

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

**ANÁLISE DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO
EM ZONAS DE RECARGA DO AQUÍFERO BOTUCATU:
ESTUDO DE CASO EM SÃO CARLOS – SP.**

MAYARA HERRMANN RUGGIERO

SÃO CARLOS

2017

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

**ANÁLISE DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO DO SOLO
EM ZONAS DE RECARGA DO AQUÍFERO BOTUCATU:
ESTUDO DE CASO EM SÃO CARLOS – SP.**

Mayara Herrmann Ruggiero

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: Profa. Dra. Marcilene Dantas Ferreira

São Carlos

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Mayara Herrmann Ruggiero, realizada em 14/06/2017.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Marcilene Dantas Ferreira (UFSCar)

Prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho (USP)

Prof. Dr. Vitor Eduardo Molina Junior (UNICAMP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.
O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por sempre iluminar meu caminho;

À minha mãe, Bettina, por toda a força durante esses anos e por tudo que me proporcionou de bom;

Ao meu namorado, Fernando, pelo companheirismo, por todo apoio e ajuda durante esse tempo, pela paciência e principalmente por todo o amor e momentos bons que passamos.

Ao meu pai, Maurício e meu irmão, Marcos pelo apoio.

Ao meu avô, Maurício (Nono) pelo apoio, carinho e conselhos.

Aos meus padrinhos, Tia Mara e Tio Teco, por todo o apoio.

À professora Marcilene Dantas Ferreira, pela orientação para a elaboração desta pesquisa;

Aos professores Luiz Eduardo Moschini e Érica Pugliesi, do Departamento de Ciências Ambientais, por toda a disposição e por toda a ajuda, desde a graduação;

Ao professor Lázaro Zuquette, do Departamento de Geotecnia da Universidade de São Paulo, pela ajuda para a elaboração deste trabalho;

À Professora Teresinha Bonuccelli, por suas contribuições na banca de qualificação.

A todos os amigos que, de alguma forma, tornaram esses anos melhores, em especial Najla, Ramon, Giuliano, Thayse, Mayara, Karol e Isabel.

Às meninas, Geisy, Erica e Fabiola, por todo o companheirismo e amizade;

Ao pessoal do LabGeo, Wilmer, Vagner, Darlan, Professor Lorandi e José Olímpio;

À Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa.

Resumo

A água subterrânea é um recurso do qual diversos países dependem para o abastecimento hídrico da população, sendo a manutenção dessas reservas essencial. As atividades antrópicas podem acarretar no comprometimento do abastecimento dessas reservas. Estas atividades ocasionam modificações nos padrões naturais da paisagem, alterando o uso e ocupação do solo. Nesse sentido, verifica-se a necessidade de avaliar se o tipo de ocupação de uma determinada região interfere na recarga subterrânea, e quais atividades podem comprometer futuramente o abastecimento dos aquíferos. Assim, o objetivo desta pesquisa foi analisar as mudanças de uso e ocupação do solo nas zonas de recarga do aquífero Botucatu e como afetam a capacidade potencial de infiltração de água no solo e aumentam o potencial de contaminação da região. Para isso, foram selecionadas as bacias hidrográficas do Chibarro e do Ribeirão do Feijão, localizadas no município de São Carlos, para a realização das análises. Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica a respeito do assunto, após isso foi feita uma análise multitemporal do uso e ocupação do solo entre 1985, 2000 e 2015, utilizando o Land Change Modeler do software IDRISI Selva. Com isso, foram projetados cenários de ocupação para 2030 e então foram elaboradas cartas de vulnerabilidade do aquífero com a metodologia DRASTIC e com o Índice de Susceptibilidade. A próxima etapa foi a elaboração das cartas de capacidade potencial de infiltração, através da relação entre os materiais inconsolidados da região e os usos do solo identificados. Os resultados mostraram que as duas bacias apresentam tendências de expansão urbana. Na bacia hidrográfica do Chibarro houve o aumento da vegetação natural, enquanto que na do Ribeirão do Feijão ocorreu a diminuição. As cartas de vulnerabilidade mostraram que os usos do solo nas duas áreas exercem uma pressão sobre o aquífero, podendo causar contaminação. As cartas de capacidade potencial de infiltração indicaram que nas duas bacias pode ocorrer a diminuição dessa capacidade, comprometendo a recarga do aquífero.

Palavras - chave: Água subterrânea; Infiltração; Análise Multitemporal; Uso do Solo.

Abstract

The groundwater is a resource of which many countries are dependent for the water supply of the population, being the maintenance of these reserves necessary. The anthropic activities can cause the commitment of the water supply. These activities result in changes on the landscape natural patterns, altering the land use. In this regard, there is the need to evaluate if the kind of land use in a region affects the groundwater recharge, and which activities can compromise in the future the aquifers supply. As such, the objective of this study was analyze the changes in land use on the recharge zone of the Botucatu Aquifer and how these changes affects the potential capacity of water infiltration in the ground and increase the local contamination potential. To this end, for the accomplishment of this research, the Chibarro and Ribeirão do Feijão watersheds were selected, located in the São Carlos municipality. First of all, a bibliographic review about this subject was made, followed by a multitemporal analysis of the land use, using the years of 1985, 2000 and 2015, using the Land Change Modeler of IDRISI software. Thus, the land cover scenarios for 2030 were projected, and it was made aquifer vulnerability maps using the DRASTIC methodology and the Susceptibility Index. The next step was the elaboration of maps of the infiltration potential capacity, trough the connection between the local geological materials and land cover. The results showed that both watersheds report trends of urban growth. In Chibarro watershed there was an increase of natural vegetation, while in Ribeirão do Feijão watershed there was a decrease. The vulnerability maps showed that the land use in both areas exercising pressure upon the aquifer may cause contamination. The infiltration potential capacity maps showed that in both watersheds is possible to happen the decrease of this capacity, risking the aquifer recharge.

Key Words: Groundwater; Infiltration; Multitemporal Analysis; Land Use.

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema representativo do Ciclo Hidrológico.	6
Figura 2: Exemplificação da estrutura dos diferentes tipos de aquíferos.....	7
Figura 3: Área de recarga direta do aquífero Botucatu (Afloramento da Formação Botucatu no estado de São Paulo).....	10
Figura 4: Balanço hídrico em bacias hidrográficas com características urbanas.	12
Figura 5: Parâmetros utilizados na metodologia DRASTIC.....	20
Figura 6: Evolução da produção científica sobre Análise Multitemporal e Uso do Solo.	24
Figura 7: Quantidade de artigos produzidos por país.	24
Figura 8: Esquema de funcionamento dos Sistemas de Informação Geográfica.....	26
Figura 9: Possibilidade de Integração de informações no SIG.....	27
Figura 10: Uso e Ocupação do Solo: Projeção para 2020 e Ocupação de 2012.	30
Figura 11: Localização do Município de São Carlos.	32
Figura 12: Perfil geológico da região de São Carlos.	33
Figura 13: Área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.....	34
Figura 14: Localização da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	35
Figura 15: Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	37
Figura 16: Fluxograma da Metodologia	40
Figura 17: Variáveis para a elaboração dos Modelos de Transição Potencial.....	48
Figura 18: Funcionamento do LCM.....	50
Figura 19: Esquema proposto para a elaboração das cartas de capacidade potencial de infiltração.....	56
Figura 20: Precipitação média anual para 30 anos no município de São Carlos.	57
Figura 21: Captação de água no Ribeirão do Feijão.....	58
Figura 22: Porcentagem de área ocupada por cada classe de declividade	59
Figura 23: Mapa de classes de altitude da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	60
Figura 24: Carta de Declividade da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	60
Figura 25: Mapa de substrato rochoso Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	62
Figura 26: Mapa de materiais inconsolidados Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	62
Figura 27: Porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo.....	63
Figura 28: Mapa de uso e ocupação do solo Bacia Hidrográfica do Chibarro.	64
Figura 29: Porcentagem de área ocupada por cada classe de declividade.	65
Figura 30: Mapa de classes hipsométricas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	66

Figura 31: Carta de declividade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	66
Figura 32: Mapa de materiais inconsolidados da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão..	68
Figura 33: Mapa de substrato rochoso da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	68
Figura 34: Porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso e ocupação do solo.	69
Figura 35: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	70
Figura 36: Comparação gráfica entre as porcentagens de área dos usos do solo para os três anos analisados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.	72
Figura 37: Comparação gráfica entre as porcentagens de área dos usos do solo para os três anos analisados na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	73
Figura 38: Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 1985, 2000 e 2015 da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	74
Figura 39: Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 1985, 2000 e 2015 da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	75
Figura 40: Mapa de mudanças de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Chibarro.	78
Figura 41: Mapa de mudanças de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão. Imagem indicando as mudanças em uma área de eucalipto.	79
Figura 42: Persistência dos usos do solo da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	84
Figura 43: Persistência dos usos do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	85
Figura 44: Gráfico de perdas e ganhos de área de uso do solo para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	87
Figura 45: Gráfico de perdas e ganhos de área de uso do solo para a Bacia Hidrográfica do Chibarro.	87
Figura 46: Cenários de uso e ocupação do solo projetados para 2030 na Bacia Hidrográfica do Chibarro.	89
Figura 47: Cenários de uso e ocupação do solo projetados para 2030 na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	90
Figura 48: Loteamentos localizados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.	95
Figura 49: Atributos da metodologia DRASTIC - Bacia Hidrográfica do Chibarro.	98
Figura 50: Atributos da metodologia DRASTIC - Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	99
Figura 51: Vulnerabilidade intrínseca e Índice de Susceptibilidade à Poluição da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	104
Figura 52: Gráfico comparativo das porcentagens de área das classes de vulnerabilidade e susceptibilidade à contaminação da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	105
Figura 53: Vulnerabilidade intrínseca da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	107

Figura 54: Índice de Susceptibilidade à Poluição da Bacia Hidrográfica do Feijão.....	109
Figura 55: Gráfico comparativo das porcentagens de área das classes de vulnerabilidade e susceptibilidade à contaminação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	110
Figura 56: Capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Chibarro. As fotos indicam a presença de vegetação em chácaras do Encontro Valparaíso e a ocupação urbana com condomínios de alto padrão.	113
Figura 57: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Chibarro.	115
Figura 58: Porcentagens das áreas de cada classe de capacidade potencial de infiltração para a Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	116
Figura 59: Volume teórico de infiltração para os três cenários analisados.....	117
Figura 60: Capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão. As fotos indicam um plantio de eucalipto na área de estudo e o desenvolvimento de infraestrutura urbana.	120
Figura 61: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	121
Figura 62: Plantação de eucalipto em processo de corte na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	122
Figura 63: Cultivo de laranja identificado na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	122
Figura 64: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	124
Figura 65: Volume teórico de infiltração para os três cenários analisados.....	126

Lista de Tabelas

Tabela 1: Municípios localizados sobre a faixa de afloramento da formação Botucatu	11
Tabela 2: Características dos Materiais Inconsolidados.....	36
Tabela 3: Características dos Materiais Inconsolidados.....	39
Tabela 4: Documentos Cartográficos Fundamentais e suas Informações.....	41
Tabela 5: Características das imagens Landsat utilizadas	43
Tabela 6: Classificação do uso e ocupação do solo.....	43
Tabela 7: Interpretação visual das imagens de satélite.....	44
Tabela 8: Reclassificação dos tipos de uso e ocupação do solo	45
Tabela 9: Classificação final dos tipos de uso e ocupação do solo (Bacia Hidrográfica do Chibarro).....	46
Tabela 10: Classificação final dos tipos de uso e ocupação do solo (Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão)	46
Tabela 11: Pesos das variáveis na metodologia DRASTIC.....	51
Tabela 12: Peso das variáveis na metodologia DRASTIC Pesticida.....	51
Tabela 13: Pontuação do uso e ocupação do solo segundo o IS.....	53
Tabela 14: Ponderação das variáveis para o IS.....	54
Tabela 15: Classificação da porosidade e do índice de vazios do solo.....	54
Tabela 16: Porcentagem de água que os diferentes tipos de uso do solo são capazes de absorver.....	57
Tabela 17: Área ocupada pelos materiais inconsolidados.....	61
Tabela 18: Áreas e porcentagens de área ocupadas pelos diferentes tipos de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	71
Tabela 19: Áreas e porcentagens de área ocupadas pelos diferentes tipos de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	72
Tabela 20: Área e porcentagem de área de cada mudança de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	80
Tabela 21: Área e porcentagem de área de cada mudança de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	80
Tabela 22: Área e porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo nos cenários projetados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	92

Tabela 23: Área e porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo nos cenários projetados na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	92
Tabela 24: Categorização para a variável Profundidade das Águas Subterrâneas. .	97
Tabela 25: Categorização para a variável Recarga do Meio Saturado.	100
Tabela 26: Classificação da variável Característica do Solo.	100
Tabela 27: Classificação da variável Topografia.	101
Tabela 28: Classificação da variável Impacto da Zona Vadosa.	101
Tabela 29: Calssificação da variável Condutividade Hidráulica.	102
Tabela 30: Cálculo do volume teórico de infiltração - Bacia Hidrográfica do Chibarro.	118
Tabela 31: Cálculo do volume teórico de infiltração para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.	125

Lista de Siglas

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

SAG – Sistema Aquífero Guarani

pH – Potencial Hidrogeniônico

UGRHI – Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

CBH – Conselho de Bacia Hidrográfica

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

Km² - Quilômetro Quadrado

m² - Metro Quadrado

m/s – Metros por segundo

cm/s – Centímetros por Segundo

m³/ano – Metro Cúbico por Ano

APA – Área de Proteção Ambiental

IS – Índice de Susceptibilidade

LCM – Land Change Modeler

IGC – Instituto Geográfico e Cartográfico

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (índice de Vegetação da Diferença Normalizada)

MLP – Rede Neural Mmulticamadas

DAEE – Departamento De Águas e Energia Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Sumário

1. Introdução	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo Geral	3
2.2. Objetivos Específicos.....	3
3. Justificativa	4
4. Revisão Bibliográfica	5
4.1. Águas Subterrâneas e o Ciclo Hidrológico.....	5
4.2. Hidrogeologia	7
4.3. O Aquífero Botucatu.....	8
4.4. Áreas de Recarga e Sua Importância	9
.....	12
4.5. Características da Recarga e da Permeabilidade do Solo	13
4.6. Uso e Ocupação do Solo	14
4.6.1. Modificações no Uso e Cobertura do Solo e a Influência dos Recursos Subterrâneos.....	15
4.6.1.1. Impactos na Infiltração de Água.....	16
4.6.1.2. Impactos na Qualidade das Águas Subterrâneas.....	17
4.6.2. Métodos para Avaliar a Vulnerabilidade dos Aquíferos e a Influência do Uso e Ocupação do Solo.....	19
4.7. Análise Multitemporal de Uso e Cobertura do Solo	23
4.8. O Geoprocessamento como Ferramenta de Análise Espacial	26
4.8.1. Modelagem para Realizar a Análise Multitemporal de Uso e Ocupação do Solo	28
5. Caracterização da Área de Estudo	32
5.1. Município de São Carlos	32
5.2. Bacia Hidrográfica do Chibarro	34
5.3. Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão	37
6. Metodologia	40
6.1. Esquema Representativo da Metodologia.....	40
6.2. Elaboração da Revisão Bibliográfica.....	41
6.3. Documentos Cartográficos Fundamentais Básicos	41
6.4. Análise Multitemporal e Elaboração de Cenários Futuros.....	42
6.4.1. Digitalização do Uso e Ocupação do Solo	42

6.4.2.	Land Change Modeler.....	44
6.5.	Cartas de Vulnerabilidade a Contaminação e Índice de Susceptibilidade à Contaminação	50
6.5.1.	Índice de Susceptibilidade à Contaminação.....	52
6.6.	Cartas de Capacidade Potencial de Infiltração.....	54
6.7.	Etapa de Campo.....	57
6.8.	Análise dos Resultados	58
7.	<i>Resultados e Discussão</i>	59
7.1.	Documentos Cartográficos Fundamentais.....	59
7.1.1.	Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	59
7.1.2.	Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	65
7.2.	Uso e Ocupação do Solo.....	71
7.3.	Análise de Mudanças de Uso e Ocupação do Solo Através do Land Change Modeler.....	76
7.3.1.	Mudanças de 1985 a 2000.....	76
7.3.2.	Mudanças de 2000 a 2015.....	77
7.3.4.	Análise Comparativa de Mudanças de Uso e Ocupação do Solo nas Duas Bacias de Estudo	86
.....	87
7.4.	Cenários Futuros de Uso e Ocupação do Solo.....	88
7.4.1.	Áreas com Vegetação Natural.....	88
7.4.2.	Áreas de Expansão Urbana e Infraestrutura	93
7.5.	Análise das Influências das Mudanças de Uso do Solo nas Águas Subterrâneas ..	96
7.5.1.	Vulnerabilidade Intrínseca do Aquífero a Contaminação e Índice de Susceptibilidade à Contaminação.....	97
7.5.1.1.	Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	102
7.5.1.2.	Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.....	106
7.5.2.	Implicações das Alterações de Uso do Solo na Infiltração de Água	111
7.5.2.1.	Bacia Hidrográfica do Chibarro.....	111
8.	<i>Conclusão</i>	127
8.1.	Quanto à Metodologia.....	127
8.2.	Quanto aos Produtos Obtidos.....	128
8.3	Quanto à Aplicação dos Produtos Obtidos	129
9.	<i>Referências</i>	131

1. Introdução

As reservas hídricas subterrâneas são importantes fontes de captação de água para o consumo humano, principalmente no estado de São Paulo. O Aquífero Guarani é uma das principais reservas de água subterrânea do Brasil, abrangendo uma vasta extensão neste estado. Ele é composto pelas formações Botucatu e Pirambóia, e apresenta sua zona de recarga justamente nos locais de afloramento dessas formações.

A recarga é definida como a água que entra na zona saturada, atingindo o aquífero, através da infiltração e percolação vertical, podendo ter origem, também do escoamento lateral através das fronteiras entre os diversos sistemas subterrâneos (PARALTA, et al., 2006).

Considerando a recarga vertical, entende-se que as características do material geológico, como a permeabilidade e os padrões de uso e ocupação do solo influenciam de forma direta a quantidade de água que vai atingir a zona saturada. O uso e ocupação do solo, por ser resultado de alterações antrópicas no ambiente natural, pode muitas vezes ter uma influência negativa na recarga, de forma a alterar a quantidade de água que atinge o aquífero, bem como a qualidade dessa água.

Em regiões agrícolas, por exemplo, a utilização de agrotóxicos e fertilizantes pode impactar negativamente a qualidade dos recursos subterrâneos, além disso, a compactação do solo pode modificar os padrões de condutividade hidráulica, alterando, portanto, a quantidade de água que atinge a zona saturada. Em áreas urbanas, a impermeabilização do solo também modifica a dinâmica da água no solo, porém, outras fontes de recarga podem ser adicionadas, como vazamentos provenientes de estruturas de saneamento, podendo, também, ocasionar perda de qualidade do recurso.

O município de São Carlos está localizado exatamente na área de afloramento da formação Botucatu (aproximadamente 52,72 % da área do município), apresentando então, grandes áreas de recarga direta do aquífero. Junto a isso, o município vem passando por diversas modificações do uso do solo, referentes tanto à expansão urbana quanto a alterações relacionadas a usos em regiões agrícolas. As bacias hidrográficas selecionadas para este estudo apresentam características distintas quando se considera o planejamento do

município. A Bacia Hidrográfica do Chibarro é um eixo de expansão urbana definido no plano diretor municipal. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão é uma zona de proteção de manancial, porém apresenta o desenvolvimento de muitas áreas agrícolas e inclusive áreas de expansão urbana.

Assim, entender como o uso do solo vem ocorrendo e se modificando com o passar do tempo mostra os padrões de mudança de uma determinada região, sendo possível realizar deduções sobre a ocupação futura de uma área. Para isso, a utilização de ferramentas de geoprocessamento, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é de extrema importância, visto que estas possibilitam a interpretação do uso do solo e a elaboração de banco de dados associados a coordenadas geográficas, facilitando análises e o entendimento sobre a realidade.

Portanto, o SIG é considerado uma ferramenta muito importante para a tomada de decisões, por possibilitar a integração de diferentes tipos de informações, podendo associá-las com os aspectos naturais de um determinado local (MOLINA-JUNIOR, 2003)

Finalmente, o levantamento de dados das características do solo, relacionados com informações sobre uso e ocupação do solo, é um método de analisar como as modificações desses usos influenciam na recarga dos aquíferos, de forma a verificar se os impactos são negativos ou positivos, de acordo com as mudanças que ocorrem. Essas análises podem contribuir com o posterior planejamento de uma determinada região e também com a conservação dos recursos subterrâneos, no sentido de gerar informações que subsidiem a tomada de decisão pelo poder público.

O presente estudo buscou analisar as modificações do uso e ocupação do solo nos anos de 1985, 2000 e 2015, de forma a verificar se tais alterações influenciavam de forma positiva ou negativa na capacidade potencial de infiltração de água no solo e no potencial de contaminação de aquíferos. A pesquisa foi realizada nas Bacias Hidrográficas do Chibarro e do Ribeirão do Feijão, ambas inseridas no município de São Carlos e localizadas sobre a zona de recarga do Aquífero Botucatu.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Analisar as mudanças de uso e ocupação do solo nas zonas de recarga do aquífero Botucatu, como estas afetam a capacidade potencial de infiltração de água no solo, assim como aumentam o potencial de contaminação da região.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar o mapeamento do uso e ocupação do solo nas Bacia Hidrográficas do Chibarro e do Ribeirão do Feijão, para os anos de 1985, 2000 e 2015 para as duas bacias hidrográficas estudadas;
- Elaborar uma análise multitemporal de uso e ocupação do solo em diferentes períodos, para identificação e quantificação das mudanças no uso do solo utilizando o Land Change Modeler do software IDRISI Selva;
- Elaborar cenários futuros de mudança de uso do solo para o ano de 2030 com base nas tendências de alterações identificadas e em legislações específicas utilizando o Land Change Modeler;
- Elaborar cartas de Capacidade Potencial de Infiltração e de Vulnerabilidade de Aquífero (utilizando a metodologia DRASTIC e Índice de Susceptibilidade) para o uso e ocupação do solo atual e para os cenários projetados;
- Verificar as diferenças de resultados encontrados entre as duas áreas de estudo observando quais as implicações para a conservação das reservas subterrâneas.

3. Justificativa

No Estado de São Paulo cerca de 70% dos municípios são abastecidos por mananciais subterrâneos (SOUZA, 2012), mostrando a necessidade eminente de inferir o que ocorrerá no futuro com essas reservas. Entender como os padrões de ocupação do solo se desenvolverão no futuro é uma maneira eficaz de prever como a permeabilidade do solo e, conseqüentemente, a recarga das reservas hídricas subterrâneas irá responder a tais modificações. No município de São Carlos aproximadamente 54% do abastecimento da população é proveniente do manancial subterrâneo (SAAE, 2014).

As duas áreas escolhidas para a realização das análises, Bacia Hidrográfica do Chibarro e Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, apresentam afloramento da Formação Botucatu, sendo consideradas áreas de recarga direta do aquífero. Além disso, essas duas bacias apresentam uma situação oposta quando se trata do planejamento futuro do município de São Carlos.

Na Bacia Hidrográfica do Chibarro está delimitada uma grande área de expansão urbana, prevista na atual revisão do Plano Diretor. Considerando a importância das formações geológicas que compõem essa área, questiona-se se o planejamento proposto é ou não inadequado quando se trata de reservas subterrâneas.

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, por outro lado, é considerada como uma zona de proteção, devido à importância dos seus recursos hídricos para o abastecimento do município. Este manancial é responsável pela captação de 35% da quantidade de água que chega à população (MONTAÑO e SOUZA, 2016). Apesar disso, percebe-se grande influência de usos agrícolas nessa área além de evidências de desenvolvimento de áreas de expansão urbana. Portanto, é importante entender como isso pode influenciar nas águas subterrâneas.

Assim, o mapeamento dos usos do solo nessas duas áreas, bem como a influência destes na infiltração e contaminação das águas é de extrema importância para a identificação de falhas ou acertos no planejamento territorial, bem como da necessidade, ou não, de um incremento na proteção desses locais.

4. Revisão Bibliográfica

Neste tópico serão apresentados conceitos e pesquisas relacionadas com a temática de estudo, iniciando com um levantamento teórico sobre águas subterrâneas, passando pela temática de geoprocessamento e como este pode contribuir para a conservação dos recursos hídricos subterrâneos.

4.1. Águas Subterrâneas e o Ciclo Hidrológico

A água é um elemento essencial à manutenção da vida na Terra, sendo todos os organismos vivos presentes no planeta dependentes deste recurso. Assim, a água é um recurso primordial para o desenvolvimento de sociedades e para o desenvolvimento econômico, acarretando em seu uso excessivo pelas sociedades humanas, que acabam por degradar e poluir as águas superficiais e subterrâneas (TUNDISI, 2003).

A água doce presente no planeta é um recurso renovável que se encontra em constante movimento cíclico entre as reservas sólidas, líquidas e gasosas (SOUZA, 2014). Este movimento é denominado Ciclo Hidrológico. O ciclo é iniciado através da incidência de energia solar no planeta, a qual inicia o processo de evaporação da água dos oceanos, rios, lagos e outras superfícies. A água evaporada se une àquela decorrente da evapotranspiração das plantas, formando então as nuvens na atmosfera. Com as condições climáticas adequadas esse vapor de água acumulado em forma de nuvens se condensa, tornando-se gotículas de água, as quais precipitam em forma de chuva, neve, granizo, nevoeiro e geada (RICKLEFS, 2009).

A água precipitada atinge a superfície de uma bacia hidrográfica e pode seguir alguns caminhos distintos. Parte dessa água é drenada através do escoamento superficial do solo, chegando a lagos, represas e rios, outra parte é interceptada pelas folhas dos vegetais sendo evaporada posteriormente e outra parte infiltra no solo, onde pode ainda sofrer processo de evaporação, ser consumida pelas plantas ou percolar e atingir as camadas mais profundas do solo, caracterizando a recarga de águas subterrâneas (FAGUNDES, 2010). Os processos envolvidos no ciclo hidrológico estão esquematizados na figura 1.

Com base nos processos do ciclo hidrológico as águas superficiais e subterrâneas estão conectadas, por meio da infiltração, percolação e áreas de

recarga e descarga de aquíferos (SOUZA, 2014). A partir do momento em que a água infiltra no solo inicia-se um movimento vertical e horizontal através dos poros presentes nos materiais geológicos. Tal movimento é controlado pela ação da gravidade e pela ação das forças capilares (MENEZES, 2012).

Figura 1: Esquema representativo do Ciclo Hidrológico.



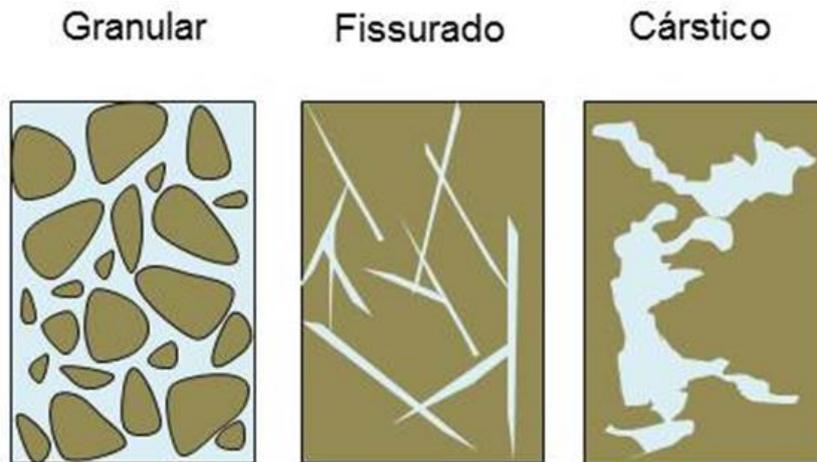
Fonte: USGS

A água subterrânea é aquela contida no subsolo, através dos poros das formações geológicas, os quais são denominados aquíferos quando se encontram saturados e liberam água suficiente para a utilização em determinados fins (SOUZA, 2014; OLAIA, 2005). De acordo com Tundisi (2003), esta ocorre em duas zonas: a insaturada e a saturada. A insaturada se estende da superfície até profundidades que podem variar de um metro a centenas de metros dependendo da região em que está localizada. Sua denominação ocorre devido à presença de ar e água em seus poros. A saturada ocorre abaixo da insaturada, e contém somente água em seus poros. Parte da precipitação percola da zona insaturada para a zona saturada em áreas denominadas zonas de recarga, ou seja, locais em que ocorre a recarga dos aquíferos.

4.2. Hidrogeologia

Hidrogeologia é a ciência que estuda o movimento de fluidos nos aquíferos. Estes são diferenciados de acordo com o material que os compõe, podendo ser de três tipos: Granulares; Fissurados e; Cársticos, conforme figura 2 (OLAIA, 2005). Os Granulares são compostos por materiais granulares, como solos e sedimentos, e a água ocupa espaços intragranulares. Os Fissurados são compostos por rochas duras ou por matérias granulares, em que a água ocupa fissuras, fendas ou fraturas. Os Cársticos são compostos por rochas duras ou matérias granulares, em que a água ocorre ocupando espaços ocasionados pela dissolução do material original, como rochas calcárias.

Figura 2: Exemplificação da estrutura dos diferentes tipos de aquíferos.



Fonte: Ruggiero, 2017

Os aquíferos podem ser ainda classificados de acordo com a pressão da água em seus limites. Os aquíferos livres apresentam o topo sem uma limitação de camada impermeável, estando em contato com a superfície e apresentando a pressão da água igual à pressão atmosférica. Os aquíferos confinados são aqueles em que a camada saturada está confinada entre dois estratos impermeáveis ou pouco permeáveis e a água apresenta pressão maior do que a pressão atmosférica (IRITANI e EZAKI, 2012).

O processo de recarga dos aquíferos é o principal componente do sistema hídrico subterrâneo, se relacionando diretamente com a qualidade das águas superficiais, visto que o fluxo de rios, lagos e regiões alagadas são alimentados pela descarga das águas subterrâneas (SOUZA, 2014).

4.3. O Aquífero Botucatu

O Brasil apresenta uma reserva extremamente importante de água doce subterrânea para a América do Sul, representada pelo Sistema Aquífero Guarani (SAG). Este ocupa quatro países (Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai) e possui aproximadamente 12 milhões de km², estando por volta de 70% dessa área no território brasileiro (TRAFICANTE, 2016). No Brasil, o SAG abrange oito estados (em torno de 8,6 % do território nacional), estando São Paulo entre eles (SABESP, 2004; IRITANI E EZAKI, 2012). O termo Sistema Aquífero Guarani foi atribuído a diversas formações geológicas presentes em diferentes estados brasileiros e nos outros países com o intuito de unificá-las (ARAÚJO, 1995).

Vale ressaltar que define-se sistema aquífero como um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas, as quais apresentam continuidade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação e descarga, e de qualidade das águas semelhantes (REBOUÇAS, 1976). No estado de São Paulo, constituem o Aquífero Guarani as formações Botucatu e Pirambóia, as quais apresentam, também, a denominação de aquífero Botucatu.

O Aquífero Botucatu apresenta uma vasta extensão no território paulista, abrangendo uma área de 155.800 km² (SANTOS, 2014), ocupando Ribeirão Preto, passando por Araraquara, Boa Esperança do Sul, até a divisa com o Paraná. Dessa forma, este sistema constitui a mais importante reserva de água doce no estado de São Paulo e também do país, devido tanto à sua grande área de ocorrência quanto às características físico-químicas de suas águas (MENDONÇA e GUTIERRE, 1998; PALMA, 2004).

A Formação Botucatu é composta por arenitos bem selecionados com granulação de média a fina, apresentando grãos quartzosos bem arredondados e teor de argila inferior a 10%. A Formação Pirambóia é composta por uma grande variedade granulométrica, predominando a mistura de siltitos, areias e argilas, em proporções variadas, apresentando teores de argila acima de 20% (REBOUÇAS, 1994; MENDONÇA e GUTIERRE, 1998; OLAIA, 2005).

De acordo com Zuquette e Palma (2006), os arenitos da formação Botucatu são, na maior parte de sua extensão, recobertos por pacotes espessos de variados materiais geológicos, como basaltos da formação Serra Geral e arenitos, siltitos e

argilitos do Grupo Bauru, apresentando, então, característica de semiconfinamento. Apesar disso, os mesmos autores afirmam que uma parte dos arenitos não silicificados são recobertos por pacotes de materiais inconsolidados. Tais materiais controlam a infiltração das águas das chuvas e, portanto, a recarga do aquífero, bem como o transporte de poluentes.

De acordo com estudo realizado por Invernizzi (2001), que realizou um levantamento a respeito de estudos que trataram das características hidráulicas, químicas e físicas do Aquífero Botucatu, foi identificado que as águas subterrâneas no Aquífero Botucatu apresentam sentido do movimento do fluxo de leste para oeste, sendo que na parte leste se encontra a zona de recarga do aquífero, com o afloramento dos sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia e mais a oeste o aquífero é recoberto por uma importante espessura de basaltos, sendo francamente confinado. O pH, a condutividade e a temperatura das águas tendem a aumentar no sentido do movimento do fluxo, bem como o enriquecimento salino.

4.4. Áreas de Recarga e Sua Importância

A recarga de águas superficiais depende de várias características do ambiente, sendo que Fagundes (2010) ressalta a importância dos materiais geológicos, da topografia e da vegetação. Os materiais geológicos apresentam uma grande influência nas porções superficiais, visto que as características desses materiais vão separar o que será escoamento superficial e o que será infiltração. A topografia pode mostrar onde irá ocorrer a recarga e a descarga, sendo que em regiões úmidas a recarga vai ocorrer em locais altos e a descarga em locais baixos. A vegetação influencia na recarga através da atividade das raízes, a qual está diretamente relacionada com a evapotranspiração, afetando diretamente a recarga.

A zona de recarga do Aquífero Botucatu esta relacionada com os arenitos friáveis da Formação Botucatu. Na porção central do estado ocorre o confinamento dos arenitos da Formação Botucatu, através dos derrames basálticos da formação Serra Geral, fazendo com que a recarga nesses locais seja muito pequena, chegando a ser nula. Dessa forma a recarga natural deste aquífero está restrita às áreas de afloramento (Figura 3).

Figura 3: Área de recarga direta do aquífero Botucatu (Afloramento da Formação Botucatu no estado de São Paulo).



Fonte: Caderno do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos

No estado de São Paulo a área de recarga do Aquífero Botucatu abrange cerca de 16.000 km², em uma faixa que se estende de norte a sul do estado, na porção Centro-Oeste, correspondendo ao afloramento das formações Botucatu e Pirambóia (GOMES et al., 2006). A tabela 1 mostra os municípios do estado que estão localizados sobre essa faixa de afloramento.

Os municípios localizados nessa faixa de afloramento integram a Área de Proteção e Recuperação da Zona de Afloramento do Manancial Sistema Aquífero Guarani, estabelecida em uma minuta de lei específica da área de proteção e recuperação da zona de afloramento do manancial SAG. Esta área de proteção está inserida nas seguintes UGRHIs: – UGRHI 8; Mogi-Guaçu – UGRHI 9; Sorocaba/Médio Tietê - UGRHI 10; Tietê/Jacaré – UGRHI 13; e Alto Paranapanema – UGRHI – 14; - Tietê/Batalha – UGRHI 16; Médio Paranapanema – UGRHI 17. A área abrange toda a área de afloramento do aquífero, bem como uma margem de 2 km de largura, contada a partir do limite do afloramento

Tabela 1: Municípios localizados sobre a faixa de afloramento da formação Botucatu

Município	Área Total (km²)	Área Sobre o Aquífero Guarani	% da Área sobre o Aquífero	População (IBGE, 2010)
Águas de São Pedro	3,61	3,61	100	3.139
Altinópolis	928,96	928,96	100	16.179
Analândia	325,95	325,95	100	4.731
Araraquara	1003,63	451,63	45	226.508
Avaré	1213,06	206,22	17	88.385
Bariri	444,41	182,21	41	34.048
Batatais	849,53	161,41	19	60.589
Boa Esperança do Sul	690,75	656,21	95	14.546
Bocaina	363,93	312,98	86	11.810
Bofete	653,54	653,54	100	10.879
Botucatu	1482,64	741,32	50	139.483
Brodowsqui	278,56	158,78	57	23.460
Brotas	1101,37	991,24	90	23.419
Cajuru	660,09	587,48	89	25.230
Corumbataí	278,62	273,05	98	4.036
Cravinhos	311,42	174,40	56	34.110
Dois Córregos	632,97	329,15	52	26.517
Franca	605,68	345,24	57	342.112
Ibaté	290,98	229,87	79	33.535
Itaí	1082,78	378,97	35	26.042
Itirapina	564,60	536,37	95	17.160
Luís Antônio	598,26	556,38	93	13.378
Paranapanema	1018,72	376,93	37	19.357
Pardinho	209,89	130,13	62	6.122
Ribeirão Preto	650,92	234,33	36	666.323
Santa Maria da Serra	252,62	252,62	100	5.902
São Carlos	1136,91	1000,48	88	241.389
São Manuel	650,73	266,80	41	40.367
São Pedro	611,28	544,04	89	34.284
São Simão	617,25	617,25	100	15.104
Serrana	126,05	126,05	100	42.784
Tejupá	296,28	296,28	100	4.750
Torre de Pedra	71,35	71,35	100	2.375

Fonte: Adaptado de Olaia (2005)

Desta forma, verifica-se um quadro alarmante, considerando que, segundo o IBGE, aproximadamente 62% dos municípios do estado apresentam população inferior a 20.000 habitantes (401 municípios, de um total de 645 no estado). Tal fato não obriga esses municípios a elaborarem plano diretor municipal, de acordo com o Estatuto da Cidade (Lei nº 10257/2001). Esse cenário ocorre não só nessa região, mas sim em grande parte dos municípios brasileiros, o que pode levar a graves

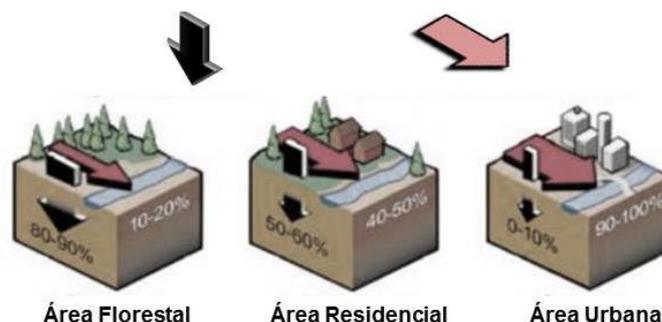
danos ambientais, tendo em vista a ausência de orientação de planejamento territorial, urbano ou ambiental.

Destaca-se ainda a situação do município de Ribeirão Preto. O mesmo é considerado de grande porte, devido ao seu número de habitantes, e devido ao intenso uso dos recursos do aquífero Guarani, atravessa um momento de rebaixamento do nível do aquífero. Atualmente, tal município possui grandes restrições estaduais e municipais para a instalação de novos poços profundos para a captação da água subterrânea, sendo estas relacionadas a criação de zonas de proteção e restrição e apresentadas na Deliberação CBH – Pardo 002/10.

O município de São Carlos é o único de porte médio inserido na área do Sistema Aquífero Guarani, que apresenta mais de 50% do seu território como áreas de recarga do Botucatu, o que o justifica a realização de estudos no sentido de buscar soluções e auxiliar o planejamento do município para prevenir a necessidade da aplicação de restrições de captação de água, como ocorre hoje em Ribeirão Preto.

As características da ocupação do solo na zona de recarga exercem uma enorme influência sobre as águas subterrâneas. Segundo Paz (2004) os diferentes tipos de ocupação apresentam comportamentos distintos quando se trata da capacidade de infiltração e do armazenamento de água. O esquema apresentado por Horn (2005) reflete as diferenças que a ocupação do solo tem com relação a infiltração e o escoamento superficial (Figura 4). Percebe-se que as modificações antrópicas ocasionam a diminuição da água que infiltra, quando isso ocorre em uma zona de recarga o abastecimento das reservas subterrâneas também é comprometido.

Figura 4: Balanço hídrico em bacias hidrográficas com características urbanas.



4.5. Características da Recarga e da Permeabilidade do Solo

A recarga direta do aquífero ocorre nos locais em que este se encontra livre, ou seja, onde afloram as formações responsáveis pelo armazenamento de água. A água que recarrega o aquífero é proveniente, principalmente da chuva, porém, a recarga pode acontecer a partir da água existente em outra unidade hidrogeológica que esteja em contato com o aquífero em questão. Além disso, tal processo pode ocorrer de forma não natural, como através do vazamento de água de estruturas do sistema de saneamento (IRITANI e EZAKI, 2012).

Paralta et al. (2006) define recarga como a água que entra na zona saturada, ou seja, que atinge o aquífero, preferencialmente através da infiltração e percolação vertical, mas que também poderá ter origem no escoamento lateral, por meio das fronteiras de sistemas. Paes (2014) afirma que a recarga ocorre através do processo de infiltração, sendo que a capacidade de infiltração do solo é uma das variáveis mais importantes ao se tratar de recarga, visto que esta engloba uma série de outros fatores que podem influenciar nesse processo.

A capacidade de infiltração indica a taxa máxima com que um determinado solo pode absorver água, podendo indicar, também, o que será revertido em escoamento superficial. Existem algumas variáveis que influenciam na capacidade de infiltração, como a permeabilidade, a temperatura do solo, a umidade, profundidade da camada impermeável, o grau de compactação do solo e o tipo de uso e cobertura do solo. Além disso, o tipo do solo, sua textura e porosidade são outras variáveis importantes (ZUQUETE e PALMA, 2006; SOARES et al., 2008).

A permeabilidade está relacionada com a facilidade que o solo oferece à passagem de água (ALONSO, 2007 apud PAES, 2014). Este atributo é dependente de diversas características do solo, como afirmado por Sampaio (2004). São essas características: massa específica do solo, massa específica dos sólidos, porosidade, macro e microporosidade.

A permeabilidade do solo é expressa através da condutividade hidráulica, a qual faz referência à transmissão do líquido através do meio poroso, traduzindo a facilidade com que determinado líquido atravessa esse meio (PALMA, 2004). A condutividade hidráulica saturada de um solo é determinada através da relação entre a forma, a quantidade, a distribuição e a continuidade dos poros presentes

nesse material, mostrando, então a relação direta entre a permeabilidade e as características do solo (MESQUITA E MORAES, 2004). A recarga de aquíferos está diretamente relacionada a essa propriedade do solo. Dessa forma, o desenvolvimento de pesquisas e estudos que quantifiquem esta variável em zonas de recarga é importante tanto para estimativas de quantidade de água que pode ser convertida em recarga, quanto para entender a capacidade de um determinado tipo de solo conter um contaminante.

Exemplificando isso, o estudo realizado por Velozo (2006) mostra que a condutividade hidráulica (10^{-5} m/s) de um solo da Formação Botucatu (Município de São Carlos, SP), sobre o qual foi instalado um lixão, facilitou a percolação e o fluxo de contaminantes provenientes do lixiviado desse lixão, contribuindo com a pluma de contaminação identificada no aquífero.

4.6. Uso e Ocupação do Solo

Entende-se que a paisagem é constantemente modificada tanto por forças naturais, quanto por forças antrópicas. As modificações antrópicas são as responsáveis pela constante alteração no uso e cobertura do solo, sendo hoje, o principal fator responsável pela alteração dos componentes do meio natural (RICKLEFS, 2009).

Essas alterações ocasionadas por atividades antrópicas são, portanto, as responsáveis pela modificação da dinâmica de diversos componentes desse ambiente natural. A diminuição da abundância de espécies vegetais e animais, a degradação do solo, a fragmentação de habitats, tudo está relacionado com as alterações na cobertura do solo. Os ciclos biogeoquímicos, por consequência, sofrem pressões e alterações negativas também.

Como exemplo disso é possível citar o aumento de nitrogênio e fósforo em ambientes aquáticos, ocasionado pela elevada presença de matéria orgânica proveniente tanto de despejo irregular de esgotos em áreas urbanas, quanto por carreamento de fertilizantes em áreas agrícolas (DERISIO, 2012). O ciclo hidrológico também sofre interferências, o que gera impactos negativos na quantidade e na qualidade dos recursos hídricos disponíveis, tanto superficiais quanto subterrâneos.

Assim, entende-se que o uso e cobertura do solo é uma variável essencial para analisar as alterações na permeabilidade do solo e por consequência na disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos.

4.6.1. Modificações no Uso e Cobertura do Solo e a Influência dos Recursos Subterrâneos

As atividades antrópicas relacionadas às formas de uso e cobertura do solo ocasionam diversos impactos nas águas subterrâneas. As alterações das características naturais de um local comprometem a qualidade e a quantidade dos recursos subterrâneos, sendo este um tema muito discutido em estudos hidrogeológicos. Muitos mostram a contaminação das águas subterrâneas por conta de atividades agrícolas (SOARES et al., 2017; SANTOS e LEITE, 2016; MOURA et al., 2015), enquanto outros indicam os problemas ocasionados pela ocupação efetivamente urbana. Reforça-se que são nas zonas de recarga de aquíferos que tanto os processos relacionados às atividades rurais quanto aos processos das áreas urbanas interferem diretamente, e de forma mais intensa, nas características das águas subterrâneas.

Os usos do solo nas áreas de recarga de aquíferos devem ser compatíveis com as características ambientais do local, de forma a evitar o comprometimento das águas subterrâneas (OLAIA, 2005). Segundo Adane e Gates (2014) o cenário mais documentado de mudança do uso do solo em relação à recarga de águas subterrâneas é a mudança de vegetação natural para agricultura.

A precipitação, os rios e outros corpos d'água são as principais fontes para a recarga subterrânea, tanto nas áreas rurais quanto nas áreas urbanas, porém, com as infraestruturas urbanas novas fontes são adicionadas, como as redes de distribuição de água e de coleta de esgoto, que juntamente com a impermeabilização do solo modificam e influenciam a dinâmica das águas subterrâneas (MALDANER, 2010). Essa modificação é percebida a partir do momento em que a ocupação urbana passou a aumentar a quantidade de água convertida em recarga, como afirmado por Lerner (2002).

A impermeabilização do solo diminui as áreas favoráveis à infiltração, porém a existência de diversas fontes indiretas de recarga contribui com esse aumento de recarga. (LERNER, 2002; MAZIERO e WENDLAND, 2005). A qualidade da água proveniente dessas fontes indiretas depende diretamente do tipo da fonte. A água proveniente da rede de abastecimento público não causa danos na qualidade da

água armazenada, porém aquela derivada da rede de coleta de esgotos pode acarretar na contaminação das reservas, transmitindo, inclusive, patógenos.

Tratando ainda da qualidade dos recursos subterrâneos, através da revisão de algumas pesquisas, Menezes *et al.* (2014), realizaram uma comparação entre os impactos em águas subterrâneas detectados em locais desenvolvidos e não desenvolvidos, considerando a urbanização, a industrialização e também o desenvolvimento agrícola. Em áreas urbanas ou industriais os compostos orgânicos voláteis e alguns oligoelementos (Zinco, Cobre, Cobalto, entre outros) apresentaram maior frequência de detecção. Em áreas com desenvolvimento agrícola, foram verificadas concentrações elevadas de nitrato e aumento na detecção de pesticidas, quando comparado com regiões subdesenvolvidas (CAIN *et al.*, 1989 apud MENEZES, 2014).

4.6.1.1. Impactos na Infiltração de Água

O tipo de uso do solo nas áreas de recarga pode influenciar diretamente na condutividade hidráulica de uma determinada região, como afirmado por Zuquette e Palma (2006). Tais autores realizaram ensaios de infiltração em diferentes estágios de alguns usos do solo em uma bacia que abrange uma área de recarga do Aquífero Botucatu. Foi concluído, então, que o uso e o estágio de desenvolvimento juntamente com as práticas de manejo afetam a condutividade hidráulica de um determinado local, influenciando, portanto, na infiltração e conseqüentemente na recarga de aquíferos.

Outro estudo, desenvolvido por Souza (2014), identificou áreas favoráveis à infiltração 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 infiltração 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 infiltração 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.

O estudo desenvolvido por Mendonça et al. (2009) mostrou que áreas com vegetação natural preservada ou com vegetação em recuperação apresentam uma 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.

4.6.1.2. Impactos na Qualidade das Águas Subterrâneas

Além de influenciar na infiltração e na recarga de aquíferos, modificando a quantidade das reservas subterrâneas, os tipos de usos do solo podem afetar também a qualidade dessas águas. Diferentes atividades podem gerar variados resíduos e efluentes (como as atividades agrícolas, que utilizam fertilizantes e agrotóxicos) os quais podem infiltrar e ultrapassar a zona não saturada do solo atingindo, então, as águas subterrâneas, causando poluição e/ou contaminação das mesmas (FERREIRA, 2014). Este foi um dos resultados de um estudo desenvolvido por Menezes et al. (2014) no extremo sul do estado do Espírito Santo, o qual indicou que há uma influência das classes de uso do solo relacionadas à agricultura nas variações de qualidade de água subterrânea, principalmente no aumento da concentração de nitrato.

As atividades antrópicas relacionadas às áreas urbanizadas também causam um grande impacto nas águas subterrâneas. Alguns estudos (BEATO et al., 2003; OLAIA, 2005; VELOZO, 2006; GOMEZ e MARTINEZ, 2010; KEMERICH et al., 2012)

mostram problemas relacionados às qualidades dessas águas. Beato et al. (2003) realizaram a avaliação da qualidade das águas subterrâneas na Bacia da Lagoa, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte (MG).

Os resultados do estudo indicaram que os principais contaminantes detectados nas amostras foram nitrogênio orgânico e amoniacal, nitrato, ferro, manganês e coliformes. Essa contaminação foi relacionada à presença de corpos hídricos com altas taxas de contaminação inseridos na área urbana e próximos à rede de esgoto. O autor mostrou ainda que outros estudos na região indicaram a contaminação do aquífero por conta do aterro presente no local, indicando que o subsolo já está contaminado e a pluma de contaminação está migrando além dos limites do aquífero local.

