

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**QUALIDADE DA ÁGUA E MODELAGEM DO USO DAS TERRAS NA BACIA**  
**HIDROGRÁFICA DO ARROIO MARRECAS, CAXIAS DO SUL, RS**

**Diego Silva da Silva**

**(Dissertação)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**QUALIDADE DA ÁGUA E MODELAGEM DO USO DAS TERRAS NA BACIA**  
**HIDROGRÁFICA DO ARROIO MARRECAS, CAXIAS DO SUL, RS**

Diego Silva da Silva  
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

**DISSERTAÇÃO**  
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de  
**MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO**

Porto Alegre (RS), Brasil  
Agosto de 2016

### CIP - Catalogação na Publicação

da Silva, Diego Silva  
Qualidade da água e modelagem do uso das terras  
na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, Caxias do  
Sul, RS / Diego Silva da Silva. -- 2016.  
109 f.  
Orientador: Carlos Gustavo Tornquist.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa  
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-  
RS, 2016.

1. Mudanças de uso das terras. 2. Modelagem  
Ambiental. 3. CLUE-S. I. Tornquist, Carlos Gustavo,  
orient. II. Título.

DIEGO SILVA DA SILVA  
Engenheiro Agrônomo - UFRGS

## DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

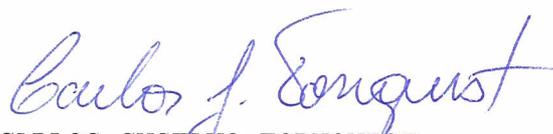
Faculdade de Agronomia

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 10.08.2016  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 16.03.18  
Por



CARLOS GUSTAVO TORNQUIST  
Orientador-PPG Ciência do Solo

FLÁVIO A. de O. CAMARGO  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação  
em Ciência do Solo



ELVIO GIASSON  
Departamento de Solos/UFRGS



PAULO CÉSAR DO NASCIMENTO  
Departamento de Solos/UFRGS



FIORAVANTE JAEKEL DOS SANTOS  
Faculdade de Agronomia Eliseu  
Maciel/UFPel

PEDRO ALBERTO SELBACH  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*Dedico em especial a minha esposa Elina pela compreensão e carinho durante esse período e aos meus pais, Gilberto e Marlene, que sempre fizeram o possível para que eu tivesse uma educação de qualidade.*

## AGRADECIMENTOS

A D'us pela vida repleta de abundância e aprendizado.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela excelência e qualidade de ensino.

A minha esposa Elina, por todo o carinho, amor e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Dr. Carlos Gustavo Tornquist, pela amizade, confiança, compreensão, disponibilidade e por todos os valiosos ensinamentos durante o período de mestrado.

Aos meus pais, Gilberto e Marlene, e a minha irmã Giovana pelo apoio deste sempre;

À Polar Inteligência em Meio Ambiente e aos meus sócios e grandes amigos, Alex Strey e Kayo Soares, pela amizade e parceria incondicional.

Ao Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Caxias do Sul – SAMAE, pela disponibilização de dados técnicos;

Aos Engenheiros Agrônomos Neiva Rech e Paulo Fachin da Secretaria de Agricultura e Abastecimento de Caxias do Sul/RS pela parceria de longa data e informações gentilmente disponibilizadas;

Ao geógrafo Eduardo Farina pelo grande auxílio na área de geoprocessamento;

Ao bolsista de iniciação científica Júlio César Schneider, pelo auxílio na execução dos trabalhos.

Aos professores do Departamento de Solos, em especial os professores Paulo Cesar do Nascimento (PC) e Elvio Giasson, os quais mantenho amizade e estima deste o início da graduação.

A todos os colegas do PPGCS pelas experiências trocadas.

## QUALIDADE DA ÁGUA E MODELAGEM DO USO DAS TERRAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MARRECAS, CAXIAS DO SUL, RS <sup>1</sup>

Autor: Eng. Agr. Diego Silva da Silva

Orientador: Prof. Dr. Carlos Gustavo Tornquist

### RESUMO

A bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, localizada na porção nordeste do município de Caxias do Sul, RS, abriga os principais mananciais de água para abastecimento da crescente população na região, além de importantes fragmentos de Mata Atlântica e Campos Sulinos. Este estudo buscou analisar as alterações de uso das terras em escala espaço-temporal nos últimos 48 anos, analisar a relação entre a qualidade das águas superficiais, utilizando dados de campanhas de monitoramento entre 2010 e 2011, e o uso atual das terras e simular a dinâmica de cenários futuros para um período de 15 anos. As ferramentas utilizadas na primeira etapa foram interpretação visual de imagens de satélite e fotos aéreas, apoiadas em campanhas de levantamento a campo. A posteriori, foi construído um banco de dados geoespaciais e a simulação espacial utilizando o modelo *Conversion of Land Use and its Effects at small region extent* (CLUE-S). Os resultados obtidos na primeira etapa indicam um decréscimo das áreas originalmente ocupadas por campos e matas, o que pode ser atribuído ao crescente processo de urbanização e a expansão de atividades agrícolas intensivas como fruticultura e silvicultura, similar àquela observada em outras regiões na Serra Gaúcha. A avaliação da qualidade de água mostra que a alteração na concentração de alguns parâmetros relacionou-se com o uso das terras. Embora os parâmetros Turbidez, Fósforo Total e Coliformes Termotolerantes tenham ultrapassado os limites de Classe 2 (Conama nº 257/2005) em algumas campanhas, a análise de correlação não conseguiu discriminar fatores explanatórios de maneira conclusiva. Quando analisados os resultados da modelagem, observou-se que a dinâmica de realocação dos usos e coberturas das terras nos planos de informação são definidos ou explicitados prioritariamente pelos seguintes fatores explanatórios: Cambissolo Háplico, Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico, declividade e elevação do terreno. Análises apoiadas em ferramentas de estatística, geoprocessamento e campanhas de levantamento *in situ* como as aplicadas neste estudo podem ser instrumentos cruciais para o entendimento da evolução dos usos das terras, servindo de referencial para resolução de potenciais conflitos e mitigação dos impactos ambientais e socioeconômicos que se apresentam.

**Palavras-chave:** mudanças de uso das terras, modelagem Ambiental, CLUE-S Terras.

---

<sup>1</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (109 p.) Agosto, 2016.

## WATER QUALITY AND LAND USE MODELING IN ARROIO MARRECCAS WATERSHED, CAXIAS DO SUL, RS<sup>2</sup>

Author: Eng. Agr. Diego Silva da Silva  
Adviser: Prof. Dr. Carlos Gustavo Tornquist

### ABSTRACT

The Arroio Marrecas watershed, located in the northeastern section Caxias do Sul municipality, is a major drinking water source for the growing population in the region, and contains important fragments of subtropical forests and grasslands. This study investigates land use changes in a spatiotemporal scale in the Arroio Marrecas watershed in the last 48 years, analyze the relationship between the quality of surface water, using data from monitoring campaigns conducted in 2010 and 2011, and the current land use and simulates the dynamics of future scenarios for a period of 15 years. Tools used in the first stage were visual interpretation of satellite images and aerial photos, supported by the field survey campaigns were used. Subsequently, it was built from a geospatial database and the spatial simulation using the model Conversion of Land Use and Its Effects at small region extent (CLUE-S). The results obtained in the first step indicate a decrease in the areas originally occupied by forests and grasslands, which can be attributed to increasing urbanization and the expansion of intensive agricultural production such as horticulture and forestry, similar to that observed in other parts of the highlands of Rio Grande do Sul (Serra Gaúcha). The evaluation of water quality shows that the change in concentration of some parameters was related to the use of the land. Water quality parameters like turbidity, total phosphorus and thermotolerant coliform were above Class 2 limits (CONAMA Resolution 257/2005) in some campaigns, a correlation analysis could not conclusively discriminate the main explanatory factor. On the other hand, a modeling exercise of future land use scenarios with the CLUE-S model revealed that dynamic reallocation of land use/land cover were defined primarily by soil classes Cambissolo Háplico, Cambissolo Húmico and Neossolo Litólico, elevation and slope. Analysis supported by statistical geoprocessing tools and field surveys as applied in this study can be crucial tools for understanding the evolution of land uses and serve to resolve potential conflicts and mitigate environmental and socioeconomic impacts

**Keywords:** land use change, environmental modeling, water quality, CLUE-S.

---

<sup>2</sup> M.Sc. dissertation in Soil Science. Graduate Program in Soil Science. Faculty of Agronomy. Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre (109 p.) August, 2016.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL .....	3
2.2 QUALIDADE DE ÁGUA SUPERFICIAL .....	4
2.2.1 <i>Parâmetros de Qualidade</i> .....	5
2.3. MODELAGEM DE CENÁRIOS FUTUROS .....	10
2.3.1 <i>Modelagem Ambiental</i> .....	10
2.3.2 <i>CLUE-S</i> .....	13
2.4 A BACIA HIDROGRÁFICA DO ARROIO MARRECA EM CAXIAS DO SUL/RS COMO CASO DE ESTUDO .....	15
<b>3. HIPÓTESE E OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>20</b>
4.1. <i>Caracterização da área de estudo</i> .....	20
4.1.1 <i>Solos</i> .....	21
4.1.2 <i>Uso e Cobertura das Terras</i> .....	25
4.1.3 <i>Qualidade de água superficial</i> .....	29
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
5.1. USO E COBERTURA DAS TERRAS .....	51
5.2. QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS AFETADAS POR USOS DAS TERRAS .....	57
5.3 CENÁRIOS FUTUROS DE USO DAS TERRAS.....	72
5.3.1 <i>Cenário 1</i> .....	73
5.3.2 <i>Cenário 2</i> .....	77
5.3.3 <i>Cenário 3</i> .....	80
5.3. ANÁLISE INTEGRADA .....	83
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>87</b>
<b>8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>88</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Parâmetros de qualidade de água superficial e metodologia analítica, conforme <i>Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th edition</i> . .....	29
<b>Tabela 2.</b> Resultados da análise de regressão logística preparatória para a implementação do modelo CLUE-S.....	41
<b>Tabela 3.</b> Parâmetros de configuração (inicialização) do CLUE-S.....	43
<b>Tabela 4.</b> Cenários de uso atual e futuros dos uso das terras na bacia do Arroio Marrecas utilizados nas simulações espacialmente explícitas com CLUE-S.....	47
<b>Tabela 5.</b> Alterações espaço-temporais de uso e cobertura das terras observadas na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas. ....	52
<b>Tabela 6.</b> Informações gerais por sub-bacia. ....	58
<b>Tabela 7.</b> Uso das terras por sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas. ....	59
<b>Tabela 8.</b> Características geomorfológicas das sub-bacias. ....	59
<b>Tabela 9.</b> Conflito entre uso atual das terras com APP por sub-bacia. ....	59
<b>Tabela 10.</b> Resultados da análise de correlação.....	61

## RELAÇÃO DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localização da região de estudo: Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, Vila Seca - Caxias do Sul, RS.....	21
<b>Figura 2.</b> Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, Vila Seca - Caxias do Sul, RS.....	22
<b>Figura 3.</b> Cambissolo observado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas. ....	23
<b>Figura 4.</b> Nitossolo localizado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas.....	24
<b>Figura 5.</b> Neossolo Litólico localizado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas..	25
<b>Figura 6.</b> Mapa de uso das terras em 2010 da bacia do Arroio Marrecas.....	26
<b>Figura 7.</b> Exemplos de usos atuais das terras na bacia do Arroio das Marrecas: a) Paisagem original campestre (parte dos Campos Sulinos), com atividade antrópica de baixo impacto (criação extensiva de bovinos); b) Paisagem original arbórea (Floresta Ombrófila Mista), com <i>Araucaria angustifolia</i> no extrato superior; c) Horticultura como cultivo agrícola intensivo; d) Silvicultura de <i>Pinus elliottii</i> para fins madeireiros.....	28
<b>Figura 8.</b> Pontos de monitoramento de qualidade de águas superficial e delimitação de sub-bacias avaliadas. ....	30
<b>Figura 9.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: hipsometria (MDE). ....	34
<b>Figura 10.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: declividade.....	35
<b>Figura 11.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: solos. ....	36
<b>Figura 12.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância das zonas urbanas. ....	37
<b>Figura 13.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância da rede viária. ....	38
<b>Figura 14.</b> Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância da rede de drenagem.....	39
<b>Figura 15.</b> Interface do CLUE-S.....	42
<b>Figura 16.</b> Matriz de conversão (Adaptado de Soler, 2010).....	45
<b>Figura 17.</b> Fluxograma do CLUE-S.....	48
<b>Figura 18.</b> Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 1966.....	52
<b>Figura 19.</b> Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 2010.....	53
<b>Figura 20.</b> Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 2015.....	54

<b>Figura 21.</b> Localização de residências e construções rurais distribuídas por sub-bacias do Arroio das Marrecas. ....	58
<b>Figura 22.</b> Vazões medidas nas sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas. ....	63
<b>Figura 23.</b> Turbidez nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas. ....	64
<b>Figura 24.</b> Sólidos dissolvidos totais nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas. ....	66
<b>Figura 25.</b> Fósforo total nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas. ....	68
<b>Figura 26.</b> Nitrato nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas. ....	70
<b>Figura 27.</b> Coliformes termotolerantes nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas. ....	71
<b>Figura 28.</b> Mapa de simulação do Cenário 1 para o ano de 2034. ....	75
<b>Figura 29.</b> Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 3. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fruticultura, OU = Outros Usos). ....	76
<b>Figura 30.</b> Mapa de simulação do Cenário 2 para o ano de 2034. ....	78
<b>Figura 31.</b> Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 2. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fruticultura, OU = Outros Usos). ....	79
<b>Figura 32.</b> Mapa de simulação do Cenário 3 para o ano de 2034. ....	81
<b>Figura 33.</b> Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 3. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fruticultura, OU = Outros Usos). ....	82

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas que implicam em mudanças de uso das terras têm causado inúmeros e reiterados impactos ambientais, com perda de biodiversidade, fragmentação de ecossistemas, sobre-exploração dos recursos naturais além da capacidade de suporte, introdução de espécies exóticas, dispersão de poluentes, entre outros. É notório que um dos fatores de degradação ambiental é a expansão da agropecuária sobre os ecossistemas naturais, pois esta provoca mudanças importantes e muitas vezes irreversíveis nos processos ecológicos, especialmente fluxos energéticos e ciclos e estoques de água, carbono e nutrientes.

Frente a estes e outros problemas causados pelas mudanças de cobertura das terras, que na maioria das vezes resultam na sobre-exploração dos recursos naturais, a degradação da qualidade dos recursos hídricos tem sido reiteradamente discutida em fóruns diversos. Neste sentido, o manejo do solo adequado e a qualidade das águas superficiais estão diretamente relacionados.

Desta forma, o planejamento ambiental é uma importante ferramenta disponível, cujos resultados, se aplicados adequadamente, pode resultar na mitigação de tais impactos ambientais. Este deve ser realizado com uma visão de análise integrada da paisagem, por um conjunto metodológico analítico que permita conhecer e explicar a estrutura da paisagem, como seus fatores e propriedades se relacionam entre si, o histórico de desenvolvimento, os processos de transformação da paisagem, entre outros.

Neste sentido, os levantamentos de uso das terras, especialmente aqueles que contemplem um componente de avaliação espaço-temporal, pode ser instrumento imprescindível para analisar como os espaços territoriais são ocupados e transformados, permitindo predizer os efeitos da alteração do uso das terras sobre o ambiente, sejam urbanos ou rurais, servindo de suporte para tomada de decisão quanto às diretrizes para o manejo sustentável.

Aliado a isso, a modelagem ambiental dinâmica, contribui como importante ferramenta na predição de cenário de mudança de uso e ocupação das terras, tanto em curto quanto em longo prazo, servindo para análise de diferentes níveis de estudo. Além disto, este tipo de estudo possibilita a realização de uma análise integrada na escala espaço-temporal das atividades desenvolvidas de determinada região, seja pela influência de ocupação ou pela mudança da matriz produtiva, como forma de determinar regramentos capazes de harmonizar a conservação ou preservação dos recursos naturais e as atividades antropogênicas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A bacia hidrográfica como unidade de planejamento ambiental**

Com a promulgação da Constituição Brasileira em 05 de outubro de 1988 (BRASIL, 1988), foram definidas novas diretrizes e competências básicas para a União e Estados Federados, explicitando claramente os direitos e deveres de cada esfera governamental no que diz respeito aos usos dos recursos hídricos (MEDEIROS; CANALI, 2012). Apresentando como pano de fundo a Constituição Federal, a Lei Federal nº 9.433 promulgada em 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que traz como uma de suas linhas norteadoras a bacia hidrográfica, como configuração territorial para implantação de sua política e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Segundo Cibim e Claro (2012), a figura da bacia hidrográfica como elemento chave da Política Nacional de Recursos Hídricos denota uma real possibilidade de planejamento dos Recursos Hídricos, tendo em vista todas as dificuldades de gestão apresentadas historicamente. Porto e La Laina (2008), por sua vez, mostram que a adoção de tal premissa pela Política Nacional de Recursos Hídricos fundamenta-se nos Princípios de Dublin (WMO, 1992), que em seu princípio n.1, apresenta: “Como a água é essencial para a vida, a gestão eficaz dos recursos hídricos exige uma abordagem integrada que concilie o desenvolvimento econômico e social e a proteção dos ecossistemas naturais. A

gestão eficaz estabelece uma relação entre o uso da terra e uso da água em toda uma bacia hidrográfica ou do aquífero.”

