIN, C. **Estimativa de recarga de aquífero em sub-bacias parcialmente reflorestadas no Rio Grande do Sul**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria / UFSM/ RS. 2014.

HAGER, F.V. et al. **A problemática da gestão das águas subterrâneas no Brasil**. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 17p. 2002.

HARE, P. W. e MORSE, R. E. Water Level Fluctuations Due to Barometric Pressure Changes in an Isolated Portion of an Unconfined Aquifer. **Ground Water**. vol 35, no. 4. p. 667–671. 1997.

HASUI, Y. & SADOWSKI, G.R. Membro Itaqueri e Facies Ponte Alta. **Ciência e Cultura**, 24:138-139. 1972.

HEALY, R.W., COOK, P.G., Using groundwater levels to estimate recharge. **Hydrogeology Journal**. 10, 91–109 p. 2002.

HILLEL, D. **Introduction to Soil Physics**. Academic Press. New York. 1982.

HIRATA, R. C. A.; SUHOGUSOFF, A.V.; FERNANDES, A. J. Groundwater resources in the state of São Paulo. In: **Anais da Academia Brasileira de Ciências – AABC**. São Paulo. 2007.

HYLAND, K. **Academic attribution: citation and the construction of disciplinary knowledge**. **Applied Linguistics**, v. 20, Issue 3, p. 341-367, 1999. Disponível em: <<<http://appliedjournals.org/content/20/3/341.full.pdf>>> Acesso em: 07/03/2018.

HORTON, R. E. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. EOS Transactions, America Geophysical Union, p.446–460. 1933.

HULME, E. W. The Pedigree and Career of Benjamin Huntsman'. **Transactions of the Newcomen Society**, v. 3, p. 16-32, 1922.

**IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. 2017. Disponível em <<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-carlos/panorama>>> Acesso em 14 de jun. de 2018.

**INMET**. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Disponível em: << <http://inmet.gov.br/> >>, acesso em: Jun, 2018.

**IPT - INSTITUTO DE PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO- Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo. 126p. 1981.

JAN VAN ECK, N.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**. 84:523–538. 2010.

JACOB, C. E. **On the Flow of Water in an Elastic Artesian Aquifer**. Trans, Am. Geophys. Union, 21: 574–586. 1940.

KALF, F. R. P.; WOOLLEY, D. R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. **Hydrogeology Journal**, Austrália. Publicado em

Berlin. Vol.13, Nº 1, março, 2005, p. 295 – 312. Disponível em:  
<http://www.springerlink.com/content>. Acesso, dia 21 de dezembro de 2018

KARMANN, I. Ciclo da Água: água subterrânea e sua ação geológica. In: **Decifrando a Terra**. Org. por Teixeira, W.; Fairchild, T.; Toledo, C.; Taioli, F. Companhia Nacional, 624p. 2008.

KHAIRY, M. A. *et al.* Trace Elements in Sediments and Mussels - Spatial Distribution, Chemical Partitioning, and Risk Assessment . **Clean-soil air water** . V.38, 12; p.1184-1193. 2010

KINZELBACH, W. *ET AL.* Sustainable groundwater management - problems and scientific tools. Institute for Hydromechanics and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland. **Episodes**, Vol. 26, no. 4. p. 279 – 284. 1998.

KOEPPEL, W. **Climatologia**. México, Ed. Fondo de Cultura Economica. 1948.

KOPEZINSKI I. **Avaliação da degradação ambiental produzida por mineração no município de Poços de Caldas (MG)** considerando procedimentos de mapeamento geotécnico. São Carlos, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 193p. 1998.

LADEIRA, F. S. B.; *et al.* **Paleossolos silicificados da Formação Itaqueri (Brasil) – interpretação paleoambiental**. Universidade de Coimbra. p. 183 192. 2012.

LERNER, D. N., ISSAR, A. S. e SIMMERS, I. **Groundwater Recharge: A Guide to Understanding & Estimating Natural Recharge**. International Association of Hydrogeologists, Hannover. 1990.

LI J, WANG MH and HO YS. Trends in research on global climate change: A Science Citation Index Expanded–based analysis. *Glob. Planet. Change* 77 13–20. 2011.

LINHARES, C. A. **Influência do desmatamento na dinâmica da resposta hidrológica na bacia do rio Ji-Paraná/RO**. 217 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial, São José dos Campos, São Paulo. 2005.

LINSLEY, R. K.; FRANZINI, J. B. **Engenharia de Recursos Hídricos**. McGraw-Hill: São Paulo, 798p. 1978.