A disposição de resíduos, principalmente quando esta é realizada de forma inadequada, é uma atividade extremamente problemática quando se trata de contaminação. Velozo (2006) realizou um estudo na área do antigo lixão de São Carlos (SP) objetivando verificar a existência de uma pluma de contaminação e também a evolução dessa pluma, a partir da comparação com estudos realizados em momentos anteriores. A autora concluiu que existem fortes indicações de contaminação do aquífero e que essa contaminação continua evoluindo. Esse fator é agravado pela elevada permeabilidade dos solos da região e a inexistência de barreiras para conter a percolação dos contaminantes provenientes da degradação do lixo.

Um estudo realizado na Província de Córdoba, na Argentina, também indicou a contaminação de águas subterrâneas devido à alocação inadequada de resíduos sólidos. Foram identificadas elevadas concentrações de Cloro, Sódio e Bicarbonato, além de baixas concentrações de oxigênio dissolvido (GOMEZ e MARTÍNEZ, 2010).

A alocação de cemitérios em locais inadequados também ocasiona problemas aos recursos subterrâneos. Em um estudo realizado em Santa Maria (RS), o qual objetivava determinar a qualidade da água subterrânea em um cemitério localizado em uma zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, foi concluído que existe a presença de poluição por conta de substâncias provenientes de processos de alteração de caixões, ornamentos mortuários e corpos humanos (KEMERICH et al., 2012).

Por fim, Olaia (2005) realizou a caracterização da urbanização na área de recarga do aquífero Botucatu, localizada no município de Ribeirão Preto. A autora concluiu que existem usos que não são compatíveis com a sua localização sobre uma área de recarga. Esses usos são:

- Cemitério sem procedimentos sanitários nos sepultamentos;
- Favelas sem a infraestrutura básica;
- Conjuntos habitacionais e loteamentos sem redes de esgoto, utilizando o sistema de “fossas negras”;
- Distritos industriais;
- Dois antigos lixões, sendo um desativado e o outro urbanizado.

4.6.2. Métodos para Avaliar a Vulnerabilidade dos Aquíferos e a Influência do Uso e Ocupação do Solo.

O conceito de vulnerabilidade está relacionado com a probabilidade de um determinado contaminante atingir as águas armazenadas nos aquíferos. A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero relaciona-se apenas com as características do meio físico e como esses aspectos contribuem para a percolação de contaminantes. A vulnerabilidade específica, por outro lado considera o mapeamento dos tipos de contaminantes que podem atingir a zona saturada, tornando o estudo mais completo, porém com mais complexidade (ZUQUETTE et al., 2009).

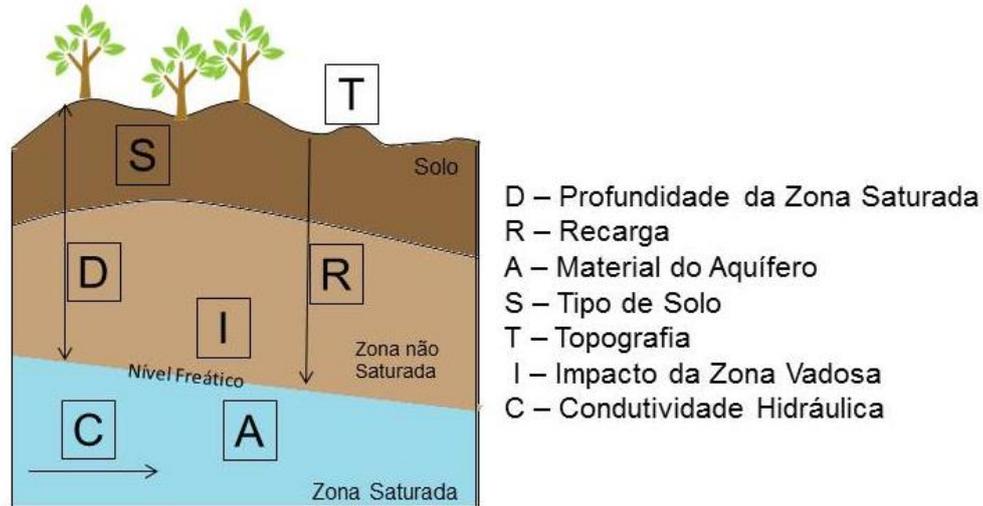
As pesquisas a respeito de vulnerabilidade de aquíferos vêm sendo cada vez mais difundidas no meio acadêmico, segundo Lemos (2010) a partir da década de 80 diversas metodologias para classificação da vulnerabilidade e representação cartográfica foram desenvolvidas, devido à realização de muitos trabalhos sobre esta temática.

O interesse em avaliar o grau de vulnerabilidade de uma formação aquífera está na necessidade de fornecer informações ao poder público no sentido de fornecer um instrumento que seja útil na tomada de decisão no planejamento territorial e no ordenamento da ocupação do solo (PARALTA et al., 2005).

Um dos métodos mais difundido para a estimativa da vulnerabilidade intrínseca é a metodologia DRASTIC. Essa metodologia foi desenvolvida por Aller et

al. (1987) e objetiva estimar a vulnerabilidade de um aquífero através da soma ponderada de sete parâmetros hidrogeológicos, esquematizados na figura 5 (OLIVEIRA, 2014).

Figura 5: Parâmetros utilizados na metodologia DRASTIC.



Fonte: Adaptado de Oliveira (2014).

Profundidade da Zona Saturada

A profundidade da zona saturada faz referência da distância entre a superfície do terreno e a zona saturada. Indica a profundidade em que o lençol freático está localizado, sendo que quanto menor esta profundidade, maior o risco de contaminação.

Esta distância entre a superfície e a zona saturada influencia diretamente na atenuação do contaminante através do contato com o meio geológico, ou seja, quanto maior a profundidade, maior o tempo de contato que o contaminante vai ter com o meio geológico, podendo diminuir os impactos no lençol freático (SIMAS, 2014).

Recarga

A recarga é a água que flui da superfície do terreno e atinge lençol freático. Este atributo diz respeito à quantidade de água por unidade de área que infiltra no solo atingindo a água subterrânea, sendo que quanto maior seu valor maior a vulnerabilidade (ALAM et al., 2012; SOULEYMANE E ZHONGUA, 2017). A recarga é o principal agente de transporte de contaminantes para a zona saturada (LEMOS, 2010).

Material do Aquífero

Este atributo relaciona-se com o material consolidado ou inconsolidado que serve como reservatório natural de água, sendo que as características desse material influenciam diretamente no comportamento do contaminante, podendo aumentar ou diminuir o tempo de atenuação do mesmo (BARTAZ et al., 2017; SOULEYMANE E ZHONGUA, 2017).

Tipo de Solo

O tipo de solo refere-se à superfície do terreno da zona vadosa e caracteriza-se por possuir atividades biológicas significativas. Estas atividades, aliadas a outras características do solo, como o tipo e o tamanho dos grãos e a plasticidade da porção argilosa podem influenciar na dispersão do contaminante e em reações físico-químicas, como sorção, biodegradação, oxidação, entre outras (SOULEYMANE E ZHONGUA, 2017).

Topografia

A topografia faz referência à declividade do terreno, a qual vai influenciar sobre o processo de infiltração de água no solo. Regiões mais planas, com declividades menores vão contribuir para a acumulação do contaminante, facilitando a sua infiltração no solo, enquanto em áreas com maiores declividades o escoamento superficial será favorecido.

Impacto da Zona Vadosa

A zona insaturada, ou zona vadosa, está localizada entre a superfície do terreno e a zona saturada, sendo que o tipo de material que a constitui influencia no processo de atenuação do contaminante, podendo ocorrer através da biodegradação, neutralização, reação química, filtração mecânica, volatilização e dispersão (LEMOS, 2010).

Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica refere-se à capacidade de transporte dos contaminantes pelos materiais do meio, controlando a velocidade com que o contaminante vai se mover. Quanto maior os valores de condutividade hidráulica maior o potencial de contaminação das águas subterrâneas.

Através da aplicação do índice DRASTIC é possível a identificação de áreas com maior vulnerabilidade para contaminação relativa de águas subterrâneas, ou seja, não fornece uma informação absoluta a respeito da contaminação (LEMOS, 2010).

A estimativa da vulnerabilidade intrínseca pode não representar o que realmente ocorre na realidade. Pensando nisso, foi realizada uma modificação da metodologia DRASTIC buscando inserir as alterações antrópicas como uma das variáveis na soma ponderada e retirar aquelas consideradas redundantes (tipo de solo, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica). A partir dessa modificação surgiu o Índice de Susceptibilidade (IS), desenvolvido no projeto ERHSA (Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo (PARALTA et al., 2005; OLIVEIRA, 2014).

Na metodologia do Índice de Susceptibilidade o uso do solo é pontuado de acordo com o seu potencial de contaminação das águas subterrâneas, sendo que os locais com descargas industriais e regiões com disposição de resíduos sólidos são aqueles considerados com maior potencial de contaminação, enquanto áreas florestais com vegetação nativa apresentam o menor potencial de contaminação. As áreas urbanas são consideradas com um potencial de contaminação elevado, enquanto as áreas com plantações de florestas exóticas, como eucalipto, apresentam um potencial de contaminação médio.

Em uma pesquisa realizada por Oliveira (2014) foram aplicadas as metodologias do DRASTIC, DRASTIC Pesticida e Índice de Susceptibilidade, na Bacia Hidrográfica do Rio Águeda, localizada na Espanha e em Portugal. O uso do solo na bacia caracteriza-se por ser agrícola, com pequenos aglomerados urbanos e com a presença de algumas minerações. Ao aplicar as metodologias já é possível observar diferenças entre as metodologias DRASTIC e DRASTIC Pesticida, com o aumento da vulnerabilidade na segunda, porém o aspecto geral observado na área de estudo foi de homogeneidade das classes. Com a utilização do IS foi observado que essa homogeneidade é perdida, ocorrendo intercalações de classes altas e baixas.

Lemos (2010) aplicou a metodologia DRASTIC para uma área inserida nos municípios de São Carlos e Ibaté, chegando à conclusão de que este método possibilita uma análise mais abrangente das condições de proteção das águas subterrâneas, não diferenciando características importantes relacionadas aos atributos. Neste ponto, o autor coloca a questão do uso e ocupação do solo, afirmando que as especificidades dos atributos que são ocasionadas pelas diferentes ocupações do solo não são consideradas.

Considera-se que a influência das alterações antrópicas, bem como do tipo de atividade desenvolvida em uma determinada região, afeta diretamente a vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Dessa forma, o mapeamento e a adequada identificação do uso e ocupação do solo torna-se uma ferramenta essencial para análises referentes à contaminação de águas subterrâneas.

4.7. Análise Multitemporal de Uso e Cobertura do Solo

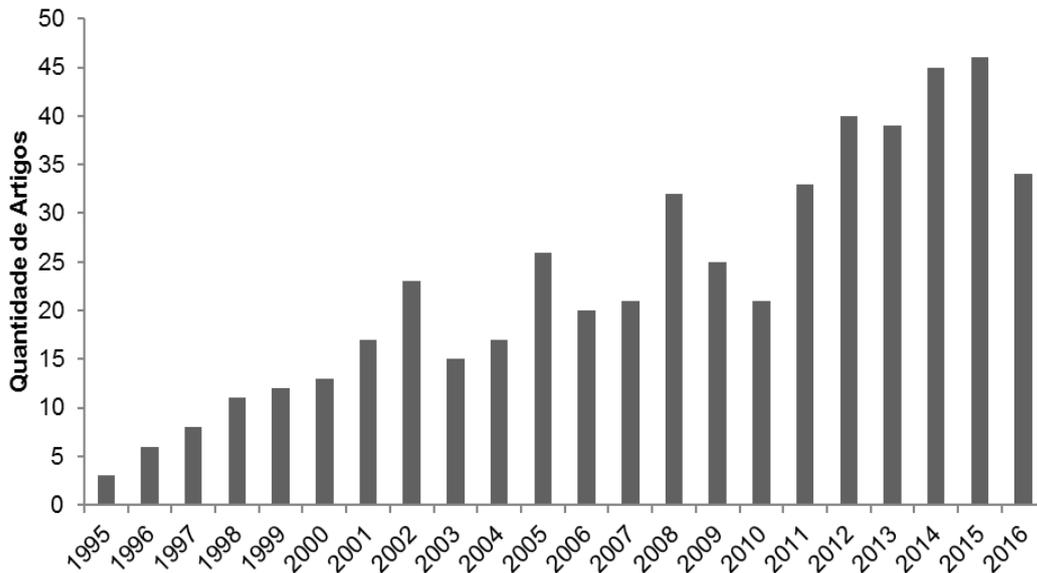
As mudanças no uso e cobertura do solo afetam o ambiente natural e os processos naturais de diversas formas. Sendo assim, o conhecimento e o estudo do uso do solo inserem-se como uma importante ferramenta no processo de planejamento e ordenamento territorial (AMORIM, 2015). No mesmo sentido, o monitoramento das modificações do uso do solo através do tempo fornece informações importantes sobre os padrões de mudanças e as principais forças responsáveis por essas alterações.

Dessa forma, a análise multitemporal pode ser utilizada como um auxílio para compreender processos e padrões durante um período de tempo histórico (LÓPEZ-GRANADO et al. 2013). Este tipo de análise aparece cada vez mais como tema de pesquisas e projetos referentes às modificações da paisagem.

Realizando uma pesquisa bibliográfica considerando as palavras chave Análise Multitemporal e Uso do Solo é possível observar o aumento dos estudos que tratam sobre este tema. Entre o ano de 1995 e 2016 foram identificados 507 artigos e revisões publicados em periódicos. A figura 6 mostra a evolução da produção científica sobre esta temática. Observa-se que a partir de 2011 houve um aumento significativo na produção científica sobre este assunto, sendo que 2015 foi o ano em que mais trabalhos foram publicados. Em um panorama mundial, o país que mais publicou artigos referentes à análise multitemporal foi os Estados Unidos (144 artigos). O Brasil foi o quarto país com mais publicações, com 47 artigos (Figura 7).

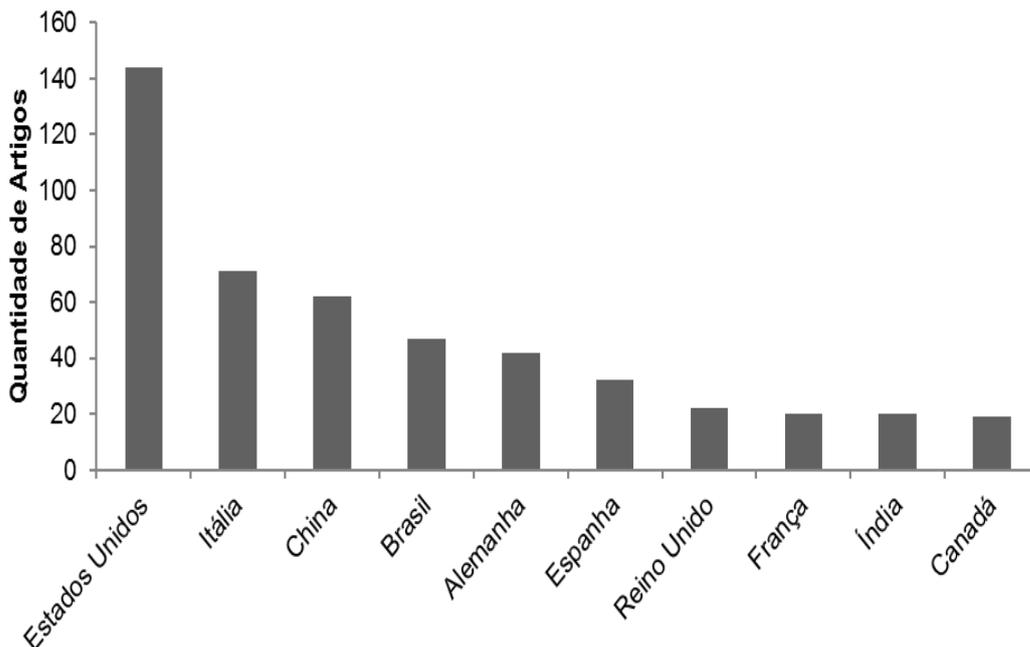
O aumento das publicações referentes a essa temática mostra a sua importância quando se trata de análises de uso e ocupação do solo, principalmente fazendo referência à substituição de vegetação por usos agrícolas.

Figura 6: Evolução da produção científica sobre Análise Multitemporal e Uso do Solo.



Fonte: Adaptado da base de dados Scopus.

Figura 7: Quantidade de artigos produzidos por país.



Fonte: Adaptado da base de dados Scopus.

Santos et al. (2015) realizaram um estudo que objetivou analisar e quantificar o uso e ocupação do solo no período de 1981 a 2010 no município de Colorado do Oeste, Rondônia, com o foco na perda de vegetação natural. Foram utilizadas técnicas de geoprocessamento para a realização dessas análises, as quais indicaram a perda de 70% da cobertura de vegetação natural, verificando que esta cobertura foi substituída, principalmente, por pastagem.

Schiavo et al. (2015) realizaram a análise multitemporal de uso e ocupação do solo no município de São Borja, Rio Grande do Sul, entre os anos de 2000, 2005 e 2010. Os principais resultados mostraram aumento de áreas com solo exposto e urbanização, além de um aumento em áreas com florestas.

Calijuri et al. (2015) analisaram a influência da mudança temporal de uso e cobertura do solo no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Alto Paraguaçu, Bahia, no sentido de relacionar tais mudanças com a qualidade e a quantidade de água na área de estudo. O estudo foi realizado entre os anos de 1987, 2004 e 2010. Os autores chegaram à conclusão de que a qualidade da água é diretamente influenciada pelas mudanças do uso e cobertura do solo. Com relação à quantidade, foi relatado que a antropização da bacia aumentou 192% durante o período estudado, enquanto a disponibilidade de água, em termos de vazões mínimas, diminuiu 55%, mostrando relação entre essas alterações antrópicas e a quantidade de água disponível.

Piroli et al. (2011) realizaram um estudo na micro bacia do Córrego de Furnas, São Paulo, com o intuito de analisar as mudanças do uso do solo entre os anos de 1972 a 2007, mostrando os impactos nas áreas de preservação permanente. A conclusão do estudo indicou que a maior parte da área de estudo apresentou modificações de uso e cobertura do solo, sendo o aumento da área urbana e de áreas com cana de açúcar as principais modificações, juntamente com a erradicação da cultura de café e diminuição de pastagens e culturas anuais.

Com relação às áreas de preservação permanente, Piroli et al. (2011) destacaram que grande parte está ocupada de forma irregular, sendo que os locais que possuem vegetação não apresentam uma variabilidade de espécies baixa, além da presença de muitas espécies exóticas.

Para a realização desse tipo de análise é necessário o conhecimento de ferramentas que possam quantificar e mostrar essas modificações. Nesse sentido, insere-se o geoprocessamento como ferramenta essencial para a análise espacial.

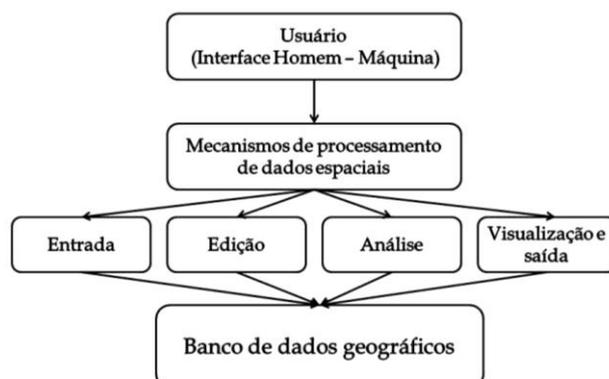
4.8. O Geoprocessamento como Ferramenta de Análise Espacial

O termo geoprocessamento é definido como a disciplina do conhecimento que realiza o tratamento da informação geográfica através de técnicas computacionais e matemáticas, objetivando a análise de dados georreferenciados – dados associados a um sistema de coordenadas conhecido, e integrados a uma base de dados digitais (CÂMARA E MEDEIROS, 1998; ESTRADA E ESTRADA, 2013).

Entre as tecnologias de tratamento e manipulação de dados geográficos destaca-se os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sendo a tecnologia mais abrangente de geoprocessamento, trabalhando com sensoriamento remoto, banco de dados geográficos, topografia, fotogrametria e GPS. Tal ferramenta pode então ser definido como um conjunto de ferramentas destinado a coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados do mundo real (BURROUGH, 1987 apud PONS, 2006; ESTRADA E ESTRADA, 2013).

O SIG apresenta cinco componentes básicos: interface com o usuário; entrada e integração de dados; funções de processamento gráfico e de imagens; visualização e plotagem; armazenamento e recuperação de dados (Figura 8). Com relação à utilização dessa ferramenta é possível identificar três formas: ferramentas para produção de mapas, suporte para análise espacial de fenômenos e banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial (CÂMARA E MEDEIROS, 1998).

Figura 8: Esquema de funcionamento dos Sistemas de Informação Geográfica.



Fonte: Adaptado de Câmara e Medeiros (1998).

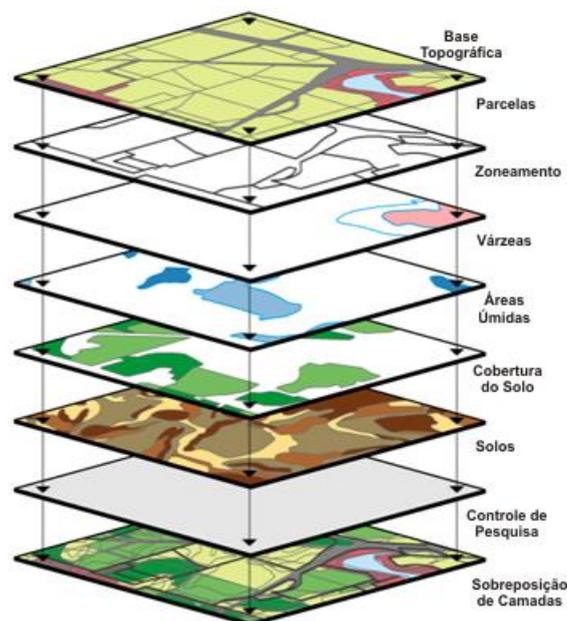
Medeiros e Câmara (2001) apresentam uma visão interessante a respeito da questão relacionada à gestão do território, afirmando que as ações de planejamento,

ordenação ou monitoramento do espaço devem incluir análises de diferentes componentes do ambiente, os quais incluem o meio físico-biótico, a ocupação humana, e seu inter-relacionamento. Os autores elencam então, cinco grandes dimensões de problemas ligados aos Estudos Ambientais em que o SIG pode ser utilizado: Mapeamento Temático; Diagnóstico Ambiental; Avaliação de Impacto Ambiental; Ordenamento Territorial e; Prognósticos Ambientais.

O mapeamento temático busca caracterizar e entender a organização do espaço, objetivando o estabelecimento de bases para ações e estudos futuros; O diagnóstico ambiental busca estabelecer estudos específicos sobre determinadas regiões; A Avaliação de Impacto Ambiental relaciona-se com o monitoramento da interferência antrópica sobre o ambiente; Trabalhos de ordenamento territorial objetivam normatizar a ocupação do espaço, de forma a racionalizar a gestão de território (MEDEIROS e CÂMARA, 2001). Relacionado a isso, o SIG permite a inserção e a integração de diversos tipos de informações, as quais podem ser interligadas através dos componentes da ferramenta, possibilitando a produção de novas informações que contribuam com o entendimento do ambiente (Figura 9).

O SIG deve ser utilizado como a ferramenta que irá realizar as análises, sendo que a partir da obtenção de informações de diversos aspectos, como o uso e ocupação do solo, será possível analisar as mudanças que ocorreram em um determinado local, bem como inferir sobre as possíveis modificações futuras.

Figura 9: Possibilidade de Integração de informações no SIG.



Amorim (2015) realizou uma análise multitemporal de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vez, em Portugal, sendo que para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizadas técnicas e softwares de geoprocessamento, como obtenção e utilização de imagens orbitais e tratamento de informações em ambiente SIG. Diversas pesquisas realizadas no sentido de analisar as modificações do uso e ocupação do solo através do tempo utilizaram o geoprocessamento e o SIG para a elaboração das análises, como nos trabalhos feitos por Leh et al. (2013), Maitre et al. (2013), Santos (2014) e Delgado et al. (2015).

4.8.1. Modelagem para Realizar a Análise Multitemporal de Uso e Ocupação do Solo

De acordo com Amorim (2015) as alterações do uso e ocupação do solo podem ser avaliadas por meio de modelos de análise dinâmicos que relacionam o espaço com o tempo, além de considerar as forças que impulsionam as mudanças. As mudanças de uso e ocupação do solo são influenciadas por diversos fatores naturais e antropogênicos, sendo de enorme importância para os estudos relacionados aos recursos naturais (RAWAT et al, 2013).

A detecção das alterações de uso e cobertura do solo é essencial para o devido entendimento das dinâmicas da paisagem, sendo que a utilização de imagens de satélite é extremamente aplicável e útil para esses tipos de estudos. A aplicação do sensoriamento remoto aliado ao SIG possibilitou o estudo dessas mudanças em um menor tempo, com menos custos e maior acurácia (RAWAT E KUMAR, 2015).

Os métodos para análise de mudanças podem ser classificados em dois grandes grupos: pós-classificação e pré-classificação. A pós-classificação gera uma classificação para cada data de forma separada, para que a detecção de mudanças ocorra posteriormente através da comparação desses mapas temáticos. Os métodos de classificação que podem ser utilizadas neste grupo são: interpretação visual, classificação supervisionada e classificação não-supervisionada (OLIVEIRA et al., 2014; WECKMÜLLER E VICENS, 2016).

A pré-classificação diz respeito à classificação de todas as imagens de diferentes datas juntas, sendo que a premissa básica é de que todas as alterações

na cobertura terrestre deverão resultar em mudanças nos valores de radiância (WECKMÜLLER E VICENS, 2016).

Um dos métodos de pós-classificação muito utilizados em estudos de mudanças de uso e cobertura do solo é o de redes neurais, sendo este utilizado no módulo Land Change Modeler (LCM). O LCM é um módulo inserido no SIG IDRISI, desenvolvido pela Clark Labs, que realiza a modelagem de mudanças de uso e ocupação do solo, considerando as variáveis que estimulam as alterações.

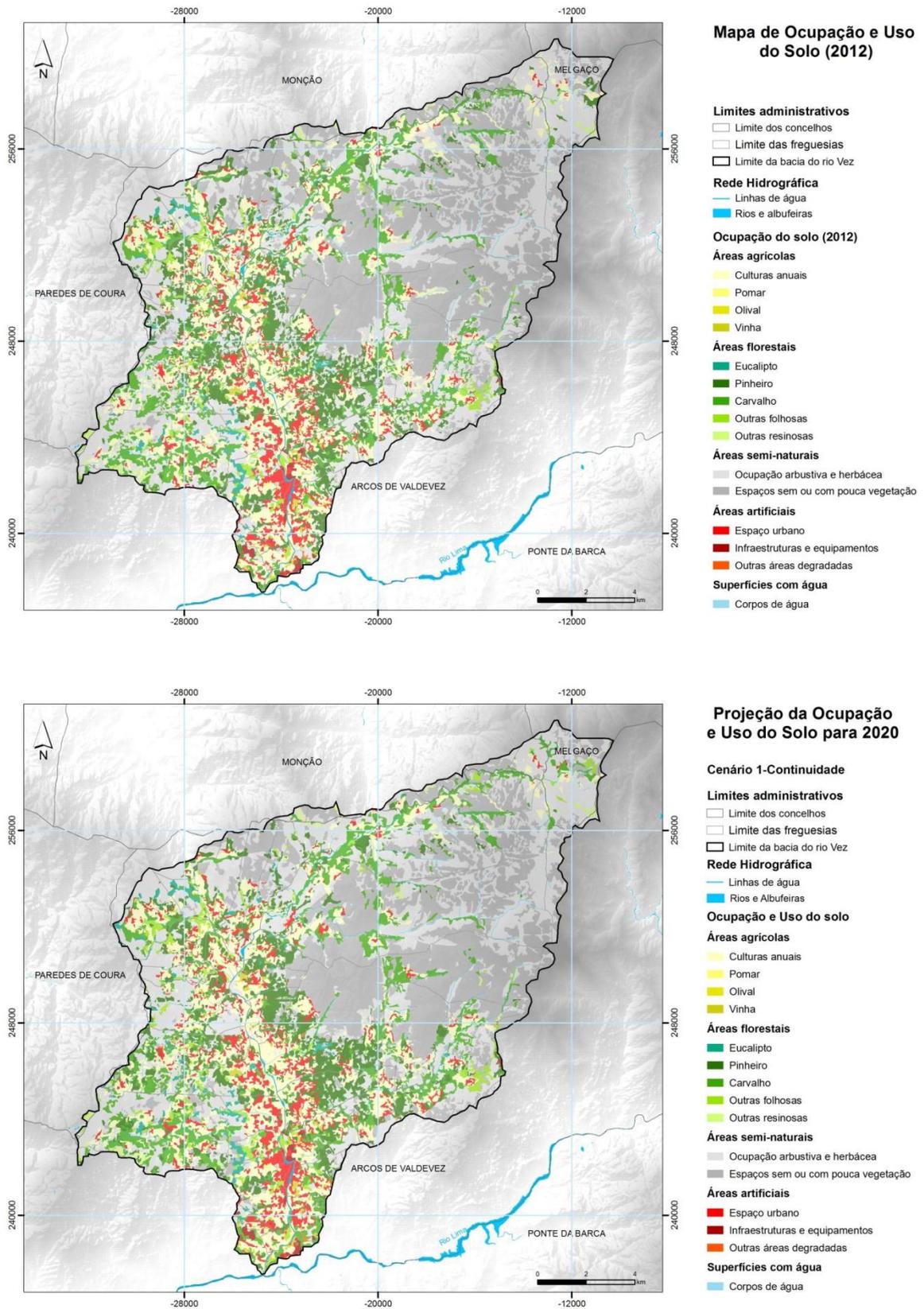
As redes neurais são modelos matemáticos que buscam imitar o funcionamento de redes neurais biológicas, incorporando a capacidade de adquirir conhecimento através de processo de aprendizagem. No LCM as redes neurais são treinadas por um algoritmo de retro-propagação, através da aprendizagem por correção de erros, ou seja, partindo de uma saída o erro é calculado e os valores desse erro são retro-propagados na rede (LUIZ, 2014).

Esta ferramenta realiza análises de mudança de uso e cobertura do solo entre duas datas distintas, fornecendo dados quantitativos sobre tais modificações, além de informações sobre perdas e ganhos de um determinado tipo de uso do solo, persistência e contribuições de um tipo de uso para o desenvolvimento ou supressão de outro tipo de uso (EASTMAN, 2012; MARTELI, 2015).

O LCM é utilizado, também, para a previsão de cenários futuros de uso e ocupação do solo, como mostrado em Amorim (2015), que utilizou o LCM para a definição de três cenários potenciais de ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Rio do Vez, em Portugal, para o ano de 2020 (figura 10). O autor considerou o LCM como uma boa ferramenta para a utilização das análises, porém ressaltou que durante a previsão de cenários pode ser necessária a interferência externa do avaliador para uma melhor adequação dos padrões gerados pelo programa. Isso mostra que o conhecimento sobre a área de estudo é essencial para gerar informações consistentes com a realidade.

A partir disso, os resultados gerados com o módulo LCM podem ser utilizados como subsídio para a tomada de decisões, ao se tratar do planejamento do uso e ocupação do solo futuro, no sentido de entender as tendências de modificação do uso do solo e propor as melhores alternativas para o planejamento, considerando também o meio ambiente natural e os serviços ecossistêmicos.

Figura 10: Uso e Ocupação do Solo: Projeção para 2020 e Ocupação de 2012.



Fonte: Amorim (2015)

Callijuri et al. (2015) também realizaram a previsão de cenários utilizando o LCM. O estudo foi desenvolvido na Bacia Hidrográfica do Alto Paraguaçu, no estado da Bahia, e a previsão foi realizada para o ano de 2050. Os autores identificaram que as áreas antrópicas obtiveram os maiores ganhos em detrimento de outros tipos de usos do solo, entre eles, usos relacionados a vegetação natural. Essa previsão pode contribuir com a tomada de decisões do poder público, de forma a propor meios para evitar a supressão de áreas naturais para o desenvolvimento antrópico.

Areendran et al. (2017) realizaram análises utilizando o LCM em um corredor ecológico na Índia. Foram utilizadas imagens dos anos de 2009 e 2014. Na análise de mudanças foi identificado o aumento de usos agrícolas, bem como a fragmentação das áreas com florestas densas. Ao realizar a previsão de cenário para o ano de 2020 e 2030 os autores mostraram que se as tendências de mudanças de usos do solo continuarem da mesma forma identificada entre 2009 e 2014, as áreas com florestas densas iriam decair em 2,53%. Os autores consideraram o LCM uma boa ferramenta de análise e previsão de cenários, sendo de grande aplicação para o planejamento e gestão do território.

Nesse sentido, tratando da presente pesquisa, o potencial de combinar os resultados gerados pelo LCM com outras informações hidrogeológicas das áreas estudadas, está justamente no subsídio para a tomada de decisão sobre a futura ocupação do solo, de forma a diminuir os impactos negativos causados sobre as reservas hídricas subterrâneas.

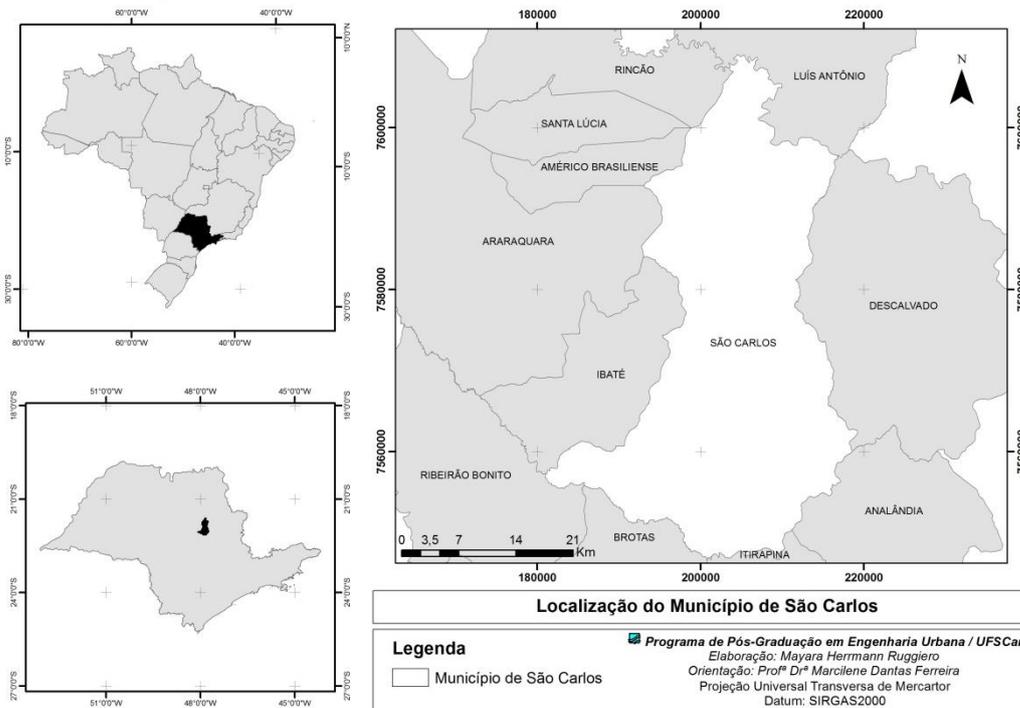
5. Caracterização da Área de Estudo

5.1. Município de São Carlos

O município de São Carlos está localizado na porção central do estado de São Paulo (Figura 11). Apresenta uma área de aproximadamente 1.132 km², com sua mancha urbana correspondendo à aproximadamente 6,92% de sua área total (78,44 km²) (OLIVEIRA et al., 2017).

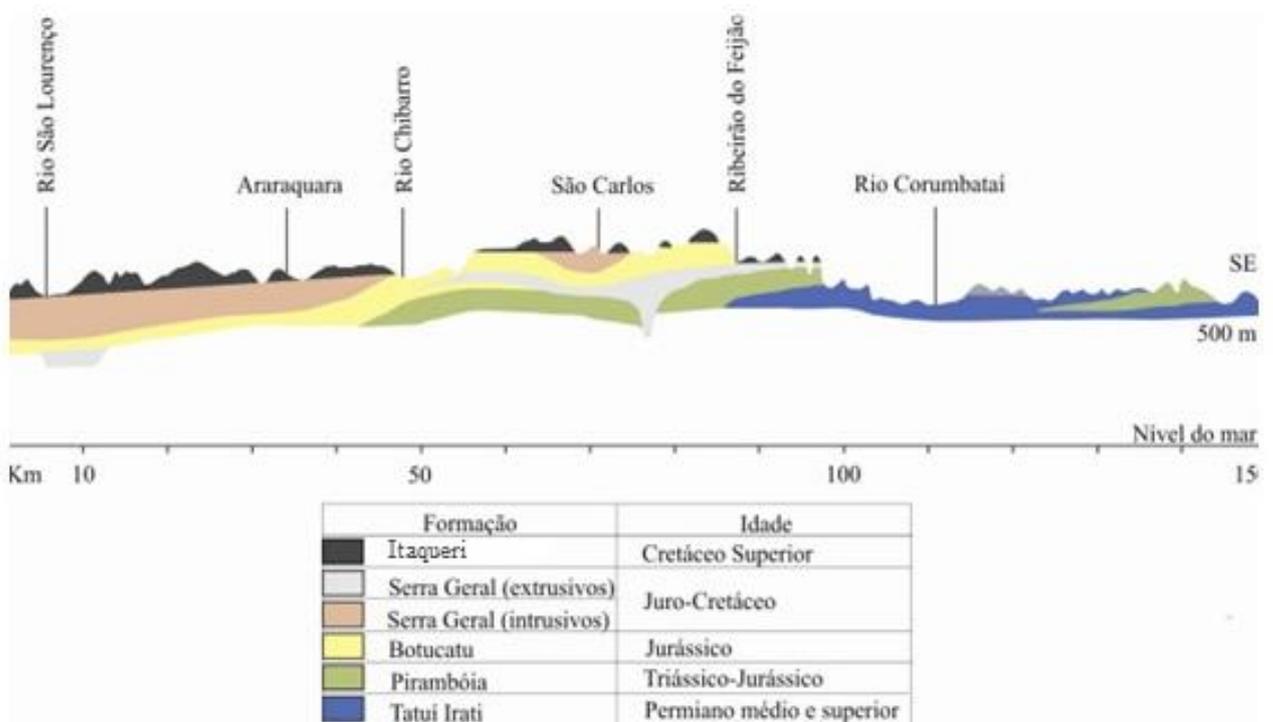
Soares (2003) classifica o clima da região como Cwa-Awa segundo o sistema de Köppen, o que indica que o município apresenta clima subtropical com verão úmido e inverno seco, sendo a precipitação média anual de 1468 mm. A litologia é representada pelas formações Serra Geral, composta por rochas de vulcânicas de derrames basálticos, Botucatu, como dito anteriormente em sua maior área, composta por arenitos eólicos, Pirambóia composta por arenitos oriundos de depósitos fluviais e de planícies de inundação, e Cobertura da Serra de Santana e similares (BISTRICHI et al., 1981 apud SOUZA JÚNIOR, 2005). Fagundes (2010) acrescenta ainda a formação Itaqueri, composta por arenitos com finos, siltitos e argilitos com espessura variada.

Figura 11: Localização do Município de São Carlos.



O município de São Carlos apresenta aproximadamente 52,63% de sua área recoberta pelo afloramento da formação Botucatu, sendo, portanto, área de recarga direta do Aquífero. A figura 12 mostra o perfil geológico da região de São Carlos, com a indicação do Rio Chibarro e do Ribeirão do Feijão (ZUQUETTE, 1981 apud COSTA, 2010).

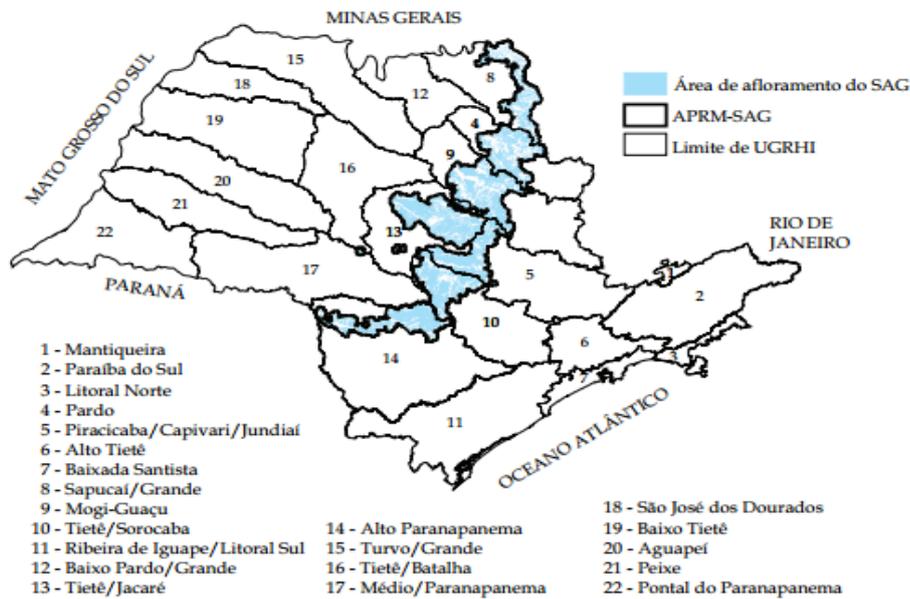
Figura 12: Perfil geológico da região de São Carlos.



Fonte: Costa (2010) adaptado de Zuquette (1981).

Essas regiões estão inseridas nas diretrizes da minuta de lei específica da área de proteção e recuperação da zona de afloramento do manancial Sistema Aquífero Guarani (Figura 13). Dessa forma, o planejamento do uso e ocupação do solo do município deve ser realizado respeitando os instrumentos e as especificações deste documento.

Figura 13: Área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani.



Fonte: Caderno de Projetos Ambientais Estratégicos número 5.

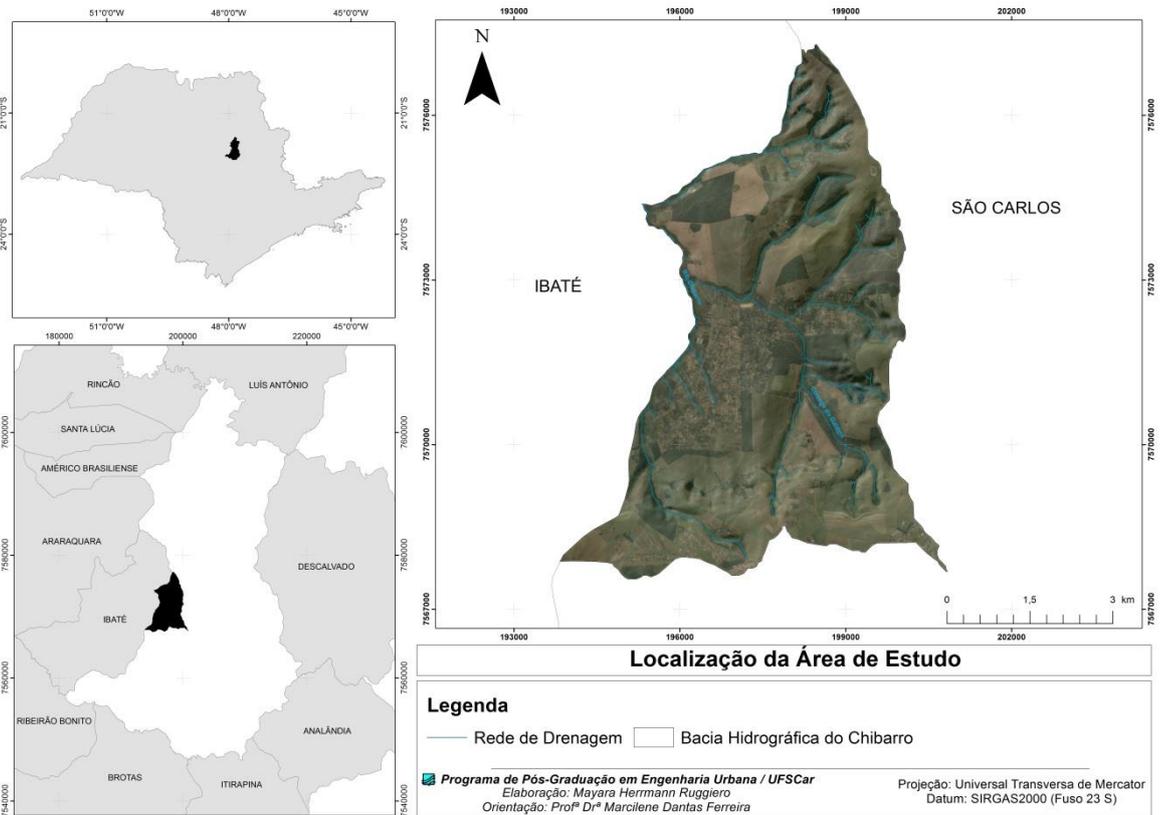
5.2. Bacia Hidrográfica do Chibarro

Características Gerais

A bacia hidrográfica do Chibarro está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré (UGRHI 13). Está localizada ao norte do perímetro urbano do município de São Carlos, em uma região com fortes tendências de expansão, apresentando, inclusive, uma grande área de expansão urbana prevista no plano diretor municipal (Lei nº 18.053/2016). A bacia compreende os municípios de São Carlos e Ibaté, sendo que no presente estudo foi considerada a porção inserida no município de São Carlos (Figura 14).

A Zona de expansão urbana ocupa uma área de aproximadamente 15,1 km², ou seja, aproximadamente 43,89% da área da Bacia. Com relação à região de recarga direta do aquífero, esta zona ocupa aproximadamente 7,24 km², ou seja, aproximadamente 46,11% da área.

Figura 14: Localização da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

A presença de novos loteamentos nesse local acarretará na compactação e impermeabilização do solo, provocando decréscimo na infiltração da água e, por consequência, na recarga do aquífero. Apesar da existência de áreas de preservação e recuperação da vegetação, a substituição de um uso agrícola por um loteamento, ou por uma área urbana, pode contribuir com a diminuição da quantidade da recarga, além de inviabilizar a futura recuperação da vegetação da região.

Uso e Ocupação do Solo

A área apresenta uma predominância de uso agrícola através do cultivo de cana de açúcar e da presença de locais com pastagens. Há a existência de condomínios de chácara e também de áreas urbanas. Com relação à vegetação, são observados fragmentos significativos de vegetação natural, além da presença de vegetação em muitas áreas de preservação permanente.

Geologia

A área de estudo é composta pelas formações Botucatu, Itaqueri e Serra Geral. A formação Itaqueri é formada por litologias compostas de arenitos com cimentos de finos, siltitos e argilitos, sendo estes intercalados e apresentando uma alta variabilidade. A formação Serra Geral é composta por basaltos, os quais afloram nas encostas com declividades elevadas. A formação Botucatu é constituída por arenitos friáveis, os quais ocupam áreas de baixas declividades e estão associados à zona de recarga direta do aquífero. Tais arenitos propiciaram a formação de um pacote de materiais inconsolidados espessos, arenosos e com textura homogênea (FAGUNDES, 2010).

Materiais Inconsolidados

As informações apresentadas na tabela 2 a respeito dos materiais inconsolidados da área de estudo foram obtidas de Fagundes (2010).

Tabela 2: Características dos Materiais Inconsolidados (continua).

Materiais Inconsolidados	Descrição
Residuais da Formação Botucatu Arenosos Rasos	Ocorrem em sequência aos arenosos com maior espessura, em pequenas extensões. Apresentam espessuras menores que 2 metros e condutividade
Residuais da Formação Botucatu Arenoso	Tais materiais são oriundos da alteração dos arenitos friáveis da formação Botucatu, apresentando espessuras que podem ultrapassar 10 metros. Correspondem à maior parte da área de estudo e estão associados à recarga direta do aquífero. Apresentam condutividade hidráulica alta.
Residuais da Formação Itaqueri Finos Rasos	Ocorrem em encostas em sequência aos finos mais espessos, com extensões pequenas e espessura na ordem de 1 metro.
Residuais da Formação Itaqueri Finos	São originários de formações litológicas finas, como argilitos e siltitos, componentes da formação Itaqueri. São
Residuais da Formação Itaqueri Arenosos com Finos Rasos	Estão associados a locais com maiores declividades, apresentando espessuras máximas de 2m.
Residuais da Formação Itaqueri Arenosos com Finos	Ocorrem recobrimdo os residuais arenosos. Apresentam condutividade hidráulica entre 10^{-4} .
Retrabalhado Arenoso	Ocorrem em locais mais elevados, estando separados dos residuais finos por uma linha de seixos, apresentando espessuras que podem variar de poucos centímetros até

Tabela 2: Características dos Materiais Inconsolidados (continuação).

Materiais Inconsolidados	Descrição
Retrabalhado Aluvião	Estão associados a locais em que a profundidade da zona saturada encontra-se a menos de 2m. Apresentam uma camada superficial arenosa rica em matéria orgânica.