Turner, Gardner e O’neill (2001) explicam que mudanças de uso das terras em uma bacia hidrográfica podem trazer consequências significativas no abastecimento de água, tendo em vista a alteração do ciclo hidrológico. Ademais, podem de alterar todos os padrões e fluxos anteriormente estabelecidos entre os componentes da paisagem e assim, desencadear impactos de diversas ordens.

## **2.2 Qualidade de Água Superficial**

O conceito de qualidade de água, segundo von Sperling (2005), não deve ser entendido unicamente como simples noção da estrutura molecular da água, mas sim, a partir de uma visão integrada e sistêmica de sua propriedade como agente solvente e meio de transporte de partículas, que por sua vez, resultam na alteração do seu grau de pureza, sendo a qualidade das águas função tanto de fenômenos naturais quanto antropogênicos. Desta forma, a determinação da qualidade da água passa a ser importante instrumento, tanto para determinar as consequências de determinada atividade poluidora quanto para a proposição de medidas que satisfaçam a qualidade almejada.

Muniz et al. (2013), explicam que mudanças nos padrões físicos, químicos e biológicos da água podem resultar em consequências severas aos ecossistemas e à saúde humana, e que tais alterações podem estar atrelados tanto a processos naturais quanto a atividades antrópicas. Citam ainda que os efluentes, sejam domésticos, rurais ou industriais, são os principais agentes de degradação da qualidade da água. Segundo Merten e Minella (2002), as atividades agropecuárias representam uma parcela considerável da contaminação dos mananciais, por se tratarem de atividades com elevado potencial degradador, que resultam em poluição do solo e da água. Assim, a qualidade das águas superficiais é resultado do uso e ocupação das terras e do manejo adotado na bacia hidrográfica. CETESB (2004) complementa, indicando que as características da poluição no deflúvio superficial de uma área agrícola serão dependentes das práticas agrícolas adotadas, da época do ano que em os

preparos e manejo do solo são realizados, da carga de fertilizantes e defensivos agrícolas e da estação de colheita.

Desta forma, segundo von Sperling (2005), a qualidade da água pode ser representada pelos parâmetros que traduzem suas principais características físicas, químicas e biológicas. A legislação ambiental vigente, Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Para cada classe definem-se padrões de qualidade da água de forma a assegurar os usos preponderantes, sendo mais restritivo quanto mais nobre for o uso em questão. Os padrões de qualidade constituem-se de um conjunto de parâmetros e seus respectivos teores máximos permitidos e/ou restrições, que servem como indicadores específicos para avaliação da qualidade da água para determinado uso.

### **2.2.1 Parâmetros de Qualidade**

A Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), em seu art. 14, apresenta 11 condições e padrões de qualidade de água superficial que deverão ser observados para enquadramento do recurso hídrico em uma das 13 Classes de Qualidade. Ainda, dispõe sobre as concentrações máximas permitidas para 90 parâmetros específicos, inorgânicos e orgânicos, de forma distinta para cada Classe. A referida Resolução, em seu art. 42, indica que na ausência de enquadramento do recursos hídrico, as águas doces serão consideradas classe 2.

Desta forma, foram selecionados 5 parâmetros para predição da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, abaixo apresentados, dentre os quais três (Turbidez, Fósforo Total e Coliformes Termotolerantes) são integrantes dos parâmetros que compõem o Índice de Qualidade das Águas.

### 2.2.1.1 Turbidez

Segundo CETESB (2009), o parâmetro turbidez pode ser definido como o grau de atuação da intensidade que um feixe de luz sofre ao atravessá-la devido à presença de sólidos em suspensão como partículas inorgânicas (areia, silte, argila) e detritos orgânicos (algas, bactérias e plâncton em geral). Quando de origem natural, correspondem a partículas de rocha, argila e silte. Neste caso, não resultam em alterações sanitárias significativas na qualidade da água, a não ser pelo inconveniente de alteração da coloração ou, ainda, pelo fato que os sólidos possam ser meio de transporte para microorganismos patogênicos. Quanto de fonte antropogênica, estão associados a despejos domésticos, industriais ou processos erosivos, e podem apresentar substâncias tóxicas e organismos indesejáveis (VON SPERLING, 2005).

A turbidez pode resultar em diminuição da penetração dos raios solares, restringindo a realização da fotossíntese pela vegetação submersa ou algas e, conseqüentemente, a redução da incorporação de oxigênio no meio aquático (BRAGA et al., 2002), prejudicando a procura de alimento para algumas espécies, influenciando a dinâmica das comunidades aquáticas e gerando desequilíbrios ambientais.

A turbidez apresenta sinergia com os teores de material em suspensão e sua concentração nos corpos hídricos está diretamente relacionada aos períodos de precipitação, sendo que sua maior ou menor presença na água pode variar em razão do uso e ocupação das terras nas proximidades do ponto de coleta. Ademais, há indicativos de que os maiores valores de turbidez ocorram próximo a estradas, áreas de criação de animais ou, ainda, associada a erosão das margens de arroios e rios, com reduzida quantidade de área de preservação permanente (SANTI et al., 2012; LUBENOW et al., 2012).

Segundo a Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), o valor máximo permitido para enquadramento como Classe 2 é  $\leq 100$  Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT).

### 2.2.1.2 Fósforo Total

O fósforo é um macronutriente encontrado nas águas superficiais predominantemente sob as formas de ortofosfatos, polifosfatos e fósforo orgânico. Sua presença no ambiente pode estar relacionada a processos naturais como a dissolução das rochas e decomposição da matéria orgânica, ou de ações antrópicas como o uso de fertilizantes e despejo de efluentes, entre outros (VON SPERLING, 2005; CETESB, 2004).

Toledo e Nicolella (2002), mostram que o fósforo como fonte de poluição difusa tem sido motivo de atenção em inúmeros países, principalmente em razão das dificuldades encontradas para se determinar procedimentos de avaliação de impacto ambiental em bacias hidrográficas. Os mesmo autores, mostram que o aporte de fósforo em recursos hídricos, associado a outros elementos como amônia, por exemplo, podem desencadear processos que resultem no decréscimo dos teores de oxigênio dissolvido em razão do aumento dos processos respiratórios em comunidades aquáticas. Lucas, Folegatti e Duarte (2010), mostram que juntamente com o nitrogênio, o fósforo é responsável por processos de eutrofização dos cursos d'água, principalmente em ambientes lênticos, como barragem de reservação de água.

Segundo Resende (2002), a poluição de águas subterrâneas por fosfatos é praticamente inexistente, em razão da forte adsorção deste elemento pelas partículas do solo. Contudo, em se tratando de águas superficiais, os aportes de fósforo estão relacionados predominantemente por escoamento superficial e erosão do solo. Em associação com o nitrato, o aumento da concentração de fósforo em ambiente aquático pode resultar em eutrofização.

A Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), indica que o valor máximo permitido para enquadramento como Classe 2 até 0,100 mg/L de  $P_2O_5$ .

### 2.2.1.3 Nitrato

Conforme descreve Kayser (2006), quando em altas concentrações em águas superficiais, o nitrato resulta em processo de eutrofização do meio, favorecendo a proliferação de algas e macrófitas e o decréscimo de oxigênio dissolvido, podendo resultar, nos casos mais severos, na morte da ictiofauna. Resende (2002) apresenta que, em se tratando de atividades agrícolas, a forma mais representativa de contaminação do grupo nitrogenado é o nitrato, pois em razão de ser fracamente retido nas cargas positivas dos colóides do solo, permanece mais tempo em solução, facilitando em sua lixiviação e percolação. Destaca ainda que as concentrações elevadas de nitrato em águas superficiais merecem ser motivo de atenção, pois podem indicar a presença de outras substâncias indesejáveis, tais como defensivos agrícolas.

Nóbrega, Araújo e Santos (2008) indicam que, em alguns casos, a contaminação por nitrato pode estar relacionada a biodegradação de fezes humanas. Conforme apresentado por CETESB (2004), os esgotos sanitários são a principal fonte de aporte de nitrogênio orgânico nas águas superficiais. Para áreas agrícolas, as diferentes formas de nitrogênio estão relacionadas com o escoamento superficial de solos fertilizados.

Para enquadramento como Classe 2, a Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005) indica que o valor máximo permitido não deve ultrapassar 10 mg/L de  $\text{NO}_3^-$ .

### 2.2.1.4 Sólidos Dissolvidos Totais

Gonçalves (2009) explica que sólidos dissolvidos totais são substâncias orgânicas e inorgânicas predominantemente minerais, dissolvidas em águas, de tamanho correspondente a um micrômetro, que nem por ocasião de filtração pode ser extraída da água. Sua presença em água pode resultar na alteração do sabor, podendo em alguns casos, ter efeito laxante. Carvalho e Oliveira (2003) APUD Barreto et al. (2014) indicam que sólidos dissolvidos totais pode ser um indicativo de poluição dos recursos hídricos, resultando no decréscimo de oxigênio

dissolvido em razão do aumento de demanda química e bioquímica de oxigênio. CETESB (2004), indica possíveis correlações existentes com sólidos dissolvidos totais e outros parâmetros de qualidade de água superficial. A cor está diretamente relacionada a presença de sólidos dissolvidos, que podem ser tanto material de origem coloidal orgânico, como ácidos húmicos e fúlvicos, ou ainda, como materiais inorgânicos. A presença de sólidos dissolvidos, por sua vez, também pode apresentar relação com a alteração da condutividade elétrica.

O valor máximo permitido para enquadramento como Classe 2, corresponde a 500 Mg/L de sólidos dissolvidos totais, segundo a Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005).

### **2.2.1.5 Coliformes Termotolerantes**

Os coliformes termotolerantes são microorganismos existentes em fezes de animais de sangue quente, sendo a *Escherichia coli* o indicador patogênico de origem fecal mais importante, pois quando presente indica que o meio está contaminado por fezes (PIVELI e KATO, 2006). A Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011), em seu anexo I, especifica que o padrão microbiológico da água para consumo humano deve apresentar coliformes em 100 mL. Segundo CETESB (2009), se enquadram ainda no grupo de coliformes, além de *Escherichia coli*, algumas bactérias dos gêneros *Klebsiella*, *Enterobacter* e *Citrobacter*. Embora o número de coliformes termotolerantes não seja o melhor indicador de contaminação fecal, é aceitável seu uso para predição de qualidade de água superficial.

A Resolução CONAMA nº 357 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), permite valores inferiores a 1000 NMP/100mL (número mais provável por 100 mL) para enquadramento como Classe 2.

## **2.3. Modelagem de Cenários Futuros**

### **2.3.1 Modelagem Ambiental**

Frente às necessidades de uma observação mais acurada a respeito das pressões antropogênicas exercidas sobre os recursos naturais, além de uma análise integrada, novas abordagens metodológicas têm sido adotadas, tendo por objetivo uma apreciação complexa sobre as diferentes interrelações entre as partes que compõem um sistema. Nessa conjuntura, ferramentas de geoprocessamento evoluíram no sentido de apresentarem uma compreensão da dinâmica espaço-temporal dos impactos ambientais. Tais ferramentas, conforme Nascimento (2011), vêm simplificando e aperfeiçoando o monitoramento dos impactos e de suas tendências futuras e permitindo possíveis alternativas de mitigação.

Pessoa e Scramin (2004), descrevem o mundo como um sistema complexo que pode ser analisado sobre diferentes níveis e escalas, que se alteram em razão da complexidade que se exige no estudo específico, e explica que a modelagem é resultado das seguintes informações: acervo de conhecimento adquirido sobre o problema; da interpretação das variáveis de entrada do modelo; da disponibilidade de acesso a dados científicos sobre essas informações; e da sensibilidade pessoal de cada profissional para sua representação, em uma escala de trabalho menor que a real, de forma a ressaltar os aspectos relevantes à investigação. Citam ainda, que entre os principais objetivos de estudos que recorrem a modelagem ambiental, estão: a busca pelo aumento de conhecimento (pesquisa) sobre as relações causa-efeito no sistema, visando o fornecimento de melhorias nas interpretações quali-quantitativas do ambiente; e a necessidade de predição de funcionamento do ambiente do sistema (problemas/soluções), objetivando melhoria no controle de processos, na proposição de manejo do sistema ou como subsídio à tomada de decisão (gerenciamento ou manejo).

Conceitualmente, modelos ambientais, devem ser entendidos como modelos matemáticos capazes de representar processos ou fenômenos do mundo

real. Para sua criação são subtraídos do meio desejado os elementos mais significativos para equalização, e são construídos por observações dos dados espaciais e suas interrelações. Desta forma, são utilizados com o viés de aumentar o conhecimento sobre determinado processo, predizer resultados quantitativos ou comportamentos inferidos. Seu *modus operandi* pode ser tecido tanto por equações empíricas simples quanto equações diferenciais complexas, a depender do objetivo a que se propõem (MOORE et al. 1993 APUD SPORL, 2007).

Paraíba e Saito (2005) indicam que modelos ambientais podem predizer o destino final de determinado elemento, além de indicar quais poluentes e compartimentos do ambiente devem ser foco de observação, visando sustentabilidade e economicidade de práticas agrícolas. Felgueiras (2001) conclui que, embora os avanços da tecnologia atual serem eminentes, deve-se atentar para a criação de modelos ambientais que representam adequadamente o fenômeno, o comportamento ou o processo que ocorre na natureza, que é objeto da modelagem. Para tanto, impreterivelmente o modelo deve adotar como premissa que a natureza se constitui de interações espaço-temporais complexas entre os elementos que a constituem.

Para Dias e Walde (2013), a modelagem ambiental deve ter por premissa prever prováveis eventos em área pré-determinada, de acordo com suas características, para simular cenários futuros. Exemplificam ainda que os modelos dinâmicos, ou seja, aqueles que representam um processo no mundo real em resposta a alterações direcionadas, apresentam respostas adequadas às mudanças espaço-temporais e, portanto, são indicados para a simulação de cenários futuros de usos do solo. Kok, Verburg e Veldkamp (2007) afirmam que um ponto em comum entre os modelos de simulação refere-se à capacidade de simular a dinâmica da paisagem a partir de um conjunto de informações.

Machado, Vettorazzi e Xavier (2003) explicitam que entre as vantagens que estão atreladas à modelagem, destacam-se a possibilidade de simulação de inúmeros cenários em curto espaço de tempo, aliado ao baixo custo. Os mesmos autores ainda salientam que embora os benefícios sejam reconhecidos, a modelagem apresenta como limitação a dificuldade de trabalhar com uma ampla

gama de dados que sejam capazes de expressar a heterogeneidade dos sistemas naturais, mas que representam importante passo para o manejo de bacias hidrográficas. Blainski et al. (2011), corroboram com essa informação ao explicar que, na gestão de bacias hidrográficas, os modelos matemáticos constituem ferramentas de predição dos impactos oriundos da ocupação do solo sobre a quantidade e a qualidade da água.

Clavero et al. (2010), trazem uma abordagem complementar, inferindo que a modelagem arquitetada para os cenários futuros apoiaria a elaboração de políticas públicas com vistas a regulamentação de atividade no território; que os cenários simulados trazem um visão de futuro de médio e longo prazo; que tais resultados além de auxiliarem na tomada de decisão, também poderão orientar as ações governamentais; que os resultados obtidos não devem ser considerados como um fim, mas como forma de estímulo para fomentar decisões estratégicas, criando caminhos alternativos para usos compatíveis com as capacidades de suporte dos solos; e, ainda, que os cenários futuros proporcionam um elemento primordial quando se busca uma aproximação com a melhor situação ambiental possível.

Para Folhes et al. (2012), um dos pontos que mais chamam a atenção, no que diz respeito a evolução da modelagem, refere-se aos esforços empreendidos na simulação de cenários futuros de uso e ocupação das terras, em especial por preverem impactos socioambientais que podem ocorrer em diferentes escalas. Wilkinson e Eidinow (2008), indicam que os estudos envolvendo cenários futuros ganharam importância nas últimas décadas como instrumento de planejamento na área ambiental, tendo em vista os crescentes problemas relacionados a alterações climáticas, escassez hídrica, funcionamento de ecossistemas e alterações nos padrões de qualidade do ar, que possuem significância em escala global. Complementarmente, Neto et al. (2011) expressam que a simulação de distintos cenários de uso e ocupação das terras possibilita constatar a influência das diferentes coberturas do solo sobre os processos hidrossedimentológicos, auxiliando na proposição de medidas capazes de atenuar o problema.

Dias e Walde (2013) explicam que a simulação de cenários futuros, desde conhecidas as nuances da área objeto de estudo, possibilita antever prováveis eventos de maneira satisfatória. Desta forma, a modelagem dinâmica, ou seja, aquela que busca entender as influências das variáveis do sistema no espaço-tempo, tem permitido uma adequada avaliação de modelagem de cenários futuros. Nascimento et. al (2001) corrobora com a informação supracitada, descrevendo que, embora a paisagem seja constituída por uma quantidade significativa de variáveis, que encontram-se interconectadas, as mutações no sistema são recorrentes. Todavia, desde que compreendidos esse processos e fatores, por meio da análise de tendências, é possível ter-se sucesso na predição de cenários futuros de uso e ocupação das terras.