LIU, Xingjian *et al.* A bibliometric study of earthquake research: 1900–2010. **Scientometrics**, v. 92, n. 3, p. 747-765, 2012.

LUCAS J. F.R. *et al.* Curva de retenção de água no solo pelo método do papel-filtro. **R. Bras. Ci. Solo**, 35:1957-1973, 2011

MAIDMENT, D. R. Hydrology cycle. In: **Handbook of Hydrology**. Org. por Maidment, D. R. McGraw-Hill: New York, 1424p. 1993.

MANDAL, B. K.; SUZUKI, K. T. Arsenic round the world: a review. **Talanta**, v. 58, n. 1, p. 201-235, 2002.

MANOEL FILHO, J. Ocorrência das Águas Subterrâneas. In: **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Org. por Feitosa, F. A. C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E. C.; Demetrio, J. G. A., CPRM: LABHID, Rio de Janeiro – RJ, p.53-75. 2008.

MARINHO, Fernando AM; OLIVEIRA, Orlando M. The filter paper method revisited. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 3, p. 250-258, 2006.

MARTELLI, G.V. **Monitoramento da flutuação dos níveis de água em aquíferos freáticos para avaliação do potencial de recarga em área de afloramento do sistema aquífero Guarani em Cacequi –RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. 151p. 2012.

MAZIERO, T. A. **Monitoramento de água subterrânea em área urbana: aspectos quantitativos**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 85 f. 2005.

MAZIERO, T.A. e WENDLAND, E. **Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP**. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. 2005.

MCCUEN, R. (1995) **Hydrologic analysis and design**. Englewoods Cliffs. N.J. Prentice - Hall. 867pp. 1995.

MCDONALD, M. G; HARBAUGH, A. W. (1988) A modular three-dimensional finitedifference ground-water flow model, Washington: Techniques of Water Resources Investigations of the U.S. Geol. Survey, Book 6, chap. A1.

MEMON, A Quantitative analysis of springs. **Environ. Geol.** Vol. 26, pp 111 -120. 1995.

MENDES, C. A. B.; LIMA, W. P. Análise de impactos ambientais de florestas plantadas no contexto de bacias hidrográficas: princípios norteadores. In: Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, I. Taubaté. **Anais...** Taubaté: IPABHI. 2007, p. 263 – 270. 2007.

MENDONÇA, L. A. R. (2001) Recursos hídricos da Chapada do Araripe, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Recursos Hídricos, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

MOLINARI, D. C.; VIEIRA, A. F. G. Considerações preliminares sobre a capacidade de infiltração de água no solo no Distrito Industrial II Manaus (AM). **V Simpósio Nacional de Geomorfologia**; I Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. Universidade Federal de Santa Maria. UFSM/RS, 2004.

MONTAÑO, J.; CARRIÓN, R. Optimización de la explotación del sistema Acuífero Jurásico Triásico, Tacuarembó - Buena Vista. **Anais...** VI Congresso Brasileiro de Aguas Subterrâneas. Porto Alegre. p. 180-189. 1990.

MOON, S.; WOO, N. C.; LEE, K. S. Statistical analysis of hydrographs and water-table fluctuation to estimate groundwater recharge. **Journal of Hydrology**. Volume 292, 198-209 p. 2004.

MORTATTI, J.; BORTOLETTO JÚNIOR, M.J.; MILDE, L.C.E.; PROBST, J.L. Hidrologia dos Rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. Revista Ciências & Tecnologia, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 55-67. 2003.

MURO, M.D. **Carta de zoneamento para seleção de áreas rente à instalação de aterros sanitários no município de São Carlos – SP – escala 1:50000**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP, 2000.

NISHIYAMA, L. **Mapeamento Geotécnico Preliminar na Quadrícula de São Carlos- SP**. Dissertação de mestrado. USP/EESC. v,1. 228p. São Carlos 1991.

NISHIYAMA, L.; ZUQUETTE, L. V. 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.

NAKAZAWA, V.A; PRANDINI, F.L.; SANTOS, A.R. dos e FREITAS, C.G.L. Cartografia Geotécnica: a aplicação como pressuposto. In: Simpósio de geologia do sudeste, 2., São Paulo. **Anais...** São Paulo, SBG/SP-RJ, p.329-336. 1991.

OLIVEIRA, L. B. **Determinação da macro e microporosidade pela mesa de tensão em amostras de solo com estrutura indeformada**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Rio de Janeiro, v.3, p. 197-200, jan/fev 1968.

OLIVEIRA, C.H. **Planejamento Ambiental na Cidade de São Carlos (SP) com ênfase nas áreas públicas e áreas verdes**. Diagnósticos e propostas. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais). Universidade Federal de São Carlos – UFSCar. São Carlos. 1996.