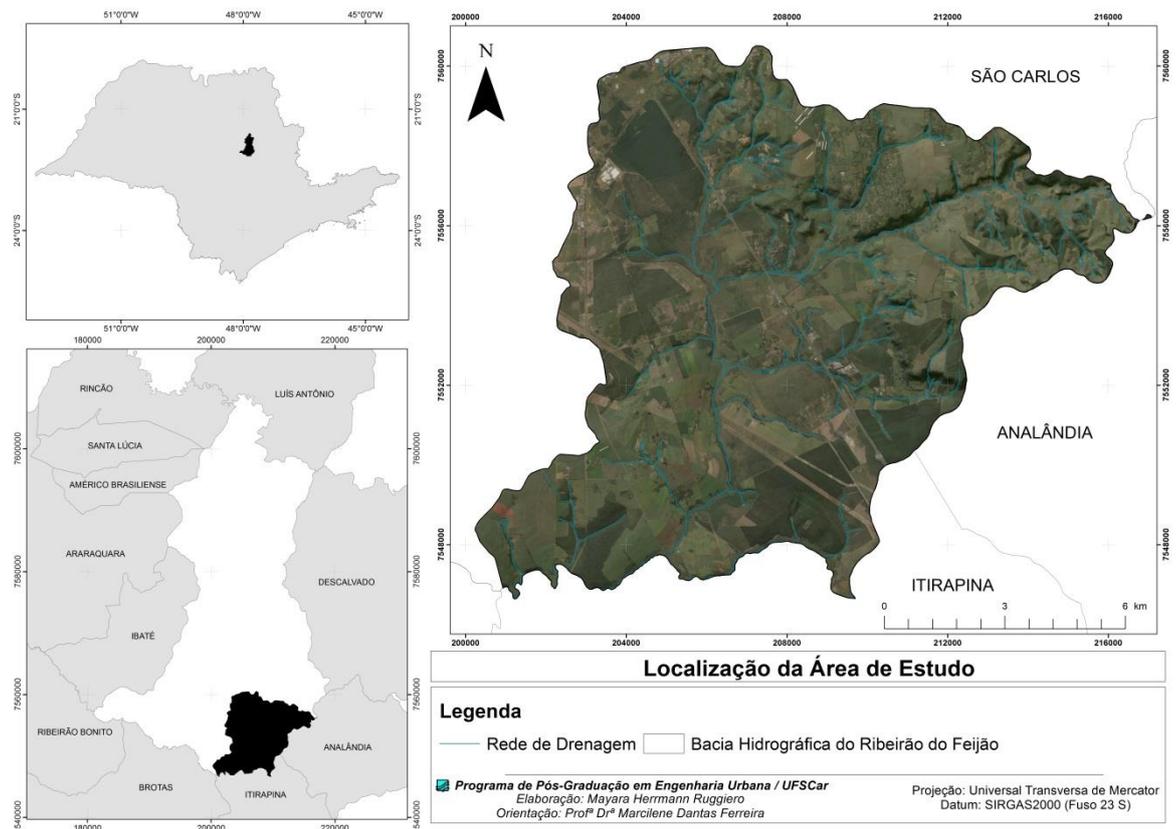
Fonte: Adaptado de Fagundes (2010).

5.3. Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

Características Gerais

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão está inserida em três municípios da região: São Carlos, Analândia e Itirapina, sendo que a maior porção da bacia está localizada no município de São Carlos, com uma área de 116 km² (Figura 15).

Figura 15: Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Apresenta extremo valor para o município de São Carlos por ser um manancial para captação de água para o abastecimento da população com uma grande vazão. Além disso, parte da bacia está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) Corumbataí.

Além disso, esta bacia apresenta uma grande importância quando se trata da recarga do aquífero. Grande parte da área da bacia é composta pelo afloramento da formação Botucatu, a qual é recoberta por materiais inconsolidados arenosos e homogêneos, acarretando em elevados valores de condutividade hidráulica. Sendo assim, toda essa área de afloramento é considerada zona de recarga direta do aquífero.

Uso e Ocupação do Solo

O uso e ocupação do solo é predominantemente agrícola, apresentando áreas com pastagens, cultivos predominantes de cana de açúcar e laranja, além de áreas com silvicultura. Existe a presença de fragmentos significativos de vegetação natural. A área é caracterizada, também, pela presença de alguns pontos de extração mineral, além da presença de condomínios de chácaras e também de área urbana consolidada.

Geologia

A geologia da área de estudo é composta pelas formações Itaqueri, Serra Geral e Botucatu, sendo as informações aqui apresentadas obtidas de Failache e Dantas-Ferreira (em prelo). A formação Itaqueri aflora a nordeste a norte, sendo caracterizada por arenitos de granulação média a conglomerática, com coloração marrom-avermelhada. Sua espessura pode chegar a 30 metros.

A formação Serra Geral é representada principalmente por derrames basálticos e intrusões de magma. Afloram frequentemente próximo ao Ribeirão do Feijão e em forma de paredões. Apresenta espessura de cerca de 100 metros. A formação Botucatu compreende a maior parte da área da bacia. É constituída de arenitos com granulação fina a média, grãos bem selecionados e com teor de argila variável. Podem ser friáveis ou silicificados. Sua espessura varia de 50 e 70 metros, não ultrapassando 150 metros.

Materiais Inconsolidados

As informações apresentadas na tabela 3 sobre cada unidade foram obtidas de Failache (2015).

Tabela 3: Características dos Materiais Inconsolidados

Materiais Inconsolidados	Descrição
Residual do Botucatu	Apresenta maior distribuição na bacia, com profundidades que variam de 2 a 20 metros. Sua textura é predominantemente arenosa, sendo um solo bastante friável. A condutividade hidráulica varia de 10^{-3} a 10^{-2} cm/s. É um material muito importante quando se trata da recarga do aquífero.
Residual do Serra Geral	São encontrados em taludes a nordeste da bacia e nas proximidades do afloramento de basalto contínuo ao Ribeirão do Feijão. Apresentam espessuras de 2 a 10 metros e sua textura é predominantemente argilosa. A condutividade hidráulica varia de 10^{-5} a 10^{-3} cm/s.
Residual do Itaqueri	Estão localizados principalmente no topo da Serra do Cuscuzeiro, sendo sua granulometria composta principalmente por areia fina à média, à argila arenosa. A condutividade hidráulica varia de 10^{-4} a 10^{-2} cm/s.
Retrabalhado Arenoso III	Ocorre em um dos locais com maior elevação da bacia, entre as cotas 950 e 1000 metros. Apresenta uma textura com predominância areno-argilosa. Sua condutividade hidráulica varia entre 10^{-3} a 10^{-2} cm/s.
Retrabalhado Arenoso IV	Estão localizados na base das escarpas, sendo caracterizados como depósitos coluviais. Apresenta condutividade hidráulica que varia entre 10^{-4} a 10^{-2} cm/s.
Retrabalhado Arenoso I	Recobre os materiais da formação Botucatu, sendo predominantemente arenosa. Sua condutividade hidráulica é de aproximadamente 10^{-3} cm/s
Retrabalhado Misto	Esses materiais são originados da mistura dos materiais residuais da formação Serra Geral e dos materiais arenosos da formação Botucatu. As espessuras desses materiais variam de 10 a 20 metros. Sua condutividade hidráulica varia de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s.
Aluvião	Estão localizados em áreas planas do Ribeirão do Feijão e de alguns de seus afluentes. Apresenta uma textura variada e é rica em matéria orgânica. Sua condutividade hidráulica está na casa de 10^{-4} cm/s.
Concreções Lateríticas	Ocorrem principalmente em locais com elevada declividade. Apresenta textura variada e condutividade hidráulica na casa de 10^{-3} cm/s.

Fonte: Adaptado de Failache (2015).

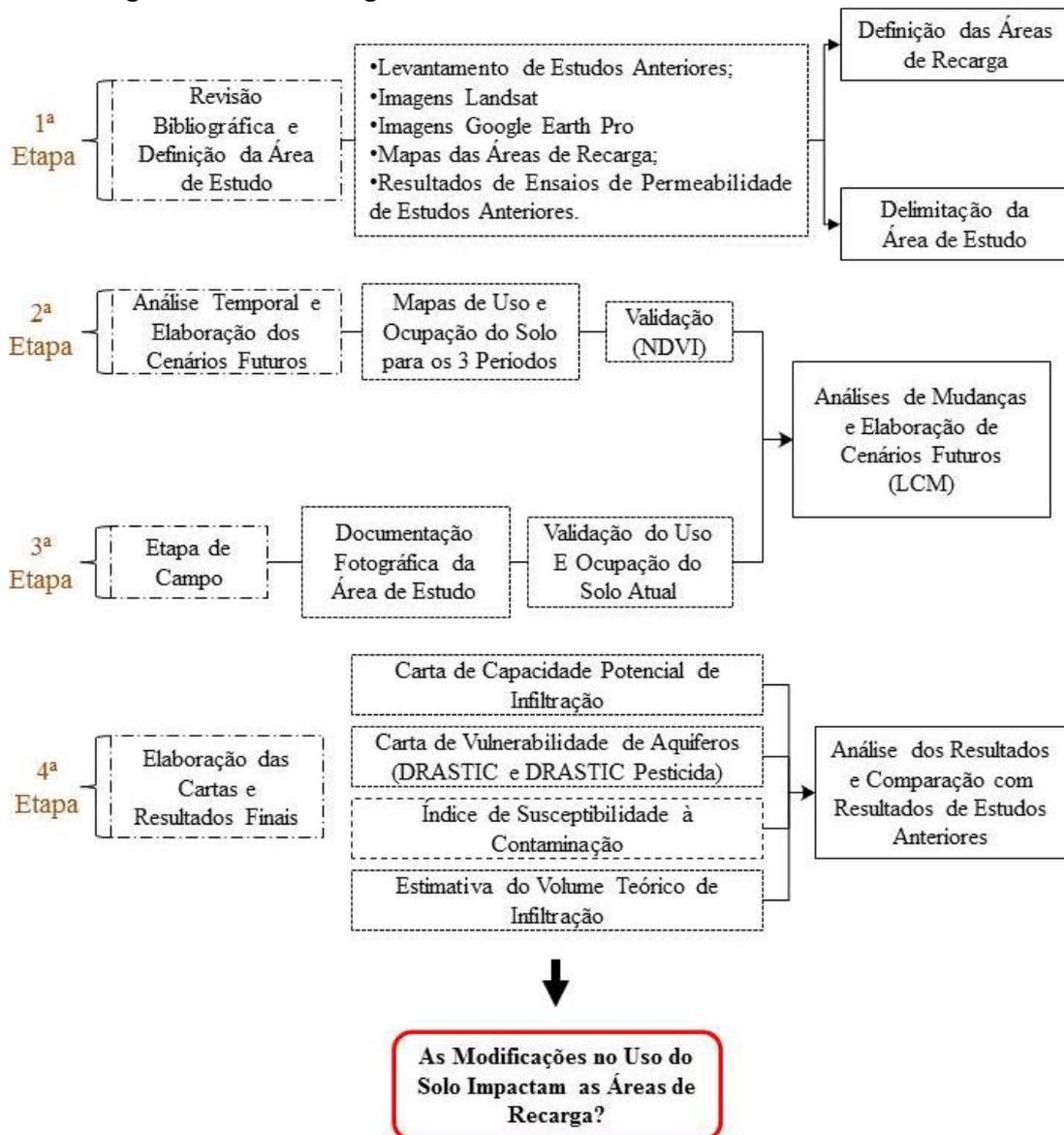
6. Metodologia

Neste tópico serão apresentados os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento da pesquisa.

6.1. Esquema Representativo da Metodologia

Para a identificação da influência das modificações do uso do solo na permeabilidade das áreas de recarga, o trabalho foi dividido em quatro etapas, as quais estão especificadas no esquema representativo da metodologia (Figura 16).

Figura 16: Fluxograma da Metodologia



6.2. Elaboração da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica foi realizada objetivando a aquisição de informações teóricas para subsidiar o desenvolvimento da pesquisa. A partir da identificação de estudos anteriores que trabalharam em áreas semelhantes (áreas de recarga de aquíferos) e utilizaram dos mesmos parâmetros e ensaios para gerar resultados, foi construída uma base teórica e um banco de informações de forma a fornecer uma base conceitual para o trabalho. O banco de informações foi utilizado para a comparação dos resultados atuais (gerados por este estudo) com os resultados anteriores, além de subsídio e complementação das análises realizadas.

A pesquisa foi realizada em diversas plataformas de pesquisa, como Scopus, Google Acadêmico e bancos de teses e dissertações de diversas universidades.

6.3. Documentos Cartográficos Fundamentais Básicos

Os documentos cartográficos fundamentais básicos foram definidos conforme as orientações de Zuquette e Gandolfi (2004). Para a elaboração desses documentos foram utilizadas cartas topográficas do IGC com escala 1:10.000, projeção Universal Transversa de Mercator e Datum Horizontal Córrego Alegre, Fuso 23 Sul. Foi utilizado o software ArcGIS 10.2 para o tratamento e produção dessas informações. Tais documentos estão especificados na tabela 4.

Tabela 4: Documentos Cartográficos Fundamentais e suas Informações.

Documento Cartográfico	Atributo	Obtenção	Escala
Mapa Topográfico	Curvas de Nível Pontos Cotados	Cartas Topográficas IGC ¹	1:10.000
Carta de Declividade	Declividade	Cotas Altimétricas	1:10.000
Mapa de Substrato Rochoso	Litologia	Fagundes (2010) Failache e Dantas-Ferreira (no plero)	1:25.000
Mapa de Materiais Inconsolidados	Condutividade Hidráulica	Fagundes (2010) Failache e Dantas-Ferreira (no plero)	1:25.000
Mapa de Uso e Ocupação do Solo	Uso do Solo	Imagens de Satélite	1:50.000 1:25.000

Fonte: Ruggiero, 2017.

¹Folhas topográficas IGC (Bacia Hidrográfica do Chibarro): SF-23-V-C-IV-3-SO-F; SF-23-V-C-IV-3-SO-A; SF-23-V-C-IV-3-SO-B; SF-23-V-C-IV-3-SO-D. Folhas Topográficas IGC (Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão): SF-23-Y-A-I-1-NE-A; SF-23-Y-A-I-1-NE-B; SF-23-Y-A-I-1-NE-C; SF-23-Y-A-I-1-NE-D; SF-23-Y-A-I-1-NE-E; SF-23-Y-A-I-1-NE-F; SF-23-Y-A-I-1-NO-D; SF-23-Y-A-I-1-NO-F; SF-23-Y-A-I-1-SE-A; SF-23-Y-A-I-1-SO-B; SF-23-Y-A-I-2-NO-C

Os mapas topográficos foram elaborados através da digitalização das curvas de nível e dos pontos cotados provenientes das cartas topográficas. Este procedimento foi realizado com o software ArcGIS 10.2. A partir desses documentos foram geradas as cartas de hipsometria e declividade, com a utilização das ferramentas *Topo to Raster* e *Slope*.

Os mapas de substrato rochoso e materiais inconsolidados foram obtidos através dos trabalhos de Fagundes (2010), para a bacia hidrográfica do Chibarro, e Failache e Dantas-Ferreira (no plero), para a bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, sendo estes adaptados para a área de estudo e proposta desta pesquisa.

6.4. Análise Multitemporal e Elaboração de Cenários Futuros

6.4.1. Digitalização do Uso e Ocupação do Solo

Primeiramente foi realizada a delimitação do uso e ocupação do solo das duas bacias hidrográficas abrangidas por essa pesquisa. Foram definidos anos específicos para as análises, de forma a mostrar de fato as tendências de alterações que ocorreram nessas áreas. Com a definição das datas foram adquiridas as imagens dos satélites Landsat 5 (para o ano de 1985), Landsat 7 (para o ano 2000) e Landsat 8 (para o ano de 2015).

Os usos do solo foram digitalizados utilizando o software ArcGIS 10.2, sendo que as imagens receberam o devido tratamento em ambiente SIG, sendo projetadas com a projeção Universal Transversa de Mercator e Datum Geocêntrico SIRGAS2000, ou seja apresenta a sua origem no centro de massas da Terra (BORGES et al., 2016). Foi utilizada a composição RGB com as bandas 654 para a imagem Landsat 8 OLI e com as bandas 543 para as imagens Landsat 7 ETM e Landsat 5 TM. A tabela 5 apresenta as informações sobre as imagens de satélite obtidas.

As imagens Landsat foram utilizadas para gerar os mapas de mudanças de uso do solo, na escala 1:50.000.

A digitalização foi realizada através da interpretação visual da imagem na tela do computador, seguida da digitalização dos polígonos representativos de cada tipo de uso do solo. Foi elaborado um banco de dados em que foram definidas as classes e os tipos de uso, sendo a classe uma classificação mais abrangente, e o

tipo uma classificação mais detalhada. A tabela 6 mostra a classificação utilizada e a tabela 7 mostra os parâmetros da interpretação visual das imagens.

Tabela 5: Características das imagens Landsat utilizadas

	Landsat 5	Landsat 7	Landsat 8
Período de Operação	1984 - 2013	1999 - 2003	2013 - Ativo
Bandas	1 (0.45-0.52 μm)	1 (0.45-0.52 μm)	1 (0.43 - 0.45 μm)
	2 (0.52-0.60 μm)	2 (0.52-0.60 μm)	2 (0.45 - 0.51 μm)
	3 (0.63-0.69 μm)	3 (0.63-0.69 μm)	3 (0.53 - 0.59 μm)
	4 (0.76-0.90 μm)	4 (0.77-0.90 μm)	4 (0.64 - 0.67 μm)
	5 (1.55-1.75 μm)	5 (1.55-1.75 μm)	5 (0.85 - 0.88 μm)
	6 (10.40-12.50 μm)	6 (10.40-12.50 μm)	6 (1.57 - 1.65 μm)
	7 (2.08-2.35 μm)	7 (2.09-2.35 μm) 8 (0.52-0.90 μm)	7 (2.11 - 2.29 μm) 8 (0.50 - 0.68 μm) 9 (1.36 - 1.38 μm) 10 (10.60 - 11.19 μm) 11 (11.50 - 12.51 μm)
Sensor	TM	ETM +	OLI/TIRS
Resolução	30 m	30 m	30 m
Data	09/07/1985	24/07/2000	28/07/2015
Composição	R5G4B3	R5G4B3	R6G5B4
			

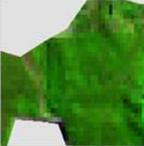
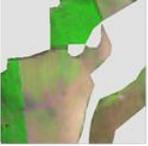
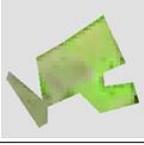
Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 6: Classificação do uso e ocupação do solo.

Classe de Uso	Tipo de Uso
Agrícola	Pastagem
	Cana de Açúcar
	Silvicultura
	Laranja
	Outras Culturas
Natural	Vegetação Natural
	Cerrado
	Vegetação em Recuperação
Urbano	Área Urbanizada
	Infraestrutura Urbana
	Loteamentos de Chácaras
Água	Represas

Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 7: Interpretação visual das imagens de satélite.

Tipo de Uso	Landsat	Google	Descrição	Tipo de Uso	Landsat	Google	Descrição
Pastagem			Representada por campos de pastagens; Vegetação rasteira composta por gramíneas. Caracterizada por regiões com manchas roxas e esverdeadas.	Represa			Representada pelas represas localizadas na área; Caracterizadas por cores escuras próximas ao azul.
Área Urbanizada			Representada pelas regiões com área urbana consolidada; Locais inseridos no perímetro urbano do município. Caracterizada por cores roxas.	Vegetação Natural			Representadas pelas áreas de mata; Vegetação presente nas áreas de preservação permanente; Fragmentos de Cerrado.
Cana de Açúcar			Representada pela cultura de cana de açúcar, independente do estágio de cultivo. Caracterizadas por cores esverdeadas vivas, quando em estágio avançado;	Silvicultura			Representada pelas plantações de pinus e eucalipto na região. Caracterizadas por cores verdes e textura mais elevada.
Infraestrutura			Representada pelos condomínios de chácara presentes na área, os quais apresentam infraestrutura, porém não são consideradas áreas urbanas consolidadas	Solo Exposto			Representadas por áreas desmatadas sem a presença de nenhum outro tipo de uso. Caracterizadas por cores roxas e textura lisa.
Laranja			Representada pelas regiões com a presença de cultura de laranja; Caracterizada pela divisão em blocos. Caracterizadas por cores esverdeadas.	Outras Culturas			Representadas por outros tipos de culturas, como horticulturas, plantações de milho, etc. Existe a necessidade de confirmação por imagens com maior detalhe (Google Earth).

Fonte: Ruggiero, 2017

Para subsidiar a classificação do uso e ocupação do solo, foi gerado o NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para a imagem de 1985, com o intuito de identificar os pequenos fragmentos de vegetação com um maior índice de cobertura vegetal.

Foram também utilizadas imagens do ano de 2015 obtidas do Google Earth Pro dos satélites DigitalGlobe e CNES/Astrium. As imagens foram georreferenciadas e projetadas com a projeção Universal Transversa de Mercator e Datum Geocêntrico SIRGAS2000. O método de digitalização utilizado também foi o manual. Optou-se por elaborar o uso e ocupação com a imagem do Google Earth Pro para gerar as cartas finais em uma escala maior do que as imagens Landsat são capazes de atingir.

6.4.2. Land Change Modeler

A análise multitemporal, bem como a previsão de cenários futuros foi realizada no software IDRISI Selva, utilizando o módulo Land Change Modeler. Para isso, os arquivos de uso e ocupação do solo digitalizados no ArcGIS 10.2 foram

transformados do formato vetorial para o formato matricial, devido ao software IDRISI Selva trabalhar apenas com formatos matriciais.

Após esse tratamento inicial, os arquivos passaram por adequações para serem utilizados no módulo. A primeira adequação realizada foi quanto ao número de classes de uso e ocupação do solo a serem trabalhadas. Para a realização das análises no *Land Change Modeler* todas as imagens de uso e ocupação precisam apresentar o mesmo número e as mesmas classes de uso. Dessa forma, tais classes foram definidas, e a classificação da imagem do uso de 2015 precisou passar por modificações na Bacia Hidrográfica do Chibarro, visto que a mesma apresentava 9 tipos de uso e ocupação do solo, e precisava acompanhar as outras imagens, que apresentavam 7 tipos.

Assim, a classe de uso Área Urbanizada foi unificada com a classe Infraestrutura, isso porque nos anos de 1985 e 2000 ainda não existia o avanço da mancha urbana para a Bacia Hidrográfica do Chibarro. A tabela 8 representa essa reclassificação para a imagem de 2015, bem como as classes e as novas classes das imagens de 1985 e 2000. A tabela 9 mostra a classificação final dos tipos de uso e ocupação do solo.

Tabela 8: Reclassificação dos tipos de uso e ocupação do solo (continua).

2015		
Tipo	Classe	Nova classe
Solo Exposto	1	1
Vegetação Natural	2	2
Área Urbanizada	3	3
Cana de Açúcar	4	4
Pastagem	5	5
Infraestrutura	6	3
Represa	7	6
Silvicultura	8	7
Laranja	9	7
2000		
Tipo	Classe	Nova classe
Infraestrutura	1	3
Vegetação Natural	2	2
Pastagem	3	5
Solo Exposto	4	1
Cana de Açúcar	5	4
Represa	6	6
Outras Culturas	7	7

Tabela 8: Reclassificação dos tipos de uso e ocupação do solo (continuação).

1985		
Tipo	Classe	Nova classe
Vegetação Natural	1	2
Represa	2	6
Infraestrutura	3	3
Pastagem	4	5
Solo Exposto	5	1
Cana de Açúcar	6	4
Outras Culturas	7	7

Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 9: Classificação final dos tipos de uso e ocupação do solo (Bacia Hidrográfica do Chibarro)

CLASSIFICAÇÃO FINAL	
Tipo de Uso	Classe final
Solo Exposto	1
Vegetação Natural	2
Infraestrutura	3
Cana de Açúcar	4
Pastagem	5
Represa	6
Outras Culturas	7

Fonte: Ruggiero, 2017.

O mesmo procedimento foi realizado para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, sendo que a única modificação necessária foi a união do tipo de uso laranja com outras culturas. A classificação final para esta bacia encontra-se na tabela 11.

Tabela 10: Classificação final dos tipos de uso e ocupação do solo (Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão)

CLASSIFICAÇÃO FINAL	
Tipo de Uso	Classe Final
Solo Exposto	1
Vegetação Natural	2
Infraestrutura	3
Cana de Açúcar	4
Pastagem	5
Represas	6
Silvicultura	7
Outras Culturas	8
Mineração	9

Fonte: Ruggiero, 2017.

Análise das Mudanças

Para a análise das mudanças é necessária a inserção de duas imagens de classificação de uso e ocupação do solo no software. No presente trabalho foram feitas as análises de mudanças entre os anos de 1985 e 2000; 2000 e 2015 e; 1985 e 2015. Nesta etapa, além de informações sobre mudanças, são geradas, também, informações sobre persistência de uso do solo e perdas e ganhos em cada categoria de uso.

Modelo de Transição Potencial

Nesta etapa são identificadas as principais transições das mudanças de uso e ocupação do solo, sendo estas relacionadas a variáveis explicativas. Estas transições foram obtidas através dos mapas de mudanças gerados na etapa anterior, sendo possível filtrar quais destas são importantes ou não para a pesquisa. São ainda inseridas variáveis de restrições ou incentivos às mudanças. A exemplo disso é possível citar a distância de corpos hídricos como de restrição e a distância do perímetro urbano como de incentivo. As variáveis selecionadas para os trabalhos foram: declividade, distância de corpos hídricos, distância da área urbana e probabilidade de mudanças. (Figura 17).

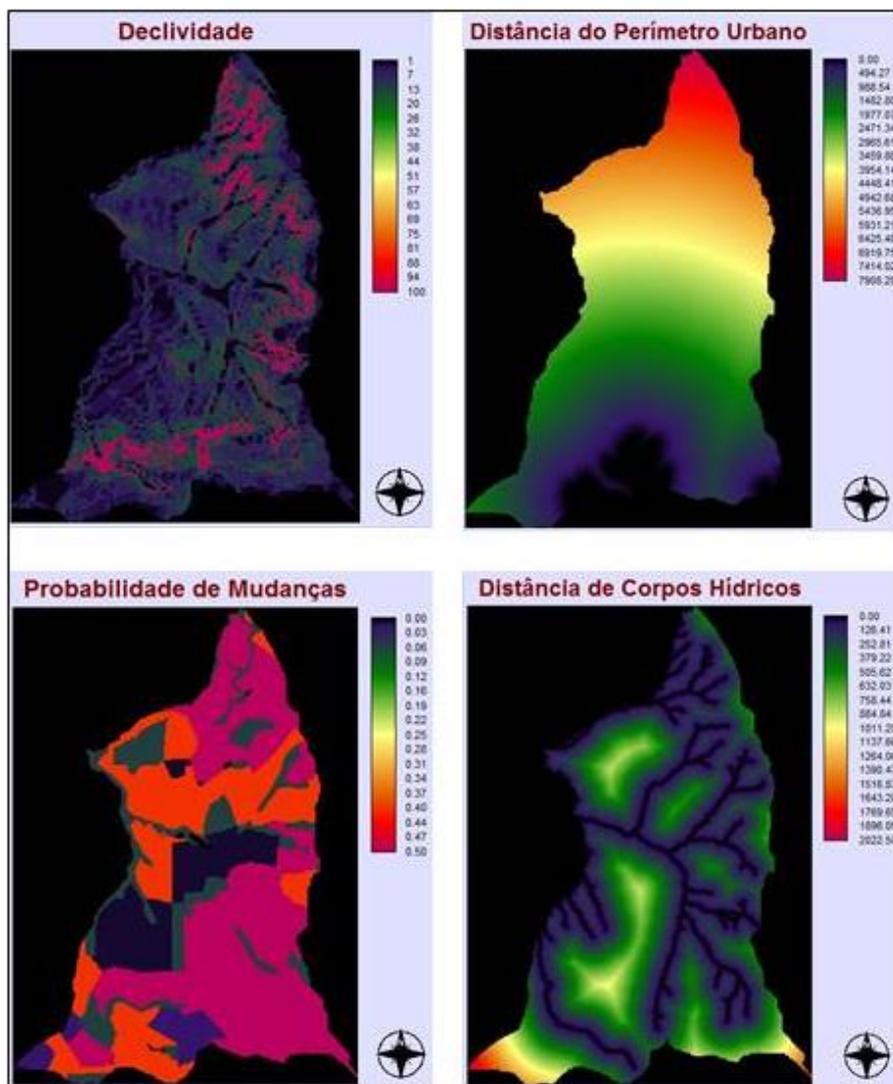
A declividade foi gerada no software ArcGIS 10.2 através das curvas de nível e dos pontos altos obtidos pela folha topográfica do IGC, com escala de 1:10.000. O arquivo gerado foi transformado de vetorial para matricial e, então, inserido no software IDRISI Selva. As variáveis distâncias dos corpos hídricos e distâncias do perímetro urbano foram processadas no software IDRISI Selva através da ferramenta DISTANCE. A hidrografia também foi obtida da folha topográfica do IGC, com escala de 1:10.000. O mapa de probabilidade de mudanças foi elaborado utilizando o mapa de mudanças gerado anteriormente, entre 1985 e 2015, e a ferramenta *Evidence Likelihood* do IDRISI Selva.

A partir da seleção dessas variáveis, é necessário realizar a modelagem empírica das informações. Para isso, Eastman (2012) afirma que existem duas ferramentas possíveis: a regressão logística e a rede neural multicamadas (MLP). Optou-se por utilizar o MLP, devido à possibilidade de modelar todas as classes de transição de uma vez só. Para isso, é adotado que as variáveis selecionadas

influenciam em todas as classes de transição que se deseja modelar (EASTMAN, 2012).

Amorim (2015) explica que o MLP é um logaritmo não paramétrico, o qual permite relacionamentos complexos entre duas ou mais variáveis independentes. Assim, com base em um algoritmo de treinamento são determinados os pesos da rede neural, sendo que para o treinamento adequado, as amostras devem identificar as relações entre as mudanças de uso e ocupação do solo e as variáveis determinadas. Para o modelo ser validado é necessária uma precisão de no mínimo 75%, caso o contrário deve ser realizado um novo treinamento com outras variáveis.

Figura 17: Variáveis para a elaboração dos Modelos de Transição Potencial.



A partir do momento em que a precisão do sub-modelo gerado foi considerada aceitável, ou seja, atingiu 75%, são gerados os potenciais de transição, sendo estes utilizados na etapa de previsão de cenários.

Previsão de Cenários

Para a previsão dos cenários futuros, o LCM utiliza as Cadeias de Markov, sendo que um processo desse tipo é aquele que representa o estado de um sistema através do conhecimento do seu estado anterior. Dessa forma, o modelo determina a quantidade de mudança utilizando os mapas anteriores e posteriores de uso e ocupação do solo, criando probabilidades de cada categoria de ocupação do solo mudar para todas as outras categorias na data especificada (AMORIM, 2015).

As Cadeias de Markov definem processos estocásticos através de modelos matemáticos, de acordo com a seguinte equação (PEDROSA E CÂMARA, 2004):

$$\Pi_{(t+1)} = P^n \cdot \Pi_{(t)}$$

Onde $\Pi_{(t)}$ é o estado do sistema no tempo t , $\Pi_{(t+1)}$ é o estado do sistema após o intervalo $t+1$ e P^n são os estados que podem acontecer, os quais são representados em matrizes de possibilidades de transição. Essas matrizes representam a possibilidade de um determinado estado permanecer o mesmo ou mudar para o estado durante o intervalo de tempo $t \rightarrow t+1$ (PEDROSA E CÂMARA, 2004; AMORIM, 2015).

Assim, é possível a elaboração de dois tipos de mapas: *hard prediction* e *soft prediction*. O mapa de previsão *hard* expressa o que de fato mudou, gerando, então um cenário de mudança. O mapa de previsão *soft* gera classes de vulnerabilidade a mudança, traduzindo o potencial de mudança futura de uma determinada área (EASTMAN, 2012; AMORIM, 2015).

Nesta etapa é possível realizar a validação do modelo. Desta forma, é preciso gerar um cenário para uma data com um uso do solo conhecido (2015, por exemplo). Assim, o modelo elabora um mapa mostrando em quais locais houveram acertos (o modelo previu mudança e a mudança realmente aconteceu), em quais houveram falhas (o modelo previu persistência, porém ocorreram mudanças), e em quais houveram alarme falso (o modelo previu mudanças, porém o uso do solo persistiu) (EASTMAN, 2012). Como a proposta desta pesquisa busca a previsão de cenários futuros, para o ano de 2030, a etapa de validação não foi realizada.

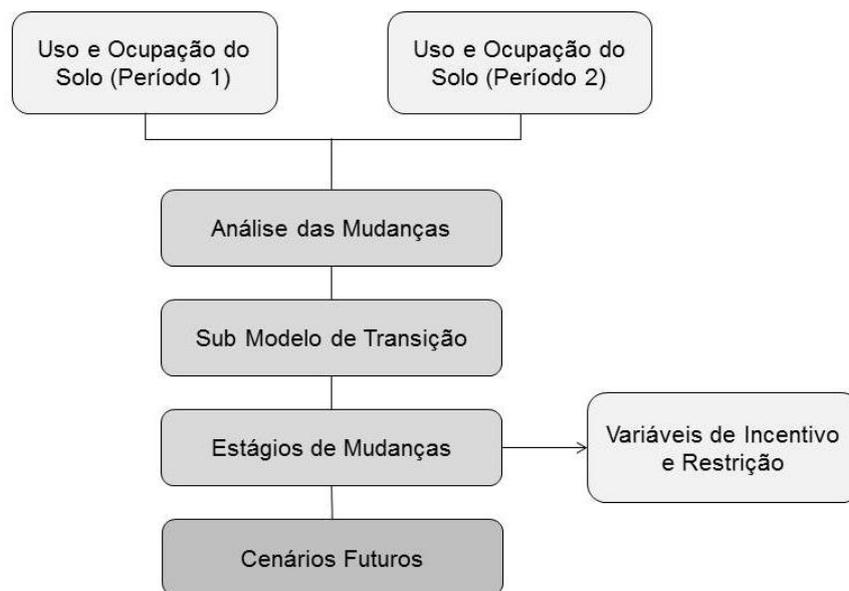
Foram definidos dois cenários para realizar as previsões. O primeiro, um cenário considerando as restrições ambientais definidas em legislação, como as

áreas de preservação permanente e reservas legais, além de aspectos físicos dos locais, como características dos materiais inconsolidados.

O segundo cenário leva em conta o zoneamento proposto pelo plano diretor do município de São Carlos. Considera-se, portanto, as zonas de expansão urbana, além daquelas de restrição e conservação ambiental. Para a obtenção dos cenários propostos tomou-se por base aquele elaborado através do módulo *Land Change Modeler*, sendo que o mesmo passou por adequações no software ArcGIS 10.2, sendo estas relacionadas a mudança do formato matricial para o vetorial, digitalização das informações para adequação da escala (1:25.000) e elaboração dos cenários para 2030.

A figura 18 mostra o esquema de funcionamento do LCM, com todas as suas etapas.

Figura 18: Funcionamento do LCM.



Fonte: Adaptado de Marteli (2015)

6.5. Cartas de Vulnerabilidade a Contaminação e Índice de Susceptibilidade à Contaminação

As cartas de Vulnerabilidade à contaminação foram elaboradas com o intuito de mostrar a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas nas áreas de

estudo. Para isso foi utilizada a metodologia DRASTIC e na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão foi também utilizada a metodologia DRASTIC Pesticida.

Este método é um dos mais difundidos quando se trata de estudos de vulnerabilidade intrínseca de aquíferos. A sigla DRASTIC faz referência aos atributos considerados por Aller *et al.* (1987) para a realização das análises:

Depth to water (profundidade do nível da água)

Net Recharge (Recarga do meio saturado)

Aquifer media (Característica do meio aquífero)

Soil media (Característica do solo)

Topography (Topografia)

Impact of vadone zone media (Impacto da zona vadoza)

Hydraulic Conductivity (Condutividade Hidráulica)

A quantificação da vulnerabilidade ocorre através da associação dos atributos analisados, os quais recebem pesos e são categorizados de acordo com a sua importância quando considerada a vulnerabilidade de águas subterrâneas (tabela 12 e 13). (LEMOS, 2010; TANAJURA E LEITE, 2016; SADATI-NOORI E EBRAHIMI, 2016).

Tabela 11: Pesos das variáveis na metodologia DRASTIC.

D	R	A	S	T	I	C
5	4	3	2	1	5	3

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

Tabela 12: Peso das variáveis na metodologia DRASTIC Pesticida.

D	R	A	S	T	I	C
5	4	3	5	3	4	2

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

O DRASTIC Pesticida utiliza os mesmos parâmetros do DRASTIC, e também objetiva a caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero, mas considera mais os parâmetros dependentes de atividades antrópicas, sendo que tais

parâmetros foram modificados levando em conta os processos de atenuação dos pesticidas nos solos e na zona vadosa (OLIVEIRA, 2014).

A partir da seguinte equação os índices DRASTIC e o DRASTIC Pesticida são determinados, sendo que quanto maior o valor do índice encontrado, maior a vulnerabilidade do local.

$$I = DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + IrIw + CrCw$$

Onde:

r = categoria

w = peso

Para a elaboração das cartas de vulnerabilidade foi realizado o mapeamento de todos os atributos necessários para a aplicação da metodologia. A equação foi aplicada através da álgebra de mapas, que foi realizada com a ferramenta *Raster Calculator* do software ArcGIS 10.2.

6.5.1. Índice de Susceptibilidade à Contaminação

Segundo Zuquette et al. (2008) a maioria dos métodos desenvolvidos para o estudo de vulnerabilidade, inclusive o DRASTIC, não consideram as fontes poluentes, assim, os resultados não indicam os níveis atuais de risco e perigo. Portanto, com a finalidade de complementar as análises de vulnerabilidade e verificar a influência do uso do solo nos aspectos de qualidade das águas subterrâneas, foi adotada a metodologia do Índice de Susceptibilidade à Poluição (IS).

Segundo Paralta et al. (2005), o IS busca avaliar a vulnerabilidade específica dos aquíferos. A vulnerabilidade específica considera as propriedades de um poluente aliado às características da vulnerabilidade intrínseca de uma região (SIMAS, 2014). Este índice foi feito através de uma modificação da metodologia DRASTIC, em que são desconsiderados alguns parâmetros e é acrescida a ocupação do solo.

Assim, o IS é calculado a partir da soma ponderada dos seguintes parâmetros:

- Profundidade da Zona Saturada – **D**;

- Recarga do Aquífero – **R**;
- Geologia do Aquífero – **A**;
- Declividade – **T**;
- Uso e Ocupação do Solo – **OS**;

A ponderação do IS é diferente daquela utilizada no DRASTIC. Os valores das escalas dos parâmetros que são definidos no DRASTIC são multiplicados por dez, sendo então denominados índice, e o uso do solo é pontuado conforme a tabela 14. A multiplicação por dez ocorre com o intuito de ajustar os valores considerados no DRASTIC para porcentagem. Além disso, a ponderação desses parâmetros também é diferente, e segundo Ribeiro (2005) apud Paralta et al. (2005) tais valores foram definidos por especialistas da hidrogeologia. Os valores finais obtidos através dos cruzamentos dos mapas e dos cálculos variam de 0 a 100%. A tabela 15 mostra a ponderação utilizada no IS.

O IS foi determinado a partir da seguinte equação, e para isso os mapas básicos foram reclassificados conforme a metodologia e foi utilizada a ferramenta *Raster Calculator* do software ArcGIS 10.2 para realizar a álgebra de mapas.

$$IS = Dp \times Di + Rp \times Ri + Ap \times Ai + Tp \times Ti + OSp \times OSi$$

p = Ponderação

i – Índice.

Tabela 13: Pontuação do uso e ocupação do solo segundo o IS (continua).

Ocupação do Solo	Índice
Descargas industriais, zonas de espalhamento de lixos	100
Perímetros regados, arrozais	90
Pedreiras, zonas de extração de areia, mina a céu aberto, estaleiros	80
Aeroportos, zonas portuárias, infraestruturas da rede de autoestradas e da rede ferroviária	75
Espaços de atividades industriais, comerciais e de equipamentos gerais	75
Espaços verdes urbanos	75
Zonas com equipamentos desportivos e de ocupação de tempos livres	75
Tecido urbano contínuo	75
Tecido urbano descontínuo	70
Culturas permanentes (vinhas, pomares, oliveiras, etc.)	70
Culturas anuais associadas às culturas permanentes	50
Pastagens	50
Sistemas culturais e parcelares complexos	50
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais	50

Tabela 14: Pontuação do uso e ocupação do solo segundo o IS (continuação).

Ocupação do Solo	Índice
Territórios agroflorestais	50
Meios aquáticos (sapais, salinas, etc.)	50
Florestas e meios seminaturais, superfícies com água	0

Fonte: Adaptado de Simas (2014).

Tabela 14: Ponderação das variáveis para o IS.

D	R	A	T	OS
0.186	0.212	0.259	0.121	0.222

Fonte: Adaptado de Simas (2014).

6.6. Cartas de Capacidade Potencial de Infiltração

As cartas de capacidade potencial de infiltração foram elaboradas com o intuito de mostrar se as modificações de ocupação do solo com o tempo influenciam na infiltração de água, e conseqüentemente, na recarga do aquífero. Elas foram elaboradas para o uso atual e para os cenários projetados para o ano de 2030.

Esses documentos foram gerados através do ordenamento das características das variáveis selecionadas, considerando a maior ou menor influência que tais características exercem sobre a capacidade potencial de infiltração de água. Para isso foram utilizados os mapas de materiais inconsolidados e de uso e ocupação do solo.

O ordenamento dos materiais inconsolidados foi feito conforme as suas características de porosidade e textura. Através do levantamento de informações de trabalhos anteriores (FAGUNDES, 2010; LEMOS, 2010; FAILACHE, 2015), os valores de porosidade foram classificados de acordo com a tabela 16.

Tabela 15: Classificação da porosidade e do índice de vazios do solo.

Porosidade	Índice de Vazios	Denominação
>50	>1	Muito Alta
50 - 45	1,0 - 0,80	Alta
45 - 35	0,80 – 0,55	Média
35 - 30	0,55 – 0,43	Baixa
<30	<0,43	Muito Baixa

Fonte: Adaptado de IAEG (1974) apud Fiori (2016).

Os valores de textura foram classificados de acordo com a porcentagem de areia presente nos materiais inconsolidados, da seguinte forma:

Acima de 80% - Alta;

Entre 50 e 80% - Média;

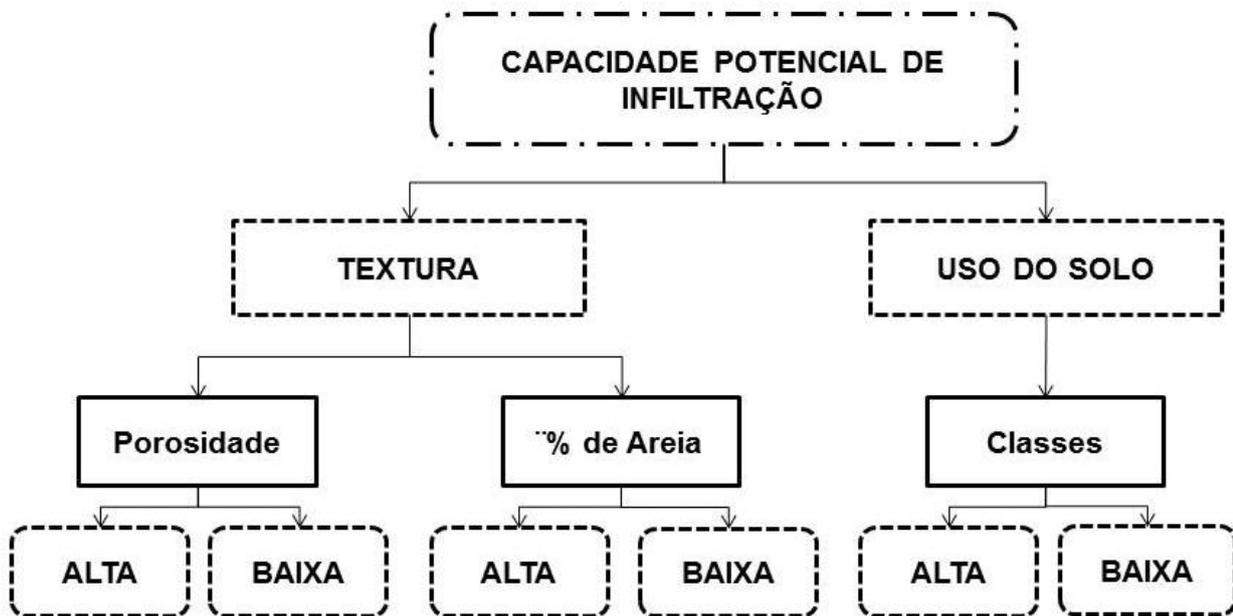
Abaixo de 50% - Baixa.

A partir da realização dessa classificação, os materiais foram divididos em cinco classes de capacidade potencial de infiltração: Muito Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta, sendo estas numeradas de 1 a 5 (1 referente à muito baixa e 5 referente à muito alta). Junto a isso, foram atribuídos pesos para cada material segundo sua capacidade de infiltração, sendo que se o material possui uma alta capacidade o peso foi 3 e se possuía uma baixa capacidade o peso foi 2. Esta sistematização foi realizada com o auxílio de especialista na área de geologia e geotecnia.

Os usos mapeados nos mapas de uso e ocupação do solo foram reclassificados de acordo com categorias que representem de uma melhor forma os impactos, tanto positivos quanto negativos, sobre a capacidade potencial de infiltração de água. Esses usos também foram ordenados com classes de 1 a 5 conforme o maior ou o menor impacto sobre a capacidade potencial de infiltração e também foram atribuídos pesos 2 ou 3 de acordo com a capacidade potencial de infiltração.

A reclassificação dos mapas foi realizada no software ArcGIS 10.2 com a ferramenta *Reclass*. Após isso foi realizada a álgebra de mapas com a ferramenta *Raster Calculator*, na qual foi feita a multiplicação dos dois mapas. Foi realizada a multiplicação pelo fato das duas variáveis serem independentes entre si. Com isso, os valores obtidos foram reclassificados em cinco classes, variando de muito baixa capacidade potencial de infiltração a muito alta capacidade potencial de infiltração. A figura 19 mostra o esquema para a elaboração das cartas.

Figura 19: Esquema proposto para a elaboração das cartas de capacidade potencial de infiltração.



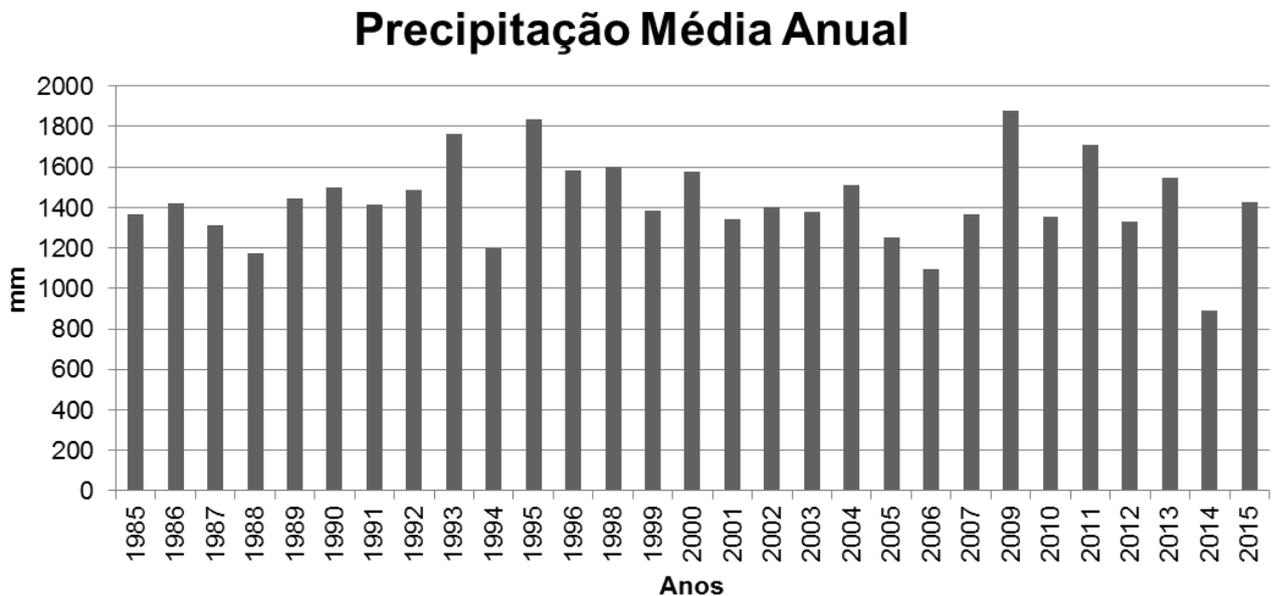
Fonte: Ruggiero, 2017.

Essa metodologia foi aplicada para as duas bacias hidrográficas, sendo obtidas um total 7 cartas de capacidade de potencial de infiltração (4 para a Bacia Hidrográfica do Chibarro e 3 para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão).

6.6.1. Cálculo do Volume Teórico de Infiltração

Para subsidiar as discussões foi seguida a metodologia proposta por Piroli (2015) para realizar o cálculo do volume teórico de infiltração de água nas áreas de estudo. Primeiramente foi obtida a precipitação média anual para o município (1433,007 mm), de acordo com os dados disponíveis no DAEE referentes ao posto de monitoramento de Santa Eudóxia (C4-019). A figura 20 mostra a precipitação média anual de 1985 a 2015 para o município de São Carlos. Esse valor foi convertido para metros cúbicos por km² e foi multiplicado pela área dos diferentes tipos de uso do solo localizados sobre o afloramento da Formação Botucatu. Após isso, o valor obtido foi multiplicado pela porcentagem de água que o uso do solo é capaz de infiltrar, conforme a tabela 17.

Figura 20: Precipitação média anual para 30 anos no município de São Carlos.



Fonte: DAEE

Tabela 16: Porcentagem de água que os diferentes tipos de uso do solo são capazes de absorver.

Tipo de Uso	Porcentagem
Pastagem	50
Cana de Açúcar	40
Vegetação Natural	80
Eucalipto	50
Mineração	20
Água	0
Café e Laranja	50
Expansão Urbana	30
Cultivos Anuais	40
Solo Exposto	40
Área Urbana	20

Fonte: Adaptado de Piroli (2015)

6.7. Etapa de Campo

Nos trabalhos de campo foi realizada a documentação fotográfica da área de estudo, considerando todos os tipos de uso do solo encontrados nas duas bacias hidrográficas. Esta etapa serviu de base para validação do mapeamento de uso e ocupação do solo realizado para o ano de 2015, bem como para o maior

detalhamento desse mapeamento e para a identificação de alguns materiais geológicos encontrados na região. A figura 21 mostra a captação de água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão identificada durante uma verificação em campo.

Figura 21: Captação de água no Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

6.8. Análise dos Resultados

As análises finais foram feitas através da combinação dos resultados gerados nas etapas intermediárias. Com as análises de mudanças foram identificados os padrões de alteração da ocupação do solo para as duas bacias, contribuindo para a elaboração da projeção de ocupação futura para as duas regiões. As cartas de vulnerabilidade e o índice de susceptibilidade foram analisados no sentido de identificar se o uso do solo é uma variável importante quando se trata de contaminação de aquífero. As cartas de potencial e os cálculos de volume teórico de infiltração resultaram em discussões a respeito dos impactos que os usos antrópicos causam sobre as áreas de recarga.