Vislumbrando a modelagem de cenários futuros de uma forma mais holística, Biggs et al. (2007) inferem que tal abordagem nos possibilita trilhar caminhos alternativos, como mudanças de tecnologias adotadas ou agregação de valores sociais, por exemplo, auxiliando os atores envolvidos a identificar e criar políticas voltadas a gestão dos recursos naturais ou ações que sejam robustas e que promovam resultados satisfatórios do sistema. Desta forma, utilizar-se de cenários futuros permitiria apoios as decisões, por antever impactos e, principalmente, por conhecer as interações e forças que impulsionariam as mudanças desejadas. Verburg et al. (2007), complementam que a utilização de tal ferramenta desempenha um papel importante na exploração futura de uso e ocupação das terras, pois permite que os resultados sejam utilizados como ambiente de aprendizado ou, ainda, podem ser utilizados como um sistema de alerta precoce para os efeitos futuros das mudanças de uso do solo, além de sinalizar áreas prioritárias de intervenção.

### **2.3.2 CLUE-S**

O modelo CLUE-S foi desenvolvido pelos pesquisadores da Universidade de Wageningen (VELDKAMP e FRESCO, 1996), com o objetivo de simular a dinâmica de mudança de uso e ocupação das terras. Tem sido constantemente melhorado deste então e utilizado e validado com êxito em

diferentes ambientes (VERBURG et al., 2002; WASSENAAR et al., 2007). O modelo CLUE-S é uma adaptação do CLUE que inicialmente fora desenvolvido para modelar grandes extensões de terra, sendo ajustado para escalas menores por VERBURG et al. (2002).

O modelo é discreto e espacialmente explícito, modela em escala local e regional, multibinomial, considera como dados de entrada fatores edáficos e socioeconômicos locais, e possui enfoque estatístico (GALHARTE, 2011). Conforme descreve Verburg et al. (2002), o CLUE-S apresenta duas modulações, sendo: módulo de demanda não espacial e módulo de alocação espacial. No primeiro é calculada a mudança de área para todos os tipos de uso do solo de forma agregada, permitindo mensurar toda a área coberta pelos diferentes tipos de solos e cobertura em escala temporal. O segundo, por sua vez, é onde ocorrem as simulações propriamente ditas, utilizando sistema de base matricial.

O modelo de alocação consiste em quadro módulos principais: 1) Módulo de políticas e restrições de uso do espaço: indica áreas que por razões de regulamentações apresentam restrições de conversão quanto a mudanças específicas de uso e ocupações das terras; 2) Módulo de parâmetros específicos de conversão do tipo de uso da terra: são parâmetros que decidem as possibilidades de simulação (elasticidade de conversão e sequências de transição de uso e ocupação das terras); 3) Módulo de demanda (requisitos de uso da terra): determina o quantitativo de áreas que poderá ser alocada para cada classe e a cada ano; e, 4) Características da área de estudo: referem-se ao conjunto de dados biofísicos e fatores socioeconômicos (VERBURG et al., 2006; OVERMARS et al., 2007; VERBURG et al., 2007; SOLER, 2010).

As regras de simulação são baseadas em uma combinação de análise empírica dos padrões de uso atuais das terras, características de vizinhança e regras de decisão especificadas pelo usuário, ou uma combinação desses métodos. A alocação final é baseada em um conjunto de restrições e preferências que refletem as características de uso das terras, os processos assumidos, bem como as restrições relevantes de cada cenário (VERBURG et al., 2004; VERBURG et al., 2006; WASSENAAR et al., 2007; VERBURG et al., 2007, VERBURG et al., 2009).

## **2.4 A bacia hidrográfica do arroio Marrecas em Caxias do Sul/RS como caso de estudo**

No final do século XIX, o abastecimento de água à população de Caxias do Sul ocorria prioritariamente por fontes públicas e poços artesianos, apresentando como marco legal de apropriação deste recurso, o código de Posturas Municipais que estabelecia tais fontes como bens de uso comum. Em 1910 tem-se o registro dos primeiros investimentos relacionados à captação e distribuição de água relacionado a instalação de um sistema hidráulico que abastecia a Praça Dante Alighieri (SAMAE, 2016).

Com o crescimento da cidade e a constante limitação da capacidade de abastecimento de água, entre os anos de 1912 e 1924, foram realizados os primeiros levantamento e estudos relacionados a reservação de água no arroio Bal Bó, cujas obras foram iniciadas em 1926. Na ocasião dos estudos, essa bacia abasteceria potencialmente o dobro de habitantes do município da época, pois apresentava uma vazão de  $32 \text{ L s}^{-1}$  durante os períodos de estiagem (SAMAE, 2010; SAMAE, 2016).

O Sistema Bal Bó, constituído da represa São Miguel, implementação hidráulica e rede de distribuição entrou em funcionamento em 1928, mesmo com a obra inacabada. A conclusão do Sistema Dal Bó, ocorreu em meados da primeira metade da década de 1950, contando com três barragens: São Miguel, São Paulo e São Pedro (SAMAE, 2010). Contudo, o período de conclusão do Sistema coincidiu com a limitação de sua capacidade de abastecimento, tendo em vista que a população de Caixas do Sul apresentou um incremento na ordem de 58% entre a década de 1940 e 1950 (SAMAE, 2016; IBGE, 2016).

Em meados de 1963 foram iniciados os estudos de disponibilidade hídrica do Arroio Maestra, sendo que em 1966 o Departamento Municipal de Abastecimento Público tornou-se autônomo, pela lei Municipal nº 1.474, de 05 de janeiro de 1966, originando o Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE) de Caxias do Sul (SAMAE, 2010; CAXIAS DO SUL, 1966).

Com autorização do Presidente da República João Goulart foi doado ao município de Caxias do Sul a barramento do Arroio Maestra, obra concluída em 1971. Junto à estação de tratamento d'água constituía-se o Sistema Maestra. Contudo, a crise hídrica ainda perdurava no município, exigindo das autorizadas locais medidas de curto prazo. Desta forma, paralelamente à conclusão do Sistema Maestra, tomaram-se as primeiras medidas para a implantação do Sistema Faxinal, cuja primeira fase compreendeu o período entre os anos de 1971 e 1983, contando com duas barragens provisórias e obras acessórias que, por sua vez, solucionavam brevemente as restrições hídricas do município. A segunda fase de ampliação iniciou em 1987, levando 14 anos para ser finalizada, sendo considerada um marco no serviço de abastecimento hídrico do município (SAMAE, 2016; SAMAE, 2008).

Concomitantemente às ações de melhoria da capacidade de abastecimento d'água, o SAMAE investiu esforços no tratamento de efluentes, tendo em vista a preservação de recursos hídricos e a melhoria da qualidade de vida da população, que foram resultado da implantação de inúmeras estações de tratamento de esgoto no município. Por sua vez, tais medidas resultaram em vantagens, sejam práticas ou financeiras, no abastecimento de água. Neste contexto, em 2002, foi aprovado pela Câmara de Vereadores de Caxias do Sul o Plano Diretor de Esgotamento Sanitário, por meio da Lei Complementar 189/2002 (CAXIAS DO SUL, 2002; SAMAE, 2010).

Em 06 de dezembro de 2005 (CAXIAS DO SUL, 2005), aprovou-se na Câmara Municipal de Caxias do Sul a Lei Complementar nº 246, conhecida popularmente como “lei das águas”, estabelecendo conceitos e funções das Zonas das Águas (ZA) - bacias de captação e acumulação de água para abastecimento do Município de Caxias do Sul, disciplinando o uso e parcelamento do solo para espaços, entre outros providência. Seu objetivo, conforme art. 2º, era assegurar a disponibilidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos aos atuais usuários e às futuras gerações em padrões de quantidade e qualidade adequados ao consumo.

Em seu art. 53 da lei supracitada, incluiu-se a bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, juntamente com Galópolis, Faxinal, Piaí, Supultura e Mulada,

como integrantes da Zonas das Águas do Município de Caxias do Sul, contidas entre os divisores de água do escoamento superficial contribuinte dos seus respectivos mananciais, cursos e reservatório de água, sendo suas áreas classificadas em 1º categoria, ou seja, aquelas de maior restrição, objeto de preservação ambiental e 2º categoria, aquelas de menor restrição e que não se enquadram nas áreas de 1º categoria (CAXIAS DO SUL, 2005).

Tendo como prognóstico a crescente demanda por água, a taxa de crescimento da população de Caxias do Sul nos últimos 40 anos e o cenário de limite da capacidade de abastecimento de água pelas represas existentes no município, os estudos preliminares indicaram a bacia hidrográfica do Arroio Marrecas como sendo a mais promissora entre as bacias que compunham a Zonas das Águas, principalmente por se tratar de uma bacia hidrográfica com alto grau de conservação dos recursos naturais e boa qualidade ambiental. Desta forma, entre os anos de 2007 e 2008, foi elaborado Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), tendo como base o Termo de Referência expedido pela Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM), que atestou a viabilidade ambiental do Sistema Marrecas, composto por barragem, reservatório de chegada com 215ha de área de alagado e capacidade de acumulação de 33 milhões de metros cúbicos e barragem, rede de adutoras, Estação de Bombeamento de Água Bruta e Estação de Tratamento de Água (SAMAE, 2008).

Com a obtenção de Licença Prévia nº 1789/2008-DL em 06 de janeiro de 2009, emitida pela FEPAM, foi elaborado o Plano Básico Ambiental do empreendimento, composto por 12 Programas e 21 Subprogramas, que resultou na Licença de Instalação nº 015/2009, emitida pela Secretaria de Meio Ambiente (SEMA) de Caxias do Sul em 09 de abril de 2009, tendo como um de seus Programas o Plano de Conservação e Uso do Entorno do Reservatório Artificial (PACUERA) (SAMAE, 2010).

O PACUERA, conforme define a Resolução CONAMA nº 302 de 20 de março de 2002, em seu inciso III, do art. 2º, refere-se a um conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, uso e ocupação do entorno do reservatório artificial, respeitados os parâmetros

estabelecidos pela referida Resolução (BRASIL, 2002). Embora a Licença de Instalação fizesse menção à definição de diretrizes e proposições considerando um buffer de 1000m a partir da área de alagado do reservatório, na ocasião da elaboração do PACUERA optou-se por incluir toda a bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, por entender que a manutenção da qualidade e quantidade da água do reservatório resultaria do mapeamento e adequado manejo das atividades potencialmente poluidoras e das atividades produtivas, conjuntamente ao regramento do uso e ocupação do solo (SAMAE, 2010).

Assim, como etapa necessária para a obtenção da Licença de Operação do empreendimento, foi proposto o Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, que pode ser entendido como instrumento de planejamento e de ordenamento do uso e ocupação das terras e utilização dos recursos naturais. Desta forma, a bacia hidrográfica foi categorizada em quatro zonas distintas: Zona de Nível Crítico, Zona de Nível Elevado, Zona de Nível Moderado e Zona de Nível Baixo. Sendo que para cada Zona foram determinadas os usos proibitivos, restritivos e vetados, que por sua vez, serviram como base para a consolidação e proposição de Programas Ambientais para a fase de operação do empreendimento, visando a conservação ambiental da bacia hidrográfica, que trará como resultado a manutenção da qualidade e quantidade das águas superficiais (SAMAE, 2010).

### **3. HIPÓTESE E OBJETIVOS**

A hipótese deste estudo foi que cenários de uso das terras desenvolvidos a partir de tendências históricas observadas podem ser alocados de forma espacialmente explícita com o modelo CLUE-S, que integra ferramentas estatísticas e geoespaciais para identificar áreas de potencial expansão de usos intensivos (aos quais estão associados riscos de degradação das terras e águas).

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- 1) Criar uma base de dados geoespacial, incorporando dados e informações disponíveis sobre a bacia do Arroio Marrecas;
- 2) Realizar campanhas de reconhecimento, validação e atualização dos dados e informações existentes;
- 3) Avaliar a qualidade das águas superficiais segundo legislação vigente, relacionando suas concentrações aos usos das terras predominantes aos pontos de monitoramento;
- 4) Implementar o modelo CLUE-S baseado em tendências explícitas, observadas ou inferidas, de mudanças de usos das terras, para visualizar áreas de potencial risco de degradação, neste caso usualmente associadas à agricultura intensiva.

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

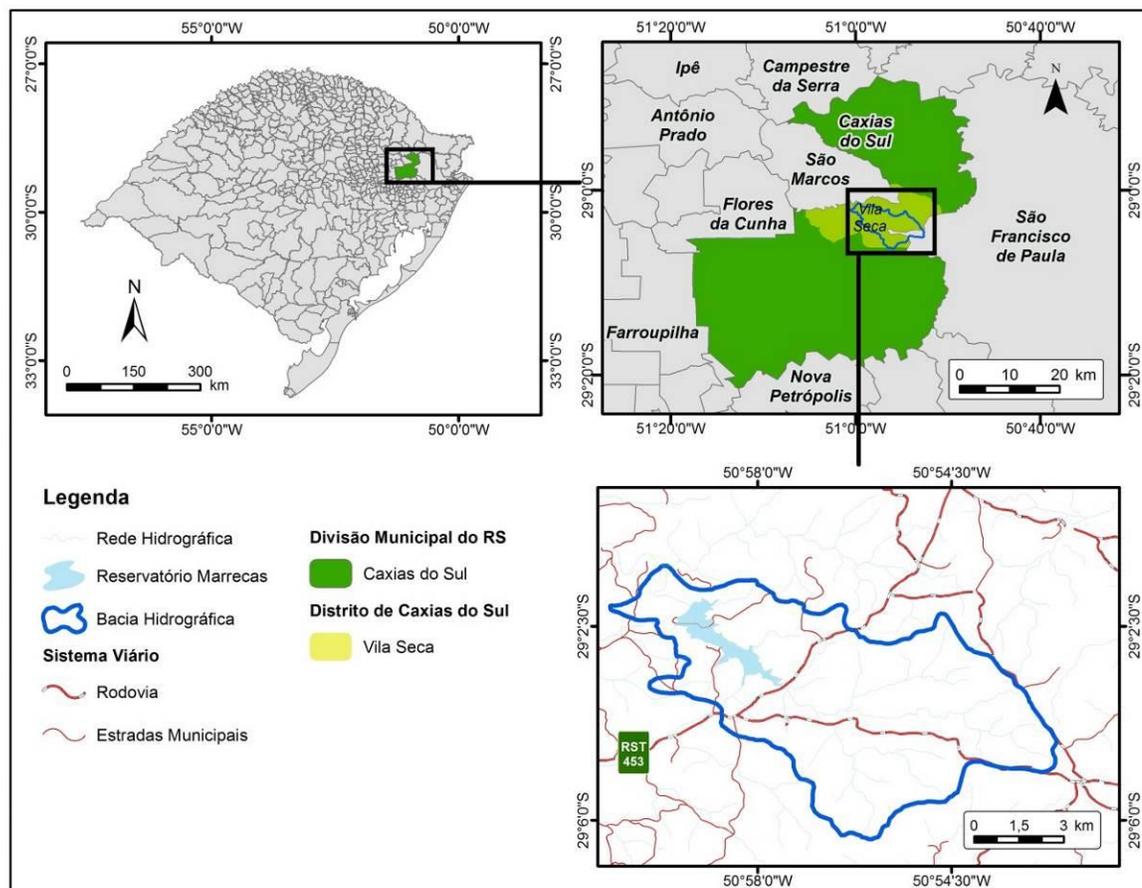
### **4.1. Caracterização da área de estudo**

A área objeto de estudo compreende a bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, localizada no Distrito de Vila Seca, quadrante nordeste do Município de Caxias do Sul (RS). A área total da bacia hidrográfica é de 5.649 ha, com uma pequena fração de área pertencente ao Distrito de Cazuza Ferreira do Município de São Francisco de Paula (Figura 1).

Integra a Bacia Hidrográfica Taquari-Antas (SEMA, 2016) e situa-se na província geomorfológica do Planalto Meridional (SUERTEGARAY et al., 2004). A vegetação predominante é caracterizada por Floresta Ombrófila Mista (parte da Mata Atlântica brasileira) e Campos Sulinos (Estepe) (SAMAE, 2008). O relevo varia de suave a fortemente ondulado.

Um aspecto geográfico relevante que modificou a paisagem da bacia do Arroio Marrecas entre 2010-2013 foi a instalação de uma barragem para abastecimento de água da cidade de Caxias do Sul, com 215 ha de área de reservação (alague) e capacidade de armazenamento de 33 milhões de m<sup>3</sup>.