OKUBO, Y. Bibliometric indicators and analysis of research systems: methods and examples. Paris: OECD Publishing, 1997. **Science, Technology and Industry Working Papers**. 1997.

PACHECO, F. **Estudio Hidrogeológico Del Sistema Acuífero Guaraní en la zona Rivera-Sant'Ana do Livramento**. Trabajo personal. Fondo de universidades/PSAG. p. 1-95. 2004.

PAO, M. L. Automatic text analysis based on transition phenomena of word occurrences. **Journal of the American Society for Information Science**, New York, v. 29, n.3, p. 121-124, May 1978.

PAIVA, J. 8. D. DE; PAIVA, E. M. C. D. de (org.) (2003). Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre : ABRH. 628p.

PALMA, J. B. **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**. 301 f. (Tese (Doutorado)), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PAO, M. L. **Concepts of information retrieval**. Englewood, Colorado:Libraries Unlimited, Inc., 285 p. 1989.

PARLANGE, J. Y; HAVERKAMP, R; TOUMA, J. Infiltration under ponded conditions. Optimal analytical solution and comparison with experimental observations. **Soil Sci.** 139: 305 - 311. 1985.

PECK, A. J. The Water Table as Affected by the Atmospheric Pressure. **J. Geophys. Res.**, 65:2383–2388. 1960.

PEJON, O.J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba (SP):** estudo de aspectos metodológicos de caracterização e apresentação de atributos. Tese de doutorado. São Carlos. Universidade de São Paulo (USP). 1992.

PÉREZ, A., ROCHA, L. “Aportes al conocimiento del Acuífero Guaraní. Area Ciudad de Rivera-Uruguay. **Groundwater and Human Development** (OSE, Obras Sanitarias del Estado, Uruguay). pp. 598-605. 2002.

PRANDINI, F.L.; NAKAZAWA, V.A.; FREITAS, C.G.L. de e DINIZ, N.C. **Cartografia Geotécnica nos planos diretores regionais e municipais**. In: BITAR, O. Y. (coord.). 1995. Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente. ABGE/IPT- DIGEO. São Paulo. Série Meio Ambiente. p.187-202. 1995.

PFEIFFER, S. C. **Avaliação da viabilidade técnico- econômica de aproveitamento de águas subterrâneas na área urbana de São Carlos**. Dissertação de Mestrado. EESC-USP. 113p. 1993.

PONÇANO, W.L. **As coberturas cenozóicas**. In: Bistrichi, C.A, Carneiro, *et al.*. Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo, SICCT, v.1, p.82-126. 1981.

PONÇANO, W.L., STEIN, D.P., ALMEIDA, F.F., ALMEIDA, M.A. & MELO, M.S.

A Formação Itaqueri e depósitos correlatos no Estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 32., Salvador. **Anais ...** Salvador: SBG, vA, p.1339-1350. 1982.

RAWLS, W.J.; AHUJA, L.R.; BRAKENSIEK, D.L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: MAIDMENT, D. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw- Hill, p. 1 -51. 1993.

REBOUÇAS, A.C. (1994) Sistema aquífero Botucatu no Brasil. In: VIII Congr. Bras. De Águas Subterrâneas. Recife. 1994.

REBOUÇAS, A. C. (org.) et al. Águas doces no Brasil. **Escrituras Editora**, São Paulo. 2003.

REBOUÇAS, A. da C. **Uso inteligente da água**. Ed.: Escrituras, São Paulo, 2004.

REICHARD, E. G.; JOHNSON, T. A. Assessment of regional management strategies for controlling seawater intrusion. **Journal of water resources planning and management**, v. 131, n. 4, p. 280-291, 2005.

ROBINS, N. S. Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability. **Geol Soc Lond Spec Publ [S.I.]**, v. 130, p. 224, 1998.

ROLDI GUARIZ, Hugo et al. Variação da Umidade e da Densidade do Solo sob Diferentes Coberturas Vegetais. **Revista Brasileira de Agroecologia**, [S.I.], v. 4, n. 2, dec. 2009. Disponível em: <<http://revistas.aba-agroecologia.org.br/index.php/rbagroecologia/article/view/9011>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

SANCHEZ, M.C. Conteúdo e eficácia da imagem gráfica. **Boletim de Geografia Teorética**, 11(21-22): 74-80. 1981.

SANCHEZ, M.C. A Cartografia como técnica auxiliar da Geografia. **Boletim de Geografia Teorética**, 3 (6): p.31-46. 1973.