Por fim, o levantamento bibliográfico foi de extrema importância para subsidiar as discussões e validar os resultados encontrados durante a pesquisa.

7. Resultados e Discussão

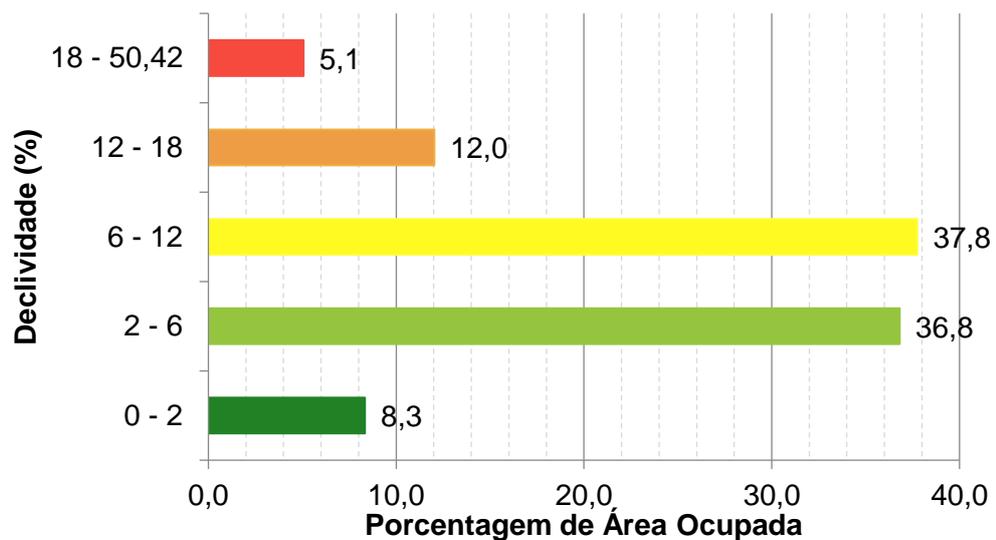
7.1. Documentos Cartográficos Fundamentais

7.1.1. Bacia Hidrográfica do Chibarro

Classes de Altitude e Declividade

Com relação às classes hipsométricas, observa-se que a altitude da área de estudo varia de 679,8 a 877,5, sendo que porção sul da bacia apresenta as maiores altitudes, e as menores cotas estão localizadas na porção oeste da área de estudo. Tratando da declividade, a classificação dos intervalos foi feita pensando nas características favoráveis à infiltração da água, buscando indicar as áreas em que o escoamento superficial terá menor atuação, e por consequência, a infiltração será maior. A figura 22 apresenta a área ocupada por cada classe de declividade na área de estudo

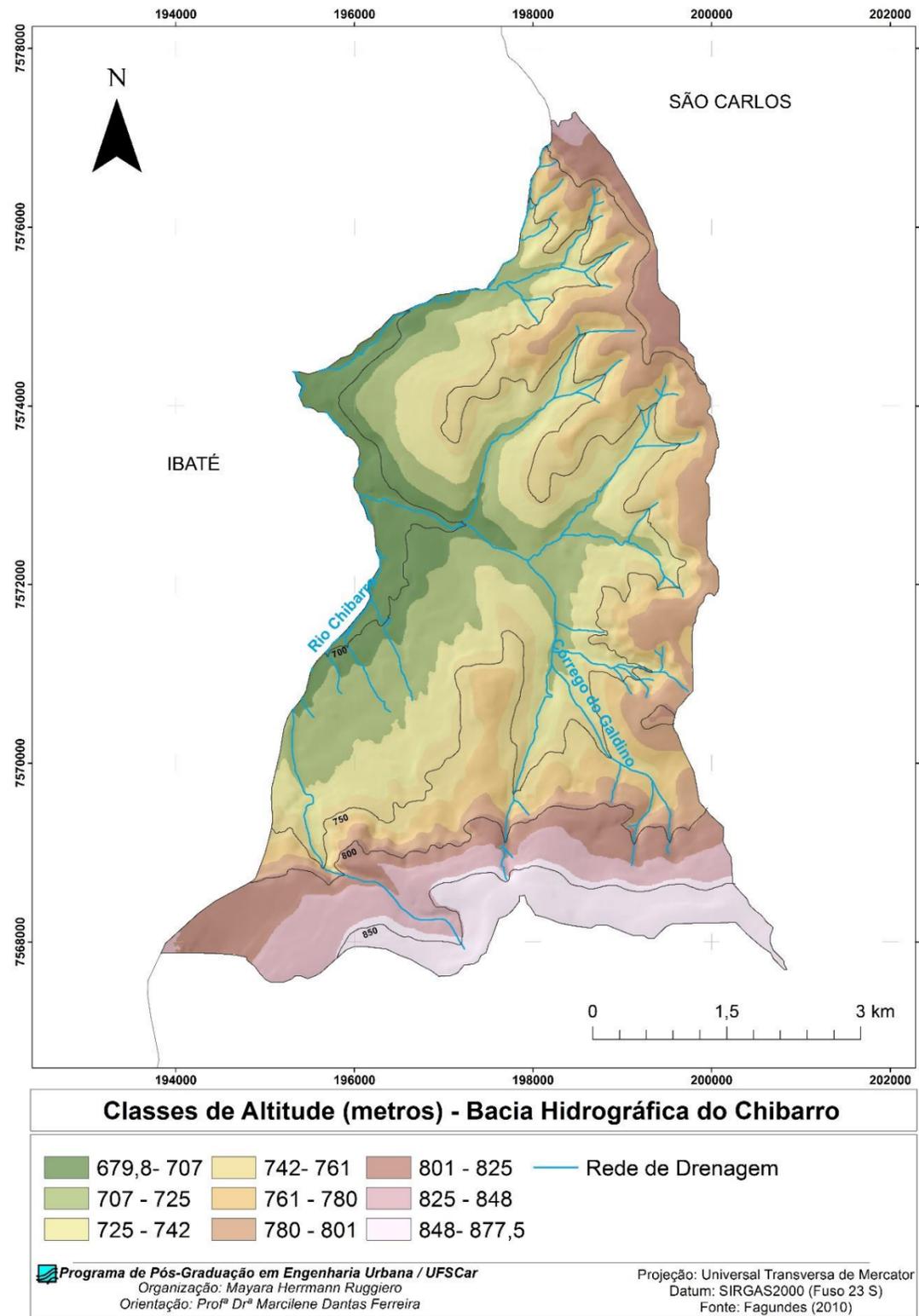
Figura 22: Porcentagem de área ocupada por cada classe de declividade



Fonte: Ruggiero, 2017.

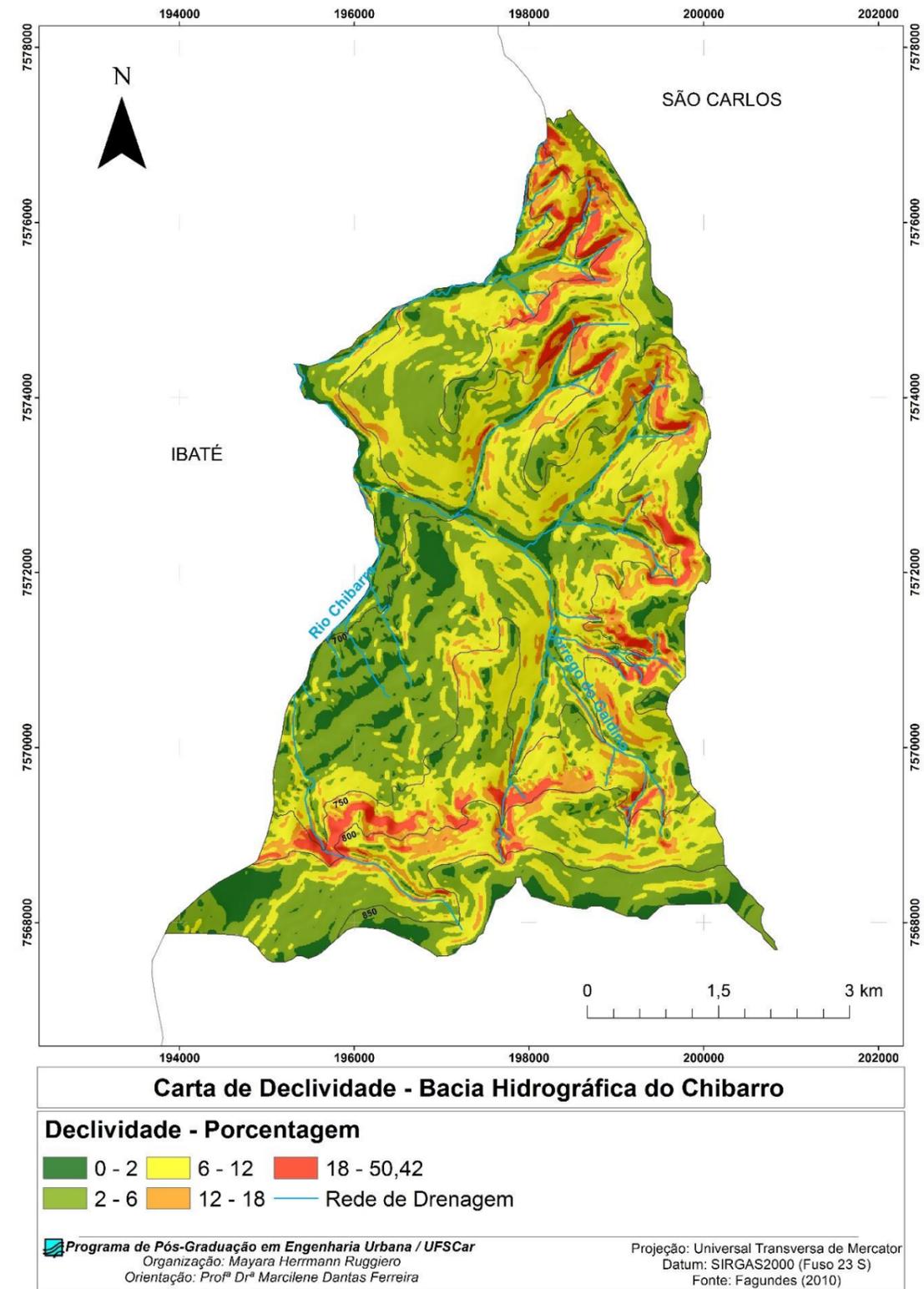
Observa-se predominância da classe 6 a 12% (ocupando 37,8% da área da bacia). As classes de 2 a 6% ocupam 36,8% da bacia e apresentam uma maior contribuição para a infiltração de água, juntamente com a classe 0 a 2%. As classes com declividades maiores estão localizadas em regiões com nascentes de rios e também a sudoeste da bacia, porém, em menor área quando comparadas com as outras classes. As figuras 23 e 24 mostram os mapas de classes de altitude e declividade da área de estudo

Figura 23: Mapa de classes de altitude da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 24: Carta de Declividade da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Mapa de Substrato Rochoso

O mapa de substrato rochoso (Figura 25) foi elaborado com base nas informações e no mapeamento realizado por Fagundes (2010). As formações predominantes da área de estudo são a Formação Botucatu e a Formação Itaqueri. A Formação Botucatu ocupa a porção central, oeste e noroeste da bacia, enquanto a Formação Itaqueri ocupa a porção norte, nordeste, sudeste, sul e sudoeste. Em questão de porcentagem de área, a Formação Botucatu ocupa 50,22% da área da bacia (aproximadamente 17,30 km²), enquanto a Formação Itaqueri ocupa 49,77% (aproximadamente 17,14 km²).

Destaca-se que a Formação Botucatu ocupa as áreas da bacia com menor declividade, o que contribui com a infiltração de água. A Formação Itaqueri também ocupa alguns locais com baixa declividade, porém nas regiões com declividades mais elevadas predomina essa formação.

Mapa de Materiais Inconsolidados

O mapeamento dos Materiais Inconsolidados é de extrema importância quando se trata de planejamento em uma determinada região. Ele expressa quais materiais geológicos estão recobrando o substrato rochoso (FAILACHE, 2015). Os materiais foram classificados conforme a sua gênese, sendo divididos entre retrabalhados e residuais e foram acrescentados dados de permeabilidade, a partir de resultados de ensaios realizados por Fagundes (2010).

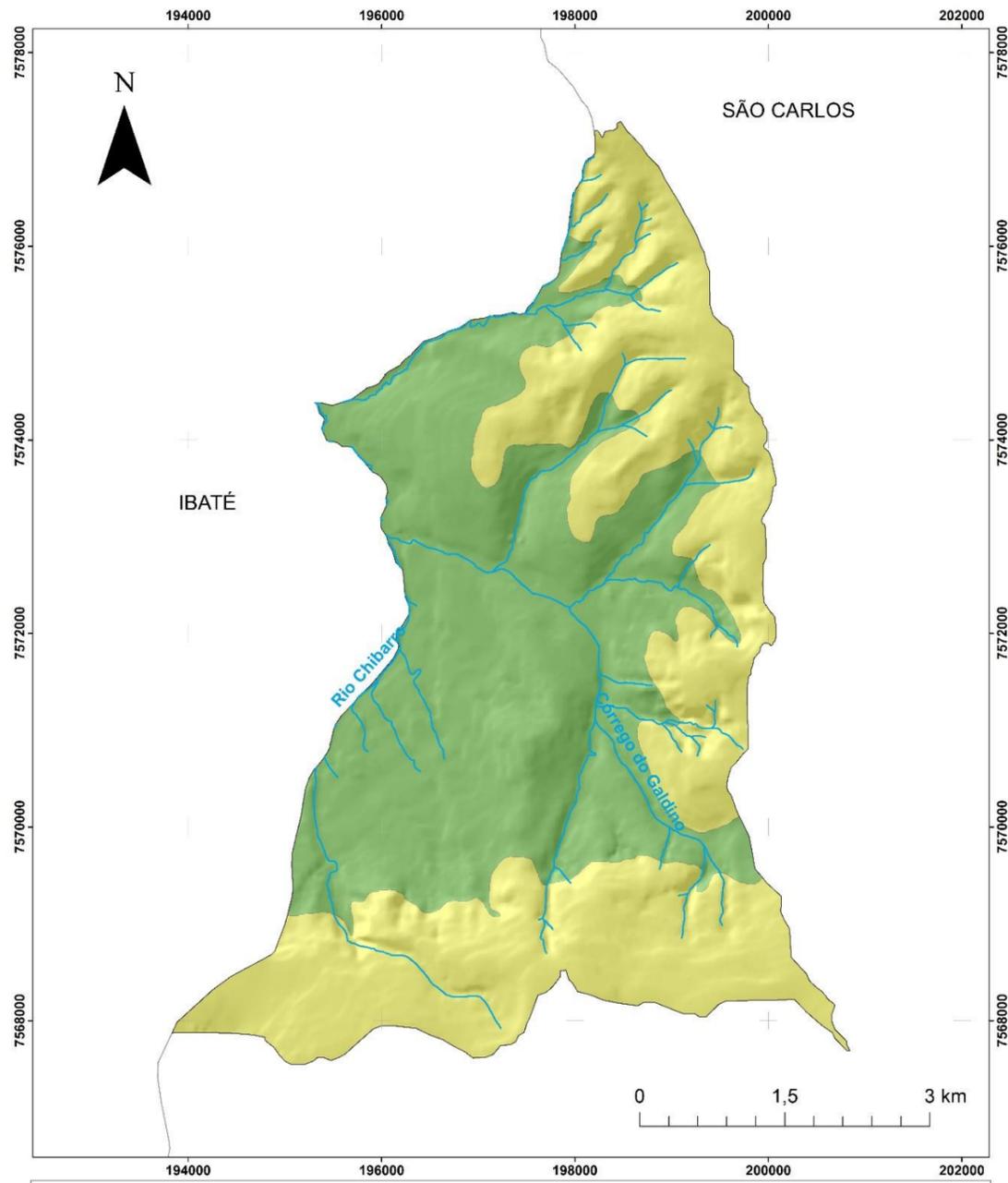
O mapa de Materiais Inconsolidados (Figura 26) também foi elaborado com base no mapeamento realizado por Fagundes (2010). A área apresenta um total de 8 unidades de materiais, sendo que a unidade Residual Botucatu Arenoso ocupa a maior parte da área, conforme apresentado na tabela 17 (45,6% da área, aproximadamente 15,70 km²).

Tabela 17: Área ocupada pelos materiais inconsolidados.

Material Inconsolidado	Área (km²)	%
Retrabalhado Arenoso	4,67	13,61
Retrabalhado Aluvião	0,66	1,92
Residual Botucatu Arenoso	15,69	45,70
Residual Botucatu Arenoso Raso	0,93	2,71
Residual Itaqueri Arenoso com Finos	3,74	10,88
Residual Itaqueri Arenoso com Finos Rasos	1,86	5,42
Residual Itaqueri com Finos	2,80	8,17
Residual Itaqueri com Finos Rasos	3,98	11,59

Fonte: Ruggiero, 2017

Figura 25: Mapa de substrato rochoso Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Mapa de Substrato Rochoso - Bacia Hidrográfica do Chibarro

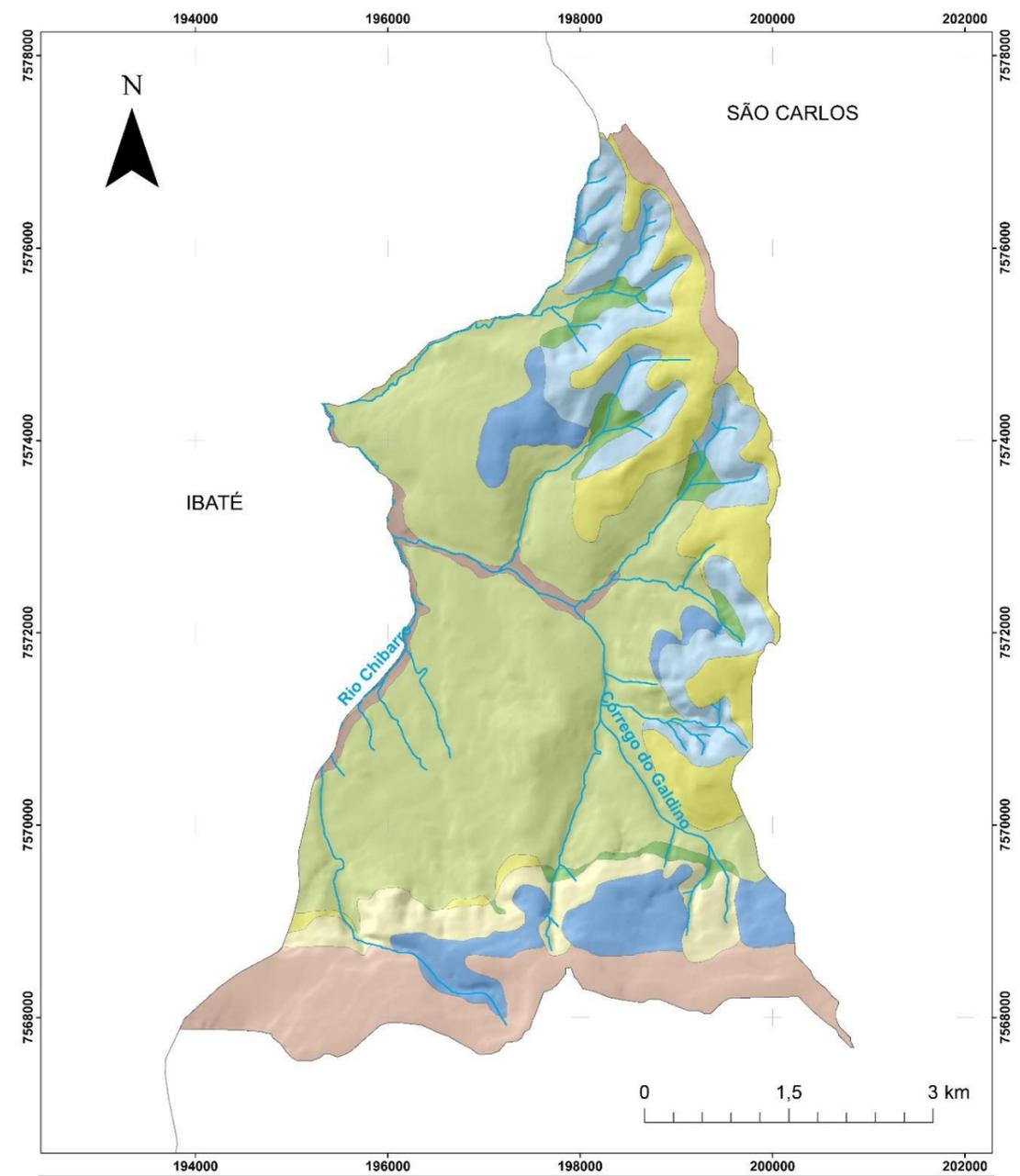
Rede de Drenagem
Formação Itaqueri
Formação Botucatu

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana / UFSCar
 Organização: Mayara Herrmann Ruggiero
 Orientação: Profª Drª Marcilene Dantas Ferreira

Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Datum: SIRGAS2000 (Fuso 23 S)
 Fonte: Fagundes (2010)

Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 26: Mapa de materiais inconsolidados Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Mapa de Materiais Inconsolidados - Bacia Hidrográfica do Chibarro

Rede de Drenagem	Resid. Itaqueri Arenoso com Finos	Resid. Itaqueri com Finos
Aluvião	Resid. Itaqueri Arenoso com Finos Raso	Resid. Botucatu Arenoso
Retrab. Arenoso	Resid. Itaqueri com Finos	Resid. Botucatu Arenoso Raso

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana / UFSCar
 Organização: Mayara Herrmann Ruggiero
 Orientação: Profª Drª Marcilene Dantas Ferreira

Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Datum: SIRGAS2000 (Fuso 23 S)
 Fonte: Fagundes (2010)

Fonte: Ruggiero, 2017.

Mapa de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado através da imagem de satélite do Google Earth Pro, do ano de 2015. Grande parte da bacia é ocupada por usos agrícolas, sendo a Cana de Açúcar o uso com maior presença (38,65% da área, aproximadamente 13,31 km²). A Vegetação Natural ocupa aproximadamente 9,02 km² (26,19%). A infraestrutura também aparece com grande expressão, ocupando 17,68% da área (aproximadamente 6,09 km²). A figura 27 mostra a porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo. Observa-se a ausência de vegetação na APP em diversos locais. Essa vegetação, além de realizar o serviço de proteção dos recursos hídricos superficiais, também contribui com a infiltração da água. O mapa de uso e ocupação do solo está representado na figura 28.

Observa-se também a presença de condomínios de chácaras, os quais ocupam uma região com a presença de materiais inconsolidados da Formação Botucatu. Neste ponto, destaca-se a influência negativa que este tipo de ocupação pode exercer sobre o aquífero. A inadequada eliminação de esgotamento sanitário, por exemplo, pode influenciar no aumento do potencial de contaminação das águas subterrâneas. O tamanho do lote influencia diretamente na quantidade de área edificada que um condomínio pode ter, impactando no processo de recarga do aquífero.

Figura 27: Porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo.

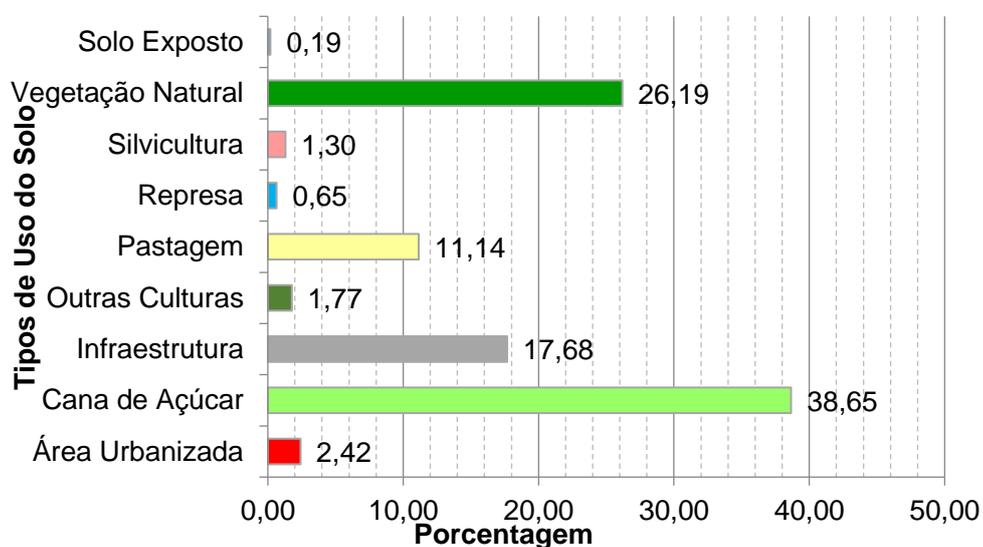
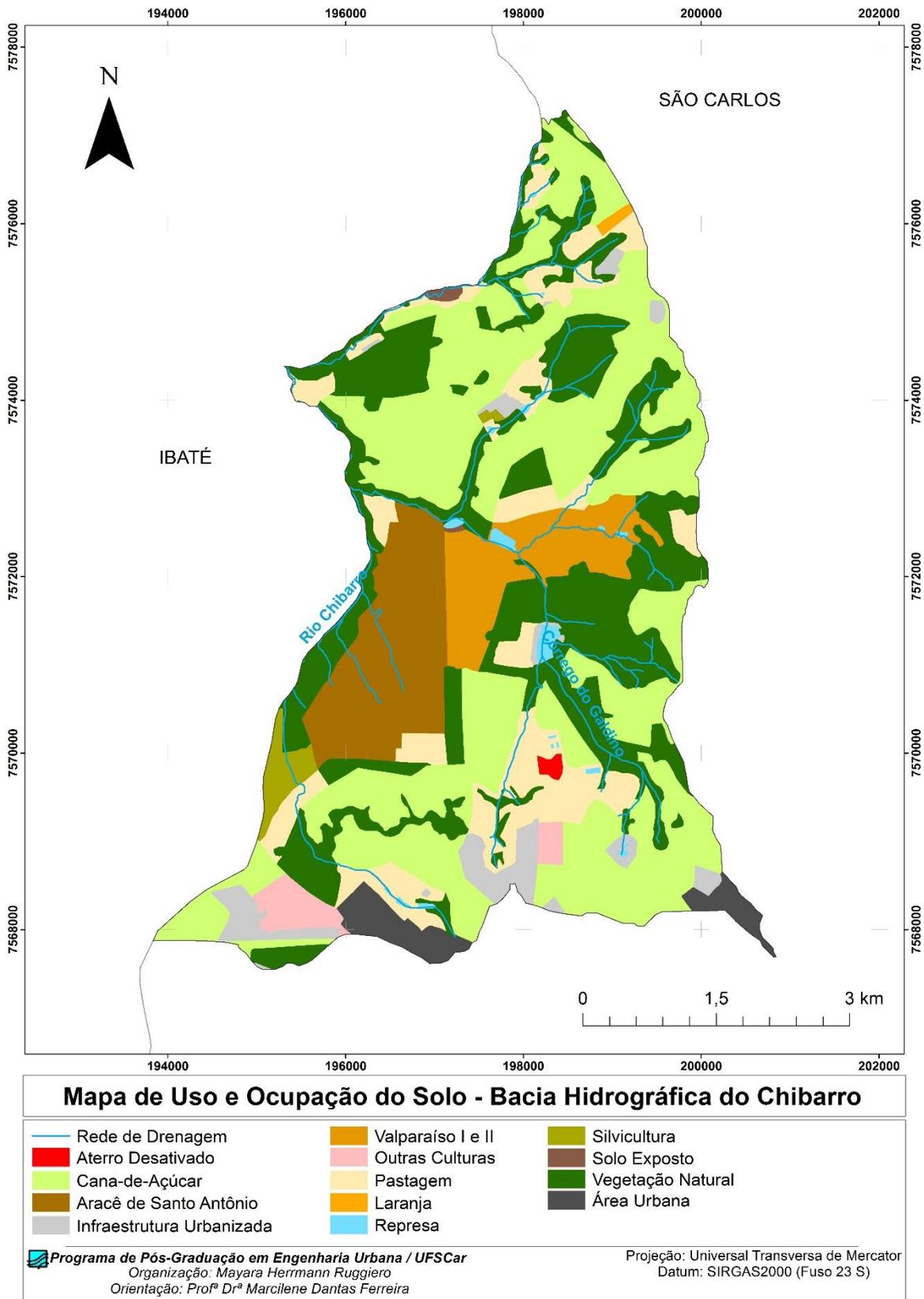


Figura 28: Mapa de uso e ocupação do solo Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

7.1.2. Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

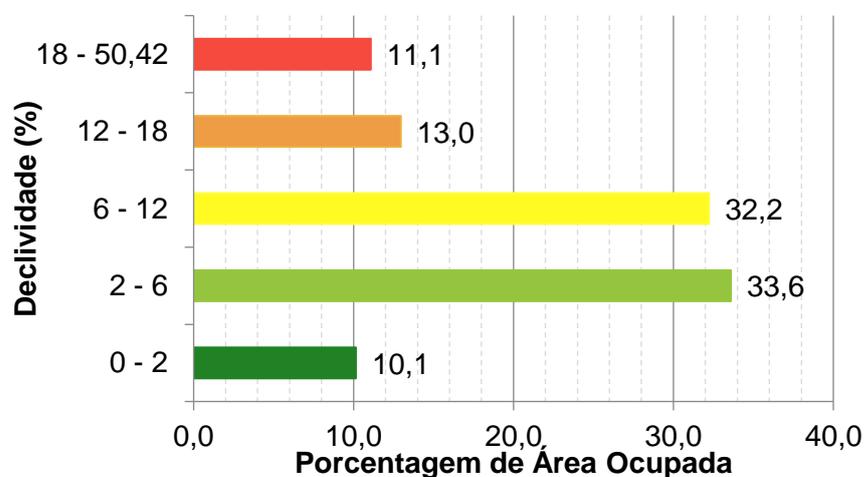
Carta de Declividade

Na área de estudo, as cotas variam de 650 a 1010 metros, sendo que a cota mais alta está localizada na porção leste da bacia, enquanto a cota mais baixa na porção Sudoeste. Com relação às classes de altitude, estas variam de 646,49 a 1012. Observa-se que a região sudeste apresenta os valores mais elevados e a porção sudoeste as altitudes mais baixas.

Na porção central da bacia encontram-se as áreas com menores declividades (de 0 a 6%). Estas classes ocupam 43,72% da área da bacia. Nesta região está localizada a área de afloramento da Formação Botucatu, com materiais inconsolidados que favorecem a infiltração de água. Assim, as declividades mais baixas associadas a esses materiais geológicos estimulam o processo de infiltração de água. As regiões com maiores declividades estão localizadas na porção nordeste da bacia, principalmente sobre os materiais associados à Formação Itaqueri.

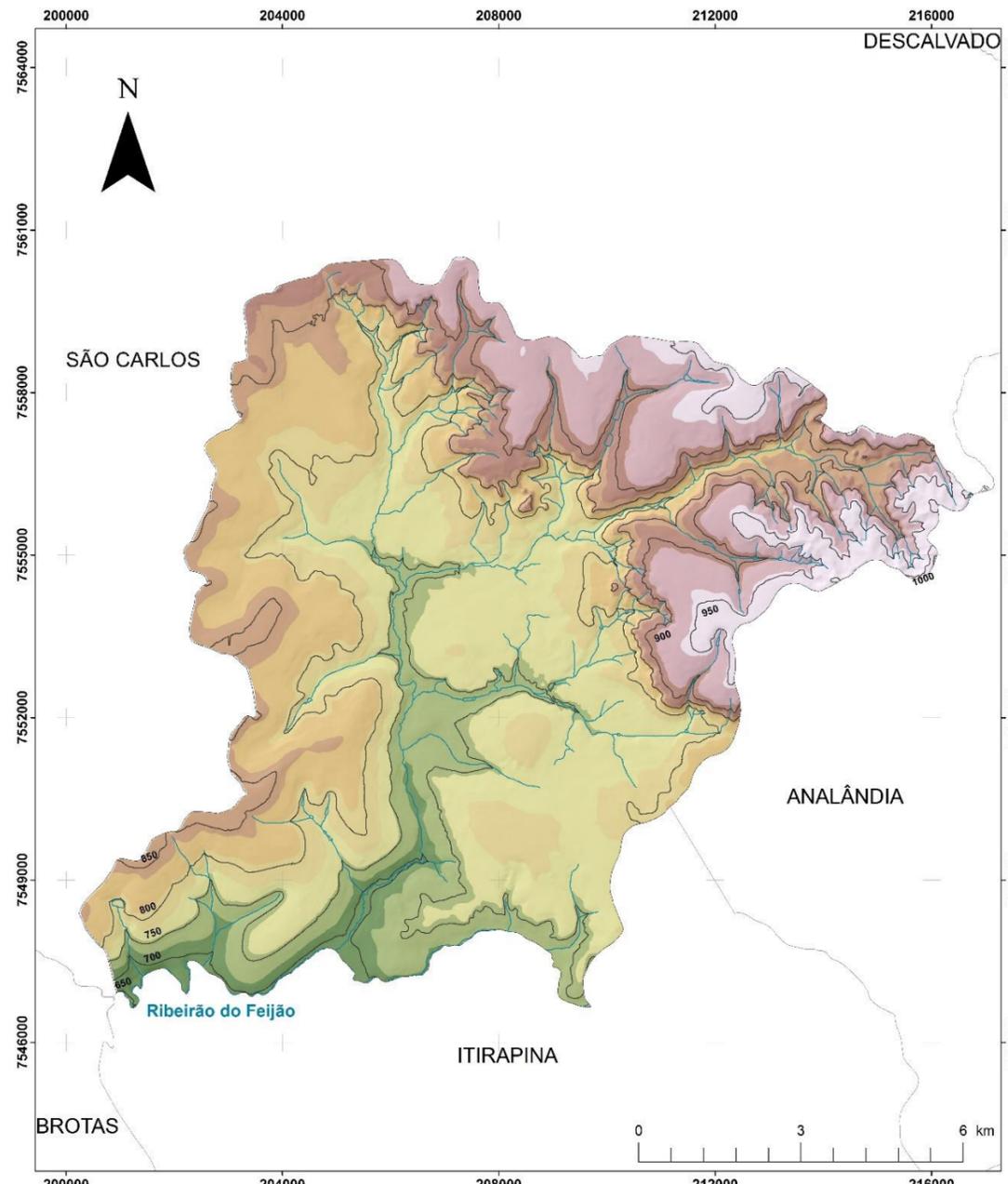
As regiões ocupadas pelo material silicificado da formação Botucatu apresentam declividades elevadas, maiores do que 18% (ocupando 11% da área da bacia), contribuindo para o escoamento superficial. A figura 29 apresenta a área ocupada por cada classe de declividade na área de estudo. A figura 30 apresenta o mapa de classes de altitude da bacia, e a figura 31 mostra as classes de declividade obtidas.

Figura 29: Porcentagem de área ocupada por cada classe de declividade.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 30: Mapa de classes hipsométricas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



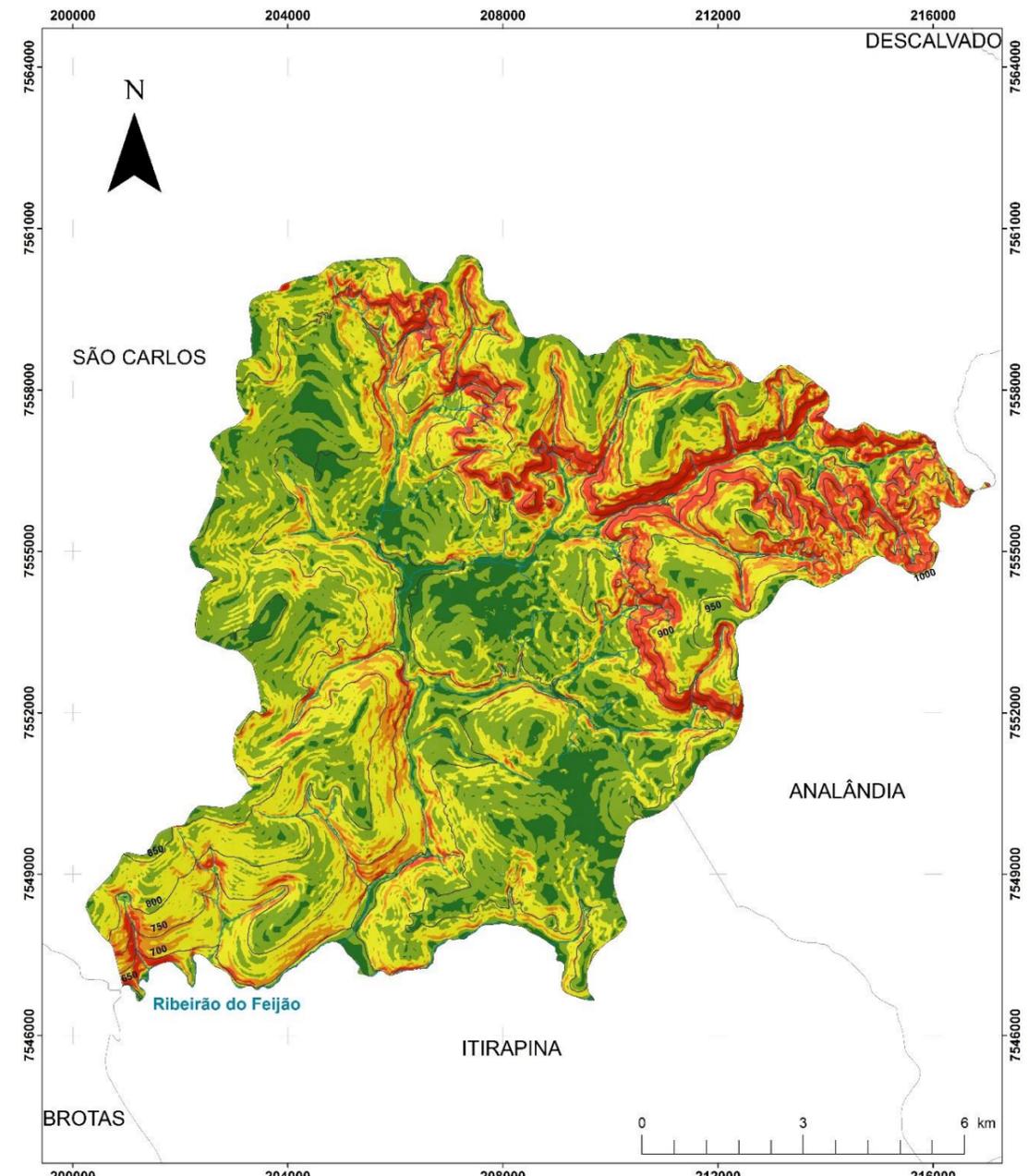
Classes de Altitude (metros) - Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

646,49 - 723	781 - 808	871 - 910	— Rede de Drenagem
723 - 755	808 - 837	910 - 943	
755 - 781	837 - 871	943 - 1.012	

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana / UFSCar
 Elaboração: Mayara Herrmann Ruggiero
 Orientação: Prof^o Dr^a Marcilene Dantas Ferreira
 Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Datum: SIRGAS2000 (Fuso 23 S)

Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 31: Carta de declividade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Carta de Declividade - Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

— Rede de Drenagem	2 - 6	12 - 18
0 - 2	6 - 12	18 - 52,59

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana / UFSCar
 Elaboração: Mayara Herrmann Ruggiero
 Orientação: Prof^o Dr^a Marcilene Dantas Ferreira
 Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Datum: SIRGAS2000 (Fuso 23 S)

Fonte: Ruggiero, 2017.

Mapa de Substrato Rochoso

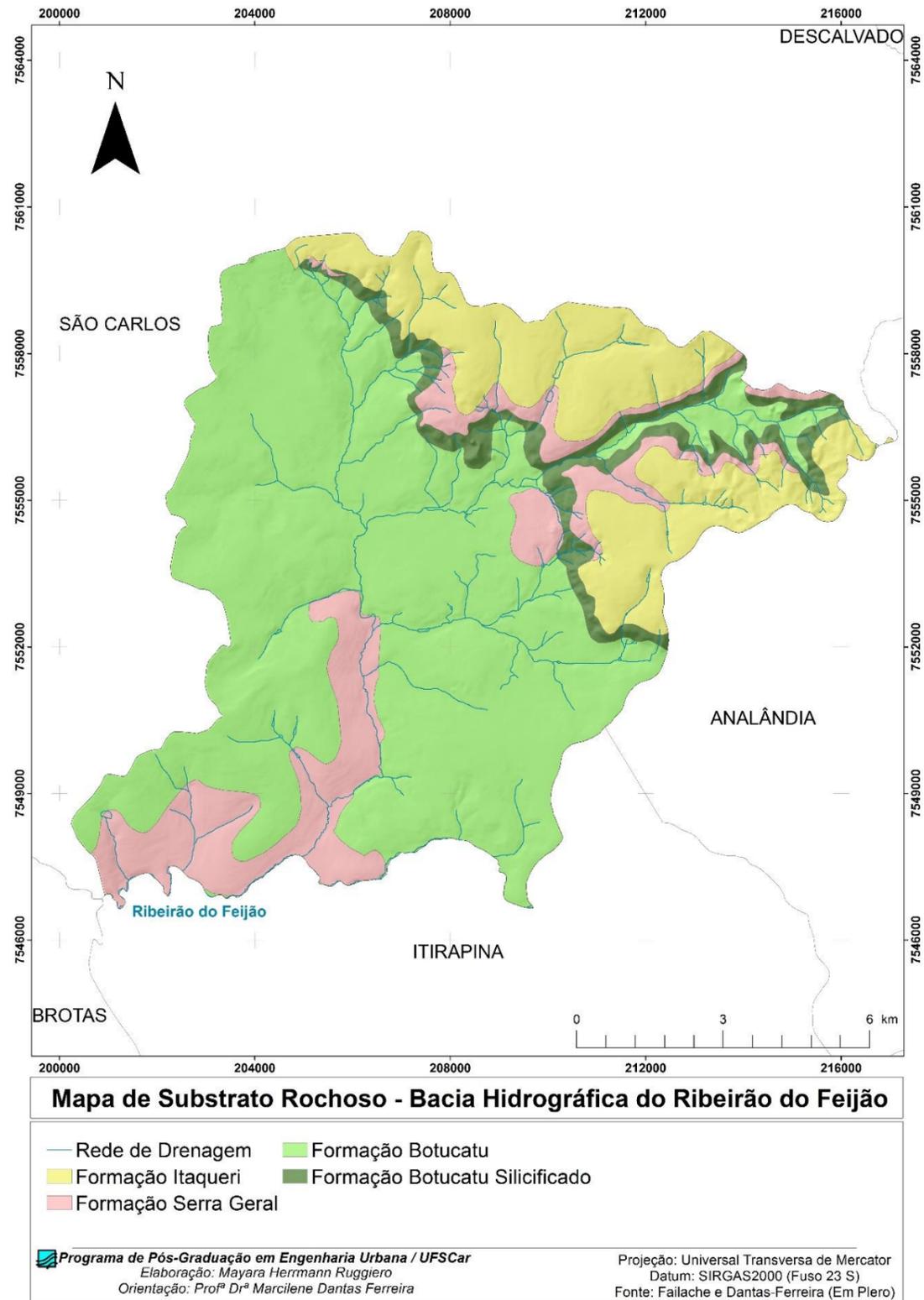
O mapa de substrato rochoso (Figura 30) foi elaborado de acordo com as informações disponibilizadas em Failache e Dantas-Ferreira (no plero). A bacia apresenta três formações: Formação Botucatu, Formação Itaqueri e Formação Serra Geral. A Formação Botucatu ocupa a porção central, nordeste, noroeste, sudeste e sul da bacia. Apresenta uma área de 69,09 km² (54,66% da área total da bacia), ocupando a maior região da bacia. Existe uma faixa dessa formação que se encontra silicificada, diminuindo a permeabilidade do solo e dificultando a recarga das reservas subterrâneas. A Formação Serra Geral ocupa a porção sudoeste e uma pequena região na porção central. Apresenta uma área total de 31,67 km² (25,05 % da área total da bacia).. A Formação Itaqueri ocupa as regiões norte, leste e uma parte da porção sudeste. Apresenta uma área de 25,65 km² (20,29% da área total da bacia).

Mapa de Materiais Inconsolidados

O mapa de Materiais Inconsolidados foi elaborado de acordo com as informações disponíveis em Failache e Dantas-Ferreira (no plero). Foram identificadas nove unidades na área de estudo (Figura 31). A unidade que ocupa a maior área da bacia é o Residual da Formação Botucatu, com 41,94 km² (33,18 % da área da bacia). A tabela x mostra a área ocupada por cada material inconsolidado na região de estudo. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, por ser um manancial de abastecimento da população deve apresentar diretrizes mais restritivas quando se trata da ocupação do solo. Nesse sentido, considerar as características desses materiais durante o planejamento, pode contribuir para a conservação dos recursos subterrâneos e superficiais.

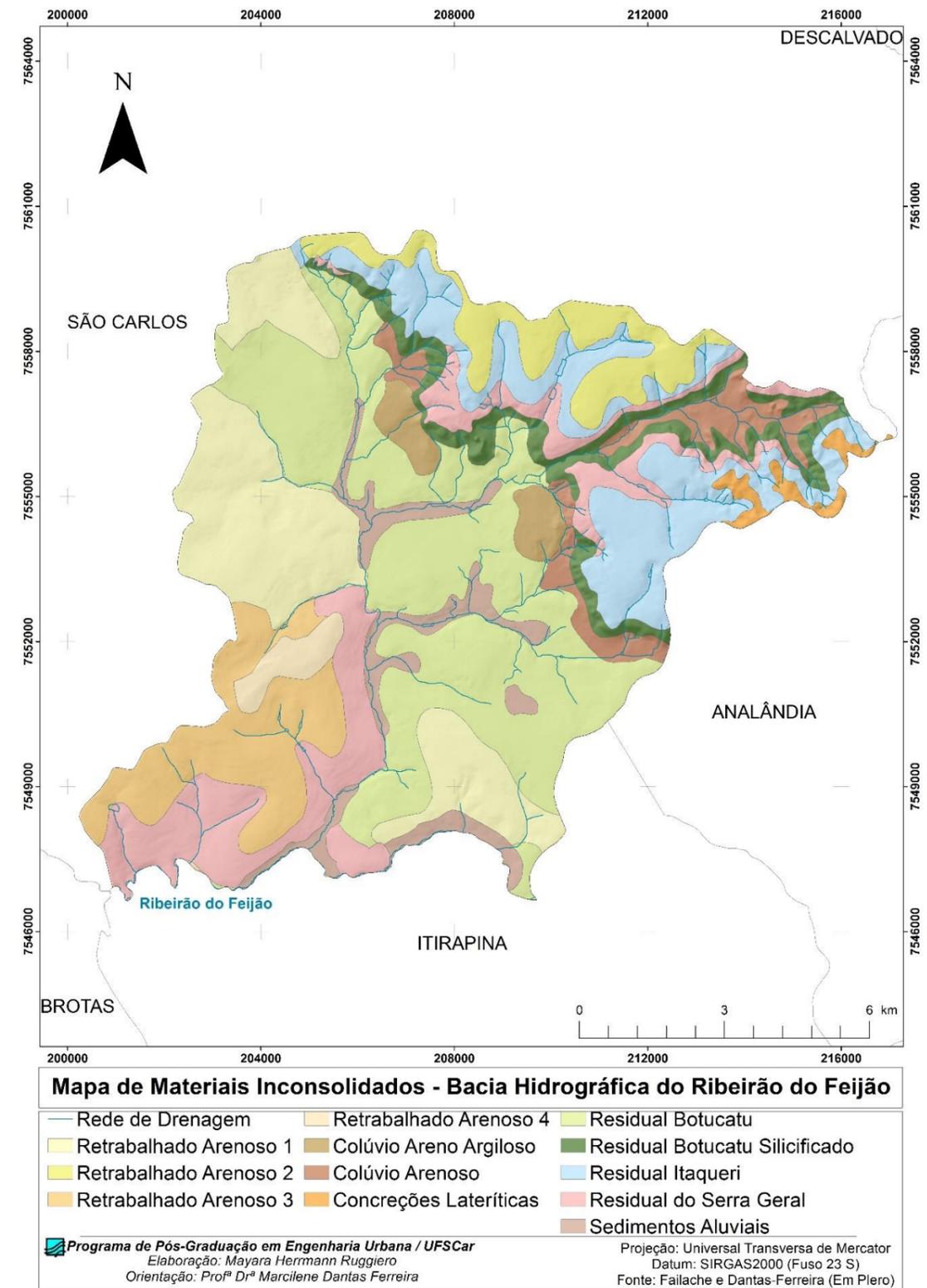
Material Inconsolidado	Área (km²)	%
Arenoso 1	19,36	15,32
Arenoso 2	7,19	5,68
Arenoso 3	10,83	8,57
Arenoso 4	1,85	1,47
Colúvio Areno Argiloso	2,78	2,20
Colúvio Arenoso	5,38	4,26
Concreções Lateríticas	1,38	1,09
Residual Formação Botucatu	33,79	26,73
Residual Formação Botucatu Silicificado	7,01	5,54
Residual Itaqueri	15,04	11,90
Residual do Serra Geral	15,31	12,11
Sedimentos Aluviais	6,48	5,13

Figura 33: Mapa de substrato rochoso da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 32: Mapa de materiais inconsolidados da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



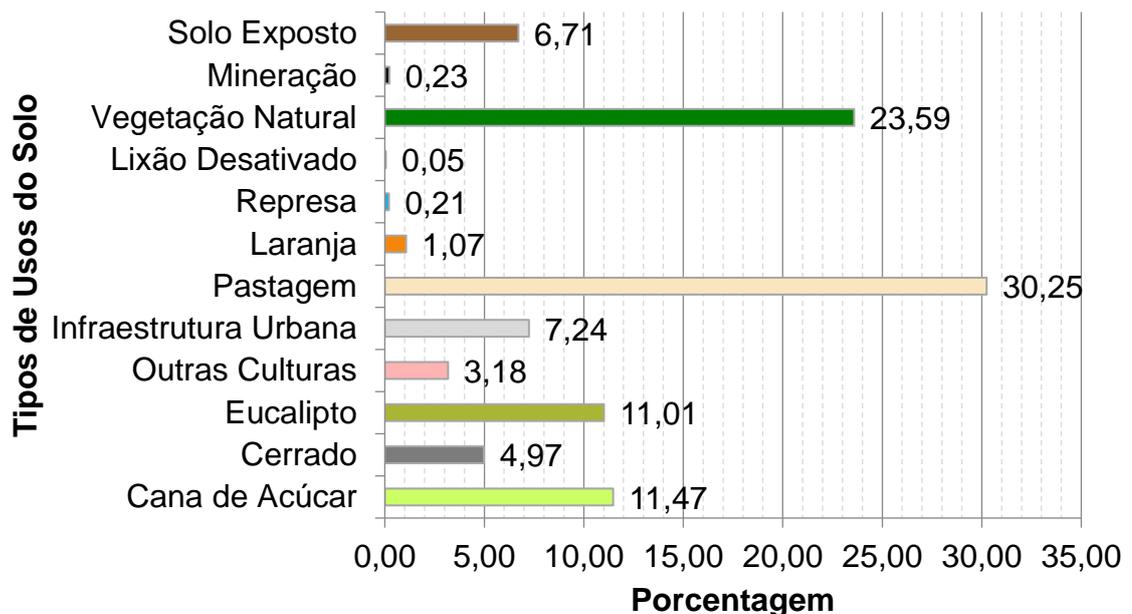
Fonte: Ruggiero, 2017.