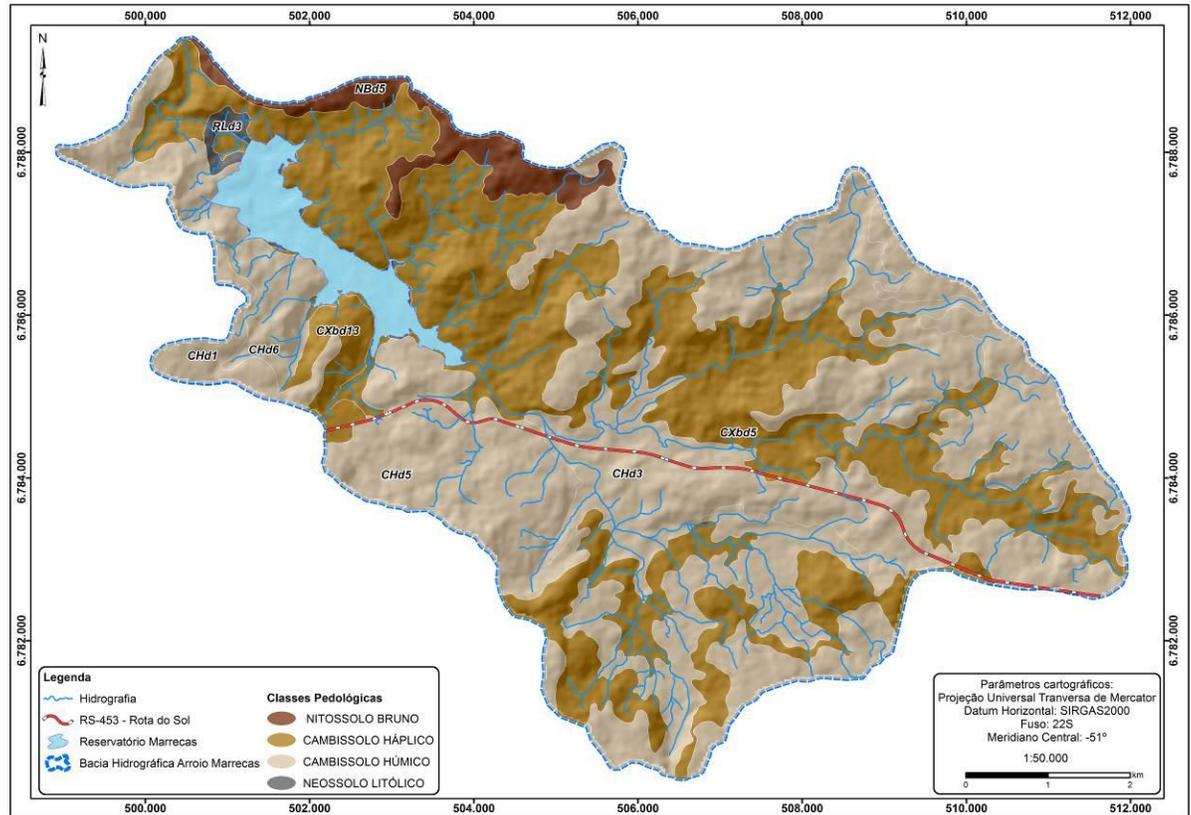
O clima é classificado como subtropical úmido. Conforme dados obtidos na Estação Meteorológica de Caxias do Sul, a precipitação média anual é de 1690 mm, com temperatura média no mês mais frio (julho) inferior a 9°C e superior a 25°C no mês mais quente (dezembro), considerando a série histórica 1970-2015 (INMET, 2016).



**Figura 1.** Localização da região de estudo: Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, Vila Seca - Caxias do Sul, RS.

#### 4.1.1 Solos

Segundo Flores et al. (2012) e SAMAE (2010), em levantamento de solos realizado na Serra Gaúcha em escala 1:50.000 (Figura 2), predominam na área de estudo Neossolos Litólicos, Cambissolos Háplicos, Cambissolos Húmicos e Nitossolos Brunos.



**Figura 2.** Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, Vila Seca - Caxias do Sul, RS.

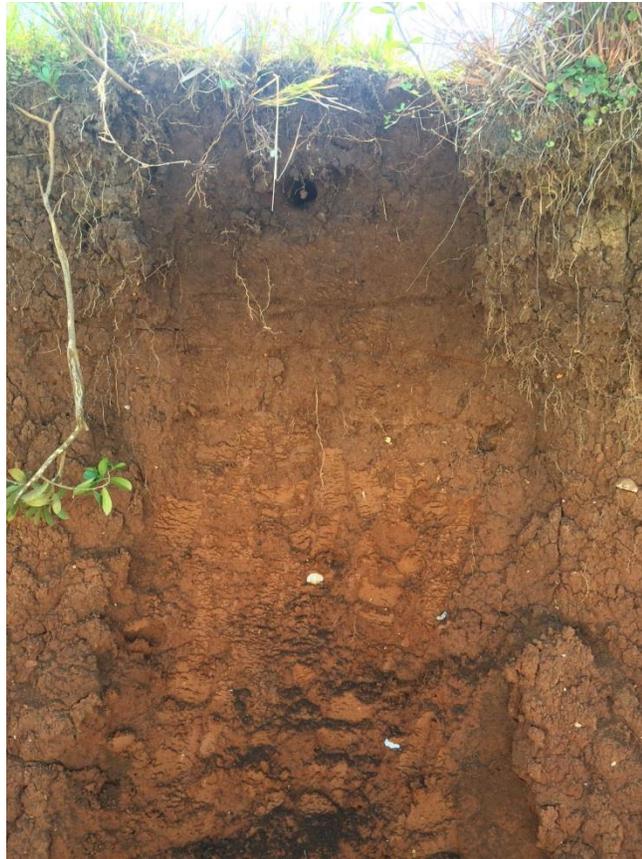
Os Cambissolos compreendem solos com pedogênese pouco desenvolvida e espessuras de perfil variando entre raso e profundo. De modo geral, evidenciam alteração do material de origem, pois em sua grande maioria não apresentam fragmentos de rocha em sua estratigrafia. Embora presente concentração de argila em subsuperfície, os demais critérios adotados não permitem seu enquadramento como Argissolo ou Latossolo. Seu horizonte diagnóstico é corresponde ao B incipiente, ou seja, horizonte com grau intermediário de desenvolvimento, porém, suficiente para o desenvolvimento de cor e unidade estruturais (EMBRAPA, 2013). Dependendo da posição que ocorrem na topossequência podem variar de bem drenado a imperfeitamente drenado. Segundo Streck et al., (2008), os Cambissolos que ocorrem no RS são diferenciados predominantemente pela concentração de matéria orgânica em superfície. Assim sendo, os Cambissolos com elevadas concentrações de matéria

orgânica em superfície correspondem no segundo nível categórico como Húmico, enquanto que aqueles com horizonte superficial enquadrado como proeminente e moderado são Cambissolos Háplicos.



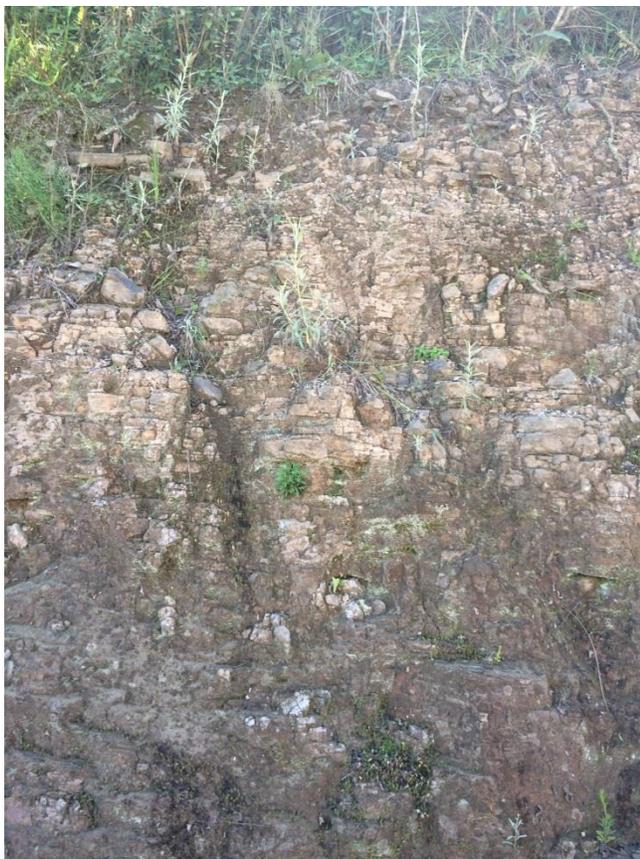
**Figura 3.** Cambissolo observado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas.

Os Nitossolos compreendem solos com textura argilosa ou muita argilosa desde sua superfície, além da presença de cerosidade, entre outros aspectos. São solos profundos com aparência muito próxima dos Latossolos, em se tratando da homogeneidade do perfil. Seu horizonte diagnóstico refere-se ao B nítico. Tal horizonte caracteriza-se por moderado a forte grau de desenvolvimento, apresenta de cerosidade, argila de atividade baixa ou caráter Alítico (EMBRAPA, 2013). Segundo Streck et al., (2008) nos Campos de Cima da Serra, predominam os Nitossolos Brunos. Apresentam boa aptidão agrícola, desde que respeitado os limites impostos pela declividade do terreno e corrigida sua fertilidade natural.



**Figura 4.** Nitossolo localizado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas.

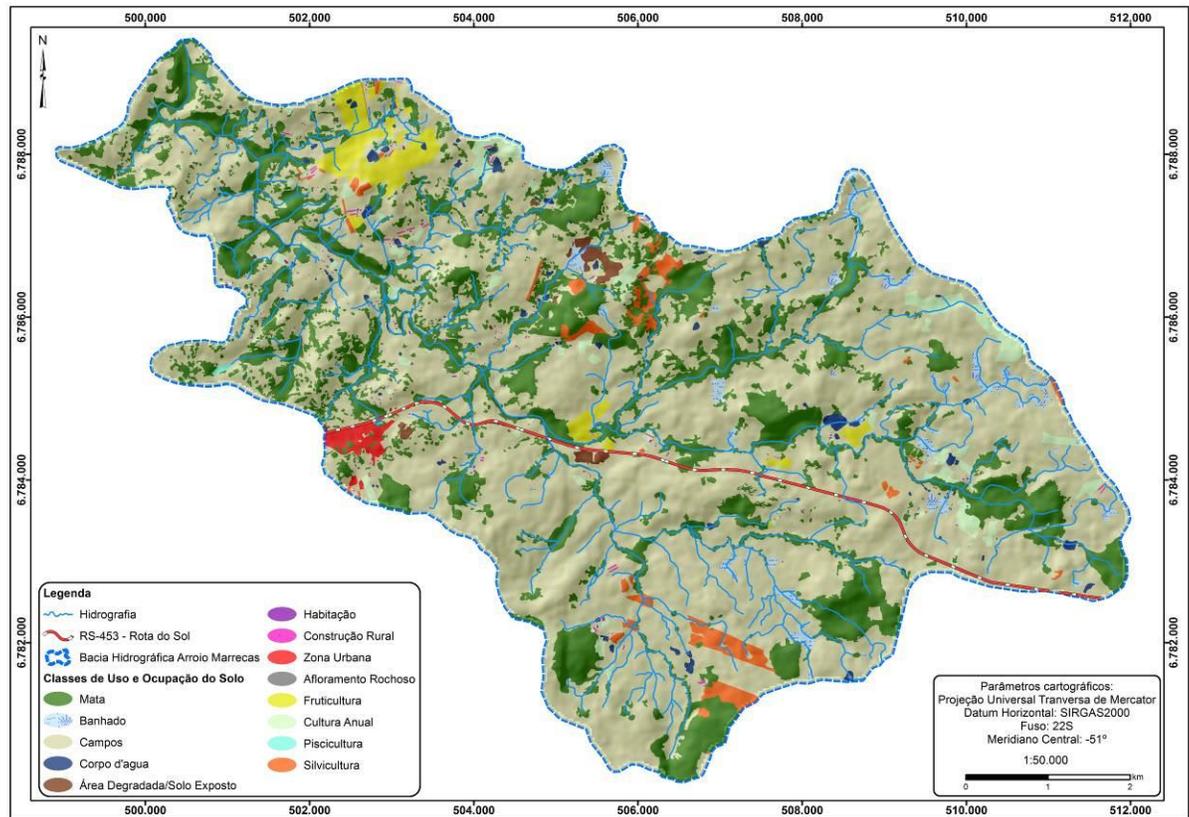
Os Neossolos constituem solos pouco desenvolvidos, sem a apresenta de horizonte diagnóstico em subsuperfície ou de atributos diagnósticos que infiram na determinação de processos pedogenéticos específicos (EMBRAPA, 2013). Quando Litólicos, apresentam horizonte superficial, seja A ou O, assentado diretamente sobre a horizonte C ou Cr, ou ainda, sobre a rocha de origem. Na região da Serra Gaúcha, costumam ocorrer em porções de relevo mais acidentado (STRECK et al., 2008).



**Figura 5.** Neossolo Litólico localizado na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas.

#### **4.1.2 Uso e Cobertura das Terras**

Para a avaliação da dinâmica de alterações nos usos das terras na área de estudo foi utilizado o levantamento pré-existente (SAMAE, 2010) (Figura 6) e adicionalmente realizados dois novos mapeamentos. Conforme a disponibilidade de fontes de dados, foram escolhidos os anos de 1966 e 2015 para melhor avaliar as mudanças mais recentes. Esta análise utilizou ferramentas de geoprocessamento (SIG), com o software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2010).



**Figura 6.** Mapa de uso das terras em 2010 da bacia do Arroio Marrecas.

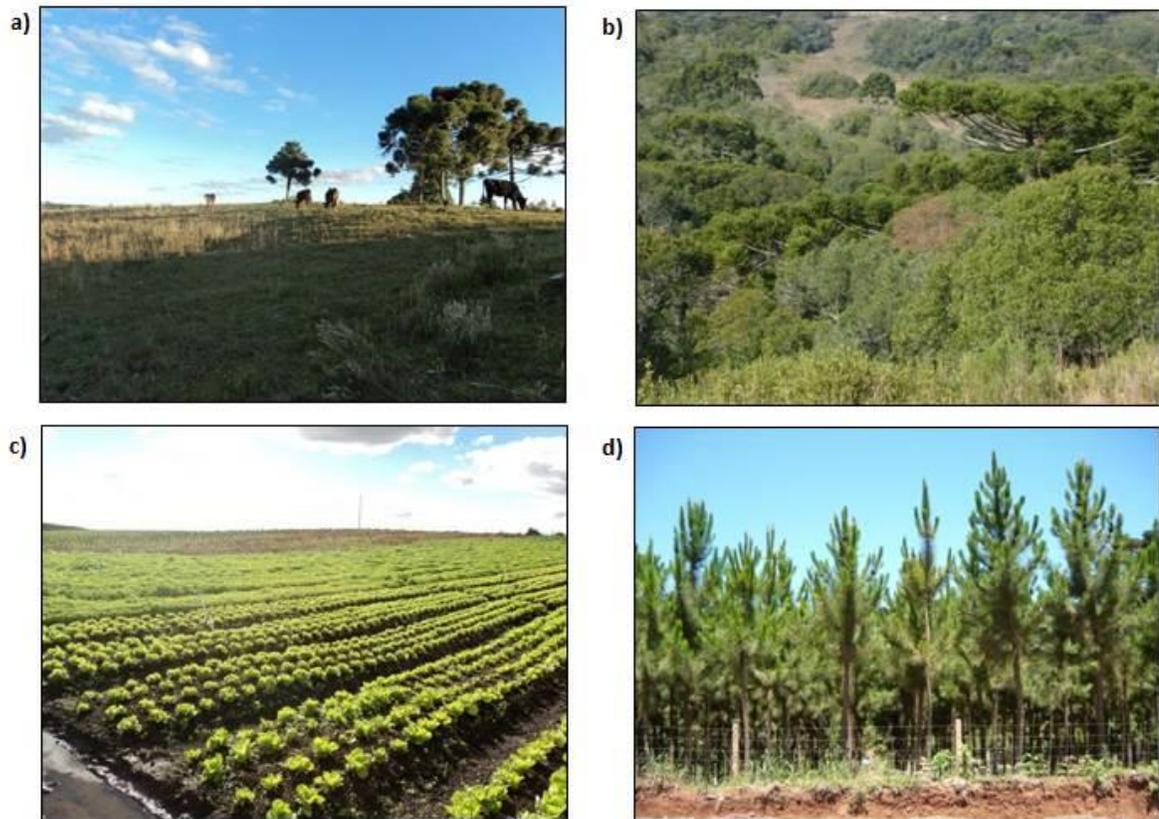
O mapa de uso e ocupação das terras em 1966 foi construído por meio da vetorização de feições por interpretação visual de aerofotos da campanha de aerofotogrametria de 1965-1966, disponibilizadas pela 1<sup>o</sup> Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro. Estas aerofotos, com escala aproximada original 1:60.000 (arquivadas na 1<sup>a</sup> DL com a numeração 17877, 17879, 17880 e 18878), foram digitalizadas e georreferenciadas com feições notáveis (pontos de controle) identificados nas cartas topográficas digitais 1:50.000 (folhas Oliva e Caxias do Sul) disponibilizadas no BDGEx - Banco de Dados Geográficos do Exército Brasileiro (BRASIL, 2016). O mapa do ano de 2015 resultou da vetorização de feições por interpretação visual de mosaico georreferenciado e ortoretificado de imagens orbitais de alta resolução obtidas por fusões das bandas multiespectrais e pancromáticas de imagens dos satélites QuickBird e GeoEye (ESRI, 2013), adquiridas entre 2013 e disponibilizadas na coleção de dados básicos do ArcGIS (basemap). O resultado desta vetorização em tela foi

verificado *in loco* em 2015, entre setembro e outubro pela reambulação da totalidade da bacia hidrográfica.