SANTOS, M. E LADEIRA, F. S. B. Tectonismo em perfís de alteração da Serra de Itaqueri (SP): análise através de indicadores cinemáticos de falhas. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 25, n. 1, p. 135-149, 2006.

SANTOS, I. *et al.* **Hidrometria Aplicada**. Curitiba, 372p. 2001.

SÃO CARLOS. **Cartas ambientais do município de São Carlos**. Prefeitura Municipal de São Carlos: Edição Comemorativa do Sesquicentenário – 150º aniversário, 2007.

SÃO CARLOS. **Lei nº 13.944, de 12 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre a criação das Áreas de Proteção e Recuperação dos Mananciais do Município de São Carlos – APREM. Disponível em: <[http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/concursos2009/lei%2013944\\_06%20-%20texto.pdf](http://www.saocarlos.sp.gov.br/images/stories/concursos2009/lei%2013944_06%20-%20texto.pdf)>. Acesso em: 25 jan. 2018.

SÃO CARLOS. **Lei Municipal Nº 13.691, de 25 de novembro de 2005. Altera a descrição de Anexos da Lei Municipal nº 13.691, de 25 de novembro de 2005, Plano Diretor do Município de São Carlos**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-carlos/lei-ordinaria/2011/1585/15855/lei-ordinaria-n-15855-2011-altera-a-descricao-de-anexos-da-lei-municipal-n-13691-de-25-de-novembro-de-2005-plano-diretor-do-municipio-de-sao-carlos>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

SCANLON, B. R.; HEALY, R. W.; COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, vol. 10, number 1 (february), 2002.

SCHÄFER, D.; SCHÄFER, W.; KINZELBACH, W. Simulation of reactive processes related to biodegradation in aquifers: 1. Structure of the three-dimensional reactive transport model. **Journal of contaminant Hydrology**, v. 31, n. 1-2, p. 167-186, 1998.

SHARDA, V.N. et al. Estimation of groundwater recharge from water storage structures in a semi-arid climate of India. **Journal of Hydrology**. Volume 329. 224-243 p. 2006.

SHARMA, M.L. Groundwater recharge, Balkema, Brookfield, V.T. p. 323. 1989.

SCHWARTZ, F. W.; IBARAKI, M.. Hydrogeological research: Beginning of the end or end of the beginning?. **Groundwater**, v. 39, n. 4, p. 492-498, 2001.

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO – SAAE. **Estação de Tratamento de Água (ETA)**. Apresenta informações sobre o abastecimento de água potável no município de São Carlos (SP), incluindo informações sobre as captações. 2012. Disponível em: <<http://www.saaesaocarlos.com.br/index.php/eta>>. Acesso em: 25 jan. 2018.

SILVA BUSSO, A.A. Geologic and Hydrogeologic aspects of the thermal aquifer system in Argentinean eastern Chacoparanense Basin. 1st Joint **World Congress on Grounwater**. pp. 22. 1999.

SIMMERS, I. **Estimation of natural groundwater recharge**. NATO ASI Ser C 222. Reidel, Dordrecht, 1988.

SINGH, A.; MINSKER, B. S. Uncertainty-based multiobjective optimization of groundwater remediation design. **Water resources research**, v. 44, n. 2, 2008.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeol. J.** 10 (1), 52–67. 2002.

SO-RYONG *et al.* Fouling characteristics of pressurized and submerged PVDF (polyvinylidene fluoride) microfiltration membranes in a pilot-scale drinking water treatment system under low and high turbidity conditions. **Desalination**. V, 244 (1-3), p. 215-226. 2009.

SOARES, P.C., LANDIM, P.M.B., FULFARO, V.J. & SOBREIRO NETO, A.F. Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo. **Rev. Bras. Geoc.**, 10:177-185. 1980.

SOARES, P.C., LANDIM, P.M.B. **Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste**. Anaisdo 27º Congressi da S. B. G. 1973

SOUZA, A. B. **Avaliação da qualidade ambiental nas nascentes do rio Monjolinho na porção à montante da Estação de Captação de Água do Espriado, São Carlos – SP**. Dissertação (Mestrado – Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SOUZA-SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. Vol 2. Ed. Blucher Ltda. 1975.

TAGUE-SUTCLIFFE, J. **An introduction to informetrics**. **Information Processing & Management**, v. 28, issue 1, p.1-3, Jan./Feb. 1992. Disponível em: <<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii> >>Acesso em: 07/03/2018

TANCO, R e KRUSE, E. Prediction of Seasonal Water-Table Flutuations in La Pampa and Buenos Aires, Argentina. **Hydrogeology Journal**, 9(4): 339 – 347. 2001.