Mapa de Uso e Ocupação do Solo

O mapa de Uso e Ocupação do Solo foi elaborado através da imagem de satélite do ano de 2015 proveniente do Google Earth Pro. É possível observar um predomínio da pastagem (30,25% da área da bacia) e muitas áreas de preservação permanente sem a vegetação. A existência de uma grande região de pasto pode dificultar a infiltração de água, devido à compactação do solo.

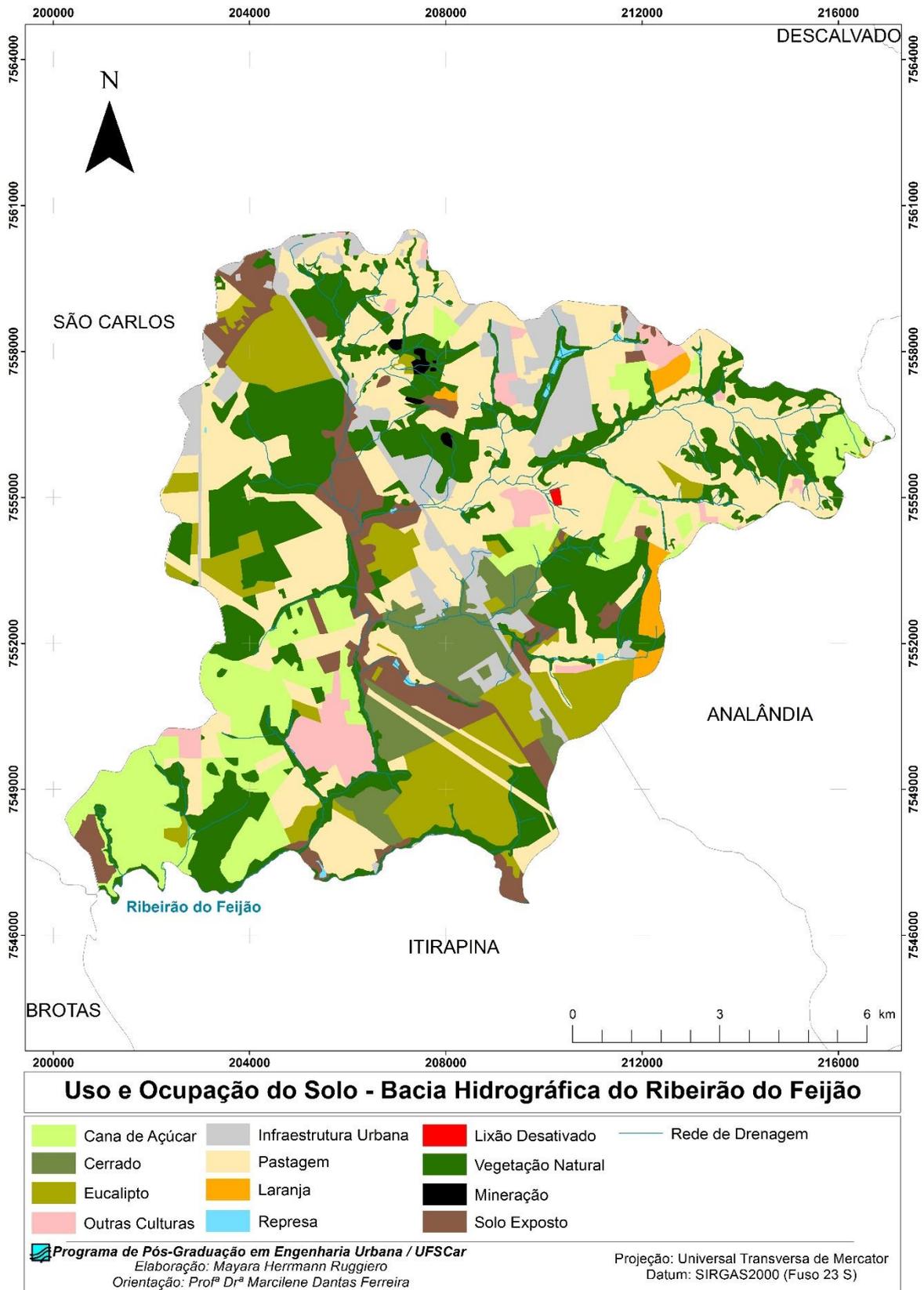
Outra característica importante é o desenvolvimento de infraestrutura ao longo das principais rodovias, podendo esta ser caracterizada como um eixo de expansão. Além disso, destaca-se a presença de importantes fragmentos de cerrado (4,97% da área da bacia) e de grandes áreas com plantações de Eucaliptos (11,01% da área da bacia). Destaca-se também a existência de minerações na área de estudo localizadas sobre a Formação Botucatu. A presença de minerações pode comprometer a qualidade das reservas subterrâneas, além de dificultar a infiltração de água. A vegetação ocupa 23,59% da área da bacia, sendo composta de alguns fragmentos e algumas áreas de preservação permanente com a presença de mata ciliar. A figura 34 apresenta a porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo encontrado na bacia, e a figura 35 o mapa de uso e ocupação do solo.

Figura 34: Porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso e ocupação do solo.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 35: Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

7.2. Uso e Ocupação do Solo

O mapeamento do uso e ocupação do solo para os três anos analisados mostrou situações distintas para as duas áreas de estudo. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro foi observado um aumento na área ocupada por vegetação natural, infraestrutura² e cana de açúcar.

Além disso, observa-se também, uma considerável diminuição na porcentagem de área ocupada por solo exposto. A tabela 18 mostra as áreas ocupadas pelos tipos de uso do solo em cada ano analisado e a figura 36 representa de forma gráfica as porcentagens dessas áreas.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão observa-se o aumento da área ocupada por culturas de cana de açúcar, infraestrutura e mineração. Tratando especificamente da área ocupada por vegetação natural, percebe-se que em 2015 houve uma perda de aproximadamente 16% da área deste uso, em relação à mapeada em 1985. A tabela 19 mostra as áreas ocupadas pelos diferentes usos do solo na bacia, com suas respectivas porcentagens, as quais estão representadas na figura 37.

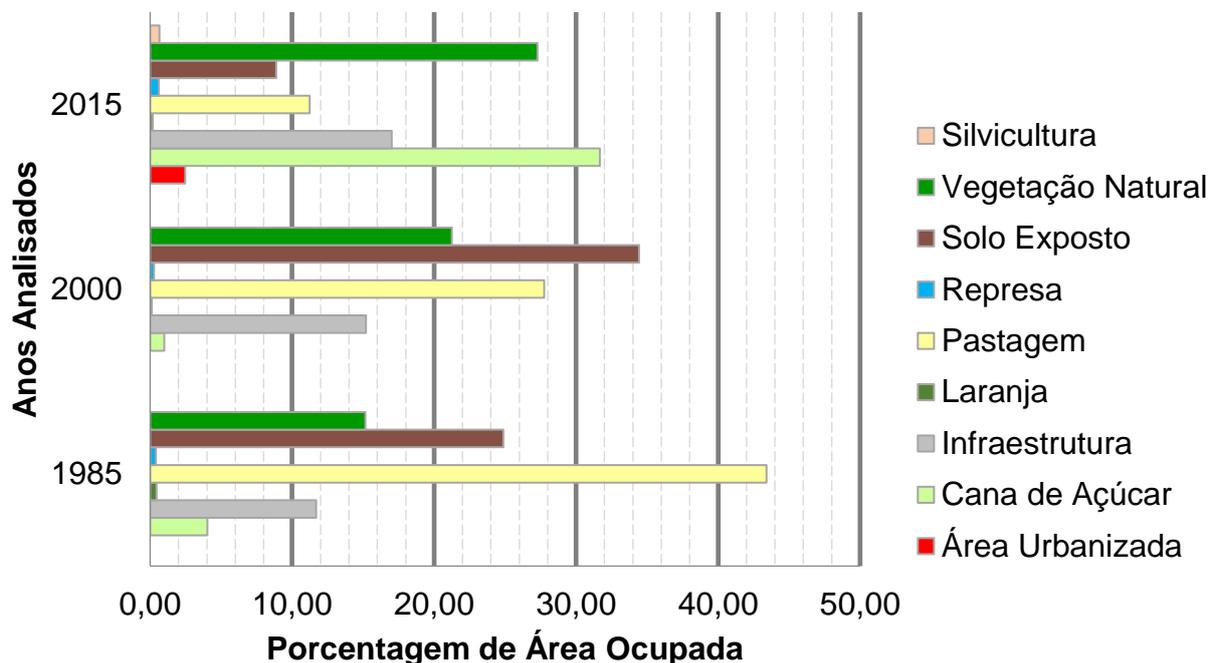
Tabela 18: Áreas e porcentagens de área ocupadas pelos diferentes tipos de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Chibarro.

Uso do Solo	Área Ocupada por Cada Tipo de Uso do Solo					
	1985		2000		2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Área Urbanizada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	2,46
Cana de Açúcar	1,38	4,03	0,34	0,98	10,88	31,67
Infraestrutura	4,01	11,68	5,22	15,20	5,84	17,02
Laranja	0,16	0,46	0,04	0,12	0,06	0,18
Pastagem	14,90	43,40	9,53	27,75	3,86	11,25
Represa	0,14	0,41	0,09	0,26	0,21	0,61
Solo Exposto	8,54	24,88	11,83	34,44	3,05	8,89
Vegetação Natural	5,20	15,15	7,29	21,24	9,37	27,28
Silvicultura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,65
Total	34,34	100,0	34,34	100,0	34,34	100,0

Fonte: Ruggiero, 2017.

² A classe infraestrutura agrupa as áreas já urbanizadas e as áreas ocupadas por condomínios de chácaras.

Figura 36: Comparação gráfica entre as porcentagens de área dos usos do solo para os três anos analisados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.



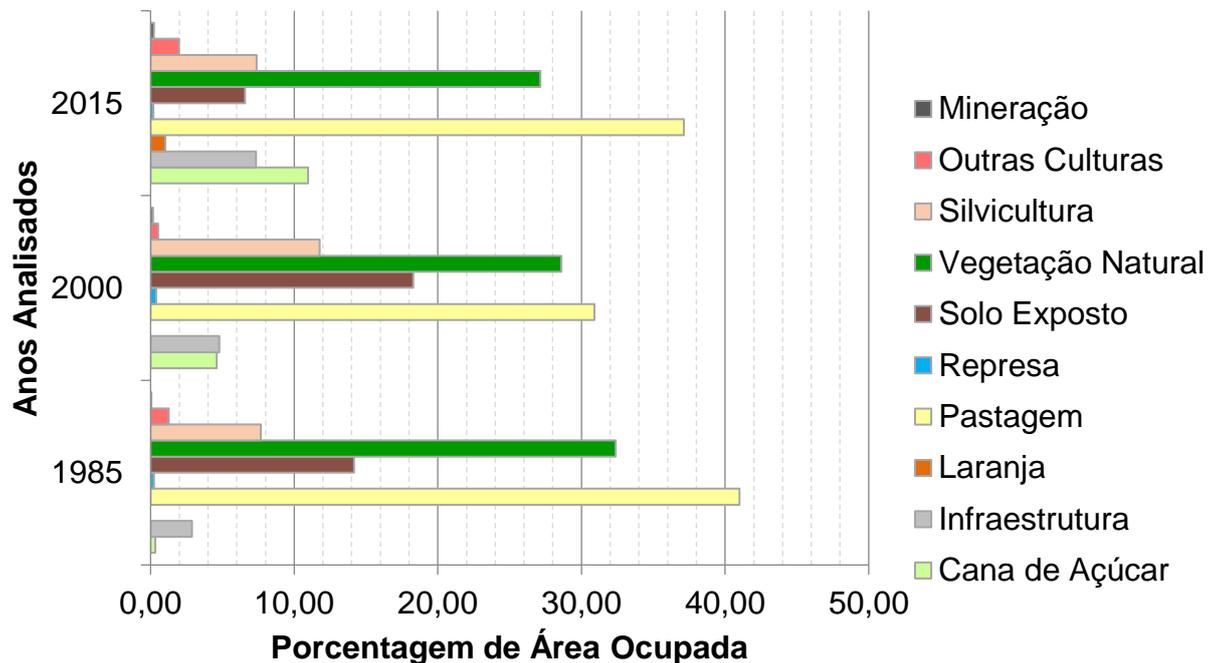
Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 19: Áreas e porcentagens de área ocupadas pelos diferentes tipos de uso do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.

Uso do Solo	Área Ocupada por Cada Tipo de Uso do Solo					
	1985		2000		2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Cana de Açúcar	0,40	0,32	5,81	4,59	13,87	10,97
Infraestrutura	3,65	2,89	6,04	4,78	9,28	7,34
Laranja	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,03
Pastagem	51,83	41,00	39,05	30,90	46,95	37,14
Represa	0,31	0,24	0,49	0,39	0,25	0,20
Solo Exposto	17,91	14,17	23,11	18,28	8,32	6,58
Vegetação Natural	40,93	32,38	36,15	28,60	34,31	27,14
Silvicultura	9,69	7,66	14,87	11,77	9,34	7,39
Outras Culturas	1,61	1,27	0,66	0,52	2,50	1,98
Mineração	0,09	0,07	0,22	0,17	0,29	0,23
Total	126,41	100,0	126,41	100,0	126,41	100,0

Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 37: Comparação gráfica entre as porcentagens de área dos usos do solo para os três anos analisados na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.

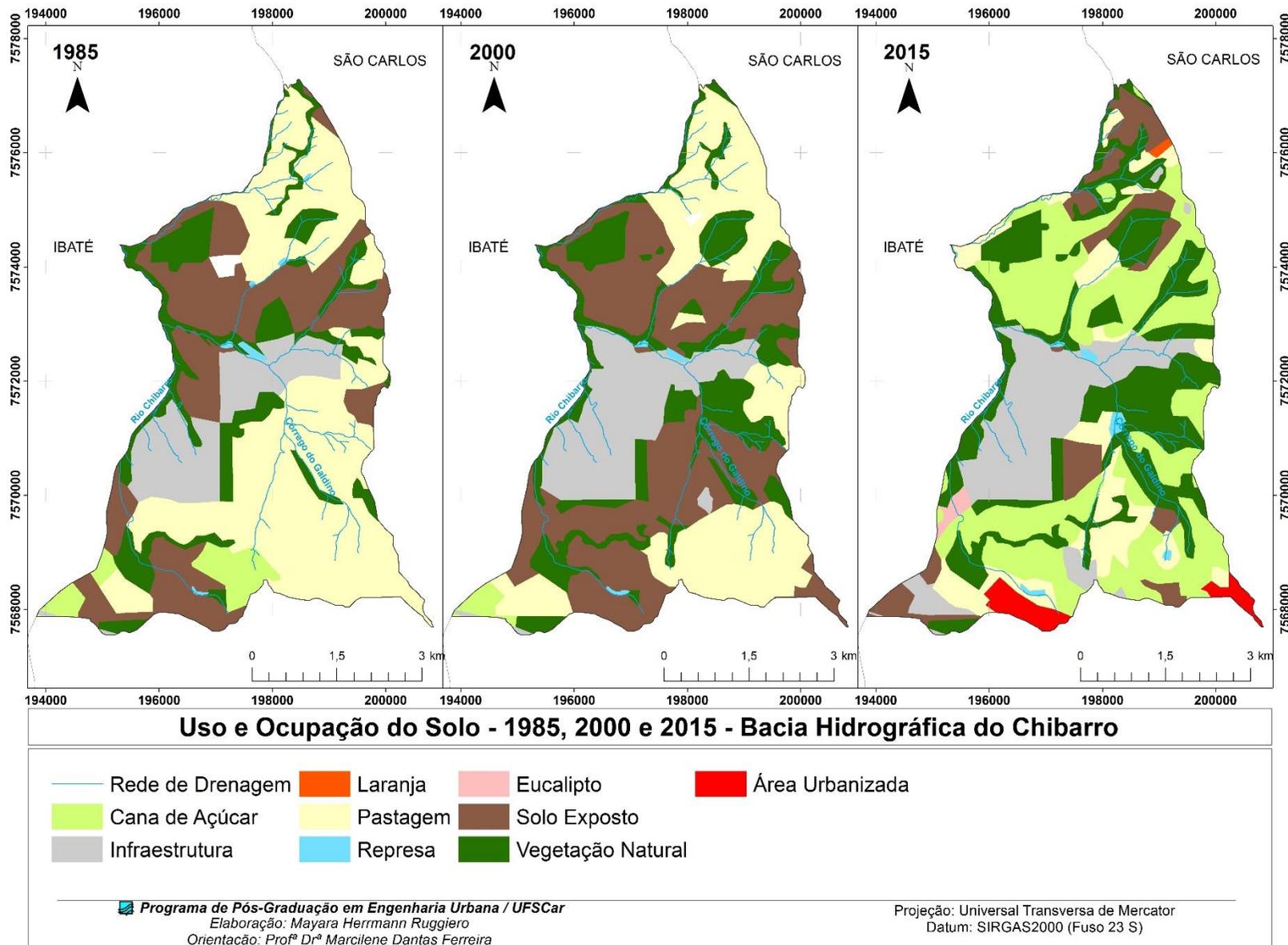


Fonte: Ruggiero, 2017.

Através dos mapas da Bacia Hidrográfica do Chibarro (Figura 38), é possível notar um aumento no número de fragmentos de vegetação, o que influencia de forma positiva na conectividade da paisagem. Além disso, o aumento da vegetação impacta positivamente a infiltração de água e a recarga do aquífero, aumentando a permeabilidade do solo. Sendo assim, a manutenção desse padrão ao longo dos anos é essencial para a conservação das reservas subterrâneas, sendo a atuação do poder público, na forma de diretrizes e incentivos para a conservação, de extrema importância.

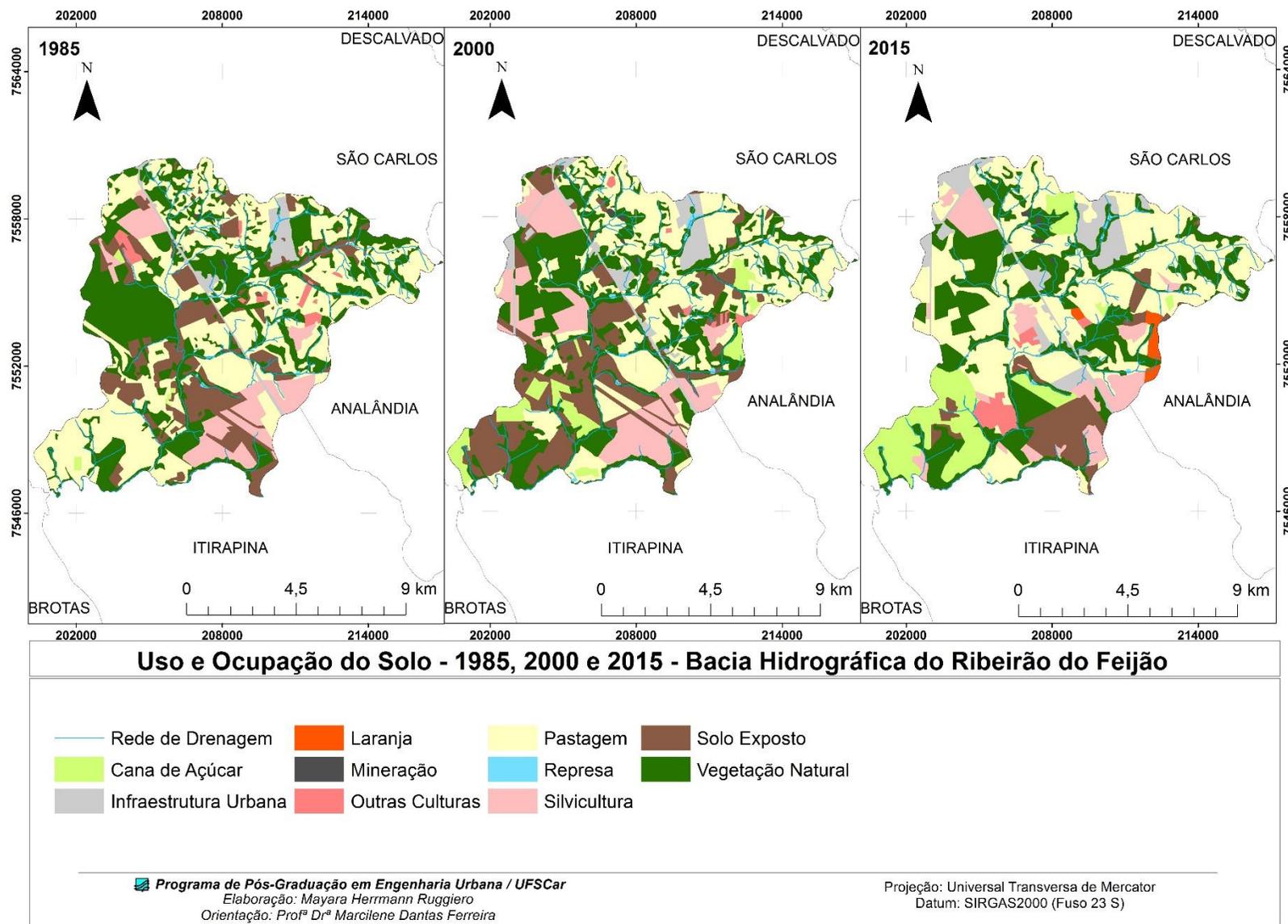
A figura 39 mostra o mapeamento do uso e ocupação do solo realizado na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão é possível notar a perda de alguns fragmentos de vegetação natural, bem como o aumento da área ocupada por pastagens. Considerando que esta bacia é um manancial de captação de água para abastecimento, considerada uma área de proteção e recuperação dos mananciais do município de São Carlos, estipulada pela lei municipal 13.944 de 2006, verifica-se um cenário controverso, visto que as áreas de vegetação natural vêm diminuindo com o passar do tempo, o que pode impactar de forma negativa as águas superficiais e subterrâneas

Figura 38: Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 1985, 2000 e 2015 da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 39: Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 1985, 2000 e 2015 da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte.: Ruggiero, 2017.

7.3. Análise de Mudanças de Uso e Ocupação do Solo Através do Land Change Modeler

As análises de mudanças de uso e ocupação do solo foram realizadas para os períodos de 1985 a 2000, 2000 a 2015 e 1985 a 2015 (Figuras 40 e 41). As tabelas 20 e 21 mostram as áreas em que cada alteração foi identificada, bem como a representação dessas áreas em porcentagem, considerando a área total das bacias hidrográficas.

7.3.1. Mudanças de 1985 a 2000

No período de 1985 a 2000, observa-se que na Bacia Hidrográfica do Chibarro ocorreram alterações em 37,10% da área estudada, sendo que a principal modificação foi de pastagens para solo exposto (4,61 km²; 13,41% da área da bacia).

Observa-se o aumento da área ocupada por infraestrutura (1,61 km²), sendo a diminuição de solo exposto, vegetação natural e pastagem responsável por isso. Este acréscimo de infraestrutura foi verificado principalmente na região oeste da bacia, sendo representado pelo desenvolvimento de novos condomínios de chácaras (destacado na figura 40 por círculos vermelhos)

Neste período já é possível verificar o aumento de vegetação natural, sendo os principais contribuintes para isto a pastagem (2,46 km²; 7,15% da área da bacia) e o solo exposto (0,54 km²; 1,58% da área da bacia). Os fragmentos de vegetação natural regenerados estão localizados principalmente nas porções leste, noroeste e nordeste da área. Este aumento de vegetação natural pode ser atribuído à criação do Novo Código Florestal aliado à definição de penalidades, causando uma grande influência nessa questão. Junto a isso, deve ser colocada a qualificação da Lei nº 7.803 de 1989, sobre as Áreas de Preservação Permanente e o capítulo sobre o meio ambiente na Constituição Federal de 1988, os quais tornaram-se as principais garantias de preservação da vegetação (FILHO et al., 2015).

Analisando a persistência dos usos do solo entre esse período (Figura 42), nota-se que a pastagem e o solo exposto foram os usos que mais persistiram (7,63 km² e 5,86 km², respectivamente). A vegetação natural persistiu em uma área de 3,89 km², com fragmentos nas porções norte, nordeste, noroeste, leste, oeste e

sudoeste. A área de infraestrutura que se manteve com o tempo foi de 3,59 km², localizada nas regiões sudoeste e central.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão foram identificadas alterações em 44,98% da área de estudo, sendo que a mudança de pastagem para solo exposto foi a mais expressiva (11,74 km²; 9,28% da área da bacia). Observa-se que a modificação de vegetação natural para pastagem ocorreu em uma área de 7,90 km² (6,25% da área da bacia), estando localizada principalmente nas regiões central, nordeste, leste e norte. Ao mesmo tempo, verificaram-se alterações de pastagem para vegetação natural (8,79 km²; 6,95% da área da bacia) com maior representatividade nas porções central, norte e sudoeste da bacia.

Com relação à infraestrutura, houve o aumento de aproximadamente 2,73 km². Ressalta-se que por volta de 1,24 km² deste total é representado pela alteração de vegetação natural para infraestrutura, principalmente na região noroeste. A figura 43 mostra os usos do solo que persistiram nos anos analisados. A pastagem foi o que mais persistiu, com 24,81 km², seguida pela vegetação natural, com 23,60 km². Houve a manutenção de áreas de silvicultura (8,22 km²), localizadas a noroeste e sudeste da bacia.

7.3.2. Mudanças de 2000 a 2015

Entre os anos de 2000 e 2015, na Bacia Hidrográfica do Chibarro, aproximadamente 60% da área sofreu modificações, refletindo mudanças na ocupação que podem causar tanto danos ambientais ao solo e, conseqüentemente à infiltração, como o aumento da área impermeabilizada em regiões com loteamentos (Imagem A na figura 38), quanto à recuperação de áreas antes degradadas, através da regeneração da vegetação (Imagem B na figura 38). Entre as mudanças que podem ocasionar danos ambientais, está o aumento da cultura da cana de açúcar. Houve um aumento total de 10,89 km² na área de cultivo de cana de açúcar, sendo a transição do solo exposto para esta o principal responsável por esse acréscimo (7,40 km²; 21,54% da área da bacia).

Figura 40: Mapa de mudanças de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Chibarro.

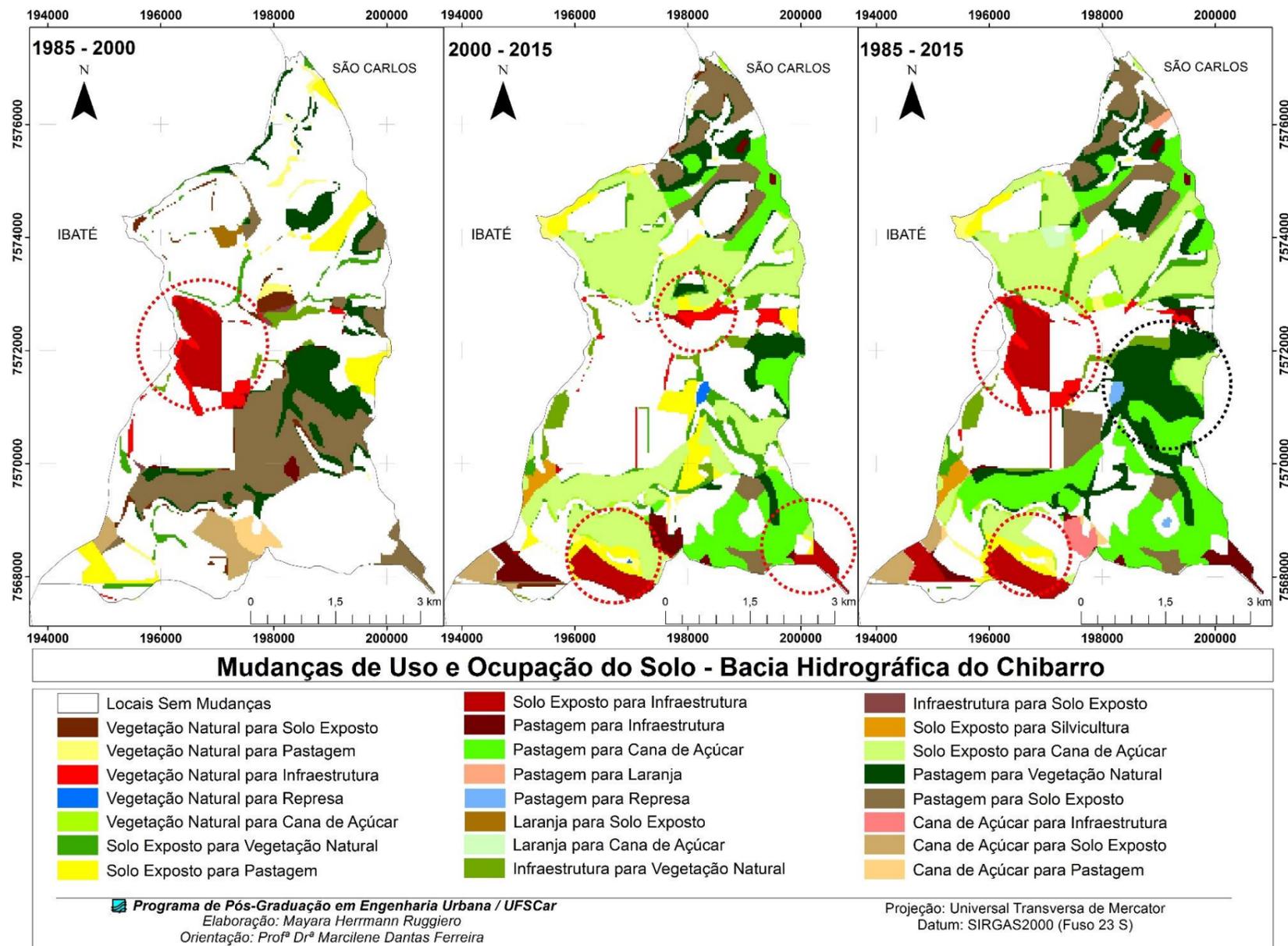


Figura 41: Mapa de mudanças de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão. Imagem indicando as mudanças em uma área de eucalipto.

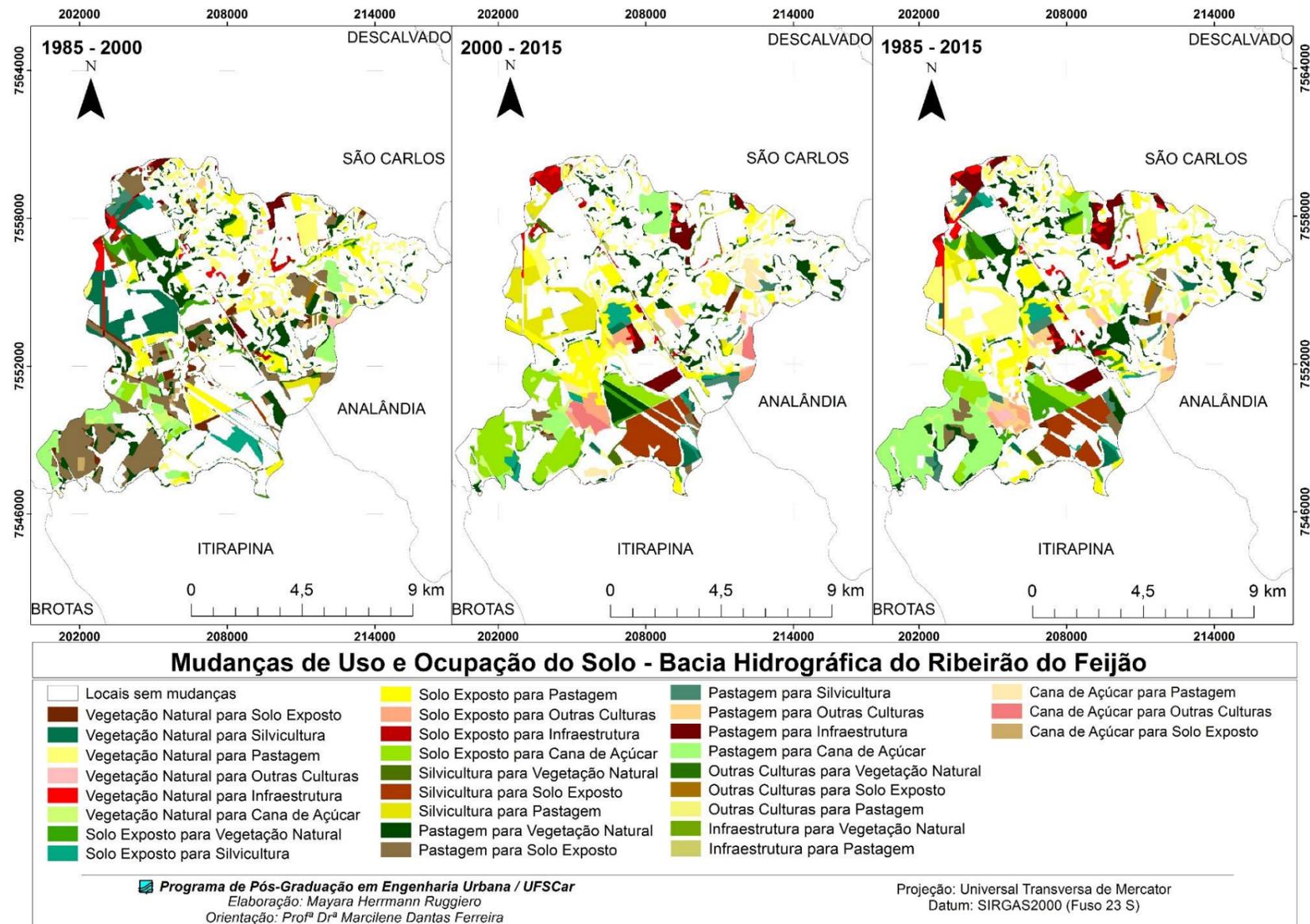


Tabela 20: Área e porcentagem de área de cada mudança de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Chibarro.

Mudanças	Períodos					
	1985 – 2000		2000 - 2015		1985 - 2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Vegetação Natural para Solo Exposto	0,47	1,35	0,10	0,30	0,00	0,00
Vegetação Natural para Pastagem	0,34	0,99	0,32	0,92	0,30	0,88
Vegetação Natural para Infraestrutura	0,49	1,44	0,39	1,13	0,54	1,56
Vegetação Natural para Represa	0,00	0,00	0,07	0,21	0,00	0,00
Vegetação Natural para Cana de Açúcar	0,00	0,00	0,27	0,80	0,28	0,82
Solo Exposto para Vegetação Natural	0,54	1,58	1,13	3,30	0,71	2,07
Solo Exposto para Pastagem	1,17	3,41	1,47	4,27	0,61	1,76
Solo Exposto para Infraestrutura	0,98	2,86	0,93	2,71	1,86	5,43
Solo Exposto para Silvicultura	0,00	0,00	0,19	0,55	0,20	0,57
Solo Exposto para Cana de Açúcar	0,00	0,00	7,40	21,54	4,97	14,47
Pastagem para Vegetação Natural	2,46	7,15	1,59	4,63	4,09	11,92
Pastagem para Solo Exposto	4,61	13,41	1,91	5,56	2,33	6,78
Pastagem para Infraestrutura	0,14	0,40	0,74	2,15	0,54	1,57
Pastagem para Cana de Açúcar	0,00	0,00	3,22	9,38	4,96	14,45
Pastagem para Laranja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,21
Pastagem para Represa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,30
Laranja para Solo Exposto	0,14	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Laranja para Cana de Açúcar	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,39
Infraestrutura para Vegetação Natural	0,30	0,89	0,51	1,49	0,45	1,31
Infraestrutura para Solo Exposto	0,07	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Cana de Açúcar para Solo Exposto	0,71	2,08	0,30	0,87	0,40	1,15
Cana de Açúcar para Pastagem	0,32	0,93	0,00	0,00	0,07	0,21
Cana de Açúcar para Infraestrutura	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,81
Total	12,74	37,10	20,54	59,81	22,89	66,66

Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 21: Área e porcentagem de área de cada mudança de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão (continua).

Mudanças	Períodos					
	1985 - 2000		2000 - 2015		1985 - 2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Vegetação Natural para Solo Exposto	2,49	1,97	0,49	0,39	0,33	0,26
Vegetação Natural para Silvicultura	4,66	3,69	1,02	0,81	1,23	0,97
Vegetação Natural para Pastagem	7,90	6,25	7,28	5,76	14,07	11,13
Vegetação Natural para Outras Culturas	0,24	0,19	0,43	0,34	0,89	0,70
Vegetação Natural para Infraestrutura	1,24	0,98	0,00	0,00	1,94	1,54
Vegetação Natural para Cana de Açúcar	0,64	0,50	0,93	0,73	0,85	0,67
Solo Exposto para Vegetação Natural	2,34	1,85	1,66	1,31	3,50	2,77
Solo Exposto para Pastagem	5,21	4,12	7,24	5,72	6,42	5,08
Solo Exposto para Outras Culturas	0,00	0,00	1,56	1,23	0,67	0,53
Solo Exposto para Infraestrutura	0,41	0,32	1,14	0,90	0,58	0,46
Solo Exposto para Silvicultura	1,37	1,08	1,62	1,28	1,11	0,88

Tabela 21: Área e porcentagem de área de cada mudança de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão (continuação).

Mudanças	Períodos					
	1985 - 2000		2000 - 2015		1985 - 2015	
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
Solo Exposto para Cana de Açúcar	0,76	0,60	7,32	5,79	3,38	2,68
Silvicultura para Vegetação Natural	0,45	0,35	0,52	0,42	0,36	0,28
Silvicultura para Solo Exposto	0,00	0,00	4,23	3,34	3,39	2,68
Silvicultura para Pastagem	0,59	0,47	4,40	3,48	0,53	0,42
Pastagem para Vegetação Natural	8,79	6,95	6,06	4,80	7,92	6,27
Pastagem para Solo Exposto	11,74	9,28	0,82	0,65	1,90	1,50
Pastagem para Silvicultura	0,57	0,45	0,99	0,78	1,64	1,30
Pastagem para Outras Culturas	0,30	0,24	0,30	0,23	2,08	1,64
Pastagem para Infraestrutura	1,08	0,86	2,25	1,78	3,57	2,83
Pastagem para Cana de Açúcar	4,38	3,46	2,79	2,21	9,41	7,44
Outras Culturas para Solo Exposto	0,37	0,29	0,00	0,00	0,44	0,34
Outras Culturas para Vegetação	0,66	0,52	0,00	0,00	0,47	0,37
Outras Culturas para Pastagem	0,40	0,32	0,00	0,00	0,45	0,36
Infraestrutura para Vegetação Natural	0,00	0,00	0,44	0,35	0,44	0,35
Infraestrutura para Pastagem	0,00	0,00	0,55	0,43	0,00	0,00
Cana de Açúcar para Solo Exposto	0,27	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Cana de Açúcar para Pastagem	0,00	0,00	1,51	1,19	0,00	0,00
Cana de Açúcar para Outras Culturas	0,00	0,00	1,34	1,06	0,00	0,00
Total	56,86	44,98	56,88	45,00	67,57	53,4

Fonte: Ruggiero, 2017.

Outra mudança importante de se destacar é o aparecimento de algumas manchas de infraestrutura na porção sul e sudoeste da bacia. Essas manchas correspondem a loteamentos e construção de condomínios de alto padrão. O aumento total de área de infraestrutura nesse período foi de 2,06 km², sendo a mudança de solo exposto para o referido uso a que mais contribuiu (0,93 km²).

Destaca-se também o aumento da vegetação natural, com um total de 3,24 km², sendo a modificação de pastagem para a vegetação natural e de solo exposto para esta, a principal alteração para este aumento (1,59 km² e 1,13 km², respectivamente). Estas alterações estão localizadas, principalmente, nas porções norte, leste, oeste e sudeste da bacia. Com relação à persistência de usos, a vegetação natural foi a que mais persistiu (6,13 km²), seguida pela infraestrutura (4,63 km²). A pastagem apresentou persistência de 1,98 km² e o solo exposto de 0,72 km². Ressalta-se que os fragmentos de vegetação natural que persistiram nesse período de tempo ocupam uma área maior do que nos anos anteriores e estão distribuídos por toda a região da bacia.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, ainda observa-se alterações que tomam um caminho oposto aquele verificado na bacia anterior. Ocorreram alterações em 45% da área da bacia e verifica-se um quadro problemático, visto que 8,03% da área da bacia correspondem à supressão de vegetação natural. A substituição desta por pastagem é a maior responsável por este cenário (7,28 km²; 5,76% da área da bacia). Mesmo com o aparecimento de novas áreas de vegetação natural, a situação apresenta um saldo negativo, visto que 8,69 km² foram recuperados, enquanto 10,16 km² foram perdidos.

No mesmo momento, observa-se o aumento da área de infraestrutura, principalmente nas regiões central, nordeste e noroeste, ocupando uma área de 3,38 km² (2,68% da área da bacia). Com relação à persistência dos usos, novamente a pastagem foi o que mais persistiu (25,65 km²) seguido pela vegetação natural (25,28 km²). Destaca-se a persistência de 2,73 km² de cana de açúcar.

7.3.3. Mudanças no Período de 30 Anos (1985 a 2015).

Tratando agora de um panorama geral das áreas em análise, verifica-se que na Bacia Hidrográfica do Chibarro, entre os anos de 1985 e 2015 aproximadamente 66,66% da área foi modificada durante esse período. Observa-se que houve aumento de infraestrutura e de área urbanizada, sendo possível afirmar que a principal mudança responsável pelo aumento das áreas com Infraestrutura foi solo exposto para infraestrutura (1,86 km²; 5,43% da área da bacia).

Verificou-se o aumento da vegetação natural com o passar dos anos (destacado na figura 40 pelo círculo preto). Houve um acréscimo de 15,25% na área de vegetação natural. Isso pode ser justificado através da mudança de legislação, que deixou de ser apenas um meio de regular a exploração florestal e passou a intervir principalmente sobre a propriedade privada, colocando que as formas de vegetação do país são bens de interesse comum de todos os habitantes (FILHO, et al., 2015). Tais alterações ocorreram com a implantação da Lei Federal nº 4771 de 1965 (Novo Código Florestal, revogado pela Lei nº 12.651 de 2012), sendo a definição de penalidades uma grande influência para a manutenção da vegetação natural.

Observa-se que a mudança de pastagem para vegetação natural foi a maior responsável por esse aumento (4,09 km²). Percebe-se também um acréscimo de áreas com o cultivo de cana de açúcar, substituindo principalmente áreas de pastagens. Assim, a mudança de pastagem para cana de açúcar, bem como de solo exposto para cana de açúcar foram as responsáveis por esse aumento (4,96 km² e 4,97 km², respectivamente).

Foi observada uma mudança de infraestrutura para vegetação natural, sendo esta vegetação fragmentos em regeneração. Tal mudança pode ser atribuída exatamente ao maior empenho em relação à adequação ambiental devido às mudanças na legislação, sendo estas observadas nas regiões de condomínios de chácaras. Com relação à persistência dos usos, aquele que mais persistiu foi a vegetação natural (4,02 km²), seguido pela infraestrutura (3,49 km²). A pastagem apresentou persistência de 2,84 km² e a cana de açúcar de 0,58 km². O solo exposto apresentou persistência de 0,26 km².

Considerando o panorama geral da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, verifica-se a existência de mudanças em 53,45% da área. A maior preocupação relaciona-se com a perda de vegetação natural (aproximadamente 19 km²), sendo esta convertida principalmente em pastagens.

Junto a isso, observa-se o aumento de aproximadamente 4,5 km² de área de infraestrutura, sendo 1,54 km² originado da supressão de vegetação. Além disso, existe o aumento dos locais com cultura de cana de açúcar (10,79 km²), nos quais é possível encontrar, novamente, áreas com supressão de vegetação (0,67 km²). A supressão de vegetação verificada nesta bacia foi também constatada no trabalho realizado por Guidoneli et al. (2013). Na análise de mudanças de uso e ocupação do solo realizada para um período de seis anos (2005 a 2011) o uso classificado como mata ciliar, cerradão e reflorestamento perdeu uma área de 10,24 km². A persistência dos usos mais uma vez mostrou predominância da pastagem com 25,12 km² e da vegetação natural, com 21,48 km².

Figura 42: Persistência dos usos do solo da Bacia Hidrográfica do Chibarro.

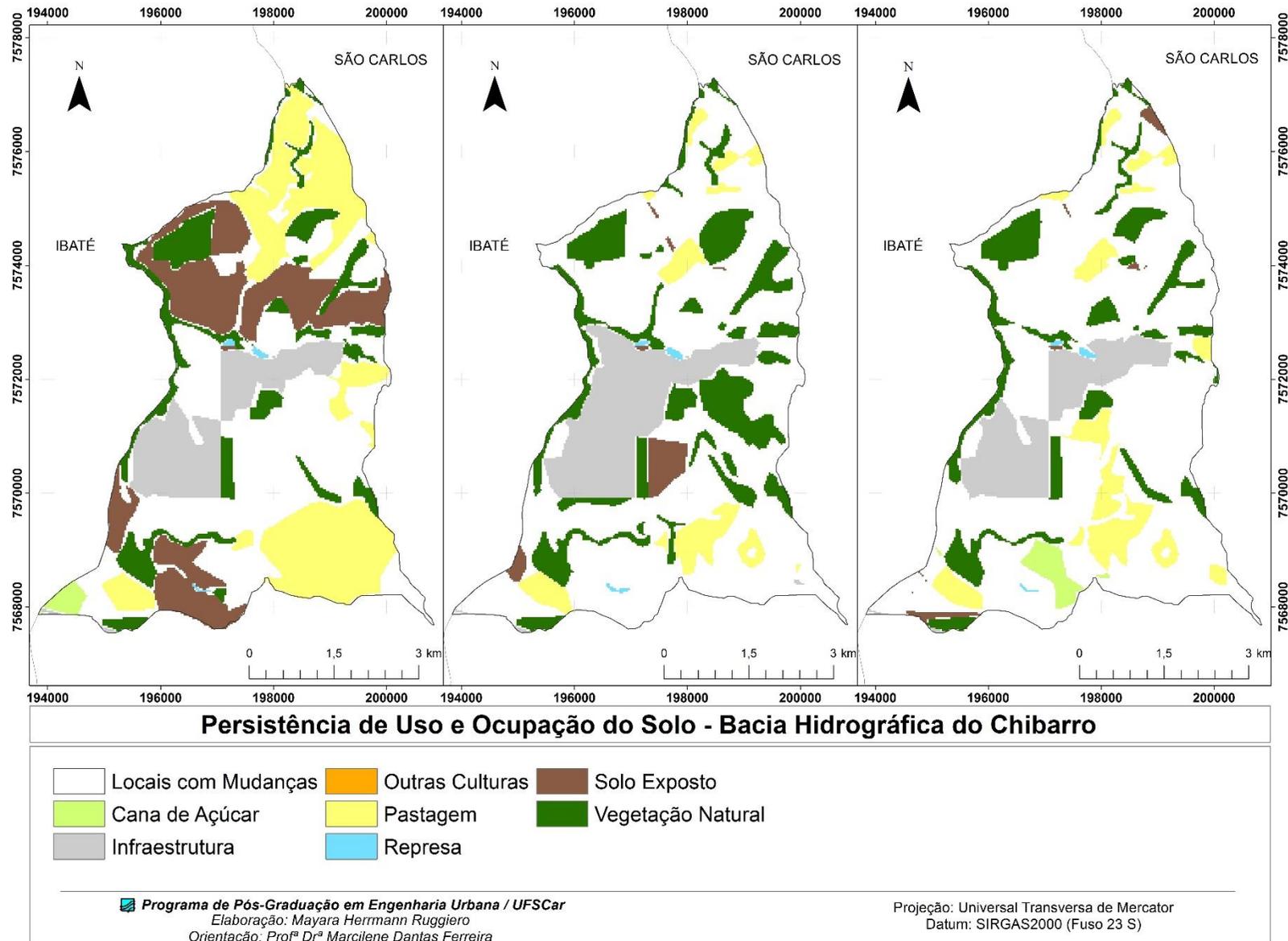
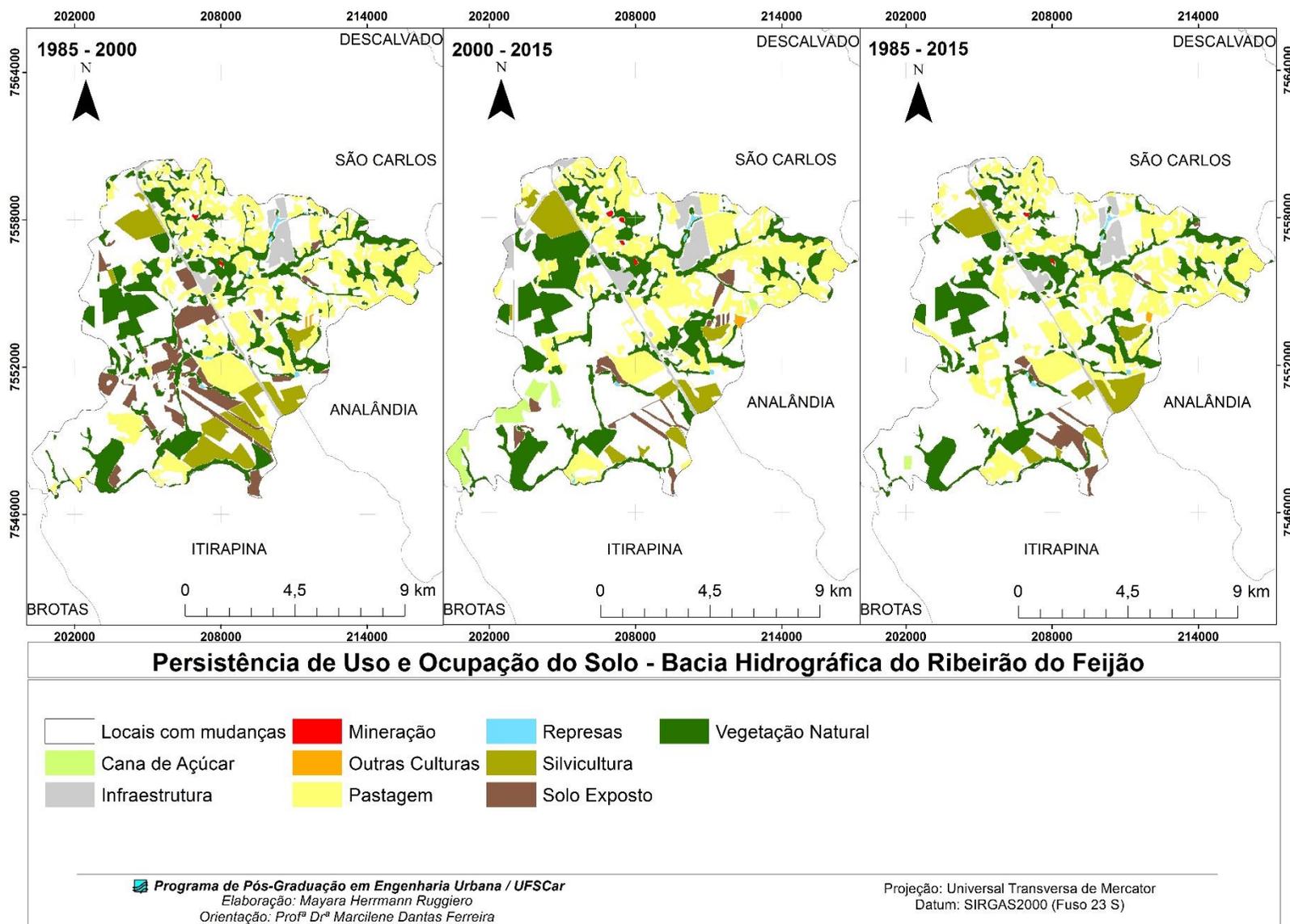


Figura 43: Persistência dos usos do solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

7.3.4. Análise Comparativa de Mudanças de Uso e Ocupação do Solo nas Duas Bacias de Estudo

As duas bacias hidrográficas apresentam diferenças quando tratadas nas legislações municipais. Na lei nº 18.053 de 2016, a qual estabelece o plano diretor do município de São Carlos, a Bacia Hidrográfica do Chibarro aparece como um eixo de expansão urbana de alta, média e baixa densidade, enquanto a outra bacia é considerada uma zona de proteção e ocupação restrita. As diretrizes para a Bacia Hidrográfica do Feijão buscam, principalmente, a preservação e proteção do manancial, objetivando também proteger e recuperar as áreas de preservação permanente encontradas na bacia.