Dez classes de uso das terras foram utilizadas para identificar feições naturais e antrópicas nesta paisagem:

- Campos: vegetação herbácea com espécies características dos Campos de Altitude, constituída por gramíneas e leguminosas, ocorrendo durante todo ano a exploração de pecuária leiteira e de corte, além da criação de ovinos (Figura 7-a).
- Corpos D'água: inclui açudes cuja água é utilizada para fins de irrigação ou dessedentação animal, também incluindo tanques-d'água destinados da produção de peixes e alevinos;
- Mata: constituída predominantemente por Floresta Ombrófila Mista, cuja cobertura característica é composta por araucária (*Araucaria angustifolia*) e outras espécies de árvores, arbustos, ervas, epífitas e lianas, que variam em abundância e porte dependendo do local e do estágio de desenvolvimento da comunidade (Figura 7-b);
- Banhado (Campos Úmidos): normalmente localizado em áreas de depressão, com baixa declividade e solos de drenagem imperfeita, com encharcamento durante todo o ano e vegetação característica;
- Culturas Anuais: nesta classe estão incluídas lavouras que concluem seu ciclo reprodutivo em um período inferior a um ano, onde predominam o cultivo de olerícolas (Figura 7-c) e cultivos anuais de cereais como trigo e milho e pastagens anuais, especialmente aveia (*Avena strigosa*) e azevém (*Lolium multiflorum*);
- Zona urbana: área urbana de Vila Seca e loteamentos ao longo da rodovia RS-453 ( Rota do Sol);
- Silvicultura: povoamentos de espécies arbóreas exóticas (*Pinus elliottii* e *Eucalyptus*) para exploração florestal (Figura 7-d);
- Fruticultura: pomares comerciais de espécies de clima temperado como macieira, pereira, ameixeira, caquizeiro e pessegueiro;

- Reservatório da Barragem do Arroio Marrecas;
- Outros Usos: incluindo pequenas áreas com construções rurais (galpões, aviários) e habitações, áreas degradadas com solo exposto e afloramentos rochosos.



**Figura 7.** Exemplos de usos atuais das terras na bacia do Arroio das Marrecas: a) Paisagem original campestre (parte dos Campos Sulinos), com atividade antrópica de baixo impacto (criação extensiva de bovinos); b) Paisagem original arbórea (Floresta Ombrófila Mista), com *Araucaria angustifolia* no extrato superior; c) Horticultura como cultivo agrícola intensivo; d) Silvicultura de *Pinus elliottii* para fins madeireiros.

### 4.1.3 Qualidade de água superficial

A qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas foi avaliada a partir de dados referentes a três pontos de coleta do total de nove pontos que foram monitorados entre os anos de 2008 e 2013 pelo Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Caxias do Sul (SAMAE, 2008; SAMAE, 2010). A escolha de tais pontos levou em consideração tanto o número de resultados disponíveis por ponto quanto sua representatividade das mudanças de uso e cobertura das terras à montante. Estes dados foram obtidos segundo as melhores técnicas de coleta e processamento das amostras, sendo estas analisadas em laboratórios credenciados pelo órgão ambiental (FEPAM-RS). Os métodos empregados para as análises físico-químicas seguiram práticas recomendadas pelo “*Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th edition*”, conforme mostra a Tabela 1.

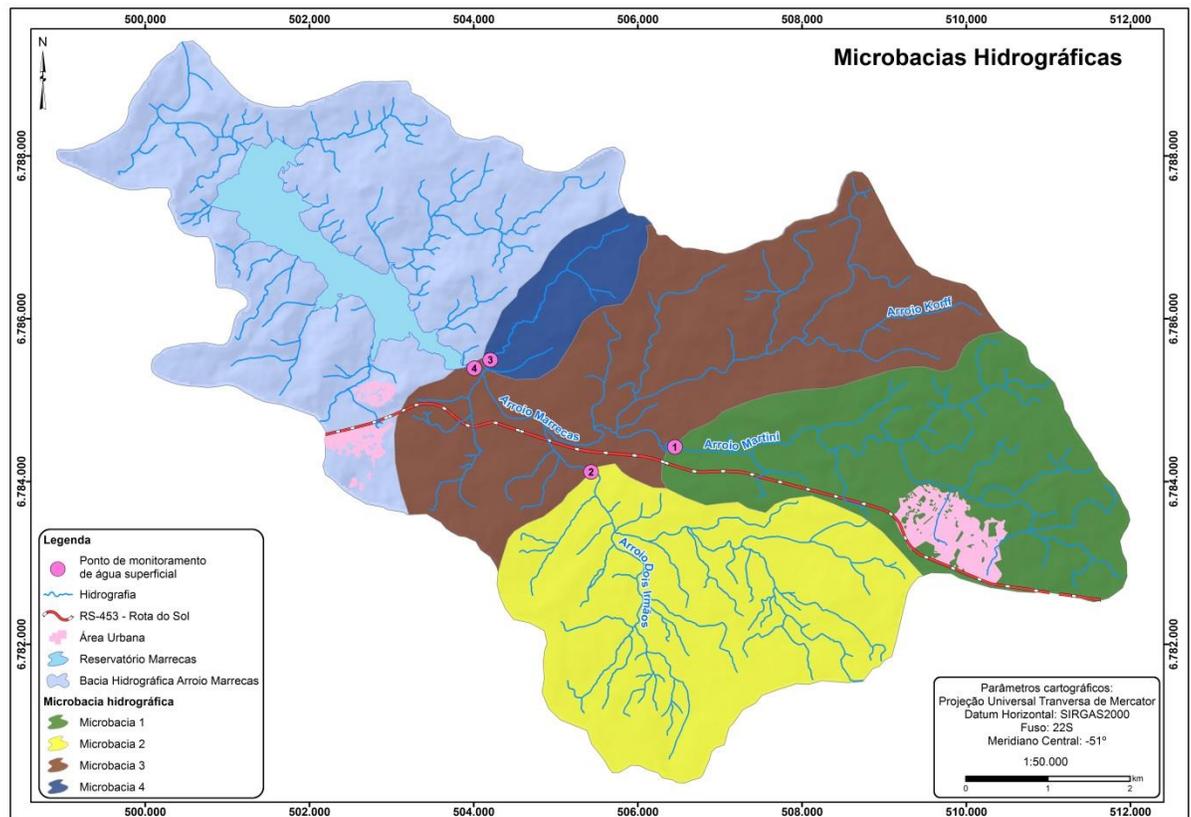
**Tabela 1:** Parâmetros de qualidade de água superficial e metodologia analítica, conforme *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 20th edition*.

Variáveis	Metodologia Analítica
Turbidez	Turbidimetria (Método 2130)
Fósforo Total	Espectrofotometria automática com molibdato de amônio e ácido ascórbico (Método 4500-P – itens B e F)
Nitrato	Cromatografia iônica (Método 4110-C)
Sólidos Dissolvidos Totais	Gravimetria (Método 2540)
Coliformes Termotolerantes	Turbidimetria (Método 2130)

Para este estudo foram escolhidos para avaliar a qualidade das águas relacionada com mudanças de usos das terras os parâmetros: turbidez, fósforo total, nitrato, sólidos dissolvidos totais e coliformes termotolerantes. Para esta avaliação, a bacia hidrográfica foi subdividida em 4 subbacias (Figura 8), definidas no ArcGIS por vetorização em tela pela identificação de nascentes e cursos d’água de 1ª ordem e relevo, e verificadas posteriormente *in loco*. A quantificação dos usos das terras assim como o número de habitações nas sub-bacias foram obtidos por operações de sobreposição (*overlay*) no ArcGIS. Adicionalmente foi

estimado o número de animais de criação (bovinos e suínos), a partir de dados fornecidos pela Inspeção Veterinária e Zootécnica de Caxias do Sul (SEAPA/RS).

Os dados obtidos entre os anos de 2010 e 2011, os quais apresentaram menor espaço temporal entre as coletas, foram submetidos à análise de correlação no software SigmaPlot (Systat Software, 2008) para entender as possíveis influências do uso e ocupação das terras sobre a qualidade da água superficial.



**Figura 8.** Pontos de monitoramento de qualidade de águas superficial e delimitação de sub-bacias avaliadas.

## 4.2 Modelagem de Cenários

Para avaliação de cenários futuros de usos e ocupação das terras, utilizou-se modelo CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small Regional Extent*), escolhido por ser um modelo consolidado, reconhecido e

amplamente utilizados em diferentes contextos e escalas (Verburg e Overmars, 2009; Verburg et al., 2007; Verburg et al, 2002; Veldkamp et al., 1996).

Em síntese, o “ambiente de modelagem” (*framework*) CLUE-S foi desenvolvido para realizar simulações espacialmente explícitas de mudanças de uso da terra a partir de análises empíricas de adequabilidade e tendências de alocação dos usos identificados em uma área de interesse. A análise é baseada inicialmente em uma abordagem estatística (regressão logística) que estabelece quantitativamente os fatores determinantes para cada uso das terras. Após é realizada uma simulação de competição e interação pixel a pixel a partir do cenário de uso das terras atual e a dinâmica temporal prevista para alocar espacialmente os cenários futuros vislumbrados.

A seguir apresentamos resumidamente o protocolo de implementação do modelo CLUE-S em sua versão mais atual, como indicado pelos desenvolvedores. A documentação completa, inclusive com modelos, pode ser encontrada na página eletrônica do *Institute for Environmental Studies da Universidade de Amsterdam* (IVM, 2016).

#### **4.2.1 Base de dados geoespacial**

A implementação do modelo CLUE-S conforme proposto por seus desenvolvedores no tutorial (“CLUES-S Course Material 2010”) disponível na página eletrônica do IVM (CLUE-S, 2016) demandou a construção de uma base de dados abrangendo os principais atributos agrônômicos, biológicos e geomorfológicos que podem influenciar direta ou indiretamente a dinâmica de uso e ocupação das terras. Esses atributos são representados por variáveis explanatórias ou “fatores forçantes” (*driving factors*) espacialmente explícitos, que podem ser trabalhados em ambiente de geoprocessamento. Os atributos são escolhidos previamente pelo modelador com base na ampla literatura sobre o tema já existente, e ponderada pelo conhecimento pretérito da região de estudo. Usualmente esta etapa é bastante onerosa e exigente em termos de tempo e recursos, pois demanda pesquisas e consultas às diferentes fontes de dados

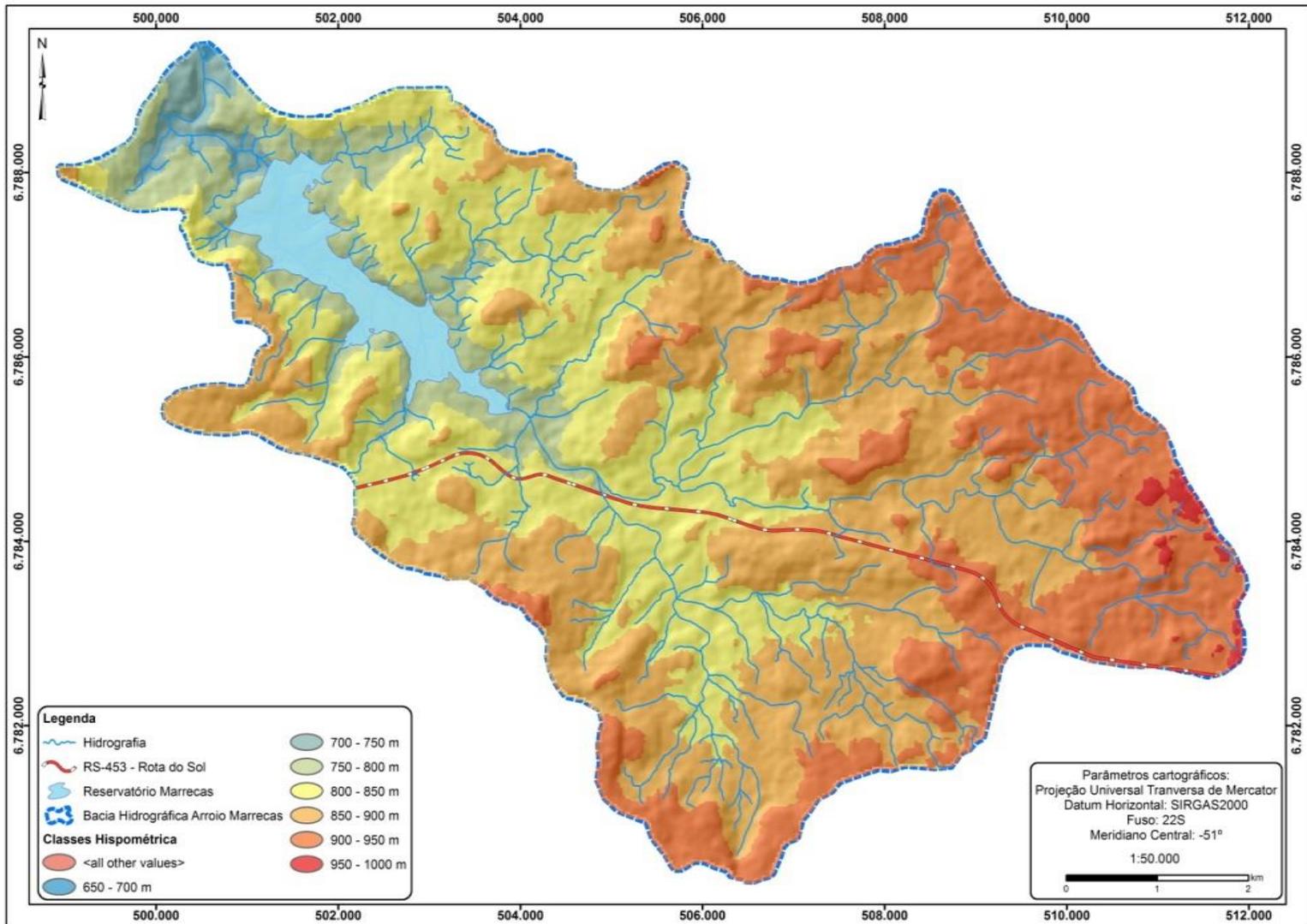
geoespaciais e posterior tratamento dos dados para adequação ao formato requerido pelo modelo.

Apoiado no conhecimento adquirido em atividades profissionais prévias na bacia do Arroio Marrecas (SAMAE, 2010), em discussões com técnicos das Secretaria de Agricultura e Abastecimento e do órgão de abastecimento de água (SAMAE) de Caxias do Sul, e na revisão bibliográfica, foram selecionadas as seguintes variáveis explanatórias para os cenários de uso e ocupação das terras:

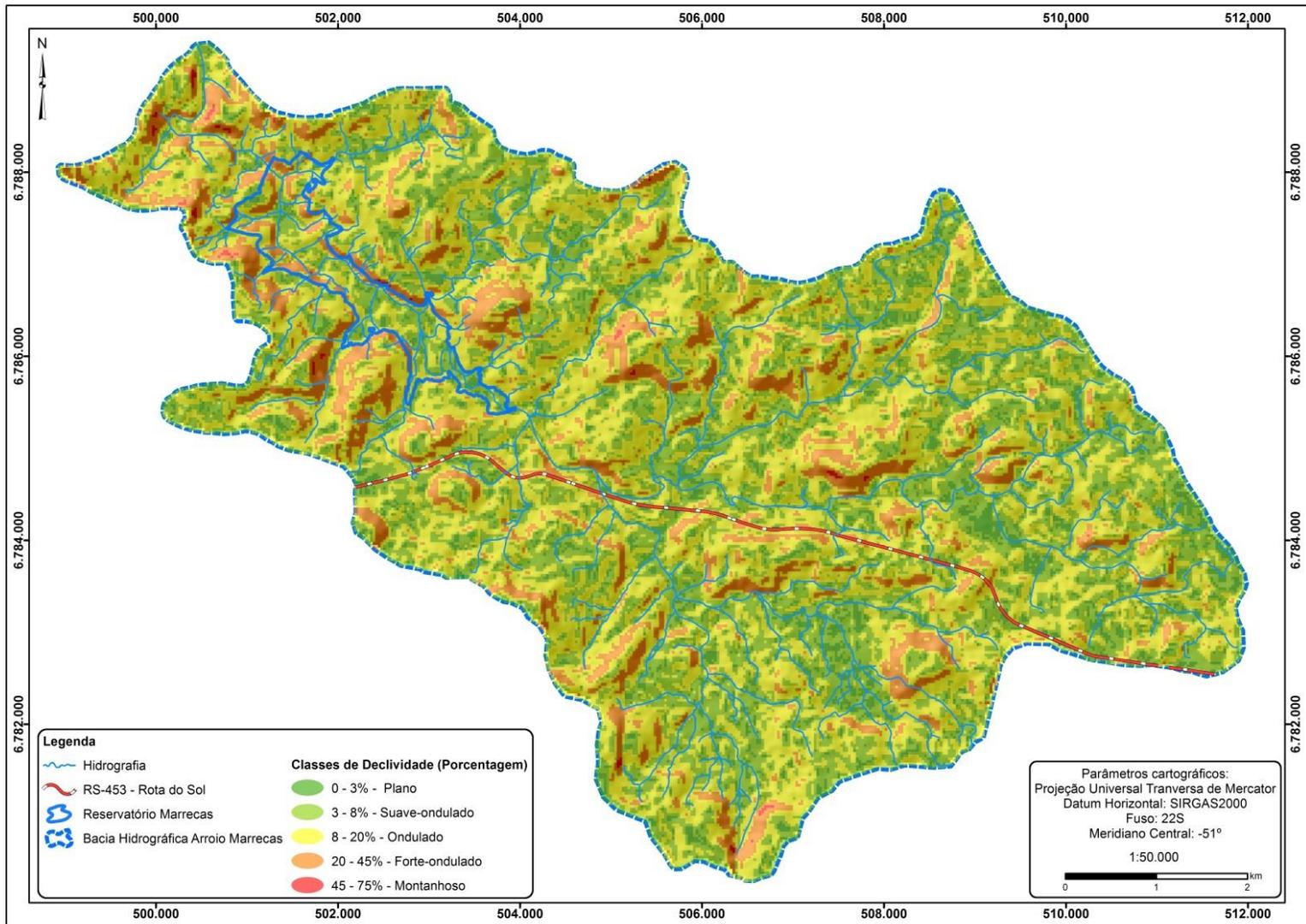
- Uso e ocupação das terras: constitui a linha de base do modelo, correspondente ao mapa de uso e ocupação das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas para ano de 2015. Para tanto, houve a simplificação de algumas classes, resultando em um mapa com 5 classes: lavouras anuais, mata, campos, silvicultura/fruticultura, área urbana e outros usos;
- Solos: recorte do mapa de solos do projeto da região vitivinícola do RS (Flores et al., 2010) com os limites da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas;
- Hipsometria: modelo digital de elevação (MDE) SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com pixel de 90 metros;
- Declividade: obtida a partir do MDE com a função *Slope* do ArcGIS;
- Distância da rede hidrográfica: obtida a partir da rede hidrográfica vetorial do levantamento de uso e cobertura (SAMAE, 2010) no ArcGIS;
- Distância das estradas: obtida a partir da rede viária vetorial do levantamento de uso e cobertura (SAMAE, 2010) no ArcGIS;
- Distância da zona urbana: obtida a partir dos polígonos de zonas urbanas, levantamento de uso e cobertura (SAMAE, 2010), atualizados com a revisão deste estudo (2015) no ArcGIS.