TODD, D. K. **Hidrologia de Águas Subterrâneas**, Edgard Blucher, São Paulo, 319 p. 1967.

TODD, D. K.; MAYS, L. W. **Groundwater Hydrology**. John Wiley & Sons, Inc., 636p. 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH: EDUSP. 1993.

TUCCI, C. E. M. **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas**. Câmara Temática sobre Recursos Hídricos. p. 1 - 64. 2002.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943p. 2007.

TUINHOF, A. et al . **Gestión de Recursos de Agua Subterránea una introducción a su alcance y práctica**. GW MATE Publication. Programa do Banco Mundial, Washington, EUA: 2002. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/EXTWAT/Resources>. Acesso, dia 14 de dezembro de 2018.

TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Revista Ciência e Cultura São Paulo**, v.55 n.4 p. 31-33, 2003.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez**. São Carlos, SP. RiMa, IIE, 2ª ed. 2005.

TURK, L. J. Diurnal Fluctuation of Water Table Induced by Atmospheric Pressure Changes. **Journal of Hydrolog**, 26: 1-16. 1975.

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos - SP**. 78 f. (Concurso de Monografias) - Prefeitura Municipal de São Carlos, São Carlos, 1967.

**UNESCO** – Organização das nações unidas para a educação, ciência e cultura. National Committee for the international Hydrological decade. World water balance and water resources of the earth. 2018.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond. 2ª ed. 2006.

VIEIRA, S. R. Permeâmetro: novo aliado na avaliação de manejo do solo. **Agrônômico**. Campinas, v.47-50, p.32-33, 1995-1998.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. (1975). **Hidrologia Aplicada**. MacGraw-Hill: São Paulo, 245p. 1975.

VRIES, J. J.; SIMMERS, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. **Hydrogeology Journal**, v.10, p.5-17. 2002.

VÖRÖSMARTY, C. J. et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. **Science**, v. 289, n. 5477, p. 284-288, 2000.

WAHNFRIED, I; HIRATA, R. Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V.10. N.2. p15-25. 2005.

WANG, G. E CHENG, G. The characteristics of water resources and the changes of the hydrological process and environment in the arid zone of northwest China. **Environmental Geology** . V 39, 7; p. 783-790. 2000.

WANG, D.; HEJAZI, M. Quantifying the relative contribution of the climate and direct human impacts on mean annual streamflow in the contiguous United States. **Water Resources Research**. V, 47. 2011.

WELCH, A. *et al.* Arsenic in ground water of the United States: Occurrence and geochemistry. **Ground Water**. V. 38; (4); p. 589-604. 2000.

WENDLAND, E. et al. **Balço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do Monitoramento Hidrogeológico em Bacia Representativa. Aquífero Guarani, Avanços no conhecimento para sua gestão sustentável.** Primera edición, Montevideo. p.139-155. 2007.

WINTER, T. C.; HARVEY J. W.; FRANKE, O.L.; ALLEY, W.M. "Ground Water and Surface Water. A Single Resource". U. S. **Geological Survey Circular** 1139. 79 p. 1998.

XU, Y.; BEEKMAN, H.E. **Groundwater recharge estimation in Southern Africa.** UNESCO IHP Series nº 64, UNESCO, Paris. 2003.

YANG, Z. P.; LU, W. X.; LONG, Y. Q.; LI, P. Application and comparison of two prediction models for groundwater levels: A case study in Western Jilin Province, China. **Journal of Arid Environments**, v. 73, p. 487-492, 2009.

YORK, J. P., PERSON, M., GUTOWSKI, W. J., WINTER, T. C. "Putting Aquifers into Atmospheric Simulation Models: an Example from the Mill Creek Watershed, Northeastern Kansas". **Advances in Water Resources**. 25(2): 221 – 238. 2002.

ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B.; PEJON, O.J. 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. e NAKAZAWA V.A. Cartas e mapas de geologia de engenharia. *In: ABGE* (ed.) **Geologia de Engenharia**. São Paulo, Editora, cap.17, p. 283-300. 1997.

ZUQUETTE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico; fundamentos e guia de elaboração.** São Carlos. Tese (Livre-Docência) p. 330. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2, 1993.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** São Carlos, SP. (Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos/USP). 1987.

ZUQUETTE, L.V. **Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos.**  
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia  
– Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. 1981.

ZUQUETTE, L. V. *et al.* Methodology to assess groundwater pollution conditions  
(current and pre-disposition) in the São Carlos and Ribeirão Preto regions, Brasil.  
**Bull Eng Geol Environ**, 68:117-136. 2009.