Através das análises de mudança de uso do solo é possível perceber que o quadro verificado na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão vai contra o que está previsto na legislação, visto que existem áreas de vegetação nativa sendo suprimidas para o desenvolvimento de culturas agrícolas e, inclusive, de infraestrutura.

Segundo Costa et al. (2012), as características naturais da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão fazem com que essa região seja muito vulnerável à contaminação. Dessa forma o desenvolvimento de mais áreas agrícolas e urbanas em detrimento de áreas naturais pode comprometer a qualidade dos recursos hídricos utilizados para o abastecimento da população.

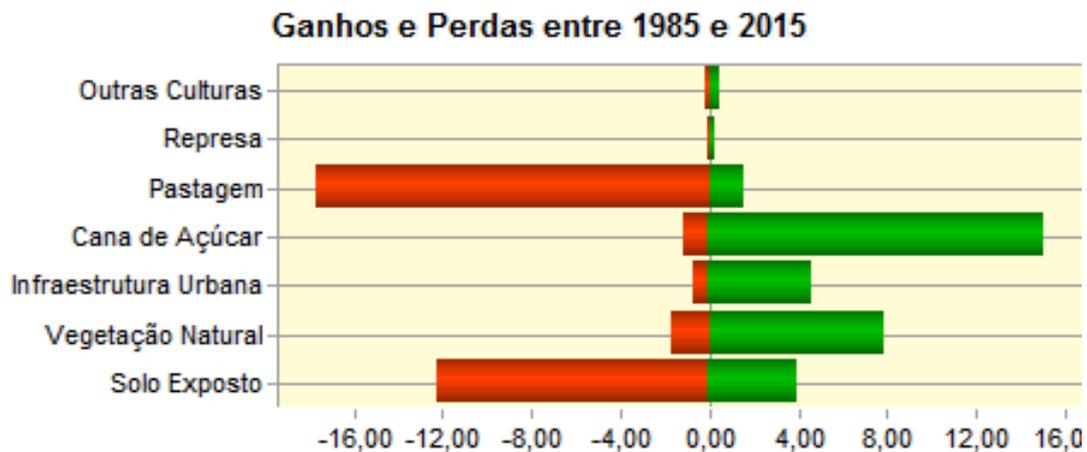
Os mesmos autores afirmam que a ocupação urbana desta área vem ocorrendo ao longo das vias públicas que atravessam a bacia, sendo isso observado nos mapas de uso e ocupação elaborados. A ocupação urbana em uma área tão vulnerável pode ocasionar em problemas com a poluição pontual e difusa através dos corpos hídricos, comprometendo a qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

Ao considerar a legislação de regulação do uso do solo vigente durante o período de análise (Lei nº 13.691/2005) a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão encontrava-se na zona 5B, sendo esta de preservação e proteção no manancial do Feijão. Ao confrontar os dados desta pesquisa com aquela desenvolvida por Costa et al. (2012) observa-se que de 2006 para 2015 houve o aumento da urbanização nesta região em 1,72% da área, ou 2,18 km² (7,09 km² em 2006 e 9,28 km² em

2015). Assim, verifica-se a necessidade de um monitoramento eficaz nessa região, buscando conter a expansão que vem ocorrendo.

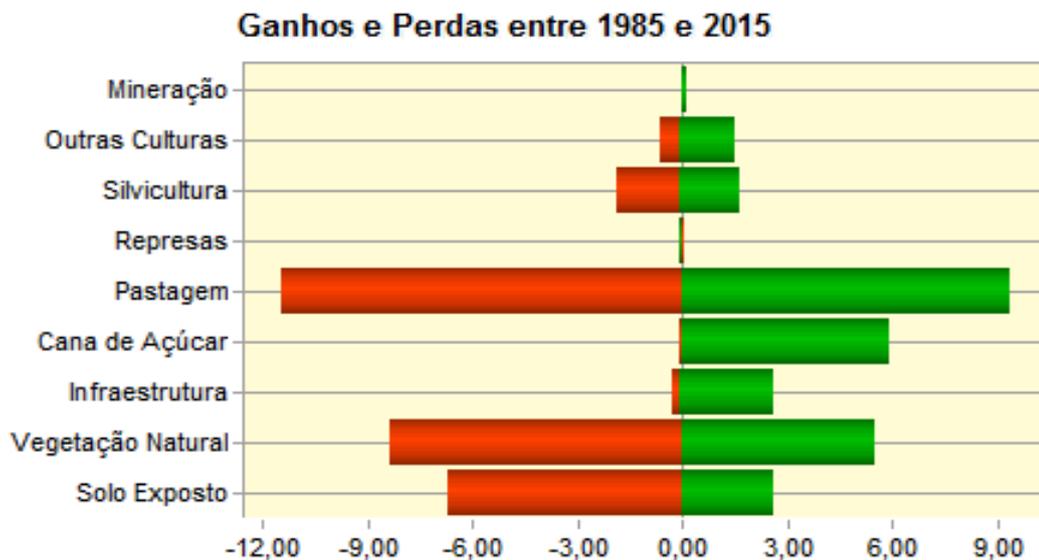
As figuras 45 e 46 mostram os ganhos e as perdas de cada tipo de uso do solo entre 1985 e 2015 para as duas bacias. A partir desses gráficos é possível perceber a diferença das alterações de uso do solo entre as áreas de estudo. A vegetação natural sofreu uma perda muito maior na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, porém os ganhos, em porcentagem de área, foram similares para as duas. Percebe-se também que em ambas as áreas a infraestrutura obteve mais ganhos do que perdas, e os cultivos agrícolas também se desenvolveram.

Figura 45: Gráfico de perdas e ganhos de área de uso do solo para a Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 44: Gráfico de perdas e ganhos de área de uso do solo para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

7.4. Cenários Futuros de Uso e Ocupação do Solo

A partir das análises de mudanças temporais, foram gerados os modelos de transição potencial e, então foi obtido o cenário futuro projetado para 2030 para as duas bacias hidrográficas. Ao analisar esses dois resultados, o mesmo foi considerado satisfatório, visto que estes expressaram os padrões de mudanças que foram observados nas áreas de estudo.

Apesar disso, em algumas regiões de ambas as bacias hidrográficas, o software gerou mudanças que dificilmente aconteceriam na realidade, como a alteração de áreas já urbanizadas para áreas de vegetação natural. Por esta razão optou-se por realizar novas interpretações desses cenários.

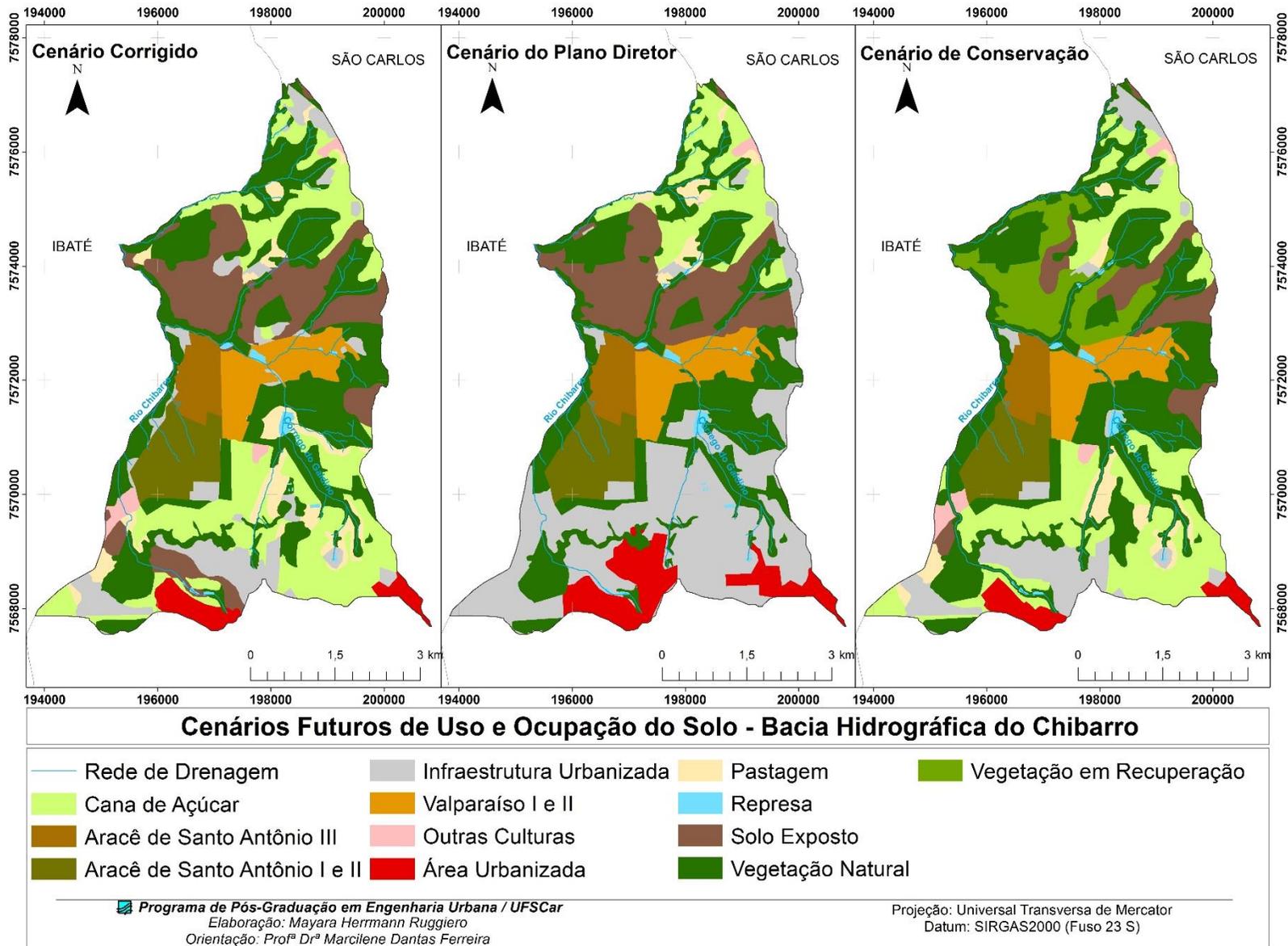
Na Bacia Hidrográfica do Chibarro foram feitas correções consideradas pertinentes no mapa gerado pelo IDRISI Selva, considerando as áreas de conservação, como recuperação de Áreas de Preservação Permanente, Zonas de Recarga do Aquífero e Reservas Legais, e uma última com embasamento no zoneamento municipal proposto na Lei nº 18.053/2016 (estabelece o Plano Diretor do Município de São Carlos e dá outras providências). Na Bacia Hidrográfica do Feijão foi elaborado um cenário com as correções necessárias e outro considerando as áreas de conservação.

As figuras 46 e 47 mostram estes cenários propostos para as duas bacias e as tabelas 22 e 23 mostram as áreas ocupadas pelos diferentes tipos de uso do solo nos três cenários, juntamente com a porcentagem da área ocupada.

7.4.1. Áreas com Vegetação Natural

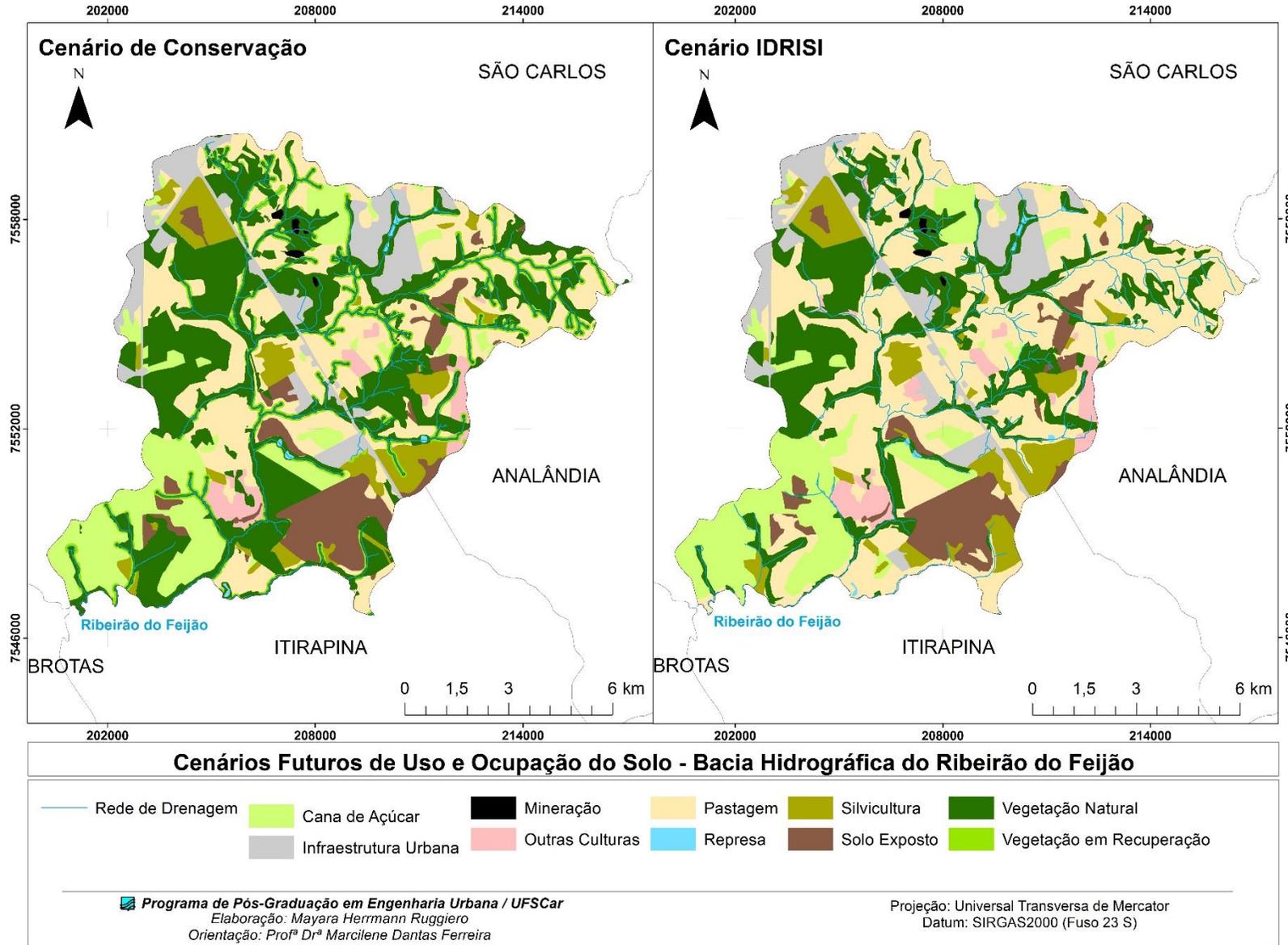
O primeiro ponto a ser observado diz respeito às alterações que ocorreram na área de vegetação natural e às diferenças verificadas nas duas áreas. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro houve aumento de 16% na área de vegetação natural quando considerado o cenário corrigido a partir do obtido pelo LCM. Nos outros dois cenários elaborados também houve o aumento da área de vegetação natural. Esse acréscimo acompanha as tendências das mudanças do uso do solo que ocorreram durante os 30 anos analisados anteriormente.

Figura 46: Cenários de uso e ocupação do solo projetados para 2030 na Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 47: Cenários de uso e ocupação do solo projetados para 2030 na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, por outro lado, foi observada a perda de 17,89% da área ocupada por vegetação natural no cenário corrigido a partir daquele elaborado através do LCM. Assim, em 2030, caso as tendências de alterações continuem da mesma forma encontrada nas análises anteriores, a área de vegetação natural passaria a ocupar 28,17 km².

O cenário de conservação seria o mais otimista em ambas as áreas. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro o aumento seria de 24,86%, com uma área total de 11,70 km² (34,07% da área de estudo), sendo o uso com maior área ocupada na bacia. Além disso, nesse cenário existe a proposta de uma área de recuperação de vegetação, a qual ocuparia 2,90 km², o que contribuiria mais ainda com esse acréscimo da área de vegetação.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão o aumento seria de 23,17%, com uma área total de 42,26 km². Essa alteração seria a mais condizente com aquilo que é proposto nas legislações para essa bacia. O Plano Diretor do município (Lei nº 18.053/2016) classifica a região dessa bacia como uma Zona de Proteção, sendo que em seu artigo 64, no qual são estabelecidas as diretrizes para esta zona, ficou estabelecido: a garantia da preservação e proteção do manancial, a preservação do patrimônio ecológico e também a proteção e recuperação das áreas de preservação permanente, em atendimento às legislações.

“Art. 64. São Diretrizes para a Zona 8B - Zona de Proteção do Manancial do Ribeirão Feijão:

I - preservar e proteger o manancial do Ribeirão do Feijão, um dos importantes pontos de captação de água do Município;

II - garantir a preservação do patrimônio ecológico existente;

III - prever e controlar densidades demográficas e de ocupação de solo urbano, como medida para a gestão do bem público, da oferta de abastecimento público e da conservação do meio ambiente;

IV - inserir as áreas preservadas da Fazenda Capão das Antas no Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) e no Sistema Estadual de Unidades de Conservação (SEUC), visando à busca de incentivos;

V - proteger e recuperar as Áreas de Preservação Permanente, em atendimento ao que rege a legislação federal e estadual, bem como em conformidade com a Lei Municipal 13.944, de 12 de dezembro de 2006, e suas alterações.”

Tabela 22: Área e porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo nos cenários projetados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.

Área Ocupada por Cada Tipo de Uso do Solo						
Uso do Solo	Cenários					
	Correção	%	Conservação	%	Plano Diretor	%
Área Urbanizada	0,87	2,52	0,81	2,37	2,36	6,86
Valparaíso I e II	1,98	5,75	1,98	5,75	1,98	5,75
Aracê de Santo Antônio I e II	1,86	5,41	1,86	5,41	1,86	5,41
Aracê de Santo Antônio III	1,04	3,02	1,04	3,02	1,04	3,02
Cana de Açúcar	7,37	21,47	7,29	21,24	2,76	8,04
Expansão de Infraestrutura Urbanizada	2,99	8,72	2,98	8,67	9,65	28,10
Outras Culturas	0,38	1,10	0,41	1,18	0,09	0,27
Pastagem	1,75	5,09	1,10	3,20	0,53	1,56
Represa	0,20	0,59	0,20	0,59	0,22	0,65
Solo Exposto	5,12	14,92	2,08	6,05	4,33	12,61
Vegetação em Recuperação	0,00	0,00	2,90	8,44	0,00	0,00
Vegetação Natural	10,79	31,41	11,70	34,07	9,52	27,73
Total	34,34	100,00	34,34	100,00	34,34	100,00

Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 23: Área e porcentagem de área ocupada por cada tipo de uso do solo nos cenários projetados na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.

Área Ocupada por Cada Tipo de Uso do Solo				
Uso do Solo	Cenários			
	Correção IDRISI (km ²)	%	Conservação (km ²)	%
Cana de Açúcar	16,52	13,07	14,95	11,83
Infraestrutura Urbanizada	10,77	8,52	10,17	8,04
Outras Culturas	3,68	2,908	2,80	2,22
Pastagem	49,14	38,87	31,93	25,26
Represa	0,25	0,201	0,25	0,20
Solo Exposto	8,29	6,559	9,07	7,18
Vegetação Natural	28,18	22,29	42,31	33,47
Mineração	0,29	0,229	0,29	0,23
Vegetação em Recuperação	0,00	0	6,89	5,45
Silvicultura	9,29	7,352	7,74	6,12
Total	126,4098	100,0	126,4098	100,0

Fonte: Ruggiero, 2017.

A lei nº 13.944/2006, a qual trata da criação a APREM do Ribeirão do Feijão, estabelece uma faixa de 50 metros sendo iniciada a partir do término da faixa de APP (estabelecida por legislação federal), que corresponde a uma área de transição para os demais usos do solo. Esta área foi inserida no cenário de conservação, sendo denominada de vegetação em recuperação. A área ocupa 5,45 % da bacia (6,89 km²) e também contribuiria para o acréscimo da vegetação natural na região.

Nas duas bacias hidrográficas os cenários de conservação seriam os que mais contribuiriam para a infiltração de água no solo e, conseqüentemente, à recarga dos reservatórios subterrâneos. Além disso, especificamente na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, a faixa de proteção estabelecida pela Lei 13.944/2006 iria garantir a devida preservação dos recursos hídricos superficiais, mantendo então a função do manancial.

7.4.2. Áreas de Expansão Urbana e Infraestrutura

Tratando dos usos referentes à infraestrutura e expansão urbana, observa-se que na Bacia Hidrográfica do Chibarro ocorreram aumentos tanto de área urbanizada quanto de infraestrutura. O cenário correspondente ao zoneamento do Plano Diretor foi o que mais apresentou aumento, sendo este relacionado ao acréscimo de 25,33% de área de infraestrutura. Neste ponto, é importante discutir a respeito de como vem ocorrendo a dinâmica dos loteamentos existentes na área e como o Plano Diretor municipal trata essa questão.

Nesta região verifica-se a existência de dois loteamentos que correspondem a condomínios de chácaras: o Encontro Valparaíso I e II e o Aracê de Santo Antônio I e II. O primeiro foi criado em 1976 e possui lotes que variam entre 5000 m² e 17.000 m², com uma grande quantidade de lotes com área acima de 9.000 m². O segundo teve sua primeira parte criada em 1989 e a segunda em 1992 e possuem lotes que variam entre 3.000 m² e 5.000 m², com poucos lotes que possuem metragem acima de 10.000 m².

O primeiro ponto a se destacar é a diferença entre a variação dos tamanhos dos lotes, sendo que verifica-se que no Encontro Valparaíso estes são maiores. Outra questão importante trata-se da subdivisão dos lotes observada no Aracê de Santo Antônio, onde é possível encontrar, através de imagens de satélite, lotes com 1.500 m².

A questão do tamanho dos lotes torna-se uma discussão importante a partir do momento em que passa a influenciar na quantidade de vegetação encontrada nos dois locais. A figura 48 exemplifica essa diferença. É possível notar que no Encontro Valparaíso a quantidade de vegetação verificada na imagem de satélite é maior do que aquela no Aracê de Santo Antônio, onde observa-se muitas áreas ocupadas por gramíneas.

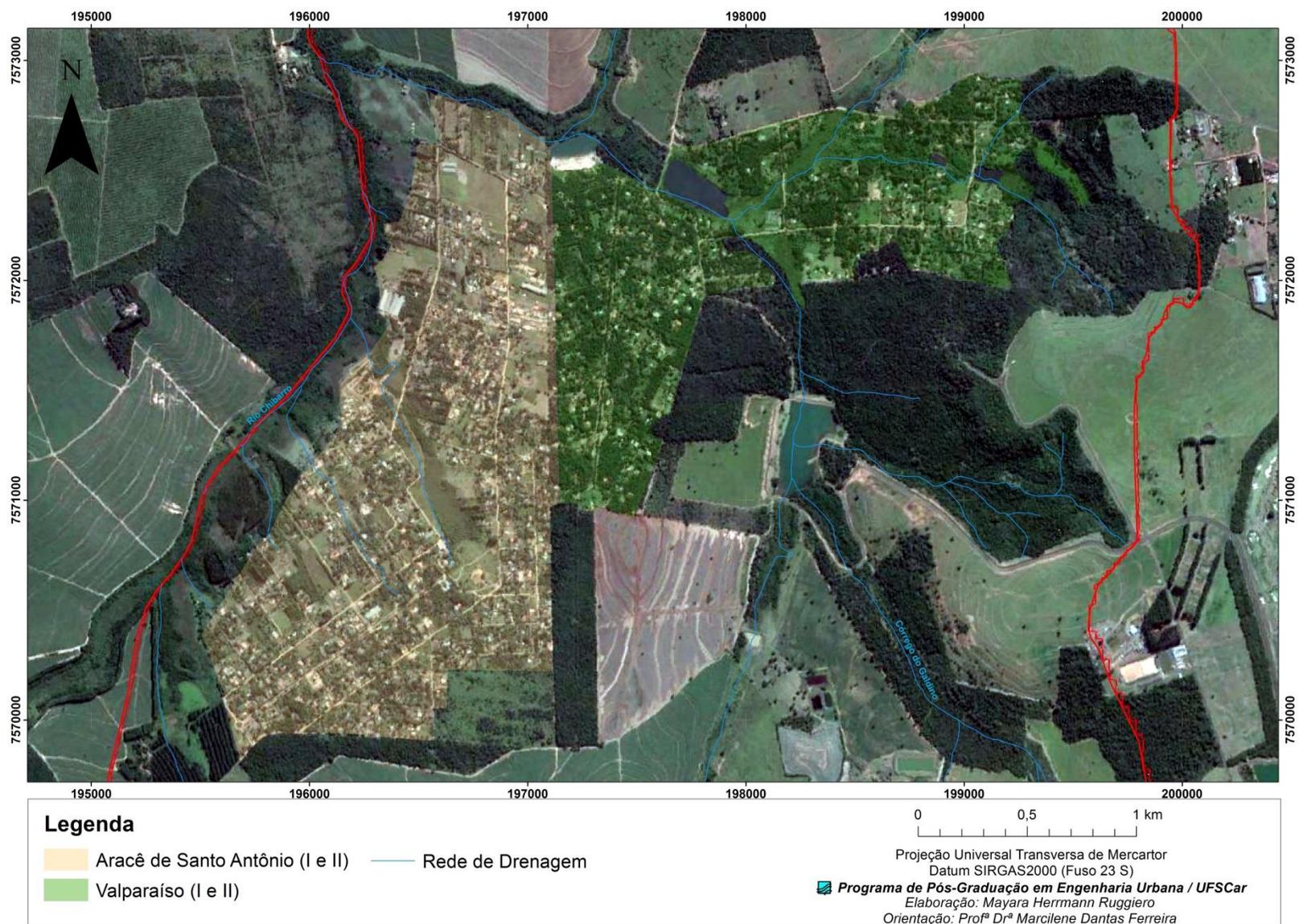
Ao considerar que ambos os loteamentos encontram-se sobre a formação Botucatu, estando, portanto, sobre uma área de recarga direta do aquífero, verifica-se que o tamanho dos lotes pode influenciar na infiltração de água no solo e na recarga dos recursos subterrâneos.

Considerando, então, a proposta de expansão do Plano Diretor municipal, é estabelecido nos artigos 41, 45 e 49 que os tamanhos mínimos dos lotes de novos loteamentos propostos na área são de 160 e 200 m² para as zonas de regulação e ocupação controlada de maior e menor densidade e de 160 e 250 m² para a zona de regulação e ocupação controlada de média densidade.

Assim, questiona-se se as características hidrogeológicas da área foram levadas em consideração durante a elaboração e discussão desta lei, visto que mesmo com a determinação de coeficientes de permeabilidade, os quais variam de 20% (maior e menor densidade) a 40% (média densidade), a área de ocupação será bem superior, podendo interferir na quantidade de área de vegetação natural da região, como já observado nos loteamentos existentes.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão foram observados aumentos de área de infraestrutura nos dois cenários elaborados. No cenário corrigido o aumento foi de 16,05%, enquanto que no cenário de conservação foi de 9,48%. Segundo Costa (2010) o aumento de áreas impermeabilizadas relacionadas com a presença de infraestrutura começou a surgir nesta bacia após 1986. Desde então é registrado um crescimento contínuo desse tipo de ocupação do solo. Assim, o resultado observado na projeção da ocupação do solo para 2030 retrata a realidade da área de estudo.

Figura 48: Loteamentos localizados na Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Com isso, verifica-se a necessidade da aplicação de instrumentos que contribuam para contenção do avanço urbano nesta região, visto sua importância para o abastecimento da população.

As modificações dos usos agrícolas também foram diferentes nas duas bacias. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro houve a diminuição da pastagem e da cana de açúcar. Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão observa-se o aumento da área ocupada por cana de açúcar, silvicultura e pastagens. Segundo Costa (2010) o desenvolvimento de áreas agrícolas em detrimento de áreas naturais acarreta na diminuição da qualidade da água, aumentando o escoamento superficial e comprometendo a infiltração de água.

Verifica-se que a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão apresenta a tendência do desenvolvimento de regiões agrícolas, considerando o aumento desses tipos de usos. Essa situação pode ser problemática ao se tratar dos recursos hídricos tanto subterrâneos quanto superficiais devido à possibilidade de contaminação da água pelo uso de agrotóxicos e pesticidas.

As tendências de desenvolvimento agrícola da região são confirmadas também no trabalho realizado por Guidolini et al. (2013), que ao realizar uma predição de uso e ocupação do solo para o ano de 2020 constataram que as áreas de pastagens e áreas agrícolas teriam aumentos.

7.5. Análise das Influências das Mudanças de Uso do Solo nas Águas Subterrâneas

As análises elaboradas para as duas áreas de estudo mostraram que a tendência é o desenvolvimento de usos antrópicos, tanto agrícolas quanto urbanos. Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão a situação é ainda mais séria, devido à constatação da diminuição de vegetação natural através do tempo.

A predominância dos usos antrópicos causam alterações nos padrões naturais dos componentes do meio físico, principalmente se tratando de características do solo. Assim, essas modificações influenciam nas reservas de água subterrânea, podendo impactar na quantidade de água que é convertida em recarga e também na qualidade da água.

Para verificar se as alterações de ocupação nas áreas de estudo estão comprometendo o aquífero Botucatu foram elaboradas análises sobre a vulnerabilidade intrínseca, susceptibilidade do aquífero à contaminação e sobre a capacidade potencial de infiltração das áreas de estudo.

7.5.1. Vulnerabilidade Intrínseca do Aquífero a Contaminação e Índice de Susceptibilidade à Contaminação

Para a elaboração das cartas de vulnerabilidade intrínseca, através da metodologia DRASTIC, e das cartas representativas do índice de susceptibilidade à contaminação, foram realizadas álgebras com os mapas apresentados nas figuras 49 e 50.

A classificação dos mapas foi realizada com base nos trabalhos desenvolvidos por Aller et al. (1987) e Lemos (2010), sendo o detalhamento dos parâmetros apresentados a seguir:

Profundidade do Nível da Água (D)

O mapa de profundidade do nível da água foi elaborado através da compilação de dados provenientes do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Foram selecionadas informações referentes ao nível estático das águas subterrâneas dos poços de captação localizados nas áreas de estudo, juntamente com dados do estudo de Fagundes (2010).

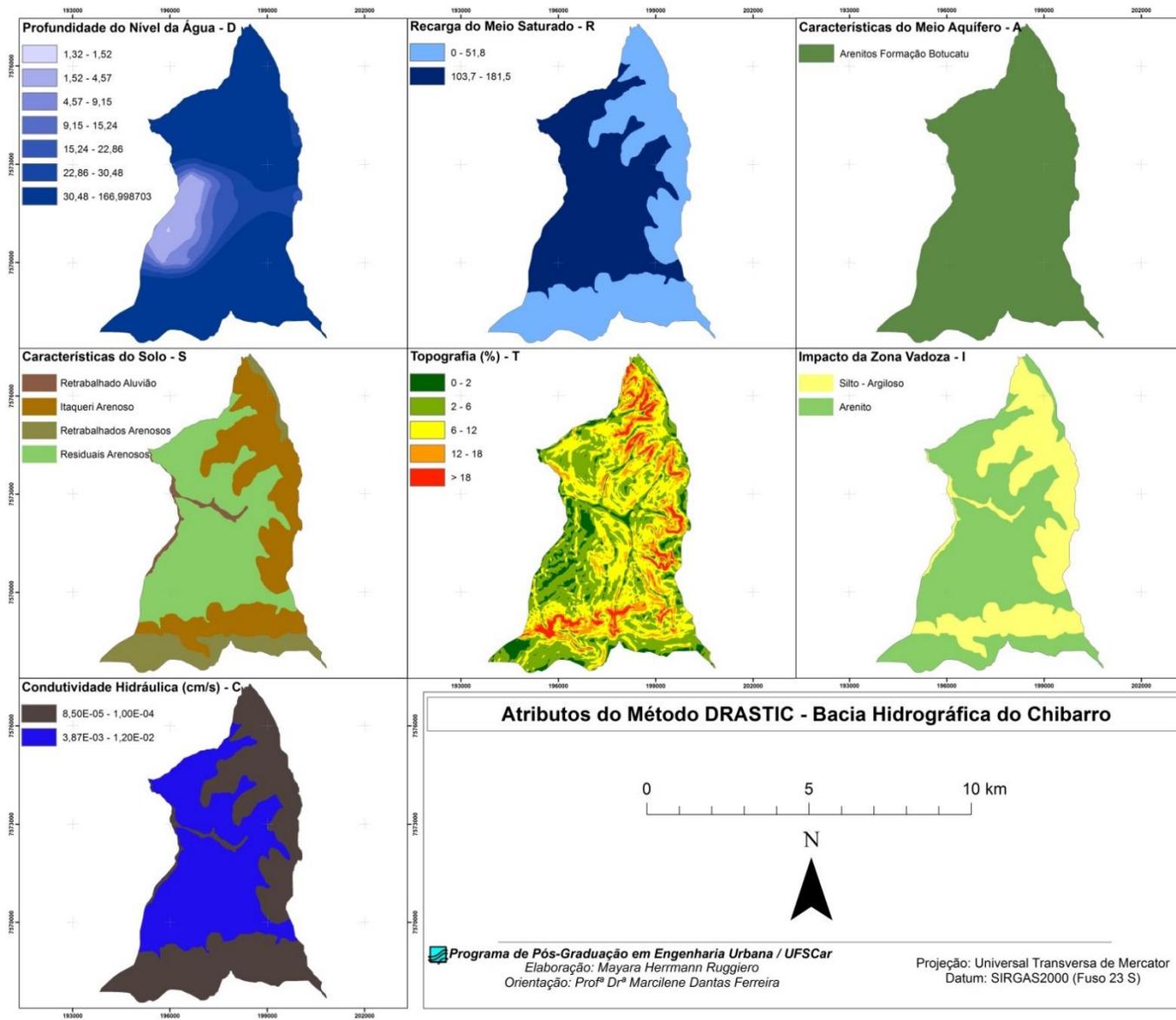
Essas informações foram tabuladas e transferidas para o software ArcGIS 10.2, no qual foi realizada a interpolação dos pontos para a criação de isolinhas com classes de profundidade do nível estático. As profundidades foram reclassificadas de acordo com os pesos de cada categoria (ALLER et al. 1987). A tabela 24 mostra a categorização realizada para a profundidade do nível da água.

Tabela 24: Categorização para a variável Profundidade das Águas Subterrâneas.

Profundidade das Águas Subterrâneas (D)		
Classe (m)	Escala (Dr)	Dr x Dw
0 - 1,52	10	50
1,52 - 4,57	9	45
4,57 - 9,15	7	35
9,15 - 15,24	5	25
15,24 - 22,86	3	15
22,86 - 30,48	2	10
>30,48	1	5
Peso (Dw)	5	

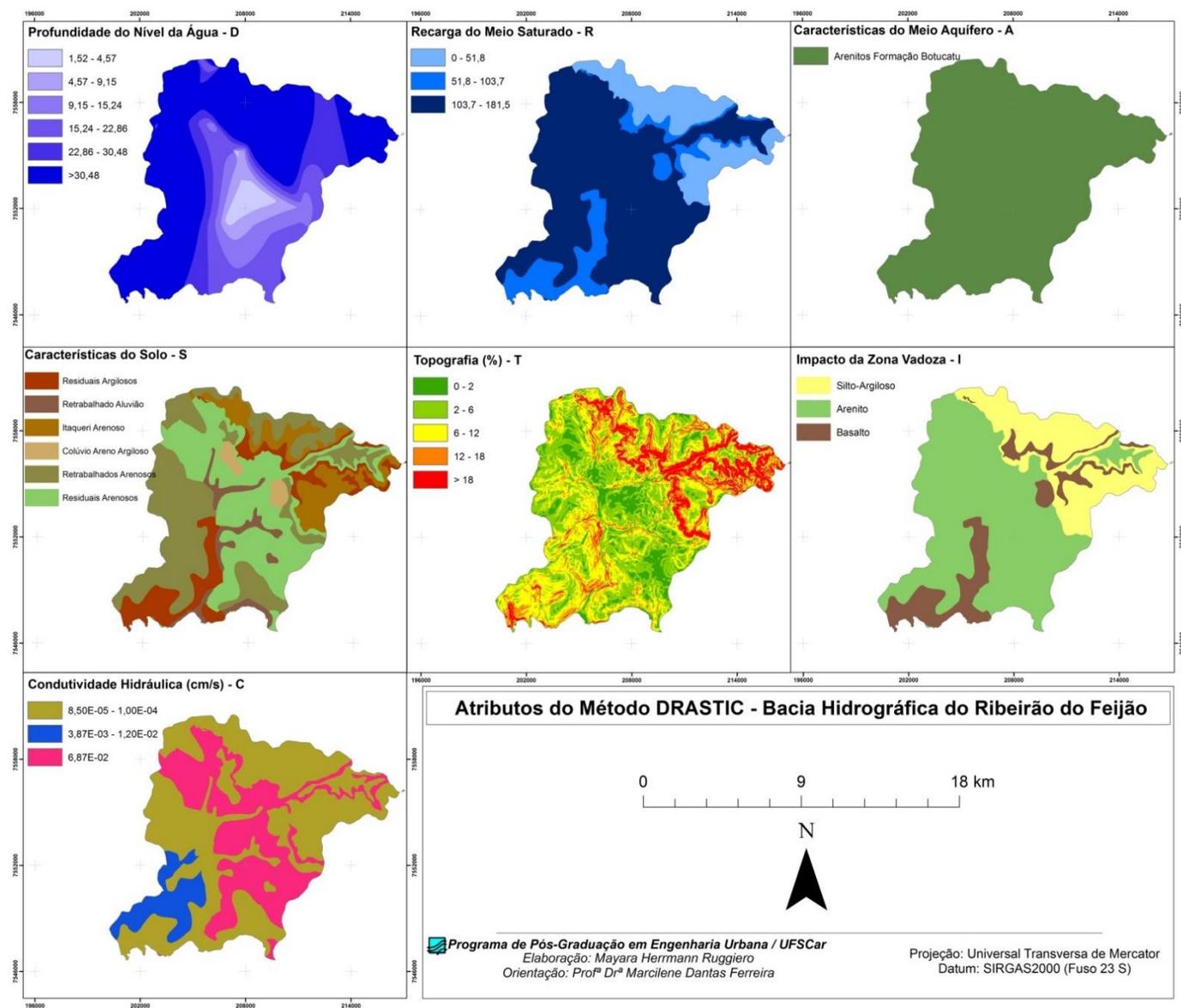
Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987).

Figura 49: Atributos da metodologia DRASTIC - Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 50: Atributos da metodologia DRASTIC - Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Recarga do Meio Saturado (R)

Os valores de recarga do meio saturado foram obtidos através do estudo realizado por Lemos (2010). De acordo com este autor, A formação Itaqueri apresenta um valor de recarga que varia de 0 a 51,8 milímetros por ano, e do arenito da formação Botucatu varia de 103,7 a 181,5 milímetros por ano. A tabela 25 mostra a categorização do atributo.

Tabela 25: Categorização para a variável Recarga do Meio Saturado.

Recarga do Meio Saturado – R			
Material	Valor (mm/ano)	Escala (Rr)	Rr x Rw
Formação Itaqueri	0 - 51,8	1	4
Arenito Botucatu	103,7 - 181,5	6	24
Formação Serra Geral	51,8 - 103,7	3	12
Peso (Rw)		4	

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987) e Lemos (2010).

Características do Meio Aquífero (A)

O aquífero presente na área de estudo é formado pelos arenitos da Formação Botucatu, os quais são classificados como arenitos maciços. Esta classe apresenta um valor de escala que varia de 4 a 9, sendo que foi utilizado o valor 6, o qual é sugerido pelo método. Esta classificação considera que quanto maior o tamanho dos grãos do material geológico, maior a permeabilidade e o risco de contaminação por fontes poluentes (ALLER et al., 1987; LEMOS, 2010)

Características do Solo (S)

Para a elaboração do mapa de características do solo (Tabela 26), foi utilizado como base o mapa de materiais inconsolidados, como observado em Lemos (2010). Este autor ainda afirma que a classificação proposta faz referências as características texturais do material, ou seja, quanto menores as partículas de solo, maior a capacidade de atenuar a ação de um contaminante.

Tabela 26: Classificação da variável Característica do Solo.

Característica do Solo - S			
Material	Escala (Sr)	Sr x Sw	Sr x Swp
Retrabalhados Arenosos	6	12	30
Retrabalhado Aluvião	3	6	15
Residuais Arenosos	9	18	40
Itaqueri Arenoso	4	8	20
Residuais Argilosos	1	2	5
Peso (Sw)		2	
Peso (Swp)		5	

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987) e Lemos (2010).

Topografia (T)

O atributo topografia foi representado através da carta de declividade da área de estudo, sendo a classificação dos intervalos baseados em Aller et al. (1987). Quanto menor a declividade, menor o escoamento superficial e, portanto, maior a permanência do contaminante no local, aumentando a percolação do mesmo até as reservas subterrâneas. A tabela 27 mostra a classificação da declividade e os valores de escala propostos pelo método.

Tabela 27: Classificação da variável Topografia.

Topografia - T				
Classe	Escala (Tr)	Tr x Tw	Tr x Twp	
0 a 2%	10	10	30	
2 a 6%	9	9	27	
6 a 12%	5	5	15	
12 a 18%	3	3	9	
>18%	1	1	3	
Peso (Tw)	1			
Peso (Twp)	3			

Fonte: Adaptado de Aller et al. (1987)

Impacto da Zona Vadosa (I)

Para a elaboração desse mapa também foi utilizado o mapa de materiais inconsolidados, sendo definidas duas classes de materiais, conforme Lemos (2010). Segundo Simas (2014) a zona vadosa corresponde à faixa de material não saturado entre a base do solo e a zona saturada. A tabela 28 mostra os materiais classificados e os respectivos valores de escala propostos pelo método.

Tabela 28: Classificação da variável Impacto da Zona Vadosa.

Impacto da Zona Vadosa - I				
Material	Escala	Escala Típica (Ir)	Ir x lw	Ir x lwp
Silto – Argiloso	1 a 2	6	30	24
Arenito	4 a 8	8	40	32
Peso (lw)	5			
Peso (lwp)	4			

Fonte: Aller et al. (1987) e Lemos (2010).

Condutividade Hidráulica (C)

O mapa de condutividade hidráulica foi elaborado conforme as informações disponíveis no estudo de Fagundes (2010) e Failache (2015). Para isso, utilizou-se o mapa de materiais inconsolidados como base, sendo este classificado conforme os

valores de condutividade hidráulica. A tabela 29 mostra a classificação da condutividade hidráulica e os valores de escala atribuídos às classes.

Tabela 29: Calssificação da variável Condutividade Hidráulica.

Condutividade Hidráulica - C				
K (cm/s)	K (m/s)	Escala (Cr)	Cr x Cw	Cr x Cwp
1,90E-04	1,90E-06	1	3	2
8,50E-05	8,50E-07	1	3	2
1,40E-04	1,40E-06	1	3	2
1,30E-05	1,30E-07	1	3	2
1,20E-02	1,20E-04	2	6	4
2,27E-03	2,27E-05	1	3	2
2,55E-03	2,55E-05	1	3	2
6,52E-04	6,52E-06	1	3	2
6,87E-02	6,87E-04	8	24	16
7,73E-04	7,73E-06	1	3	2
3,87E-03	3,87E-05	2	6	4
1,00E-04	1,00E-06	1	3	2
Peso (Cw)			3	
Peso (Cwp)			2	

Fonte: Aller et al. (1987)

7.5.1.1. Bacia Hidrográfica do Chibarro

A figura 51 mostra a vulnerabilidade intrínseca do aquífero (elaborada através da metodologia DRASTIC) e o índice de susceptibilidade à contaminação para a Bacia Hidrográfica do Chibarro. Através do DRASTIC observa-se uma predominância das classes baixas, estando estas relacionadas com as áreas de materiais inconsolidados da Formação Itaqueri, o qual apresenta quantidades significativas de material argiloso (LEMOS, 2010) e com locais em que o nível estático se encontra mais profundo. Ressalta-se que a vulnerabilidade de um aquífero está diretamente relacionada com a profundidade do lençol freático, sendo este o aspecto de maior importância em qualquer análise referente a isto.

A classe de vulnerabilidade alta ocupa 5,44% da área e está localizada na porção oeste da bacia, sobre a Formação Botucatu, em uma região em que o nível estático é mais superficial.

A metodologia DRASTIC, por não levar em consideração o tipo de ocupação que ocorre na área pode não expressar o que realmente ocorre na realidade, ao se tratar da possibilidade de contaminação do aquífero. Portanto, foi elaborado o Índice de Susceptibilidade à Contaminação.

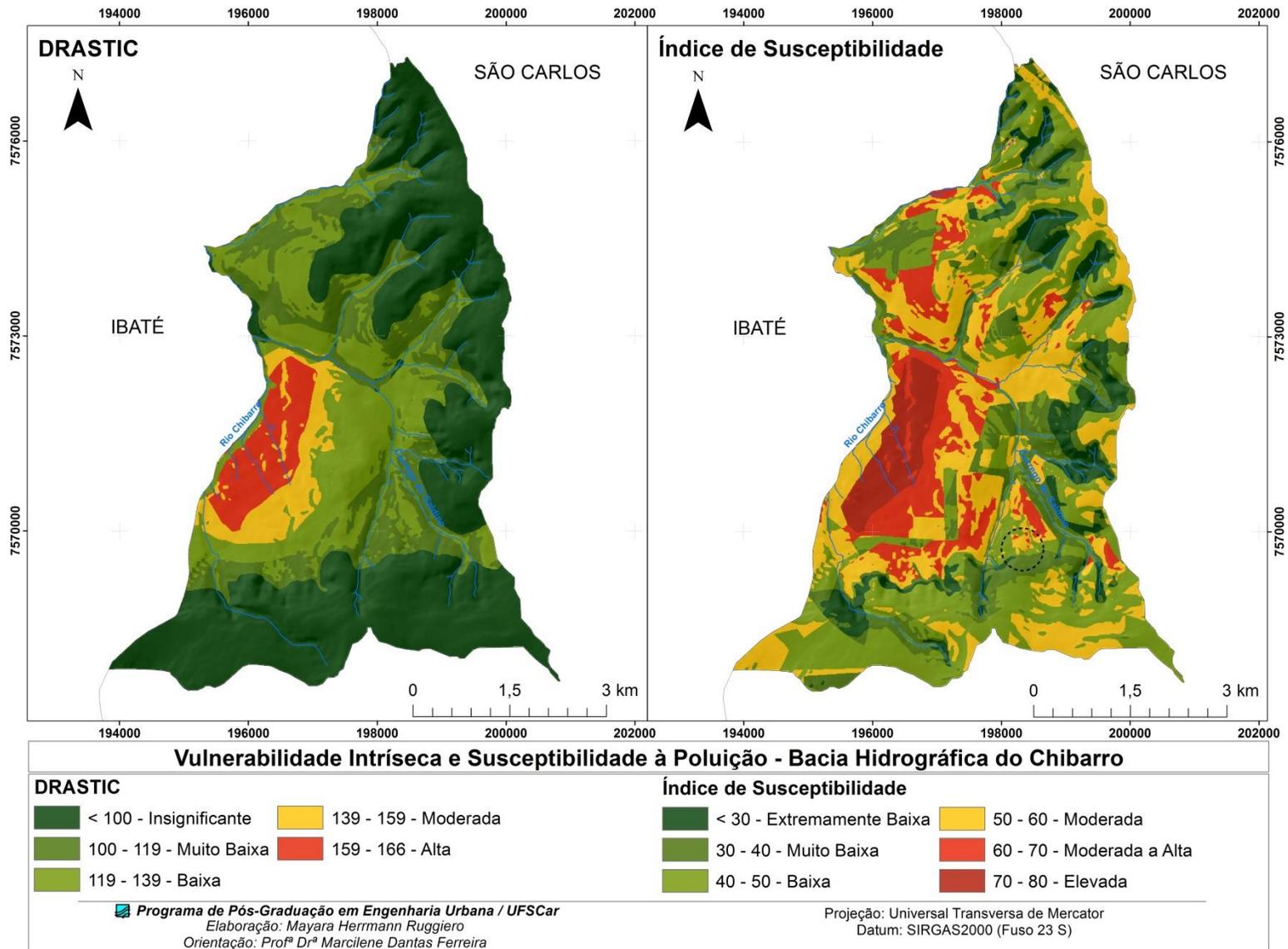
A primeira diferença verificada diz respeito ao aumento da área ocupada por classes de susceptibilidade altas. Tais classes ocupam um total de 15,29% da área da bacia. Este aumento é observado principalmente nos locais ocupados por culturas agrícolas anuais e condomínios de chácaras localizados sobre a Formação Botucatu.