A simulação da dinâmica de uso e ocupação das terras utilizou planos de informação temáticos (*layers*) compatíveis com ArcGis versão 10.3 (Figura 9 a

Figura 14) com as variáveis explanatórias convertidos para o formato matricial (ASCII *raster*), conforme requerido pelo CLUE-S.



**Figura 9.** Plano temático usado para simulações com CLUE-S: hipsometria (MDE).



**Figura 10.** Plano temático usado para simulações com CLUE-S: declividade.

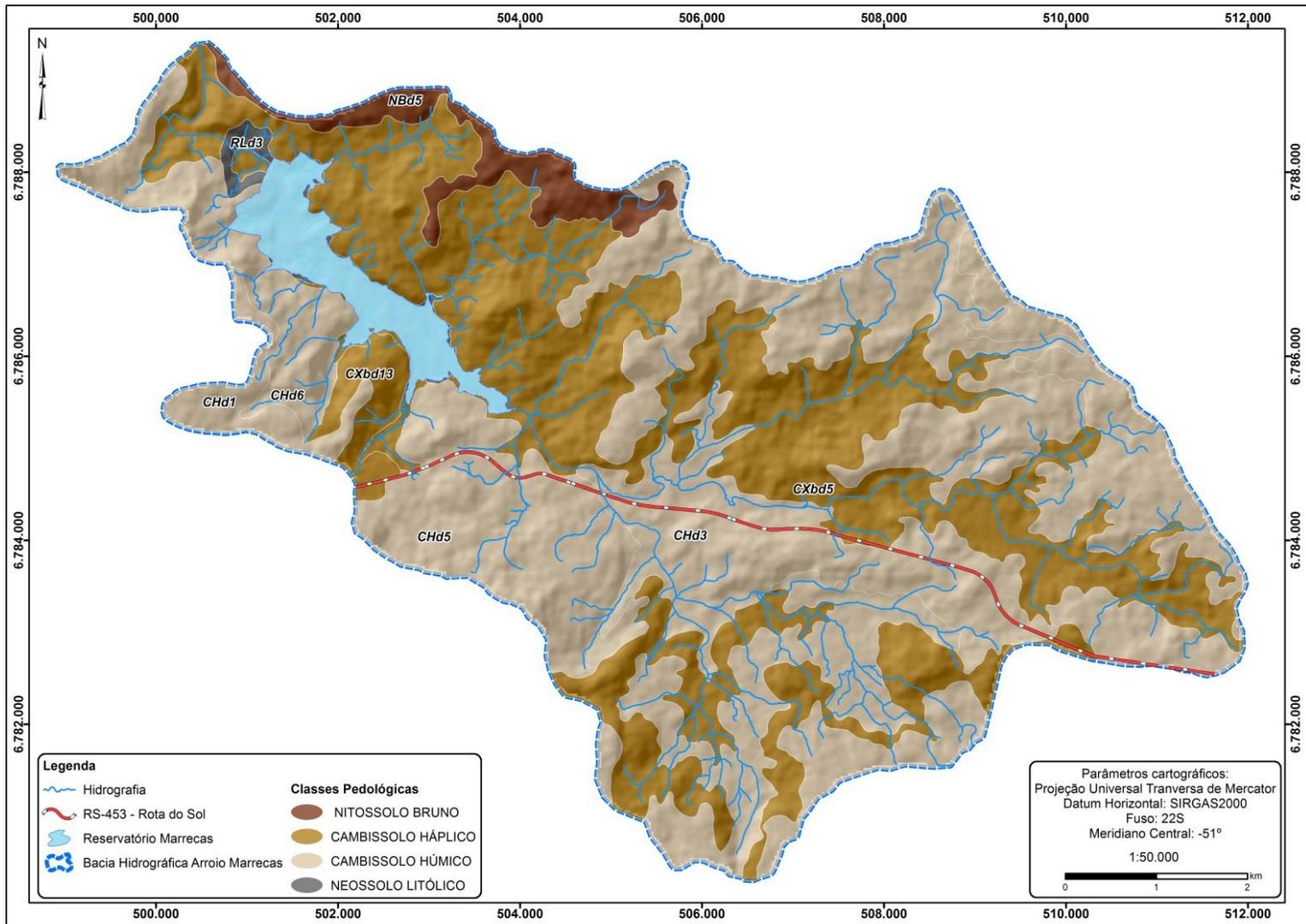


Figura 11. Plano temático usado para simulações com CLUE-S: solos.

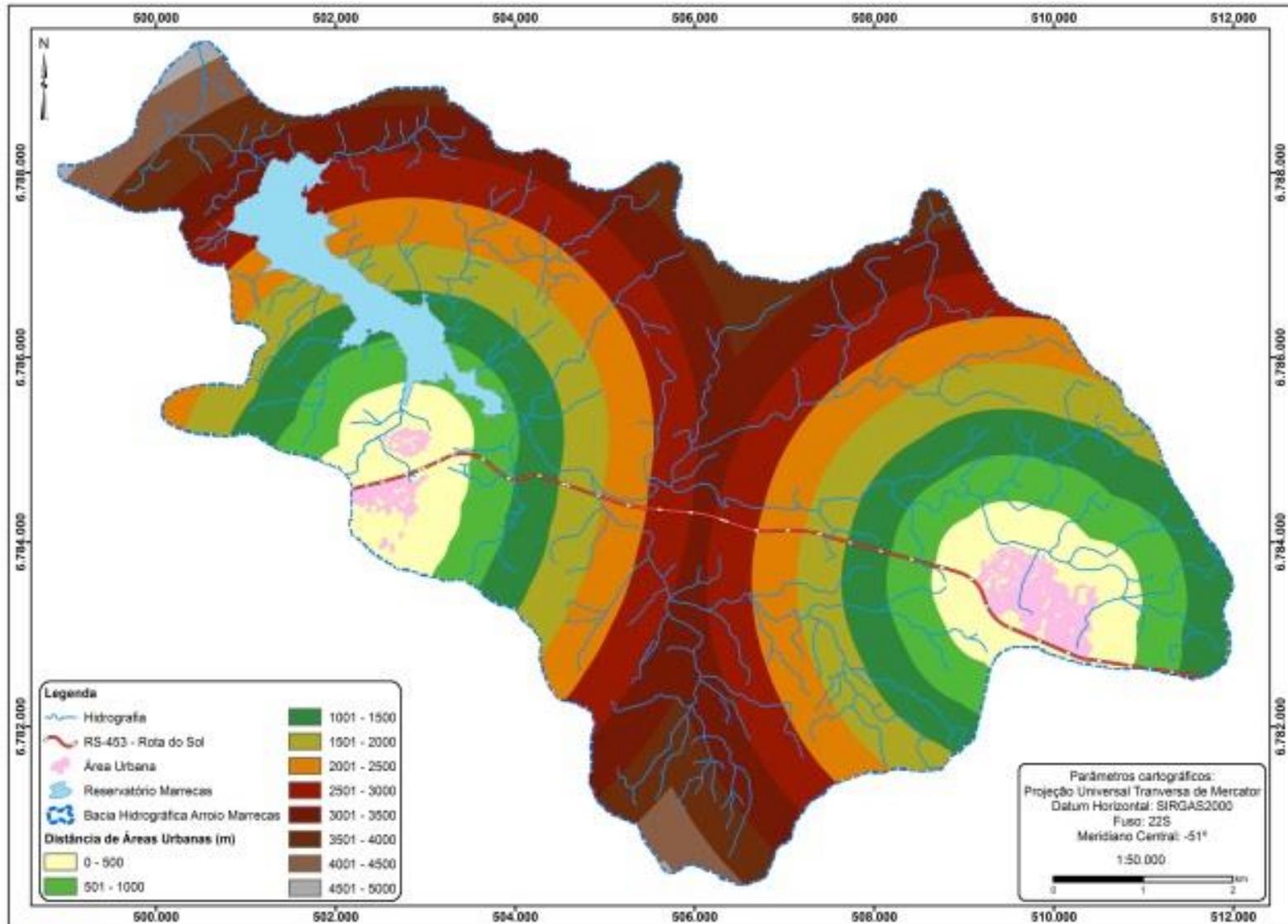


Figura 12. Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância das zonas urbanas.

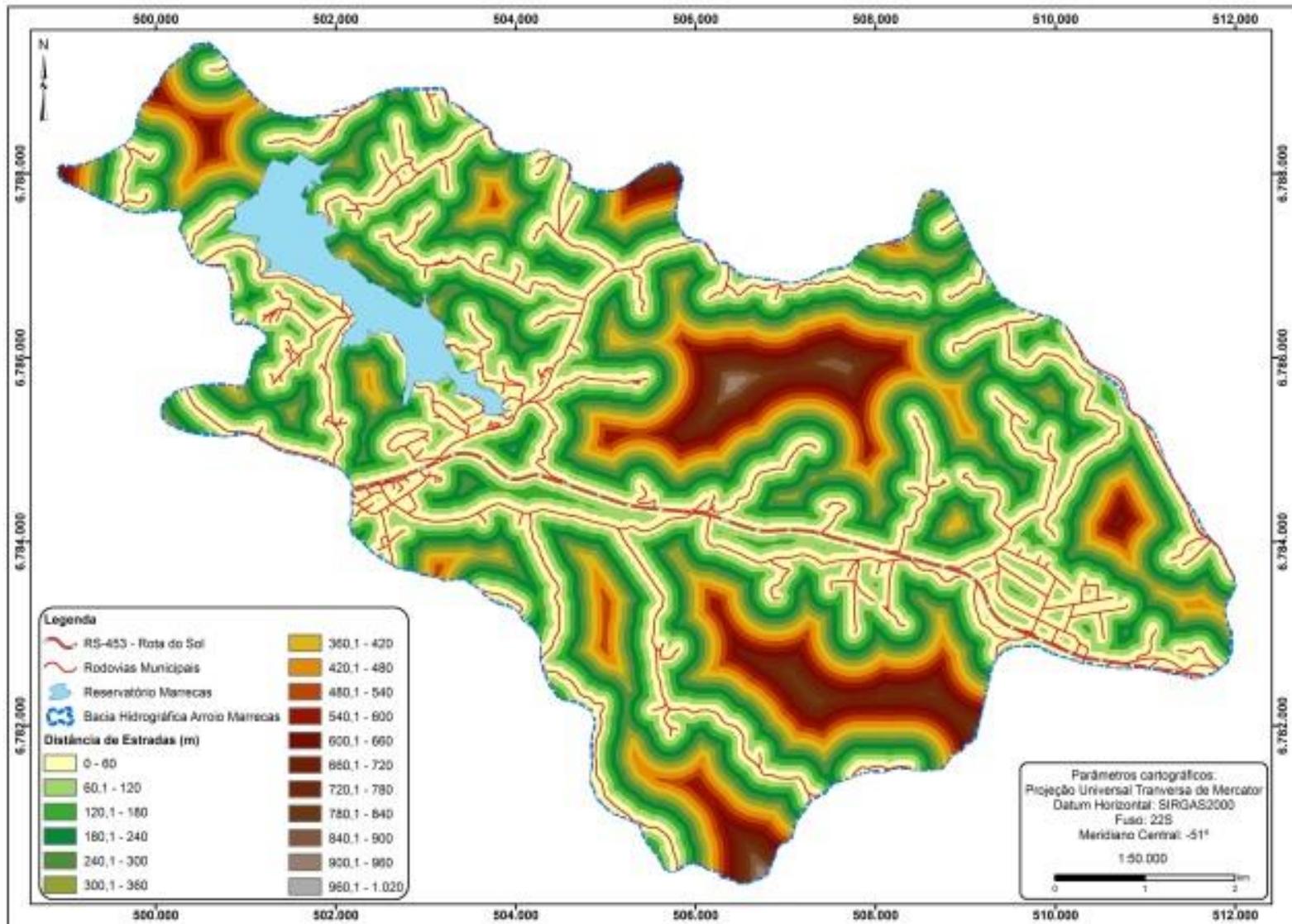


Figura 13. Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância da rede viária.

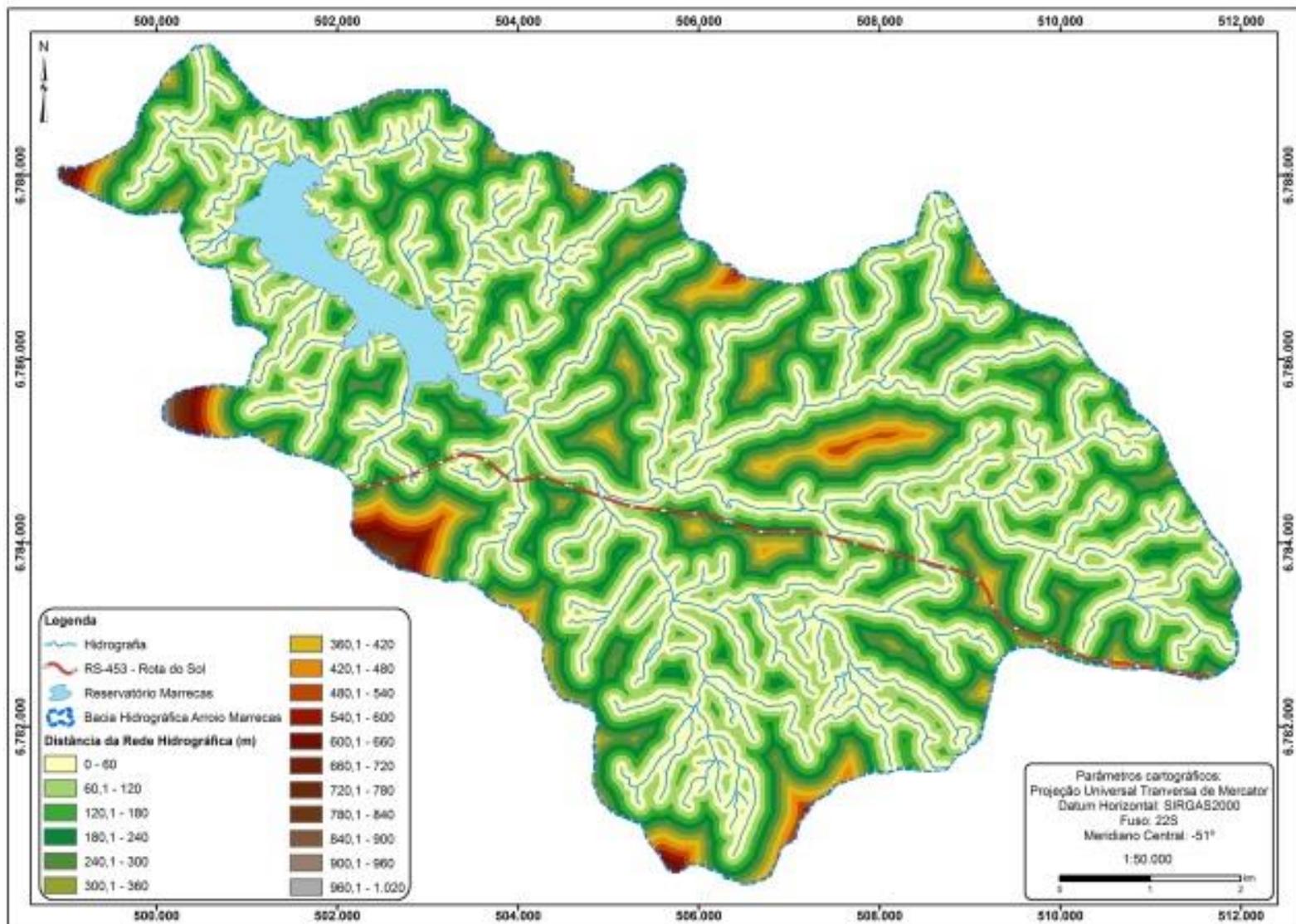


Figura 14. Plano temático usado para simulações com CLUE-S: distância da rede de drenagem.

### 4.2.2 Análise de Regressões Logísticas

A regressão logística é um método estatístico bastante utilizado para análise espacial, identificando e selecionando variáveis que melhor explicam os padrões de uso do solo (OVERMARS et al., 2007 ; VERBURG et al., 2002), versão em português do tutorial do CLUE-S, Soler (2010) explica que a análise de regressão logística permite estabelecer relações entre as categorias do uso e ocupação das terras (variáveis dependentes) e os fatores explanatórios (variáveis independentes), possibilitando prever quais características (ou ausências destas) trazem influência sobre a variável dependente.

Nesta aplicação da regressão logística para simulações com o CLUE-S, as variáveis dependentes foram: a hipsometria (MDE), a declividade, as classes de solos, as distâncias da zonas urbanas, a rede viária e a rede de drenagem. Estes planos de informação de SIG foram convertidos pela ferramenta *file converter* do CLUE-S para obtenção de arquivos em formato texto que puderam ser utilizados diretamente para análise de regressão logística no SAS (SAS, 2016).

Os resultados desta análise podem ser visualizados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados da análise de regressão logística preparatória para a implementação do modelo CLUE-S.

<b>Variáveis Independentes</b>	<b>Variáveis Dependentes</b>				
	<b>Lavoura</b>	<b>Mata</b>	<b>Campo</b>	<b>Frut/Silv</b>	<b>Zona Urbana</b>
	<b>Beta*</b>				
<i>Intercepção</i>	-11.6304	-0.1780	1.8263	-4.1268	3.8998
Declividade	-0.1001	0.0598	-0.0306	-	-
Distância de Estradas	-0.0049	0.0014	0.0003	-0.0013	-
Distância Recurso Hídrico	-	-0.0010	0.005	0.0015	-
Hipsometria	0.0099	-	-0.0026	-	-
Cambissolo Háptico	0.4161	-	0.5844	-	-
Cambissolo Húmico	-	-0.5457	1.2529	-0.7773	-
Nitossolo Bruno	1.3449	-	-	-	-
Neossolo Litólico	-	0.8529	-	-	-
Distância Zona Urbana	0.0003	-0.00006	-	0.0006	-0.2105

\*coeficiente de regressão logística.

### 4.2.3. Execução das Simulações

A simulação dinâmica propriamente dita no modelo CLUE-S foi iniciada com o acesso à interface gráfica de usuário (Figura 15) para a configuração do modelo, cujas especificidades utilizadas para a região de estudo podem ser visualizadas na Tabela 3.

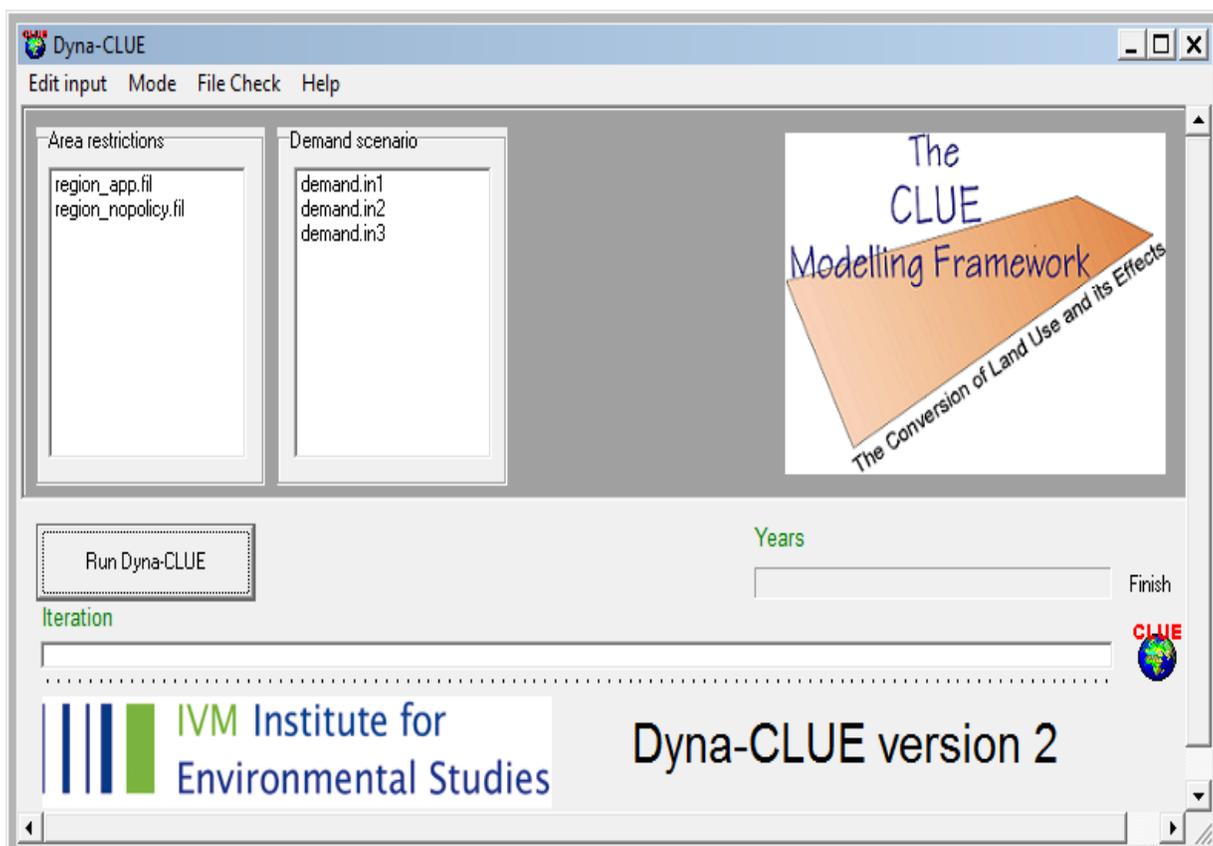


Figura 15. Interface do CLUE-S.

**Tabela 3.** Parâmetros de configuração (inicialização) do CLUE-S.

Parâmetros		Dados de Entrada					
1	Número de usos/coberturas da terra	6					
2	Número de regiões	1					
3	Máx. número de variáveis independentes na eq. de regressão.	7					
4	Número total de fatores explanatórios	9					
5	Número de linhas	101					
6	Número de colunas	145					
7	Área da célula de grade	0,81					
8	Coordenada x	498919.4					
9	Coordenada y	6780296.2					
10	Códigos dos usos da terra	0	1	2	3	4	5
11	Códigos das elasticidades dos usos da terra	1	0.7	1	1	0.3	1
12	Variáveis de interação	0	1	2			
13	Início e fim da simulação	2016	2034				
14	Número de fatores explanatórios dinâmicos	0					
15	Escolha do formato dos arquivos de saída	1					
16	Escolha de regiões com diferentes regressões	0					
17	Inicialização do histórico de uso da terra	1	5				
18	Escolha do cálculo de vizinhança	0					
19	Adição específica na preferência da área	0					

#### **4.2.3.1 Restrições de uso do terras**

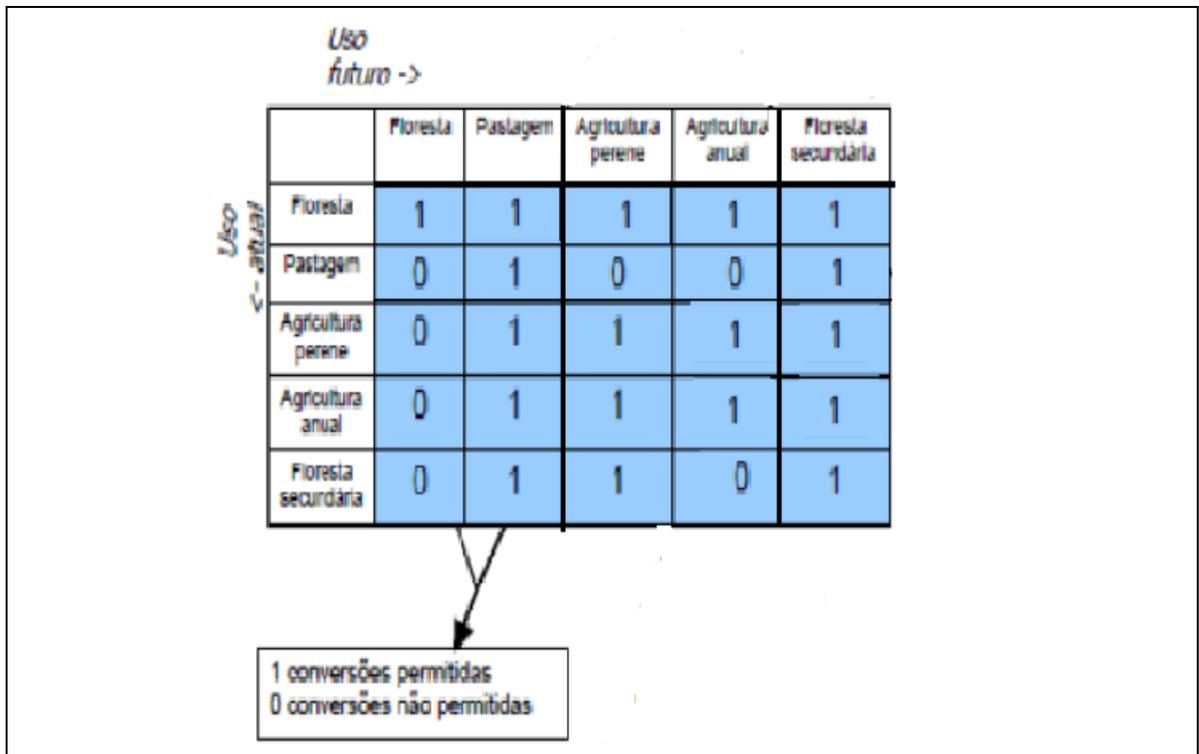
Na dinâmica de mudanças de usos das terras, é usual existirem restrições de uso do espaço onde as mudanças de uso da terra são limitadas por regulamentações (uso restrito e até mesmo proteção integral, como no caso do Código Florestal-Lei nº 12.651/2012). Estas restrições podem implicar no estímulo ou inibição de certas conversões de usos das terras. O CLUE-S contempla essa situação pela utilização de mapas que indiquem áreas com restrições. Estas conversões são indicadas na matriz de conversão de uso da terra.

As áreas restritas neste estudo correspondem à área de alagado (215ha), área de preservação permanente (APP) de 100m no entorno do lago artificial e APP de 30m para os demais recursos hídricos, de acordo com Código Florestal.

#### **4.2.3.2 Parâmetros específicos de conversão (Matriz de Conversão/Elasticidade)**

A matriz de conversão compreende as alterações possíveis dos usos e ocupações da terra atual, frente aos potenciais usos futuros (Figura 16). Nesta matriz, as linhas correspondem ao uso da terra e as colunas compreendem à visão de futuro. Sendo que, o valor 1 indica que tal conversão é permitida, enquanto o valor 0 que a conversão não é permitida. Para fins de modelagem, não foram considerados restrições de alterações.

A elasticidade, por sua vez, indica as mudanças que são permitidas. O código 0 nos indica que todas as mudanças são possíveis na célula, independentemente de sua localização e uso atual. O código 1 indica uso atual do solo que não poderá ser alterado. São permitidos no modelo intervalos entre 0 e 1, ou seja, células onde as mudanças são permitidas, porém com alguma restrição (em diferentes proporções). Como dado de entrada para o modelo foram utilizados os seguintes valores de elasticidades: 1; 0.7; 1; 1; 0.3 e 1, que correspondem respectivamente a lavoura anual, mata, campos, fruticultura/silvicultura, zona urbana e outros usos.



**Figura 16.** Matriz de conversão (Adaptado de Soler, 2010).

#### 4.2.3.3 Cenários Futuros

O estabelecimento dos cenários futuros baseou-se nas tendências observadas a partir dos mapas de uso criados desde 1966, que definiram o histórico de uso das terras. Adicionalmente foram estabelecidos potenciais incrementos futuros considerando também informações colhidas junto aos técnicos da Secretaria da Agricultura e SAMAE, os quais indicaram tendência notadas e políticas públicas que vêm influenciando a matriz produtiva e de ocupação da região. Assim, foram estabelecidos arbitrariamente três cenários (Tabela 4) para os próximos 20 anos (2015-2034), com as seguintes características definidoras:

- Cenário 1 - Pessimista: compreende um aumento de 5% ao ano em áreas de lavoura anual, diminuição de 5% ao ano das áreas de mata, incremento de 2,5% ao ano das áreas ocupadas por fruticultura/silvicultura e 1% ao ano da zona urbana;

- Cenário 2 - Produtivista: representado pelo incremento de 7.5% ao ano das áreas ocupadas por lavouras anuais e 1% ao ano da zona urbana;
- Cenário 3 - Conservacionista: corresponde ao decréscimo de 2% ano de áreas de lavoura anual e diminuição de 5ha ao ano das áreas de fruticultura/silvicultura.

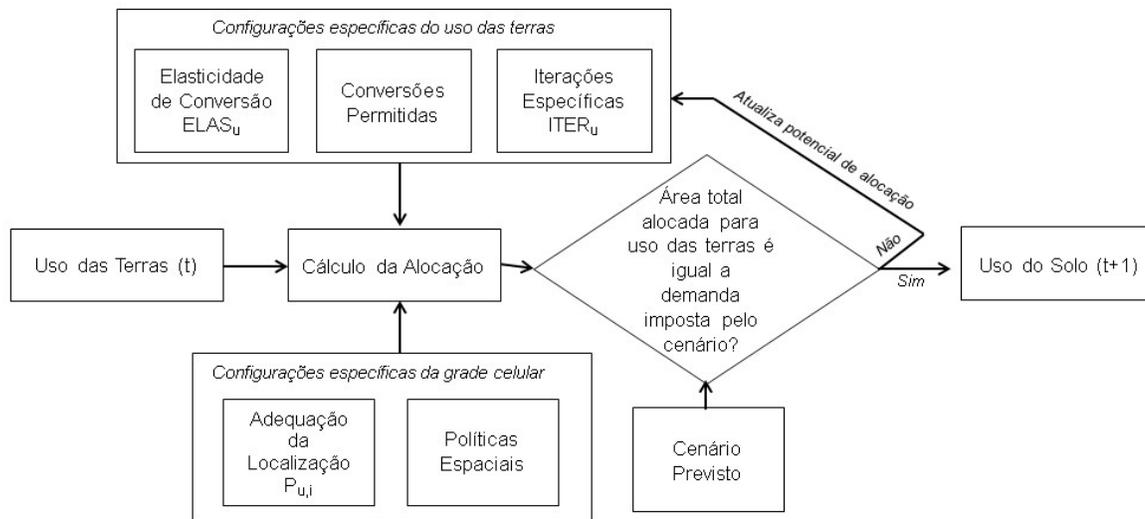
**Tabela 4.** Cenários de uso atual e futuros dos uso das terras na bacia do Arroio Marrecas utilizados nas simulações espacialmente explícitas com CLUE-S.

Usos da Terra	2015	2034		
	Cenário Atual	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	..... ha .....			
Lavoura	295,7	747,1	1168,3	201,4
Mata	1237,7	1142,7	1237,7	1237,7
Campos	3444,9	2899,3	2531,0	3618,2
Fruticultura/Silvicultura	273,8	437,7	273,8	178,8
Zona Urbana	121,5	146,8	146,8	121,5
Outros Usos	69,7	69,7	69,7	69,7
Área Total	5443,2	5443,2	5427,2	5427,2

#### 4.2.3.4 Simulação (Procedimento de alocação)

Após a inicialização dos parâmetros internos, inclusão do resultado da regressão logística, matriz de conversão e elasticidade, e dos valores estipulados nos cenários futuros (demanda por usos da terra), foi possível iniciar a simulação propriamente dita dos cenários.

O algoritmo programado no CLUE-S calcula as mudanças mais prováveis de uso e cobertura da terra em intervalos anuais com base nas restrições e adequabilidades descritas anteriormente. O procedimento de alocação obedece uma sequência lógica (Figura 17), cujas etapas são descritas a seguir conforme versão em português do tutorial do CLUES (Soler, 2010).



**Figura 17.** Fluxograma do CLUE-S.

“1. O primeiro passo inclui a determinação de todas as células com localização  $i$  que podem ser alteradas sejam elas com ou sem restrição de conversão. Células que fazem parte de uma área protegida ou de um tipo de uso da terra sem possibilidade de conversão (restrição total de conversão) são excluídas do cálculo de alocação. Da mesma forma são identificadas áreas com restrições específicas de conversão definidas na matriz de conversão.