Segundo Lemos (2010) o solo dessa região apresenta uma baixa fertilidade, levando à necessidade da utilização de insumos agrícolas, principalmente nas culturas anuais, como a cana de açúcar. Esse fator pode contribuir diretamente com a percolação de contaminantes, podendo atingir o lençol. Além disso, as propriedades localizadas nos condomínios de chácaras nessa área podem não apresentar um sistema de fossas adequado, causando a contaminação do aquífero.

Silva et al. (2013) ao analisar a qualidade da água de 13 poços cacimbas localizados no Aracê de Santo Antônio identificou pHs ácidos inferiores a 6,00, estando fora do intervalo estabelecido pelo Ministério da Saúde para a água para abastecimento populacional (intervalo de 6,00 e 9,50). Segundo a autora, os valores encontrados podem indicar a utilização de agroquímicos nas culturas agrícolas, sendo estes carregados para o lençol freático.

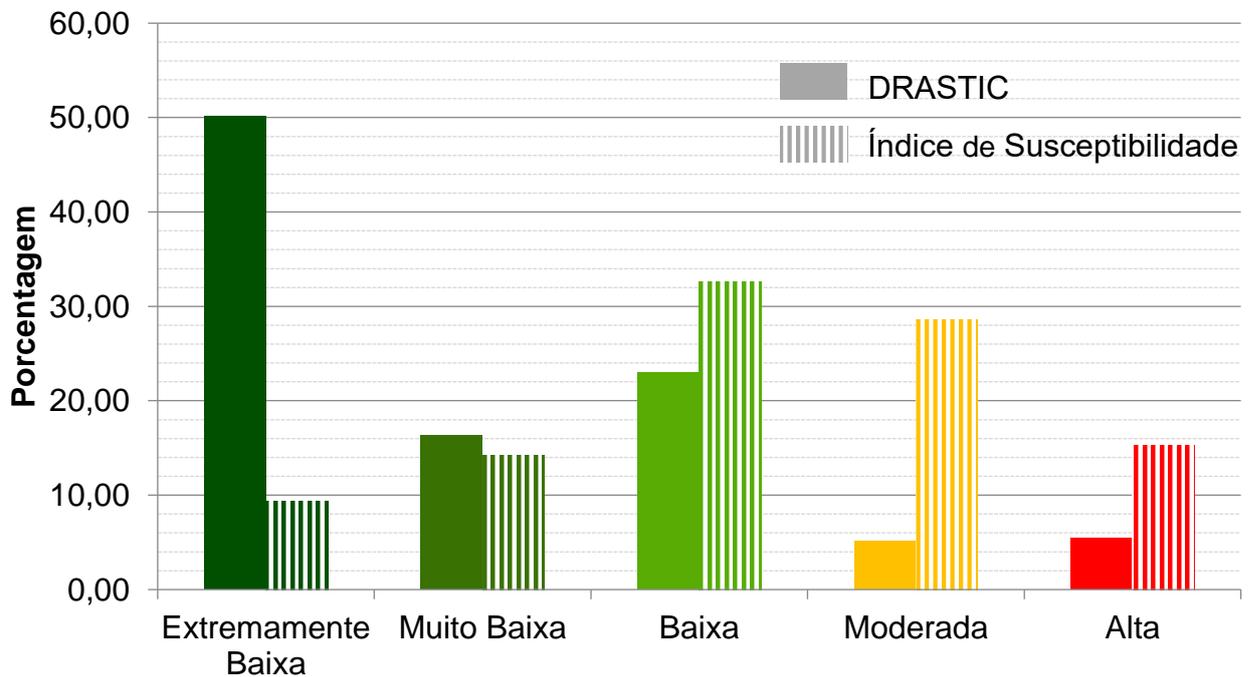
Os locais classificados como susceptibilidade moderada ocupam 28,56% da área da bacia. Encontram-se principalmente sobre a Formação Botucatu, naqueles locais em que o lençol freático está em uma maior profundidade e no restante da bacia, nas regiões que apresentam usos agrícolas. A figura 52 mostra a comparação das porcentagens das áreas ocupadas por cada classe de vulnerabilidade na metodologia DRASTIC e no Índice de Susceptibilidade

Figura 51: Vulnerabilidade intrínseca e Índice de Susceptibilidade à Poluição da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 52: Gráfico comparativo das porcentagens de área das classes de vulnerabilidade e susceptibilidade à contaminação da Bacia Hidrográfica do Chibarro.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Através do gráfico é possível observar claramente as diferenças entre as classes nas duas metodologias, principalmente ao observar as classes baixas e as classes altas. Percebe-se que ao inserir o uso do solo como variável para estimar a possibilidade de contaminação de uma região a classe alta ganha mais expressão, e a classe extremamente baixa diminui consideravelmente.

As classes de susceptibilidade baixa ocupam um total de 56,15% da bacia, estando diretamente relacionadas com os locais que possuem vegetação natural, mostrando a influência positiva que esta ocupação apresenta sobre o aquífero. Correspondem também às áreas de materiais geológicos mais argilosos, relacionados à Formação Itaqueri.

Nesta bacia encontra-se ainda o antigo aterro sanitário do município, indicado na figura 51 por um círculo preto. Este local consta no inventário de áreas contaminadas da CETESB, está classificada como em processo de monitoramento para encerramento e impacta principalmente o subsolo e as águas subterrâneas.

7.5.1.2. Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, além do DRASTIC e do Índice de Susceptibilidade foi elaborada outra variação do DRASTIC, o DRASTIC Pesticida (Figura 53). Esta metodologia objetiva, também, a caracterização da vulnerabilidade intrínseca do aquífero, porém pondera mais os parâmetros dependentes de atividades antrópicas relacionadas com a ocupação agrícola, como a característica do solo (OLIVEIRA, 2014).

Através do DRASTIC foi observada a maior predominância de classes baixas, ocupando 79,60% da área da bacia, em locais com declividades elevadas, maiores profundidades de lençol freático e locais sobre a Formação Itaqueri.

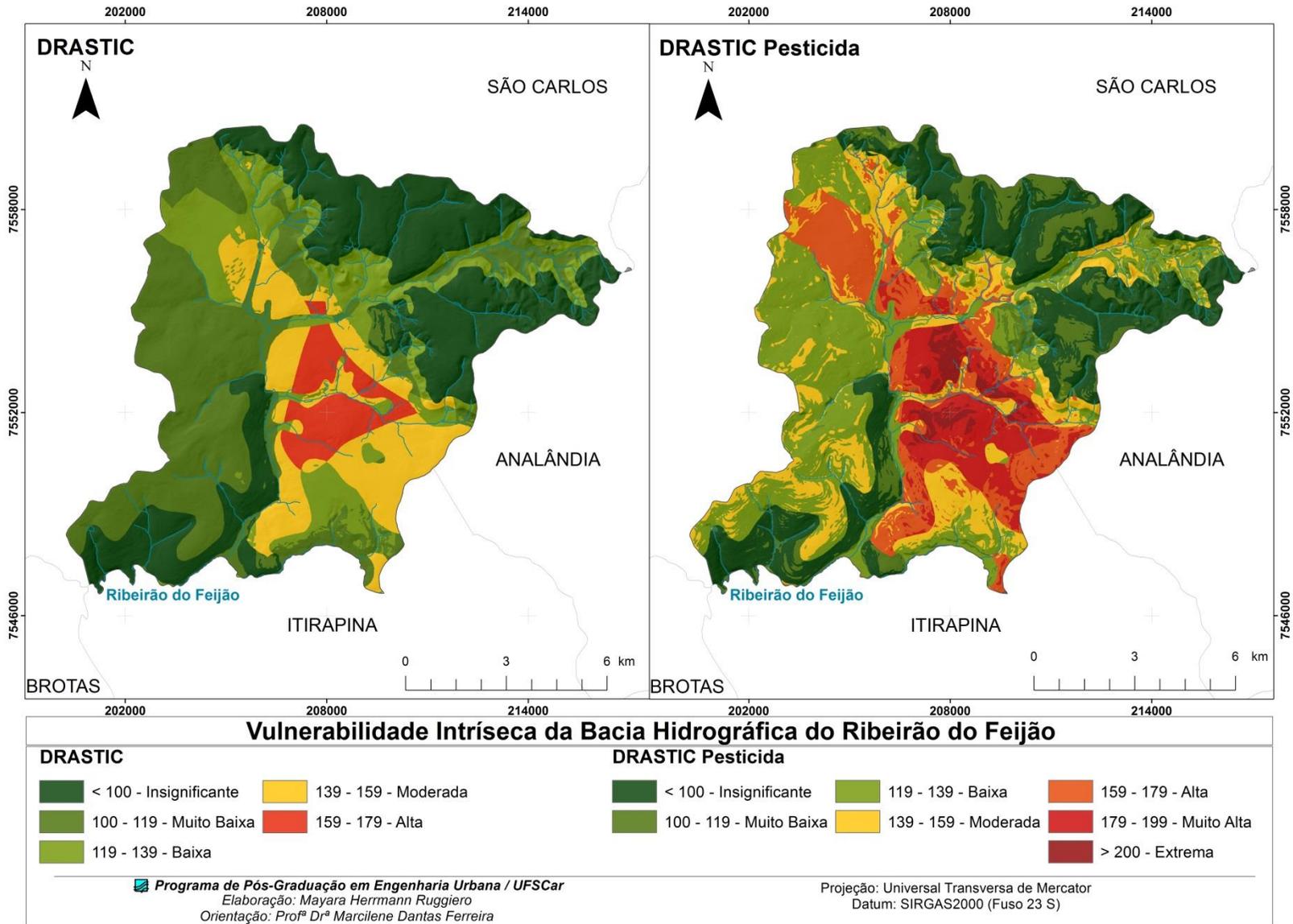
A classe alta localiza-se principalmente sobre a Formação Botucatu, em regiões com profundidades de lençol freático que variam até 9,15m. Estas classes ocupam 5,87% da área da bacia. A classe moderada também está sobre a Formação Botucatu, porém, em regiões com maiores profundidades de lençol, ocupando 14,52% da área da bacia.

O DRASTIC Pesticida, por ponderar mais os parâmetros que são diretamente influenciados por usos antropogênicos, indicou a existência de área de vulnerabilidade extrema. Esta classe ocupa 2,27% da bacia e localiza-se na porção central da área, sobre a Formação Botucatu, em locais com solos mais susceptíveis ao carreamento de contaminantes e com declividades baixas (menores que 2%).

As classes altas ocupam 21,93% da área da bacia, também estão sobre a Formação Botucatu, em locais com declividades baixas (variando entre 2 e 8%). A classe moderada ocupa apenas 15,60% da área de estudo, enquanto as classes baixas ocupam 60,20%.

Ao comparar os mapas resultantes do DRASTIC e do DRASTIC Pesticida observa-se que em alguns locais houve o aumento de classes baixas para a classe moderada. Isso foi resultante da maior ponderação para as características geológicas do solo, aliado à classificação da declividade.

Figura 53: Vulnerabilidade intrínseca da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

O Índice de Susceptibilidade (Figura 54) resultou na menor área ocupada por classes baixas (58,28% da bacia). Nessas áreas é evidente a influência da vegetação natural, além das características geológicas da Formação Itaqueri, juntamente com declividades elevadas. A classe moderada aumentou em comparação com as outras duas metodologias, ocupando 25,39% da área.

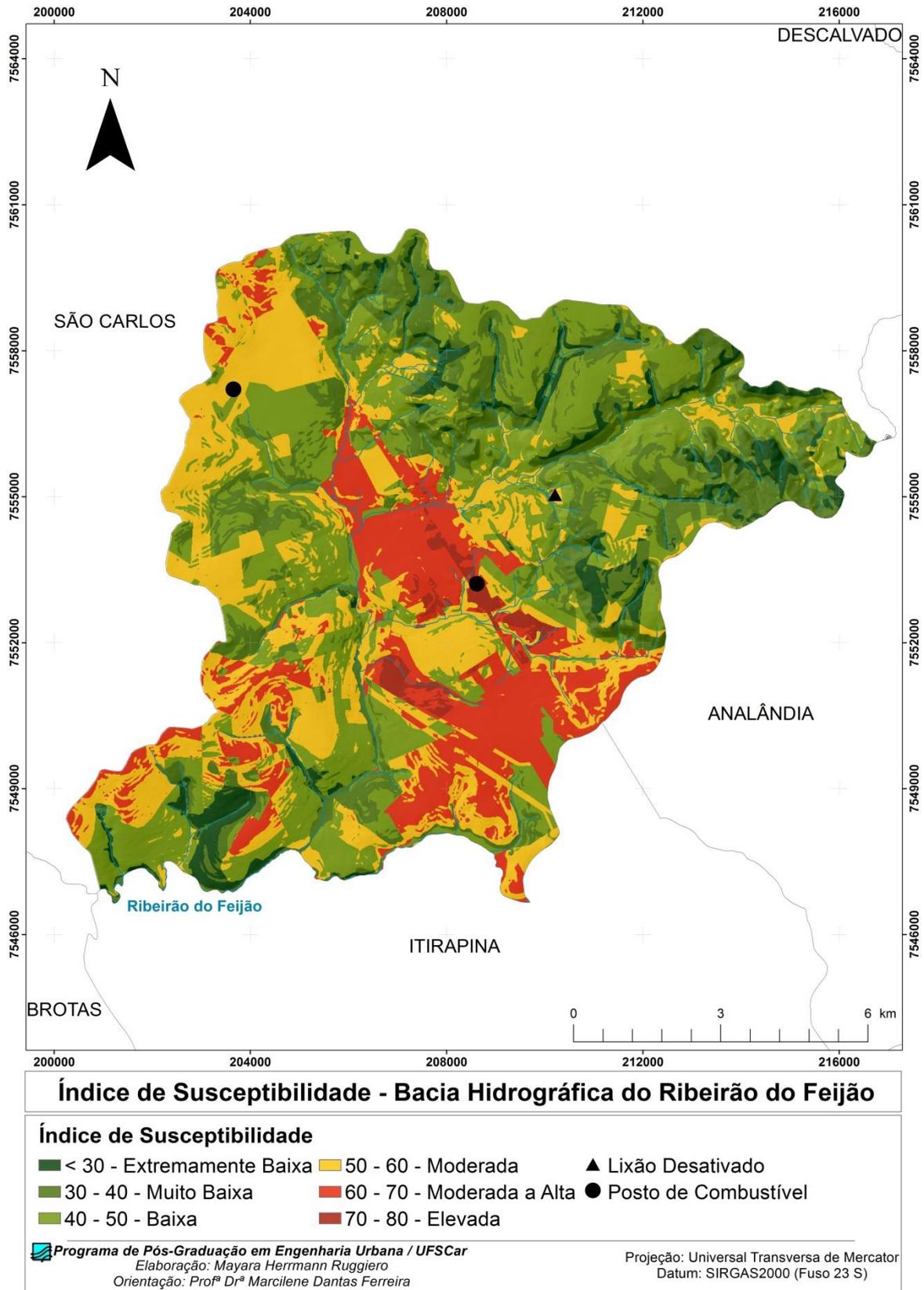
As classes altas ocupam 16,32% da área e são influenciadas pelos usos antrópicos agrícolas e urbanos localizados principalmente sobre a faixa de afloramento da Formação Botucatu.

É importante ressaltar o impacto que o tipo de ocupação do solo pode ter sobre o aquífero, sendo isto evidenciado através dos resultados do Índice de Susceptibilidade. Além disso, esta área apresenta uma situação delicada ao se tratar de contaminação do lençol freático. Velozo (2006) realizou uma investigação geológico-geotécnica através de ensaios geofísicos no local em que antes estava alocado o antigo lixão no município. Esta área localiza-se na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, sobre a Formação Botucatu e contribuiu para o aumento da susceptibilidade à contaminação, como pode ser observado na figura 50.

Os resultados do estudo de Velozo (2006) confirmaram a contaminação da água do aquífero em até aproximadamente 25m de profundidade. A autora afirma ainda que a contaminação estaria ocorrendo através da percolação de águas pluviais e outros líquidos gerados pela degradação do lixo. Este local está indicado no inventário de áreas contaminadas da CETESB, e é classificado como área contaminada com risco confirmado.

Além do local do antigo lixão, a CETESB levantou outros dois pontos de contaminação. Tais áreas são dois postos de combustível e estão indicadas na figura 50. Percebe-se que um dos pontos está localizado sobre uma área de alta vulnerabilidade e de alta susceptibilidade à contaminação, sendo que o subsolo e as águas subterrâneas são os principais meios impactados por esse tipo de atividade. Este local exige, portanto, medidas eficazes para remediar qualquer impacto que já tenha sido causado e evitar futuros problemas.

Figura 54: Índice de Susceptibilidade à Poluição da Bacia Hidrográfica do Feijão.

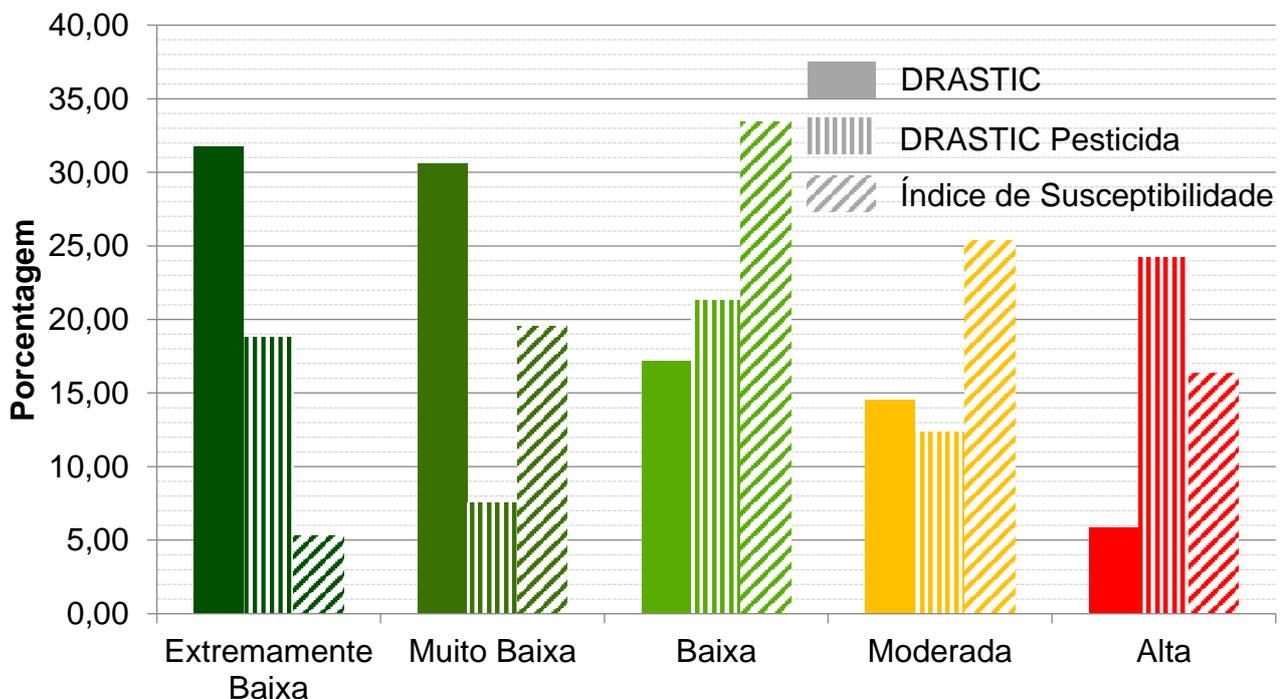


Fonte: Ruggiero, 2017.

Outra atividade identificada na bacia e que pode resultar em contaminação do aquífero é a mineração. Segundo Denúbila (2013), 20% dos processos de mineração ativos no município de São Carlos estão sobre a Formação Botucatu, necessitando de um maior cuidado para evitar processos de contaminação das águas subterrâneas. A autora identificou ainda que nas minerações localizadas sobre esta formação existem passivos ambientais como o abandono de cavas, pilha de rejeitos e bota-fora.

A figura 55 mostra a comparação da porcentagem de área ocupada por cada classe na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão. Para a elaboração do gráfico optou-se por unificar as classes altas, muito alta e extremamente altas. Percebe-se que a partir do momento que as metodologias consideram a influência de usos antropogênicos a vulnerabilidade da área aumenta. A ponderação utilizada no DRASTIC Pesticida eleva a vulnerabilidade de algumas regiões justamente por isso. Com o índice de susceptibilidade, é possível notar que as áreas com classificação extremamente baixa têm uma considerável diminuição.

Figura 55: Gráfico comparativo das porcentagens de área das classes de vulnerabilidade e susceptibilidade à contaminação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



7.5.2. Implicações das Alterações de Uso do Solo na Infiltração de Água

Diversos autores constataram que as alterações dos usos do solo, principalmente as conversões de áreas naturais para usos antrópicos, alteram a estrutura original do solo, causando impactos na infiltração de água e, conseqüentemente na recarga subterrânea. Para realizar uma análise a respeito disso nas duas bacias hidrográficas estudadas, foram elaboradas cartas de capacidade potencial de infiltração, as quais combinam as características dos materiais geológicos da região com o tipo de ocupação identificada.

Para o desenvolvimento dessas análises o uso e ocupação do solo digitalizado através da imagem do Google Earth Pro foi reclassificado para representar de uma maneira mais adequada a influência que os diferentes tipos de ocupação exercem sobre a infiltração de água. A cana de açúcar foi classificada como Cana de Açúcar Sulcada ou Sem Sulco; a pastagem em Pastagem Jovem e Pastagem Antiga; foram separados os condomínios Encontro Valparaíso e Aracê de Santo Antônio I, II e III (estes também foram considerados nos mapas dos cenários futuros) e; foram identificadas diferentes tipos de culturas, principalmente na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, sendo que esta etapa foi feita com validação em campo.

Foram elaboradas 7 cartas de capacidade potencial de infiltração (4 para a Bacia Hidrográfica do Chibarro e 3 para a do Ribeirão do Feijão), as quais representam os resultados para a ocupação atual das áreas de estudo e para os cenários projetados para 2030.

7.5.2.1. Bacia Hidrográfica do Chibarro

As cartas da Bacia Hidrográfica do Chibarro estão apresentadas nas figuras 56 e 57. Considerando a ocupação atual (Figura 56), percebe-se que a classe de potencial moderado é a que mais se destaca, ocupando uma área de 11,89km² (34,62% da área de estudo). Através dessa classe já é possível observar a influência que a ocupação antrópica exerce sobre as características do solo.

O loteamento Aracê de Santo Antônio III (Ponto 1) está localizado sobre um material inconsolidado residual da Formação Botucatu, sendo que este apresenta uma alta porosidade e uma alta porcentagem de areia. Devido às características da ocupação (lotes pequenos, com uma alta impermeabilização relacionada às

edificações) a capacidade potencial de infiltração encontrada, que deveria ser elevada por conta do material, foi moderada.

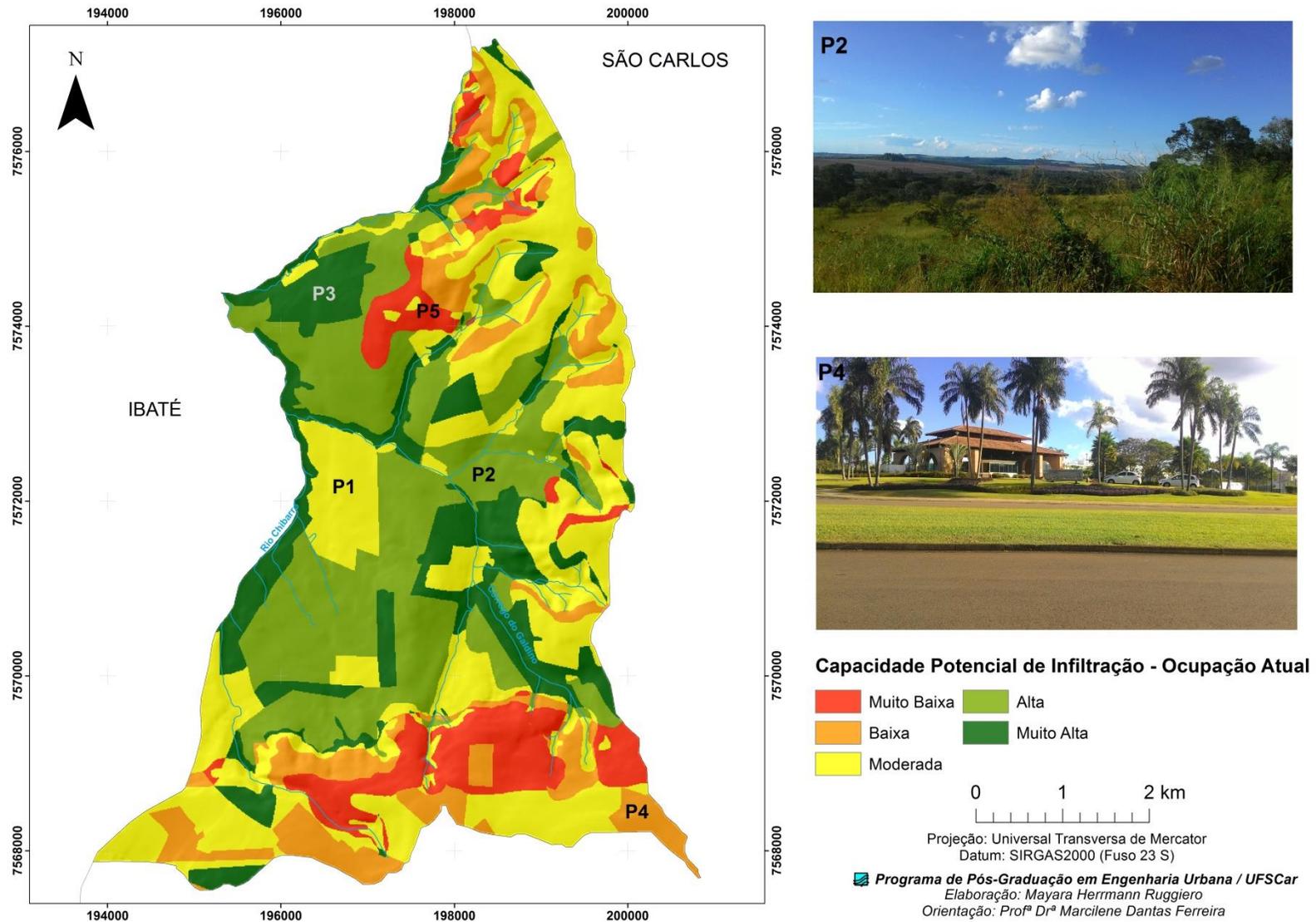
Observa-se que os loteamentos próximos ao Aracê de Santo Antônio III (Aracê de Santo Antônio I e II e Encontro Valparaíso I e II) encontram-se sobre uma região de Alta capacidade potencial de infiltração (Ponto 2). Isso ocorre devido ao tamanho dos lotes destes serem maiores do que no primeiro, e por consequência a área impermeabilizada é menor, dado espaço, inclusive, para importantes áreas de vegetação, como ocorre no Encontro Valparaíso I e II.

Ainda tratando da classe alta, esta ocupa uma área de 9,11km² (26,53% da área de estudo). Está relacionada diretamente com os materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu.

A classe Muito Alta ocupa uma área de 5,71km² (16,64% da área de estudo). Está diretamente relacionada com a presença de vegetação natural sobre materiais com alta porosidade e alta porcentagem de areia. Na figura 52 é possível observar que as áreas com uma capacidade potencial muito alta são localizadas sobre áreas de preservação permanente e fragmentos de vegetação (Ponto 3). Este resultado está de acordo com aquilo inferido por Souza (2014). A autora, ao realizar uma análise multicritério para a identificação de áreas prioritárias à infiltração na APA de Botucatu, classificou as regiões com vegetação natural com uma capacidade de infiltração muito alta, sendo que nos locais em que a vegetação natural estava sobre as formações constituintes do aquífero Botucatu, foi obtido um potencial de infiltração muito alto.

A classe baixa ocupa 4,19km² (12,21% da área de estudo). Observa-se a presença de área urbana diminui o a capacidade potencial de infiltração (ponto 4). Isso ocorre devido a elevada taxa de impermeabilização do solo e também à compactação que ocorre nas áreas que deveriam ser permeáveis.

Figura 56: Capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Chibarro. As fotos indicam a presença de



Fonte: Ruggiero, 2017.

A classe muito baixa ocupa 3,44km² (10% da área) e está relacionada principalmente com os materiais inconsolidados que apresentam baixa porosidade e baixa porcentagem de areia, convergindo para uma baixa permeabilidade (Residuais da Formação Itaqueri com Finos). Estas áreas estão principalmente sobre a ocupação agrícola com o plantio de Cana de Açúcar (ponto 5). Dependendo do seu estágio de plantio e de como o manejo da cultura é realizado, a infiltração de água nas áreas com cana de açúcar pode ser diferente. Zuquette e Palma (2006) identificaram que a cana de açúcar em seus estágios iniciais de desenvolvimento apresenta uma taxa de infiltração maior do que o plantio em estágio final.

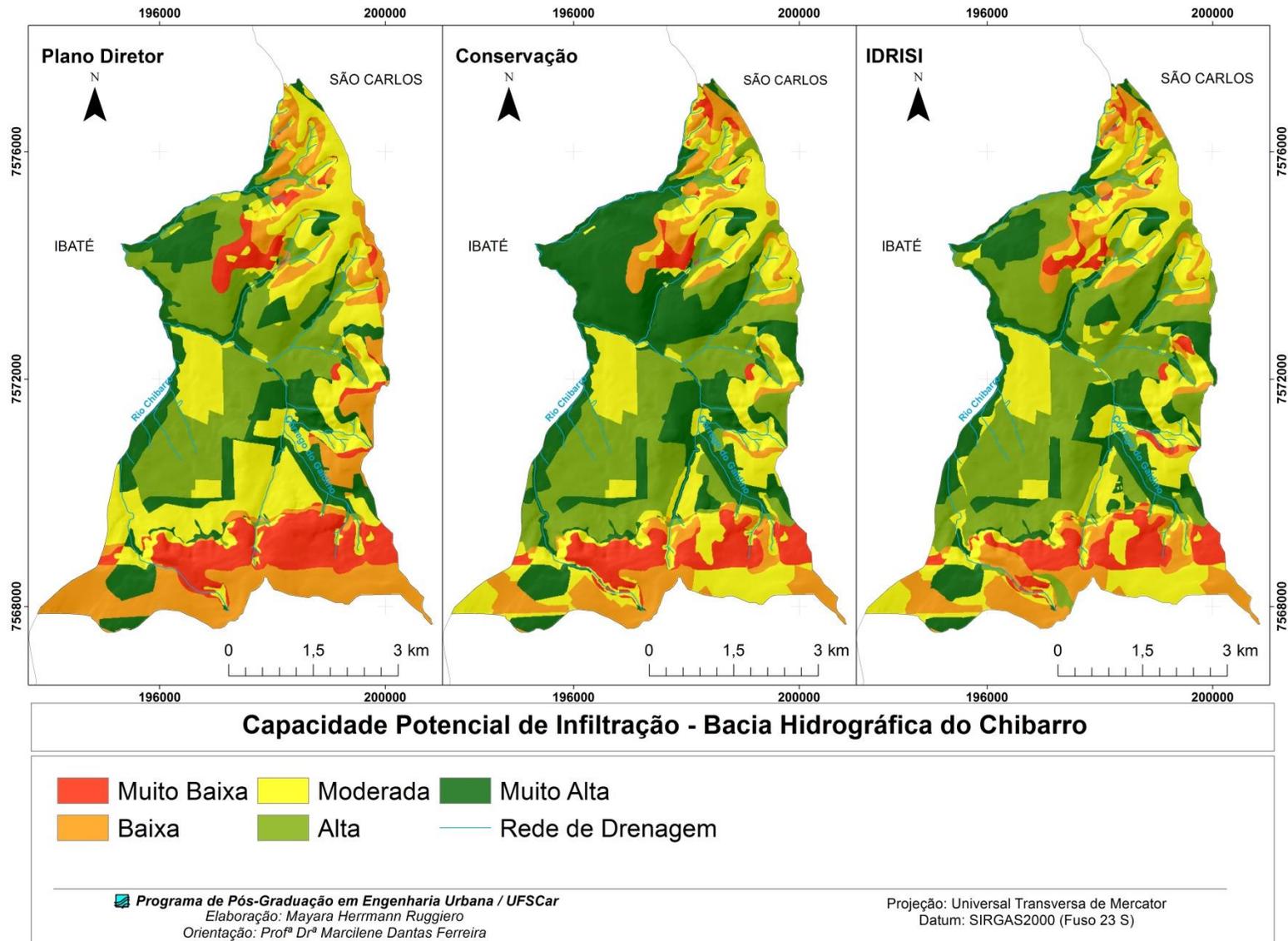
Com a elaboração das cartas de capacidade potencial de infiltração para os cenários projetados para 2030 foi possível realizar uma comparação dos resultados e verificar se as modificações dos usos do solo iriam ou não influenciar na capacidade potencial de infiltração.

O primeiro ponto a se destacar é o aumento das áreas referentes às classes baixa e muito baixa para o cenário baseado no Plano Diretor Municipal. Houve o acréscimo de 0,85km² para a classe muito baixa e 2,39km² para a classe baixa. Esse aumento ocorreu devido à projeção de uma extensa área de expansão urbana, a qual prevê lotes mínimos com tamanhos que variam de 160m² a 250m². A região que seria mais impactada é a parte sul da bacia. Junto a isso, é possível notar a diminuição da classe alta, com uma redução de 1,76km².

Ainda neste cenário é possível observar o aumento de área classificada como muito alta. Isso ocorreu devido à projeção de novos fragmentos de vegetação natural, seguindo o que ocorreu na bacia nos últimos 30 anos.

Com o cenário de conservação (Figura 57) a situação é oposta. A classe muito alta obteve um aumento de 4,33km², e este acréscimo pode ser verificado principalmente na região onde foi proposta a criação de uma área de recuperação de vegetação visando à proteção do aquífero Botucatu (ponto 1). A classe muito baixa obteve uma diminuição de 0,64km². Um ponto importante de se destacar é o aumento de 0,23km² da área da classe alta. Isso ocorreu devido à projeção de novas áreas de expansão urbana, também acompanhando as tendências de desenvolvimento da região.

Figura 57: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Chibarro.

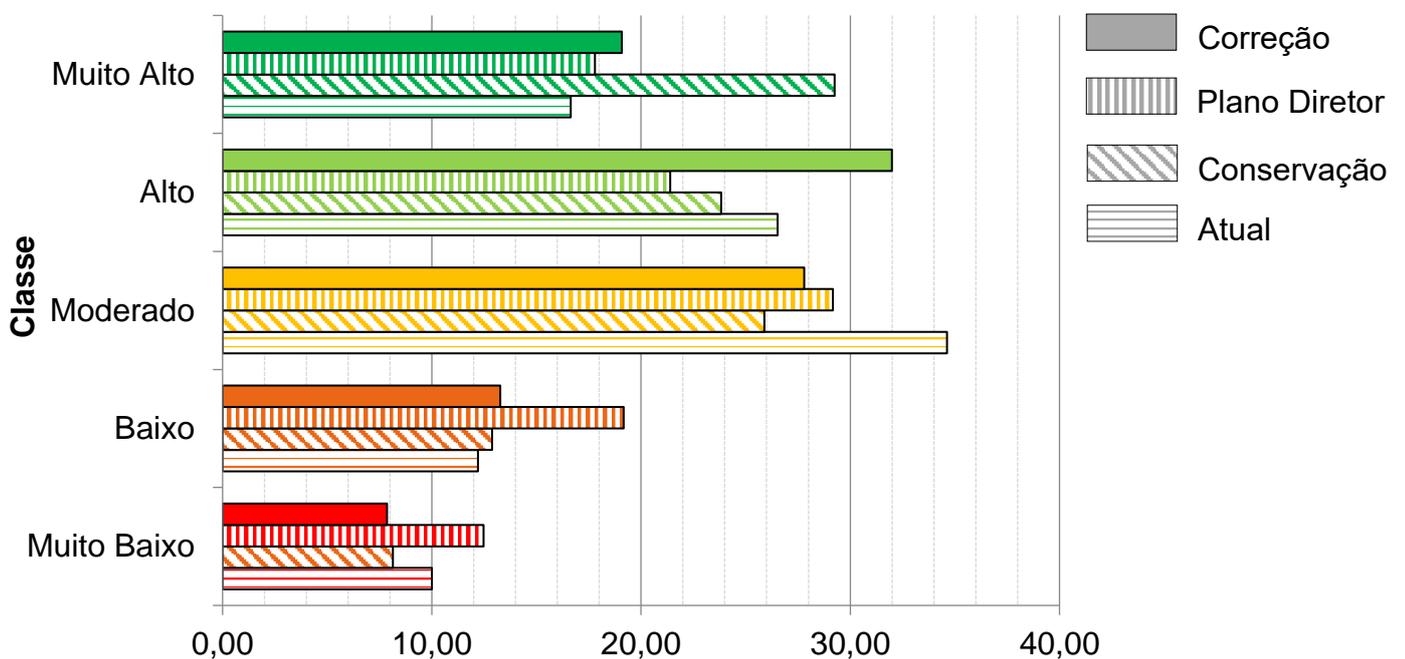


Fonte: Ruggiero, 2017.

O último cenário foi aquele que considerou apenas os padrões de modificações que foram identificados em 30 anos de análises. Um ponto importante identificado foi a diminuição da classe muito baixa em 0,74km² e o aumento das classes alta e muito alta em 1,88km² e 0,84km², respectivamente. Isso indica que se as futuras alterações de uso do solo seguirem os padrões identificados, o aumento de área de vegetação natural vai gerar novas áreas com uma maior capacidade de infiltração de água.

Mesmo apresentando tendências positivas, o poder público deve criar mecanismos e instrumentos para estimular a conservação e a recuperação dos fragmentos de vegetação natural nesta região. Porém, o que acontece é o contrário, visto a grande área de expansão urbana que está prevista no plano diretor municipal. A figura 58 mostra a comparação das porcentagens das áreas de cada classe de capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual e para os cenários propostos.

Figura 58: Porcentagens das áreas de cada classe de capacidade potencial de infiltração para a Bacia Hidrográfica do Chibarro



Fonte: Ruggiero, 2017.

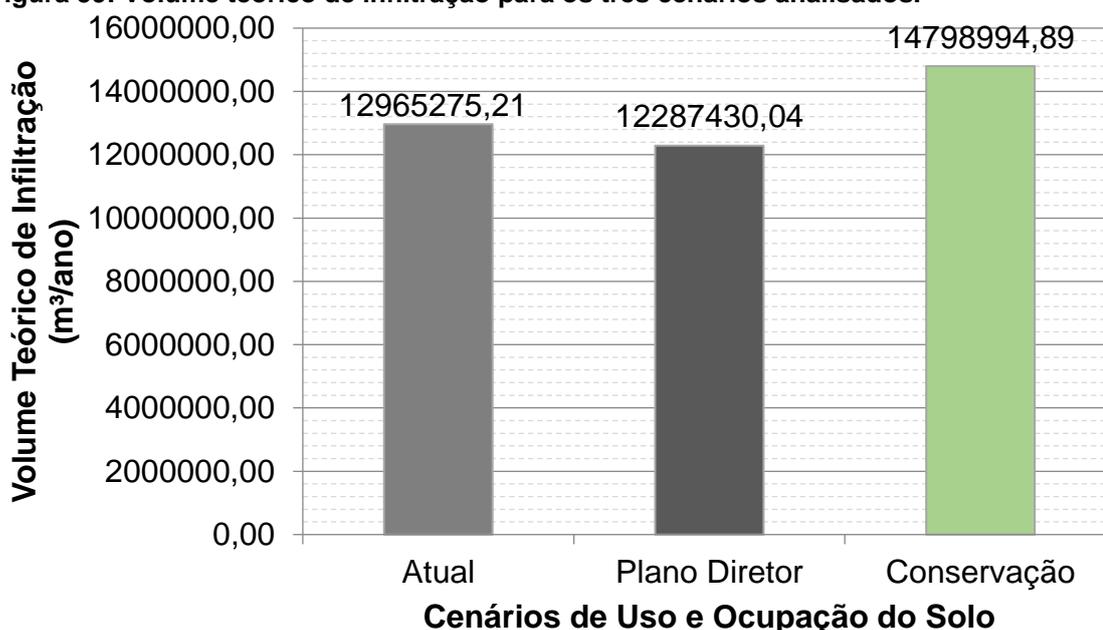
Seguindo a ideia de que as alterações de uso e ocupação do solo influenciam na infiltração, foi realizado o cálculo do volume de infiltração teórico, seguindo a metodologia proposta por Piroli (2015). O cálculo foi feito no sentido de estimar de forma teórica o volume de água que infiltraria em diferentes períodos, através da

multiplicação do volume médio anual precipitado e das áreas dos usos do solo localizados sobre a área de afloramento da Formação Botucatu, considerando, ainda a porcentagem da precipitação que cada tipo de ocupação permite que seja infiltrada, segundo Piroli (2014) e Piroli (2015).

A tabela 30 mostra os resultados encontrados para a Bacia Hidrográfica do Chibarro considerando a ocupação atual, o cenário proposto em relação ao estabelecido no plano diretor municipal e aquele considerando as diretrizes de legislações ambientais. As alterações que podem ocorrer na área de estudo devido ao planejamento municipal iriam levar à diminuição de 677.845,17m³/ano, portanto 5,41% do valor que infiltrava em 2015 poderão ser convertidos em escoamento superficial em 2030. Isso ocorre devido ao aumento da área de expansão urbana em detrimento de tipos de ocupações que contribuiriam mais com a infiltração de água (no caso desta bacia, usos agrícolas).

Ao verificar o cenário de conservação, observa-se que o volume teórico de infiltração aumentaria em aproximadamente 13,91%, com o acréscimo de 1807526,80 m³/ano. Isso é verificado devido justamente ao aumento significativo de área de vegetação natural, que contribuiria para a manutenção das características estruturais do solo, evitando processos de compactação e impermeabilização. A figura 59 mostra a comparação do volume total infiltrado em cada cenário de uso e cobertura do solo.

Figura 59: Volume teórico de infiltração para os três cenários analisados.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Tabela 30: Cálculo do volume teórico de infiltração - Bacia Hidrográfica do Chibarro.

Bacia Hidrográfica do Chibarro									
Uso do Solo	Uso Atual			Plano Diretor			Conservação		
	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração (m ³ /ano)	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração (m ³ /ano)	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração (m ³ /ano)
Pastagem	1,88	2697037,89	1348518,95	0,26	377616,66	188808,33	0,51	726071,69	363035,84
Cana de Açúcar	4,82	6902993,77	2761197,51	0,35	505440,23	202176,09	1,99	2852904,85	1141161,94
Vegetação Natural	5,03	7213890,21	5771112,17	5,19	7444160,79	5955328,63	8,97	12847799,09	10278239,27
Eucalipto	0,39	553972,31	276986,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chácaras	4,76	6820668,79	2728267,52	4,76	6820668,79	2728267,52	4,76	6820683,42	2728273,37
Água	0,18	265013,95	0,00	0,18	265085,40	0,00	0,17	243611,19	0,00
Café e Laranja	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00
Expansão Urbana	0,16	222999,3	66899,78	3,68	5274488,09	1582346,43	0,33	469119,20	140735,76
Cultivos Anuais	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo Exposto	0,07	96215,04	38486,02	2,84	4067183,93	1626873,57	0,26	368871,76	147548,71
Área Urbana	0,00	0,00	0,00	0,01	18147,35	3629,47	0,00	0,00	0,00
Total	17,29	24772791,23	12991468,09	17,29	24772791,24	12287430,04	17,29	24329061,20	14798994,89

Fonte: Ruggiero, 2017.

7.5.2.2. Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão

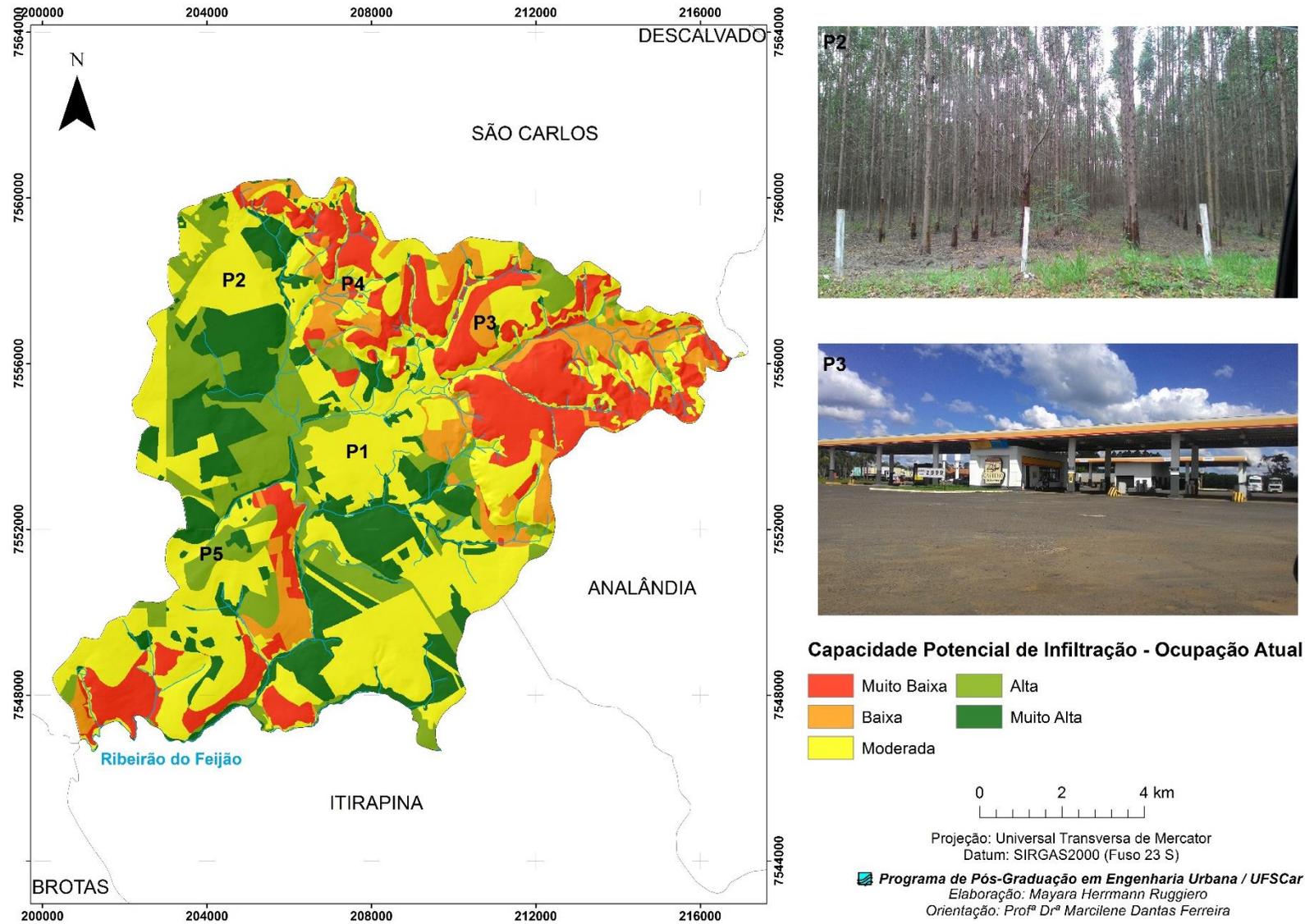
Com relação à Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, as figuras 60 e 61 representam a capacidade potencial de infiltração para a bacia. Na ocupação atual (Figura 60) também houve um destaque da classe moderada. Esta ocupa uma área de 52km² (41,21% da área da bacia) e da mesma forma que foi observado na outra bacia, o uso do solo teve uma grande influência na área dos materiais inconsolidados residuais da Formação Botucatu. A ocupação por pastagens exerceu uma pressão sobre esses materiais, fazendo com que a capacidade potencial diminuísse (Ponto 1). Isso foi observado também nos locais com plantações de Eucaliptos (Ponto 2).

Souza (2014) em suas análises também classificou as áreas com plantações de eucalipto como baixo potencial de infiltração. Lucas et al. (2012) ao avaliar a recarga do SAG em diferentes usos do solo identificou que os locais com plantações de eucalipto possuem valores muito baixos de recarga, afirmando que caso ocorra o desenvolvimento de mais áreas de silvicultura os valores de recarga poderiam diminuir consideravelmente. Esta afirmação pode ser colocada também para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, devido à presença de diversas áreas com plantio de eucalipto e também a identificação de um aumento dessas áreas entre os anos de 1985 e 2000.

As plantações de eucalipto, quando mantidas para o corte, retiram uma grande quantidade de água do solo, esta necessária para o desenvolvimento das plantas. Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão os plantios identificados são utilizados para a produção de madeira (Figura 62), levando, portando, ao déficit na infiltração de água.

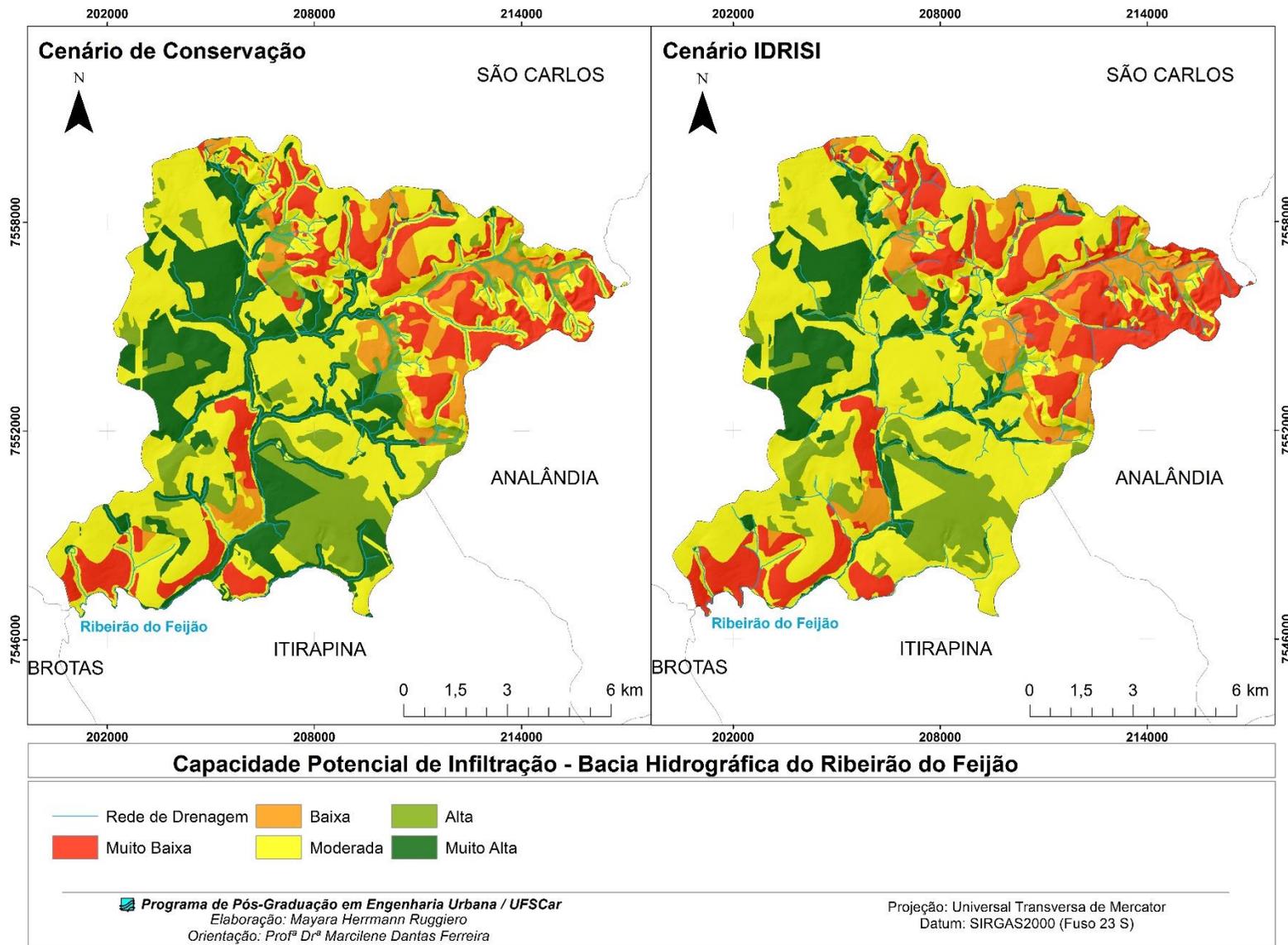
A classe muito baixa ocupa 23,32km² (18,48% da área de estudo) e foi influenciada principalmente pelas características dos materiais geológicos da região, aliado à presença marcante de pastagens e locais de expansão urbana (Ponto 3). Ressalta-se também a existência de minerações que contribuem para a diminuição do potencial de infiltração (Ponto 4). A classe baixa ocupa uma área de 10,77km² (8,53% da área) está localizada em áreas com a presença de expansão urbana e plantações de laranjas.

Figura 60: Capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão. As fotos indicam um plantio de eucalipto na área de estudo e o desenvolvimento de infraestrutura urbana.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 61: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Figura 62: Plantação de eucalipto em processo de corte na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Lucas et al. (2012) afirma que as plantações de citrus, apresentam uma baixa taxa de recarga dos aquíferos, podendo contribuir com a diminuição da recarga ao longo dos anos. Na área de estudo em questão também são encontrados cultivos de laranja, como observado na figura 63.

Figura 63: Cultivo de laranja identificado na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



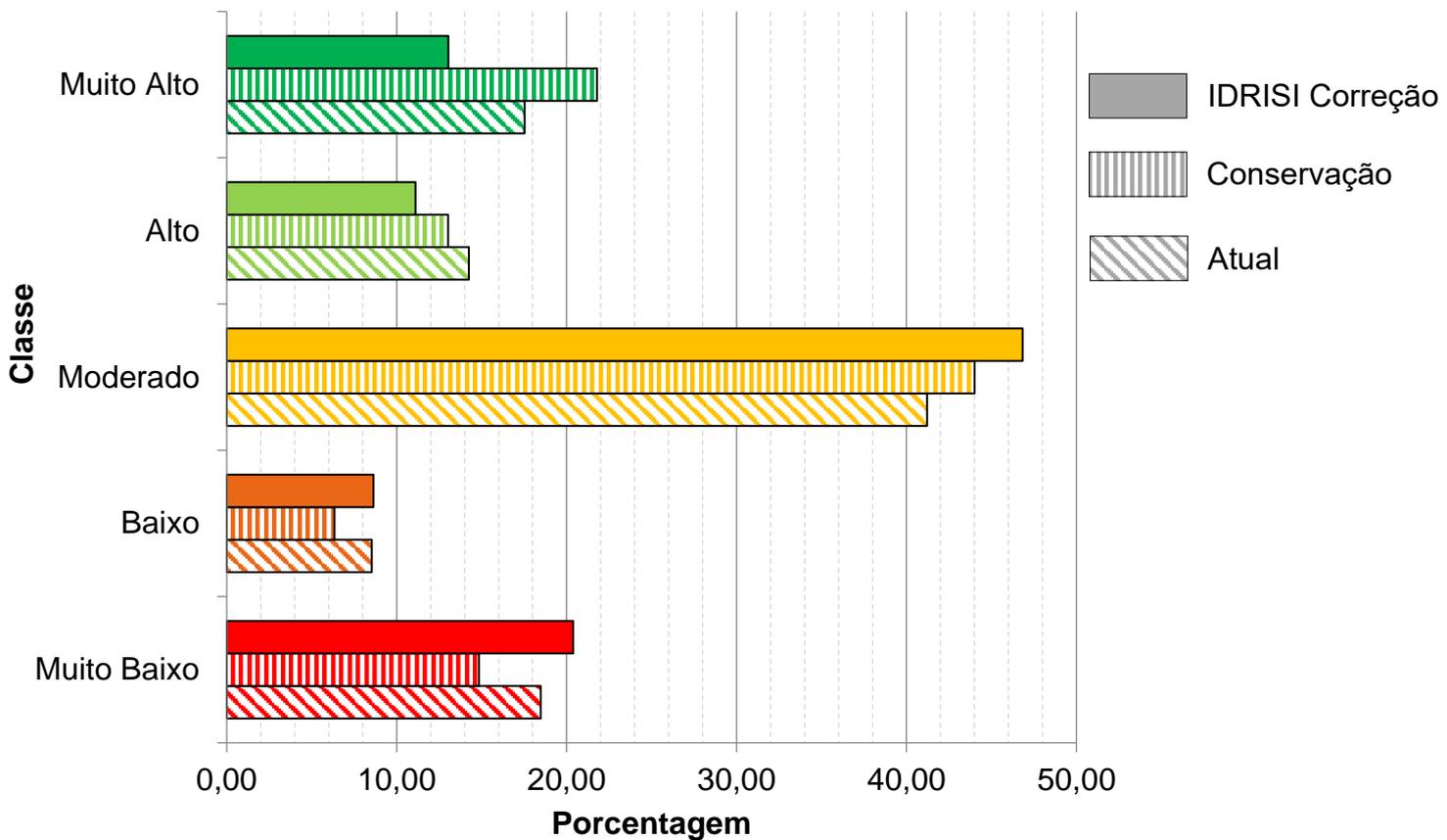
Fonte: Google Earth Pro

As áreas com uma alta capacidade potencial de infiltração ocupam 17,98km² (14,25% da área de estudo), estão localizadas principalmente sobre a Formação Botucatu e em locais com ocupação agrícola que proporcionem uma infiltração maior, como cana de açúcar em ciclos iniciais (Ponto 5). A classe muito alta ocupa uma área de 22,12km² (17,53% da área), está localizada principalmente sobre os materiais geológicos com porosidade e porcentagem de areia elevadas. A ocupação que proporciona uma capacidade potencial muito alta é a vegetação natural, podendo ser fragmentos de mata, mata ciliar ou áreas de cerrado (ponto 6)

Ao comparar os cenários projetados para 2030 com o uso atual, observa-se que o cenário de conservação (Figura 61) apresentou aumento na classe muito alta, como o esperado. Tal classe ocupa 27,55km² (21,79% da área de estudo). Esse aumento ocorreu por conta do acréscimo das áreas de recuperação de vegetação previstas na Lei Municipal nº 13.944/2006 (50 metros a partir das áreas de preservação permanente). A influência dessa faixa pode ser observada também na porção nordeste da bacia, onde houve o aumento da área classificada como moderada em detrimento da classe muito baixa.

O cenário projetado pelo software IDRISI (Figura 61), considerando os padrões de mudanças nos últimos 30 anos mostra uma situação desfavorável. Neste cenário ocorreria o aumento das classes muito baixa e baixa (25,77km² e 10,92 km², respectivamente), juntamente com a diminuição das classes alta e muito alta (14,04km² e 16,48km², respectivamente). Isso ocorreu por conta da supressão de vegetação natural para o desenvolvimento de usos antrópicos, conforme foi observado durante a análise de mudanças na área de estudo. A figura 64 mostra a comparação das porcentagens das áreas de cada classe de capacidade potencial de infiltração para a ocupação atual e para os cenários propostos.

Figura 64: Capacidade potencial de infiltração para os cenários futuros de ocupação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.



Fonte: Ruggiero, 2017.

Com relação ao cálculo do volume teórico de infiltração (Tabela 31), conforme Piroli (2015) observa-se uma diminuição de 3.121.970,80m³/ano entre 2015 e o cenário proposto para 2030, seguindo os padrões de alterações que foram observados na área. A diminuição da área de vegetação natural aliado ao aumento de usos antrópicos, principalmente áreas de expansão urbana, cultivo de cana de açúcar e pastagem, exerceu uma grande influência nesse resultado. Assim, considera-se que ocorrerá uma diminuição de aproximadamente 5,11% no volume de água infiltrado, aumentando, portanto, o escoamento superficial.

Ao comparar o cenário de conservação observa-se que o aumento da área ocupada por vegetação contribui consideravelmente com o incremento do volume teórico de infiltração. Em relação ao cenário atual, o aumento da infiltração seria de 3,63%. Considerando o cenário de correção daquele proposto no software IDRISI Selva, o aumento seria de 9,55%.

Tabela 31: Cálculo do volume teórico de infiltração para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão.

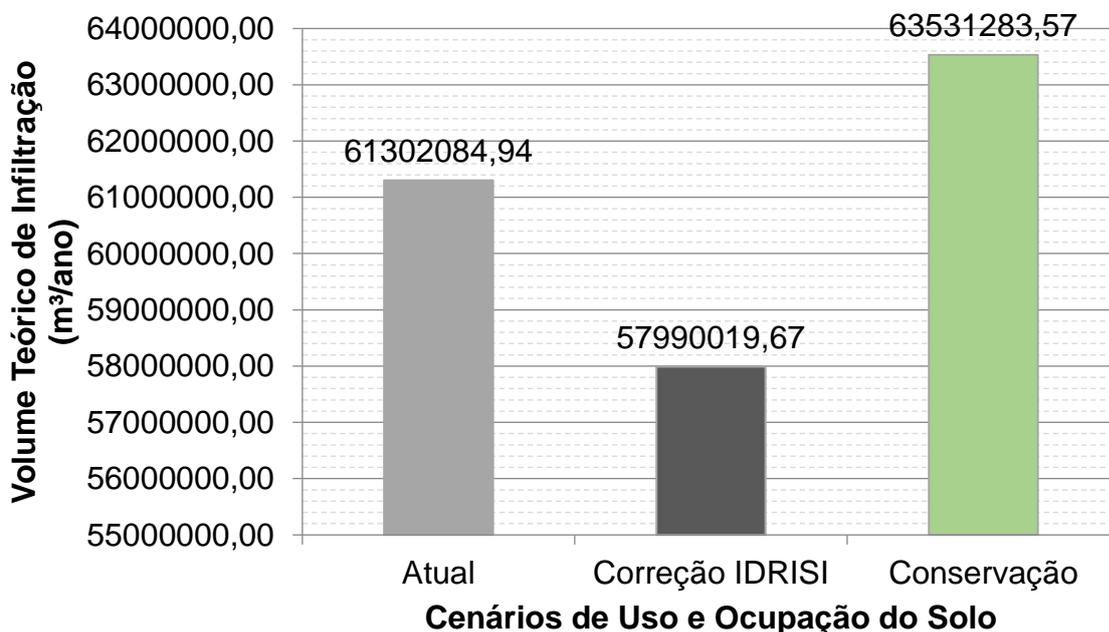
Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão									
Uso do Solo	Atual			Correção IDRISI			Conservação		
	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração	Área (km ²)	Área x Precipitação	Precipitação x % Infiltração
Pastagem	20,21	28959899,37	14479949,68	26,00	37257811,78	18628905,89	16,55	23720895,90	11860447,95
Cana de Açúcar	7,39	10592069,64	4236827,86	10,87	15574459,29	6229783,72	9,74	13950545,26	5580218,10
Vegetação Natural	22,73	32572248,82	26057799,06	17,07	24467289,76	19573831,80	29,50	42267008,63	33813606,90
Eucalipto	13,10	18777382,29	9388691,15	7,82	11204993,84	5602496,92	6,38	9144765,70	4572382,85
Mineração	0,04	57709,73	11541,95	0,05	76303,97	30521,59	0,05	74943,40	29977,36
Água	0,10	143878,29	0,00	0,10	139602,47	0,00	0,10	139602,11	0,00
Café e Laranja	1,19	1700364,45	850182,23	1,67	2394976,84	1197488,42	1,02	1455445,02	727722,51
Expansão Urbana	5,26	7539590,44	2261877,13	6,83	9793065,95	2937919,79	6,31	9042623,82	2712787,15
Cultivos Anuais	0,33	475236,16	190094,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo Exposto	6,67	9562803,56	3825121,42	6,61	9472678,88	3789071,55	7,39	10585351,87	4234140,75
Área Urbana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
Total	77,03	110381182,76	61302084,94	77,03	110381182,77	57990019,67	77,03	110381181,71	63531283,57

Fonte: Ruggiero, 2017.

A figura 65 apresenta o gráfico comparativo dos volumes teóricos de infiltração para os três cenários de ocupação. É evidenciado que a manutenção dos padrões de mudança de uso e ocupação do solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão vai acarretar em um déficit do volume de água que vai atingir o aquífero, comprometendo a recarga subterrânea.

Pesquisas como a de Velozo (2006), Costa et al. (2012), Guidolini et al. (2013) e Failache (2015) mostram que a Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão é uma área vulnerável, que apresenta tendências de expansão urbana principalmente ao longo das rodovias, e que sofre pressões relacionadas tanto a usos agrícolas quanto a usos urbanos. A Bacia Hidrográfica do Chibarro, por outro lado, apresenta uma tendência de melhora da qualidade ambiental, porém, a possibilidade de expansão urbana prevista em lei pode acarretar em uma maior pressão sobre o meio natural, comprometendo os recursos subterrâneos.

Figura 65: Volume teórico de infiltração para os três cenários analisados.



Fonte: Ruggiero, 2017.

8. Conclusão

As bacias hidrográficas selecionadas para a realização da pesquisa apresentam características diferentes quando considerado aquilo que foi definido no Plano Diretor Municipal. A Bacia Hidrográfica do Chibarro possui uma grande área de expansão prevista, sendo um dos principais eixos de desenvolvimento do município. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão é uma área de proteção de mananciais, justamente por ser um manancial de captação de água para abastecimento da população.

8.1. Quanto à Metodologia

A utilização dos sistemas de informação geográfica para o mapeamento do uso e ocupação do solo, aliado com a utilização de imagens de satélite se mostrou extremamente eficaz para o propósito desta pesquisa. No entanto ressalta-se a necessidade de um conhecimento prévio da área de estudo para a identificação de alguns tipos de usos do solo mais específicos. A validação em campo daquilo que foi digitalizado também é necessária para uma representação adequada da realidade.

Ao considerar o planejamento territorial de um município, é possível inserir o geoprocessamento como uma ferramenta importante para a tomada de decisão. As análises realizadas com o Land Change Modeler mostram que entender o padrão de desenvolvimento de uma localidade é de extrema importância para saber quais políticas públicas devem ser adotadas em cada região municipal, sendo que considerar a homogeneidade do território não é uma alternativa eficaz.

O LCM é uma boa ferramenta para realizar análises de mudanças de usos do solo. Os resultados se mostraram consistentes e foram de encontro com o que já havia sido encontrado em outras pesquisas. Ao se tratar da elaboração de cenários futuros, deve se considerar a realização de correções nos resultados gerados pelo LCM, visto que em algumas áreas ocorreram modificações que não aconteceriam na realidade.

A comparação das metodologias para a elaboração das cartas de vulnerabilidade mostrou que considerar a influência do uso e ocupação do solo é necessária para a obtenção de resultados mais próximos da realidade. A metodologia proposta para a elaboração das cartas de capacidade potencial de

infiltração gerou resultados condizentes com o que se esperava: as alterações da ocupação do solo influenciam na infiltração de água.

8.2. Quanto aos Produtos Obtidos

A pesquisa mostrou que mesmo sendo considerada uma zona de expansão urbana, a Bacia Hidrográfica do Chibarro apresenta um aumento de vegetação com o tempo, sendo este atribuído a aplicação de leis federais relacionadas a autuação por supressão de vegetação. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, por outro lado, é uma área de proteção e apresentou perda de vegetação nos últimos 30 anos, contradizendo aquilo que é especificado em leis municipais, estaduais e federais.

A elaboração dos cenários de ocupação futura para as bacias hidrográficas mostram que a aplicação de instrumentos que visem à recuperação da vegetação natural seria o ideal para a preservação dos recursos hídricos. Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, especificamente, é observado que se a legislação fosse seguida exatamente como deveria ser a situação seria extremamente favorável para a manutenção das reservas subterrâneas.

Ao tratar da contaminação das águas subterrâneas, é observado que ambas as áreas de estudo apresentam uma elevada vulnerabilidade à contaminação, sendo isso atribuído às suas características do meio físico, mas com uma forte influência dos tipos usos do solo que são identificados. Observou-se que ao considerar o uso do solo nas análises de vulnerabilidade ocorreu o aumento das classes altas e a diminuição das baixas. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro o IS indicou que 15,29% da área possui uma susceptibilidade alta.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, o DRASTIC Pesticida indicou 21,93% da área é ocupada por classes altas. O IS mostrou que 16,15% da área é altamente susceptível à contaminação, enquanto o DRASTIC indicou apenas 5,87%.

Com relação à capacidade potencial de infiltração, foi identificado que os diferentes tipos de uso do solo afetam de forma distinta a permeabilidade. Observou-se que nas duas bacias as mudanças de usos do solo podem afetar a quantidade de água que infiltra e é convertida em recarga.

O cálculo do volume teórico de infiltração indicou que na Bacia Hidrográfica do Chibarro as alterações previstas no Plano Diretor municipal iriam ocasionar a

diminuição de 5,41% do volume de água que iria infiltrar, enquanto que um cenário de conservação iria aumentar o volume infiltrado em 13,91%.

Na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão os cálculos mostraram que a continuidade das mudanças identificadas na área iriam diminuir o volume de infiltração em 5,11%, enquanto que se houvesse uma atuação do poder público no sentido de fazer valer as especificações das legislações ambientais o volume infiltrado iria aumentar em 3,63%.

A análise multitemporal do uso e ocupação do solo juntamente com informações de permeabilidade do solo possibilitou a produção de informações sobre a influência das modificações antrópicas sobre a recarga do Aquífero Botucatu, permitindo, também, inferir sobre o que acontecerá futuramente na área, através dos padrões de uso e ocupação do solo identificados atualmente.

Assim, considera-se que o objetivo deste trabalho foi atingido, visto que foi possível verificar que as alterações de ocupação do solo, principalmente aquelas relacionadas às atividades antrópicas afetam as características originais do solo e, por consequência, modificam os padrões de infiltração de água, além de acarretar na contaminação do lençol freático.

8.3 Quanto à Aplicação dos Produtos Obtidos

Para um adequado planejamento do território municipal diversos fatores devem ser levados em consideração. Através dos documentos elaborados durante esta pesquisa, é possível embasar o planejamento de áreas específicas do município.

As cartas de vulnerabilidade de aquífero e de capacidade potencial de infiltração indicam, nas duas bacias, as regiões em que devem ser criadas políticas voltadas à recuperação e conservação do ambiente natural, voltadas à manutenção das reservas hídricas, tanto superficiais quanto subterrâneas. Com relação à vulnerabilidade, o mapeamento mostra os locais em que deve ser feito um maior controle relacionado a contaminantes.

Foi observado que as áreas ocupadas pelo afloramento da Formação Botucatu são as que devem ter um maior controle. Na Bacia Hidrográfica do Chibarro os locais ocupados por loteamentos devem ter uma maior atenção, devido a elevada vulnerabilidade que esta região apresenta. Na Bacia Hidrográfica do

Ribeirão do Feijão a atenção deve ser voltada principalmente para as regiões sul, sudeste e central, devido principalmente ao desenvolvimento de indústrias e atividades potencialmente contaminantes no eixo da rodovia Washington Luiz.

O mapeamento do uso e ocupação do solo, bem como a identificação das tendências de alterações temporais também fornecem base para o poder público na tomada de decisão. Através da identificação das áreas com supressão de vegetação irregular é possível fomentar ações objetivas, buscando a regularização de acordo com a legislação.

Assim, considera-se que a junção de conhecimentos relacionados às ciências ambientais, geológicas e geotécnicas com aqueles referentes à engenharia e planejamento urbano podem gerar um melhor aproveitamento de espaço, além de contribuir com o adequado desenvolvimento municipal, garantindo o crescimento regional e a manutenção de recursos essenciais para a população.

9. Referências

ADANE, Z. A.; GATES, J. B. Determining the impacts of experimental forest plantation on groundwater recharge in the Nebraska Sand Hills (USA) using chloride and sulfate. **Hydrogeology Journal**. v. 23, n. 1, p. 81-84, 2014.

ALAM, F.; UMAR, R.; AHMED, S.; DAR, F. A. A new model (DRASTIC-LU) for evaluating groundwater vulnerability in parts of central Ganga Plain, India. **Arab J Geosci**. v. 7, n. 3, p. 927-937. 2014. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12517-012-0796-y>>. Acesso em: jul. 2017.

AMORIM, J. A. F. de. **Análise e modelação da mudança da ocupação e uso do solo – Caso de estudo da bacia hidrográfica do rio Vez**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do território). Escola Superior Agrária de Ponte de Lima. 2015. Disponível em: <http://repositorio.ipv.pt/bitstream/123456789/1441/1/Joana_Amorim_13854.pdf>. Acesso em: jan. 2016.

ARAÚJO, L. M. de; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. **Arcabouço hidrogeológico do aquífero gigante do MERCOSUL (Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai): Formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó**. 1995.

AREENDRAN, G.; RAJ, K.; MAZUMDAR, S.; SHARMA, A. Land use and land cover change analysis for Kosi River wildlife corridor in Terai Arc Landscape of Northern India: Implications for future management. **Tropical Ecology**. v. 58, n. 1, p. 139-149. 2017. Disponível em: <http://www.tropecol.com/pdf/open/PDF_58_1/13.%20Areendran%20et%20al..pdf>. Acesso em: set. 2017.

BARTAZ, G.; ZAHARAKI, D.; DOULA, M.; KOMNITSAS, K. Evaluation of groundwater vulnerability in a Greek island using GIS-based models. **Desalination and Water Treatment**. v. 67, p. 61-73. mar. 2016. Disponível em: <http://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_67/67_2017_61.pdf>. Acesso em: set. 2017.

BATISTA, J. L. O.; SILVA, A. de B.; SANTOS, R. L. Procedimentos metodológicos para o mapeamento da cobertura e uso do solo da carta SC-24-Z-C-I-3, utilizando geotecnologia. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 3. **Anais...** Recife, 2010. Disponível em: <https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/CartografiaeSIG/Cartografia/A_190.pdf>. Acesso em: març. 2016.

BEATO, D. A. C.; MEDEIROS, M. J.; DREWS, M. G. P.; DUTRA, G. M. Impactos urbanos em águas subterrâneas – Bacia da Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte – MG. **Rev. Águas Subterrâneas**. n. 7. Maio, 2003.

BORGES, A. F.; TIMBÓ, M. A.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C. Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros.

Geografias. Belo Horizonte. v. 12, n. 1, p. 45-63. 2016. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/776>>. Acesso em: jul. 2017.

CALIJURI, M. L.; CASTRO, J. de S.; COSTA, L. S.; ASSEMAN, P. P.; ALVES, J. E. M. Impact of land use/ land cover changes on water quality and hydrological behavior of an agricultural subwatershed. **Environ Earth Sci**. p. 5373-5382. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12665-015-4550-0>>. Acesso em: jan. 2016.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2ª Ed. São José dos Campos-SP: INPE, 1998.

CERDEIRA, A. L.; PESSOA, M. C. P. Y.; SANTOS, N. A. G. dos; LANCHOTE, V. L. Lixiviação de atrazina em solo em área de recarga do Aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Herbicidas**. v. 4, n. 2, p. 92-101, 2005.

COSTA, C. W. **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**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

COSTA, C. W., DUPAS, F. A., PONS, N. A. D. Regulamentos de uso do solo e impactos ambientais: avaliação crítica do plano diretor participativo do município de São Carlos, SP. **Geociências**, UNESP, 2012.

COSTA, C. W.; DUPAS, F. A.; CESPEDES, J. G.; SILVA, L. F. Monitoramento da expansão urbana, cenários futuros de crescimento populacional e o consumo de recursos hídricos no município de São Carlos, SP. **Geociências**. 2013. São Paulo. v. 32, n. 1, p. 63-80. 2013. Disponível em: <<http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7265/6709>>. Acesso em: jan. 2017.

COSTA, C. W.; LORANDI, R.; DUPAS, F. A. Legislação municipal e a proteção das áreas de recarga em mananciais urbanos: São Carlos, SP. In: Congresso Novos Direitos. 1. **Anais...** São Carlos, 2015. Disponível em: <http://www.novosdireitos.ufscar.br/congresso/copy8_of_ANAISDOICONGRESSONO_VOSDIREITOS.pdf>. Acesso em: mar. 2016.

COSTA, C. W.; MORAES, M. C. P. de; CANÇADO, C. J.; GUERRERO, J. V. R.; MARANGON, F.; LORANDI, R.; LOLLO, J. A. de; MOSCHINI, L. E. Potencial de contaminação de aquíferos por atividades antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio – Município de Leme – SP. **RBRH**, v. 20, n. 1, p. 218-225. jan/mar, 2015.

COUTINHO, H. L. da C.; LEITE, A. A. S.; PARAIBA, L. C.; CERDEIRA, A.; FILIZOLA, H.; SILVA, E. F. da; GOMES, M. A. F. **Análise espacial do potencial de lixiviação de herbicidas em áreas de recarga do Aquífero Guarani na alta bacia do Rio Taquari, MS**. 2008. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/bkp/arquivos/1934241170.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

DELGADO, M. I.; GASPARI, F. J.; KRUSE, E. E. Land use changes and sediment yield on a hilly watershed in Central-East Argentina. **Soil & Water Res.** v. 10, p. 189-197. 2015. Disponível em: <<http://agriculturejournals.cz/publicFiles/157657.pdf>>. Acesso em: jan. 2016.

DENÚBILA, L.A. **Alterações ambientais associadas à mineração no município de São Carlos (SP), utilizando AHP e SIG.** 2013. 314f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DERISIO, J.C. **Introdução ao controle de poluição ambiental.** São Paulo. Oficina de Textos. 4 edição. 2012.

EASTMAN, J. R. **Idrisi selva: manual version 17.** Worcester, MA: Clark University, 2012

ESRI. (Environmental Systems Research Institute). **ArcGIS for the desktop 10.2.2,** 2013

ESTRADA, A. F. D.; ESTRADA, J. A. F. D. A utilização de sistema de informação geográfica como suporte para a gestão ambiental: um breve levantamento teórico-conceitual. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão. 9. 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: FIRJAN, 2013. p. 2-18. Disponível em: <http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg9/anais/T13_2013_0004.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

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 em Ciências). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.

FAILACHE, M. F. **Aplicação de duas metodologias de zoneamento geoambiental: Ribeirão do Feijão (São Carlos, SP).** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2015.

FERREIRA, G. T. **O uso de técnicas geoestatísticas para o mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero guarani em área de recarga. Aplicação na região de Ribeirão Bonito – SP.** 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Rio Claro, 2014.

FILHO, A. O. S.; RAMOS, J. M.; OLIVEIRA, K. de; NASCIMENTO, T. A evolução do Código Florestal Brasileiro. **Ciências Humanas e Sociais Unit.** v.2, n. 3, p. 271-290. Aracaju, 2015.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas.** Oficina de Textos, 2016.

FRANTZ, L. C.; SILVA, J. L. S. da; CAMPONOGARA, I.; **SANTOS, E. F. dos.** **Caracterização de áreas de recarga e descarga do SAG em Rivera/Livramento e**

Quaraí/Artigas. 2004. Disponível em: <
<http://jararaca.ufsm.br/websites/labhidro/download/133.pdf>>. Acesso em: jan. 2015.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F.; SPADOTTO, C. A. Classificação das áreas de recarga do sistema Aquífero Guarani no Brasil em domínios pedomorfoagroclicmáticos – subsídio aos estudos de avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas. **Revista do Departamento de Geografia.** São Paulo. v. 18, p. 67-74. 2006. Disponível em: <
<http://citrus.uspnet.usp.br/rdg/ojs/index.php/rdg/article/view/37/27>>. Acesso em: jan. 2015.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; PEREIRA, A. S.; MATALLO, M. B.; LUCHINI, L. C. Movimento do herbicida tebutiuron em dois solos representativos das áreas de recarga do Aquífero Guarani. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande. v. 10, n. 2, p. 479-483. 2006. Disponível em: <
<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v10n2/v10n2a32.pdf>>. Acesso em: jan. 2015.

GOMEZ, M. L. & MARTINEZ, D. E., Municipal Waste management and groundwater contamination processes in Cordoba Province, Argentina. **AmbiAgua**, vol 5 No 3 pp 28 – 46 2010. Disponível em: < <http://www.ambiagua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/viewArticle/422>>. Acesso em: mai. 2015.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Minuta de lei específica da área de proteção e recuperação da zona de afloramento do manancial SISTEMA AQUÍFERO GUARANI – APRM –SAG.** Disponível em: <
<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7370/minuta.pdf>>. Acesso em: mai. 2016.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Subsídio ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.** Caderno do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos. Nº 5. São Paulo, 2011.

GUIDOLINI, J. F.; PEDROSO, L. B.; ARAÚJO, M. V. N. Análise temporal do uso e ocupação do solo na microbacia do Ribeirão do Feijão, município de São Carlos – SP, entre os anos de 2005 e 2011. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** SBSR. Foz do Iguaçu, 2013.

HORN, J. F. C. **Regime hidrológico de duas microbacias contíguas: um comparativo entre uso urbano e rural.** 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado). Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

INVERNIZZI, A. L. **Caracterização hidrogeoquímica do aquífero Botucatu, no setor médio da Bacia Hidrográfica Mogi-Pardo.** 2001. Dissertação (Mestrado em geoquímica e geotectônica). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. Cadernos de Educação Ambiental 1 - As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA. 3ª edição. São Paulo, 2012. Disponível em:

<<http://www.ambiente.sp.gov.br/publicacoes/files/2013/04/01-aguas-subterraneas-2012.pdf>>. Acesso em: nov. 2015.

KEMERICH, P. D. C.; SILVA, J. L. S.; BARROS, G.; BORBA, W. F.; UCKER, F. E.; FOLETTO, C. V. Caracterização química da água subterrânea em área ocupada por cemitério: uso da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X por energia dispersiva (EDXRF). **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 3, p. 166-182, 2012.

LANDIS, J.R., KOCK, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.

LEH, M.; BAJWA, S.; CHAUBEY, I. Impact of land use change on erosion risk: an integrated remote sensing, geographic information system and modeling methodology. **Land Degrad. Develop.** v. 24, p. 409-421. 2013.

LEMOS, F. P. de O. **Elaboração de carta de vulnerabilidade: contaminação das águas subterrâneas região da folha IBGE – Ibaté – SP**. 2010. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

LERNER, D. N. Identifying and quantifying urban recharge: a review. **Hydrogeology Journal**. p. 143-152. 2002.

LOMBA, C. C. P. **A gestão do sistema Aquífero Guarani na Argentina**. 2008. Disponível em: <<http://www.abagr.com.br/media/pdf/projetoaquiferoquaranimemoria.pdf#page=57>>. Acesso em: jan. 2015.

LÓPEZ-GRANADO, E.; MENDOZA, M. E.; GONZÁLEZ, D. I. Linking geomorphologic knowledge, RS and GIS techniques for analyzing land cover and land use change: a multitemporal study in the Cointzio watershed, Mexico. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 1, p. 18-37, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-993X2013000100003&script=sci_arttext>. Acesso em: jan. 2015.

LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletín Geológico y Minero**. 2012. v. 123, n. 3, p. 311-323. 2012.

LUIZ, C. H. P. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço**. 2014. 141 f. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

MAITRE, D. C. Le; KOTZEE, I. M.; O'FARRELL, P. J. Impacts of land-cover change on the water flow regulation ecosystem service: Invasive alien plants, fire and their policy implications. **Land Use Policy**. v. 36, p. 171-181. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837713001373>>. Acesso em: fev. 2016.

MALDANER, C. H. **Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP)**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

MARTELI, A. N. **Processos geodinâmicos associados a mudanças de uso da terra – Ao caso da Microbacia do Córrego Caçula (Ilha Solteira – SP)**. 2015. 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Ilha Solteira, 2015.

MAZIERO, T. A.; WENDLAND, E. Avaliação da recarga subterrânea de bacias urbanas no município de São Carlos, SP. **Águas Subterrâneas**. n. 1. 2005. Disponível em: <http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23197/15308>>. Acesso em: Jun. 2015.

MEDEIROS, J. S. de.; CÂMARA, G. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1-35. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.15.08/doc/cap10aplicacoesambientais.pdf>>. Acesso em: jan. 2015

MENDONÇA, J. L. G. de; GUTIERRE, T. M. C. Os aquíferos Botucatu e Pirambóia no Estado de São Paulo: novos mapas de isóbatas do topo, espessura e nível d'água. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, 1998. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22304/14647>>. Acesso em: Jan. 2015.

MENDONÇA, L. A. R.; VÁSQUEZ, M. A. N.; FEITOSA, J. V.; OLIVEIRA, J. F. de; FRANCA, R. M. da; VÁSQUEZ, E. M. F.; FRISCHKORN, H. Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 14, n. 1, p. 89-98. jan/mar. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n1/v14n1a10>>. Acesso em: jan. 2015.

MENEZES, J. P. C. de. **Influência do uso e ocupação da terra na qualidade da água subterrânea e sua adequação para o consumo humano e uso na agricultura**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santos, Alegre – ES, 2012.

MENEZES, J. P. C. de; BERTOSSI, A. P. A. B; SANTOS, A. R.; NEVES, M. A. Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. **Eng. Sanit. Ambient.** v. 19, n. 2, p. 173-186. abr/jun, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522014000200173&script=sci_arttext>. Acesso em: jan. 2015.

MESQUITA, M. da. G. B. de F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**. v. 34, n. 3, p. 963-969, mai-jun, Santa Maria, 2004.

MOLINA-JUNIOR, V.E. **Recursos hídricos superficiais da área urbana e de expansão da cidade de São Carlos, SP – Estudo Multitemporal**. 2003. 106 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2003.

MONTAÑO, M.; SOUZA, M. P. Integração entre planejamento do uso do solo e de recursos hídricos: a disponibilidade hídrica como critério para a localização de empreendimentos. **Eng. Sanit. Ambient**, Rio de Janeiro. v. 21, n. 3, p. 489-495. jul/set. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/esa/2016nahead/1809-4457-esa-S1413_41522016118729.pdf>. Acesso em: ago. 2017.

MOURA, C. C.; GASTMANS, D.; KIANG, C. H.; MODESTO, R. P.; RODRIGUES, P. F.; RUBY, E. C.; BORGES, A. V. Concentrações de nitrato nas águas subterrâneas em áreas rurais do município de São José do Rio Preto (SP). **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 268-284, 2015.

OLAIA, F. B. **Análise e caracterização da urbanização na área de recarga do Aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto – SP**. 2005. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

OLIVEIRA, E. Z.; SANTIAGO, C. D.; DANTAS-FERREIRA, M. Dinâmica dos vazios urbanos no limite da ocupação urbana do município de São Carlos, SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 10, n. 2, p. 413-427. 2017. Disponível em: < <http://www.revista.ufpe.br/rbgfe/index.php/revista/article/viewArticle/1936>>. Acesso em: ago. 2017.

OLIVEIRA, S. F. de. **Caracterização das vulnerabilidades e riscos na bacia partilhada do rio Águeda**. 2014. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura da Construção Civil). Instituto Politécnico de Castelo Branco. 2014.

OLIVEIRA, S. N.; JÚNIOR, O. A. C.; GOMES, R. A. T.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S. Detecção de mudança do uso e cobertura da terra usando o método de pós-classificação na fronteira agrícola do oeste da Bahia sobre o grupo Urucuia durante o período 1988-2011. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro. v. 66, n. 5, p. 1157-1176. set/out. 2014. Disponível em: < <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/989>>. Acesso em: ago. 2017.

PAES, C. O. **Modelagem espacial de áreas de recarga subterrânea em região de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), em Brotas/SP**. 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2014.

PALMA, J. B. **Avaliação intergrada, 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**. (2004). 301 f. (Tese (Doutorado)), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P. RIBEIRO, L. F. Modelação da recarga do aquífero livre miocénico da Bacia de Alvalade e implicações ao nível da contaminação agrícola (um caso de estudo na infra-estrutura 12 – bloco de rega de

canhestros/ Ferreira do Alentejo). In. 5º Congresso Ibérico. **Anais...** Faro, 2006. Disponível em: < <http://www.ineg.pt/download/3831/29.pdf> >. Acesso em: jan. 2016.

PARALTA, E.; FRANCÉS, A.; RIBEIRO, L.F. Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e análise crítica das redes de monitorização no contexto da directiva quadro da água. In: Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países De Língua Oficial Portuguesa, 7, **Anais...** 2005.

PAZ, A. R. da. **Hidrologia Aplicada**. Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

PIROLI, E, L. Mudanças no uso da terra e impactos sobre a infiltração de água em microbacias hidrográficas avaliados com técnicas de geoprocessamento in: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** 2015. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.03.54/doc/p0455.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

PIROLI, E. L. Geoprocessamento aplicado ao estudo da evolução do uso da terra e seus impactos sobre a infiltração de água em microbacias hidrográficas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 43. (CONBEA), 2014, Campo Grande. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2014.

PIROLI, E. L.; ISHIKAWA, D. T. K.; DEMARCHI, J. C. Análise das mudanças no uso do solo da microbacia do córrego das Furnas, município de Ourinhos – SP, entre os anos de 1972 e 2007, e dos impactos sobre suas áreas de preservação permanente, apoiada em geoprocessamento. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 15. **Anais...** SBSR, Curitiba, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0999.pdf>>. Acesso em: fev. 2016.

PONS, N. A. D. **Levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas na cidade de São Carlos – SP, com o auxílio do geoprocessamento**. V I. 233 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

POZZA, S. A. **Características temporais da concentração de material particulado na atmosfera da cidade de São Carlos - SP**. 2009. 141 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento de Processos Químicos) – Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2009. Disponível em: <http://www.btdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2257>. Acesso em: jan. 2015.

Preto regions, Brazil. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. v. 68, n. 1, p. 117-136, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-008-0173-y>>. Acesso em: ago. 2017.

RAWAT, J. S.; BISWAS, V.; KUMAR, M. Changes in land use/cover using geospatial techniques: A case study of Ramnagar town area, district Nainital, Uttarakhand, India. **The Egyptian Journal of RemoteSensing and Space**

Sciences. v. 6, n. 1, p. 111-117, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982313000069?via%3Dihub>>. Acesso em: set. 2017.

RAWAT, J.S.; KUMAR, M. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. **The Egyptian Journal of RemoteSensing and Space Sciences.** v.18, n. 1, p. 77-84, jun. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110982315000034?via%3Dihub>>. Acesso em: set. 2017.

REBOUÇAS, A. da C. A Inserção da água subterrânea no Sistema Nacional de Gerenciamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos.** v. 7, n. 4, p. 39-50. out/dez, 2002. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sqcv3/UserFiles/Sumarios/1eb408f1beb6eb467b1194ddcbf68a0d_8794a2e40db7eed3bd419e2a8cce570b.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

REBOUÇAS, A. da C. Água no Brasil: abundância, desperdício e escassez. **Bahia Análise e Dados.** Salvador. v. 13, n. especial, p. 341-345. 2003. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd17/abundabras.pdf>>. Acesso em: jan. 2015.

REBOUÇAS, A. da C. **Sistema Aquífero Botucatu no Brasil.** Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo. 1976

RICKLEFS, R. E. **A Economia da Natureza.** 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2009. 503 p.

RODRIGUES, M. T. **Comportamento de sistemas de informações geográficas por meio de classificação supervisionada em diferentes bacias hidrográficas.** 2015. 101 f. Tese (Doutorado em Agronomia).

SAAE - SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO. **Produção de água e esgoto tratado.** 2014. Disponível em <<http://www.saaesaocarlos.com.br/joomla4/index.php/dadossaneamentomenutop/producaoaguaeesgotomenu>>. Acesso em: set. 2017.

SABESP – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. **Sistema de informação para o gerenciamento ambiental dos recursos hídricos subterrâneos na área de afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.** 2004.

SADAT-NOORI, M.; EBRAHIMI, K. Groundwater vulnerability assessment in agricultural areas using a modified DRASTIC model. **Environ Monit Assess.** 2016. v. 188, n. 19, p. 1-18. 2016. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26650205>>. Acesso em: jan. 2017.

SAMPAIO, F. de M. T. **Permeabilidade superficial de solos da sub-bacia do córrego Centenário da cidade de Lavras – MG.** 2004. 42 f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientância). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

SANTOS, D. I. P. dos; ARAÚJO, E. de O.; PAGANI, P. C. P.; PAGANI, C. H. P.; ARAÚJO, M. E. B. de; NEGRÃO, M. P. Análise multitemporal de uso e ocupação do solo do núcleo inicial do projeto integrado de colonização Paulo de Assis Ribeiro no município de Colorado do Oeste – RO. **Caderno de Geografia**. v. 25, n. 43, p. 34-51. 2014.

SANTOS, D. I. P.; ARAÚJO, E. O.; PAGANI, P. C. P.; PAGANI, C. H. P.; ARAÚJO, M. E. B. Análise multitemporal de uso e ocupação do solo do núcleo inicial do projeto integrado de colonização Paulo de Assis Ribeiro no município de Colorado do Oeste-RO. **Caderno de Geografia**, v. 25, n. 43, p. 34-51, 2015. Disponível em: <<http://200.229.32.55/index.php/geografia/article/view/7858>>. Acesso em: jan. 2017.

SANTOS, J. L. O.; LEITE, O. D. Avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas na região oeste da Bahia pelo inseticida carbofuran, empregando os modelos Attenuation Factor (AF) e Retardation Factor (RF). **Orbital**. v. 8, n. 1, p. 28-35. 2016. Disponível em: <<http://www.orbital.ufms.br/index.php/Chemistry/article/view/715>>. Acesso em: jan. 2017.

SANTOS, S. I. P. dos. **Cenários de Alterações de Uso e Ocupação do Solo até 2040 em Portugal Continental**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica). Instituto Superior de Estatística e Gestão de Informação da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2014.

SÃO CARLOS. Lei nº 13.691/2005. **Plano Diretor Municipal de São Carlos**. 2005.

SÃO CARLOS. Lei nº 13.944/2006. **Dispõe sobre a criação das áreas de proteção e recuperação dos mananciais do município - APREM e dá outras providências**. 2006.

SÃO CARLOS. Lei nº 18.053/2016. **Plano Diretor Municipal de São Carlos**. 2016.

SCHIAVO, B. N. de V.; TERRA, L. G.; DUARTE, M. M.; GATIBONI, T. N. Uso de imagens orbitais multitemporais para caracterização de uso e ocupação da terra no município de São Borja. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v. 19, n.2, mai-ago. 2015, p. 1526-1534. Santa Maria, 2015. Disponível em: <<http://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/viewFile/15532/pdf>>. Acesso em: fev. 2016.

SILVA, G. C.; MENEZES, D. B.; FERREIRA, M. D. Análise da qualidade da água explotada na zona de recarga do Aquífero Guarani no município de São Carlos. In: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador. **Anais... IBEAS**. 2013

SIMAS, L.S.B. **Índices de vulnerabilidade à contaminação de massas de água subterrânea: aplicação à delimitação da Rede Ecológica Nacional no Concelho de Almada (Portugal)**. 2014. Dissertação (Mestrado). 71 f. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade de Lisboa, 2014.

SIMÕES, L. B. **Integração entre um modelo de simulação hidrológica e sistema de informação geográfica na delimitação de zonas tampão ripárias**. 2001. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu. 2001.

SOARES, D. F.; FARIA, A. M.; ROSA, A. H. Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas por resíduos de agrotóxicos no município de Campo Novo do Parecis (MT), Brasil. **Eng. Sanit. Ambient.** 2017. v. 22, n. 2, p. 277-284. 2017. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522016005007104&script=sci_abstract&tlng=pt>. Acesso em: abr 2017.

SOARES, J. J.; SILVA, D. W. da; LIMA, M. I. S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo state, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**. 63: p. 527-536. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-69842003000300019>. Acesso em: jan. 2015.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P.; BARBOSA, S. A. Mapa de infiltração do alto e médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos do meio físico e na precipitação. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 3, n. 1, p. 26-42, 2008.

SOULEYMANE, K. ZHOUNGHUA, T. A novel method of sensitivity analysis testing by applying the DRASTIC and fuzzy optimization methods to assess groundwater vulnerability to pollution: the case of the Senegal River basin in Mali. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.** v. 17, n. 8, p. 1375-1392. Disponível em: < <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/17/1375/2017/>>. Acesso em: jul. 2017.

SOUZA, L. C. de. **A efetividade da proteção das águas subterrâneas no Brasil**. 2010. Disponível em: <http://www.nima.puc-rio.br/aprodab/artigos/a_efetividade_da_protecao_das_aguas_subterraneas_luciana_cordeiro.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

SOUZA, L. C. de. O município como partícipe na proteção das águas subterrâneas no Brasil. **Boletín Geológico y Minero**. v. 123, n. 3, p. 377-388. 2012. Disponível em: <http://www.igme.es/Boletin/2012/123_3/17_ARTICULO%2013.pdf>. Acesso em: jan. 2015.

SOUZA, P. O. **Conexão florestal em áreas mais favoráveis à infiltração na APA Botucatu – SP**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu, 2014.

SOUZA-JÚNIOR J. G. A. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luíz de Queiroz. Piracicaba, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-02032006-170350/pt-br.php>>. Acesso em: jan. 2015.

TANAJURA, D. S.; LEITE, C. B. B. Quantificação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas na sub-bacia hidrográfica Jacaré-Pepira/SP. **Águas Subterrâneas**. 2016. São Paulo, v. 30, n. 3, p. 306-325. 2016.

TRAFICANTE, D. P. **Fragilidade ambiental da APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá (perímetro Botucatu, SP, Brasil) na Bacia Hidrográfica do Rio Capivara**. 2016. 107 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2016.

TUNDISI, J. G. **Água no Século XXI - Enfrentando a Escassez**. São Carlos: Rima, 2003.

VELOZO, R. **Caracterização geológico-geotécnica do lixão desativado de São Carlos – SP, com auxílio da geofísica**. 2006. 177 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006

WECKMÜLLER, R.; VICENS, R. S. Método híbrido de detecção de mudanças: uma associação entre classificação baseada em objetos e baseada em pixels. **Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro. v. 68, n. 5, p. 883-899. 2016. Disponível em: < <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/1317>>. Acesso em: ago. 2017.

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

ZUQUETTE, L. V.; PALMA, J. B. Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu. **Rev. Esc. De Minas**. Ouro Preto. v. 59, n. 1, p. 81-87. jan/mar 2006. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672006000100011>. Acesso em: jan. 2015.

ZUQUETTE, L. V.; SILVA, E. M. Jr; GARCIA, A. Aspectos de Sorção para os Materiais Inconsolidados da Região de São Carlos (SP), Brasil. **REM: Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto. v. 61, n.2, p. 219-230. 2008. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-010-0570-y>>. Acesso em: nov. 2016.

ZUQUETTE, L.V.; PALMA, J.B.; PEJON, O.J. Methodology to assess groundwater pollution conditions (current and pre-disposition) in the São Carlos and Ribeirão