2. Para cada célula  $i$ , a probabilidade total ( $TPROP_{i,u}$ ) é calculada para cada uso  $u$  de acordo com:

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + ITER_u$$

**[Equação 1]**

onde  $P_{i,u}$  é a adequação da célula  $i$  assumir o uso  $u$  (baseada em um modelo de regressão logística dos fatores socioeconômicos e biofísicos, e em um segundo modelo das características da vizinhança);  $ITER_u$  é a variável de iteração específica para cada uso e é indicativa do poder de competição relativo de cada tipo de uso e cobertura;  $ELAS_u$  é o valor de elasticidade de mudança específico para cada uso/cobertura, e somente considerada se a célula  $i$  está no estado  $u$  no ano considerado.

3. Na primeira iteração,  $ITER_u$  é igual para todos os usos. As células são alocadas para o uso de maior  $TPROP_{i,u}$  para a grade de células considerada. As conversões não permitidas pela matriz de conversão não são alocadas. Dessa forma, este processo inicial de alocação provoca a mudança do tipo de uso ou cobertura de um certo número de células.

4. A área total alocada para cada uso é então comparada com a demanda. Usos com deficiência no número de células sofrem aumento no valor de  $ITER_u$  e aqueles com excesso sofrem uma diminuição no valor de  $ITER_u$ . Com esse procedimento é possível que  $P_{i,u}$  seja rejeitada pela variável  $ITER_u$  devido a diferenças na demanda.

Este procedimento seguido, balanceia a alocação que ocorre na direção base-topo, baseada nas características da área de estudo, bem como a alocação topo-base, baseada na demanda

5. Passos 2 a 4 são repetidos até que demanda seja corretamente alocada. Quando a alocação se iguala à demanda, o mapa final é salvo e os cálculos se reiniciam para o próximo incremento de tempo. Algumas das mudanças alocadas são irreversíveis no tempo, enquanto outras dependem das mudanças nos intervalos de tempo iniciais. Portanto as simulações tendem a um resultado complexo e não-linear nos padrões de mudanças de uso e cobertura, característicos de sistemas complexos” (Soler, 2010).

#### **4.2.3.5 Resultado das Simulações**

O produto final do CLUE-S foi um conjunto de planos de informação em formato *raster*, correspondentes a cada iteração (ano) do algoritmo apresentado acima (Figura 17). Normalmente o mapa do último ano do intervalo de simulação seria o de maior interesse, como fizemos neste estudo, mas todos podem ser visualizados em SIG para se entender a espacialização dos usos nos cenários propostos, além do que podem ser derivados dados tabulares, como a área final prevista por uso da terra, sua variação efetiva em relação aos usos originais.

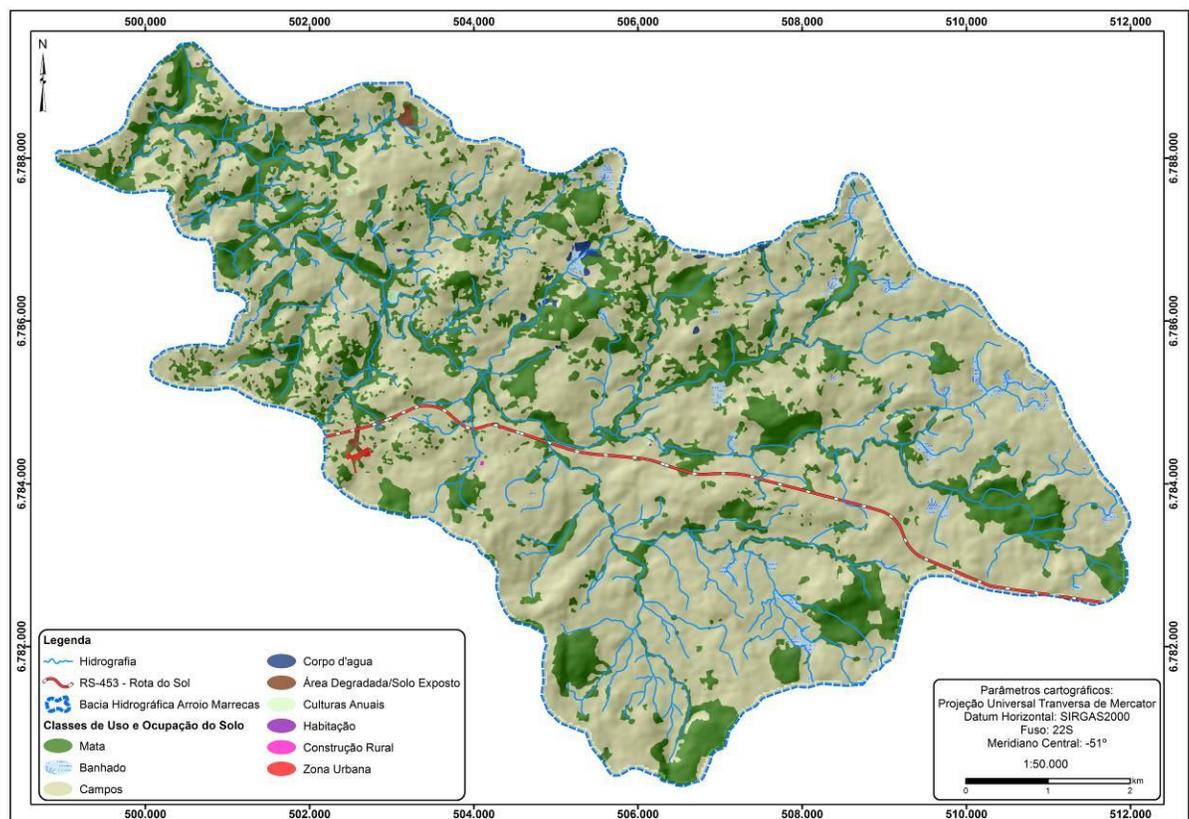
## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Uso e Cobertura das Terras**

A região nordeste do município de Caxias do Sul está situada em zona de transição entre campos e matas subtropicais (pertencentes à Mata Atlântica), como foi identificado pela fotointerpretação para o ano de 1966 (Figura 18). Esta possibilita inferir padrões de ocupação de quando predominavam atividades antrópicas de baixo impacto e mínima alteração da paisagem, historicamente exploradas desde o início da colonização da região ainda no século XVII, como pecuária extensiva de bovinos de leite e carne (Tabela 5). Ribeiro et al. (2015), em estudo que apresenta as alterações temporais de uso e cobertura das terras nos períodos que compreendem os sistemas agrários de sesmeiro, colonial e contemporâneo, nos distritos Vila Seca e Criúva, mostra que as atividades agrícolas desta região sempre estiveram intimamente relacionadas as áreas de campo e mata, o que possivelmente explique seu atual estado de conservação.

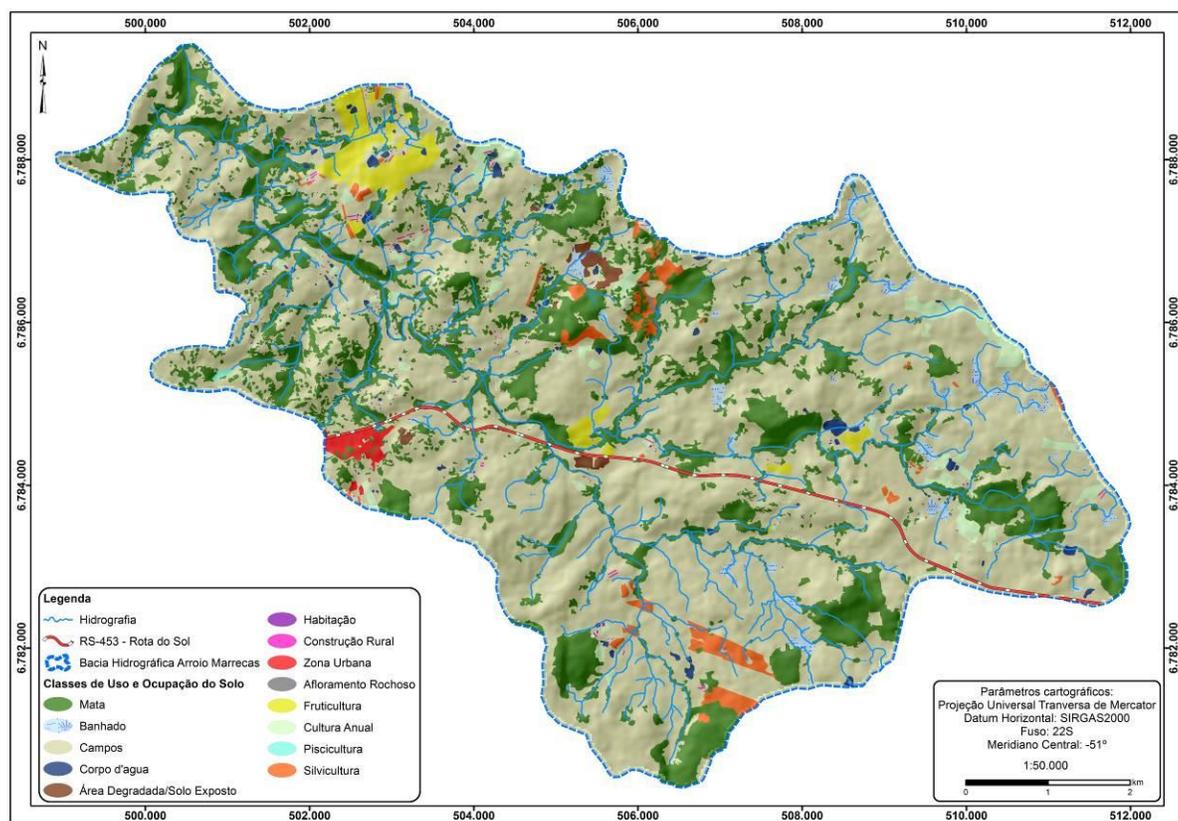
**Tabela 5.** Alterações espaço-temporais de uso e cobertura das terras observadas na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas.

Uso do Solo	1966		2010		2015	
	ha	%	ha	%	ha	%
Campos	4054	71,8	3769	66,7	3319	58,8
Mata	1458	25,8	1374	24,3	1319	23,4
Cultura Anual	17	0,3	132	2,3	255	4,5
Corpo D'água	5	0,1	44	0,8	46	0,8
Banhado	100	<0,1	78	1,4	73	1,3
Fruticultura	-	-	105	1,9	138	2,4
Silvicultura	-	-	89	1,6	145	2,6
Zona Urbana	3	-	23	0,4	109	1,9
Reservatório das Marrecas	-	-	-	-	196	3,5
Outros usos	113	2	34	0,6	49	0,9
<b>Total</b>	<b>5649</b>	<b>100</b>	<b>5649</b>	<b>100</b>	<b>5647</b>	<b>100</b>

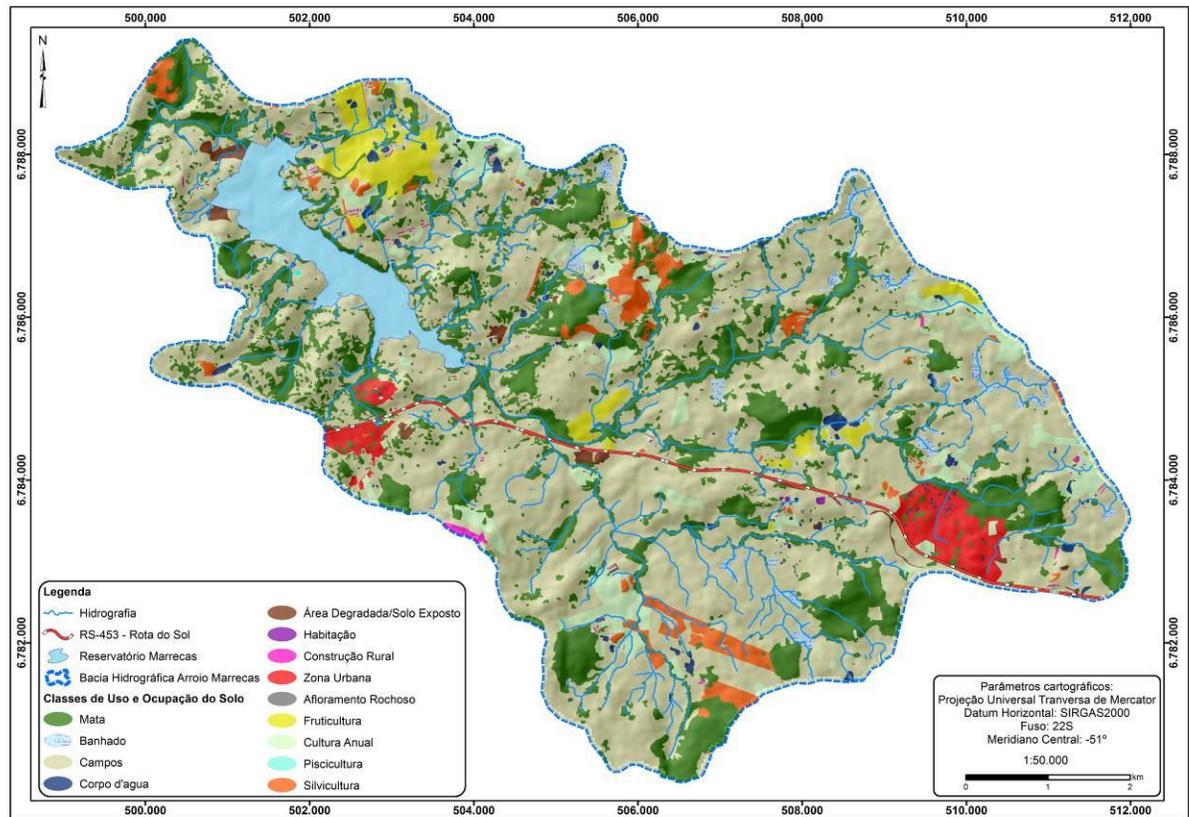


**Figura 18.** Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 1966.

Analisando a dinâmica temporal de uso e ocupação das terras na bacia do Arroio das Marrecas observa-se tendência de incremento das atividades antrópicas (Figura 19 e Figura 20), sendo algumas destas bastante intensivas do ponto de vista da modificação da paisagem e utilização de insumos agroindustriais, como as culturas anuais, fruticultura e silvicultura.



**Figura 19.** Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 2010.



**Figura 20.** Mapa de uso das terras da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas referente ao ano de 2015.

A análise dos mapas de uso e ocupação das terras possibilita uma melhor compreensão das tendências de ocupação territorial na bacia do Arroio Marreca. Em termos gerais, os campos tiveram a maior diminuição entre as classes mapeadas: 13% (cerca de 734 ha) foram convertidos em outros usos entre 1966 e 2015. De outra parte, as mudanças de uso sobre as matas da região foram menos expressivas, com uma diminuição de aproximadamente 2,4% em relação a 1966. Estudo realizado no ano de 2006 sobre o uso e ocupação do solo no município de Caxias do Sul mostra que 49% da paisagem era ocupada por mata e vegetação secundária, seguido de campo com 17,25%. Especialmente as áreas de campo apresentam maior ocorrência no setor nordeste do município, perfazendo o mosaico que constitui a paisagem da bacia do Arroio Marrecas (Schlindwein et al., 2007). Os mesmos autores, observam que as áreas de mata estão localizadas predominantemente junto a corpos hídricos ou locais de relevo mais encaixado.

Quanto ao baixo percentual de decréscimo das áreas de mata, esta observação pode ser relacionada com a implementação da legislação de conservação das matas (Código Florestal de 1965, e em particular, da Lei da Mata Atlântica), que impõe grande restrição na remoção destes ecossistemas florestais. É importante considerar que grande parte das alterações na área sob mata ocorreram recentemente (2010-2012) com o barramento do Arroio Marrecas e posterior enchimento do reservatório, com área inundada média de 196 ha. A construção da represa implicou na remoção da vegetação na área de inundação, autorizada pelo órgão ambiental a bem de interesse social conforme a legislação vigente, o que resultou na perda de 104 ha de Mata Atlântica (com expressiva ocorrência de araucária naqueles fragmentos).

Corroborando com tal afirmação os registros de campo de Ribeiro e Miguel (2012), em estudo onde um dos entrevistados rememora o sistema de cultivo de derrubada e queimada da mata utilizados outrora em Vila Seca, permitindo a extração de araucária, dentre outras espécies, seja para processamento em serrarias da região, ou ainda, produção de carvão e lenha. O entrevistado salienta que o manejo supracitado ocorreu apenas até 1970.

Observando a evolução de uso e cobertura das terras, nota-se expansão das classes fruticultura, cultura anual e silvicultura, embora não ocupem conjuntamente mais que 10% da bacia. Essa tendência já é observada em outras regiões da Serra Gaúcha, especialmente aproveitando a permissividade da legislação ambiental com relação às conversões de ecossistemas campestres em outros usos das terras, o que contrasta com a proteção garantida à Mata Atlântica.

Sommer e Saldanha (2010), analisando as alterações de paisagem nos Campos de Cima da Serra entre 1986 e 2009, observaram gradativa substituição das áreas ocupadas por campo por cultivos agrícolas e reflorestamento, tal qual observou-se na bacia do Arroio Marrecas. Os projetos de reflorestamento correspondem à implantação de espécies exóticas, como o *Pinus* sp., enquanto os cultivos agrícolas são voltados à fruticultura, muitas vezes para o mercado exterior, e produção de grãos. As áreas de silvicultura estão conectadas à cadeia produtiva do setor de celulose e madeira e suas estratégias de crescimento são pautadas em programas de incentivo, como o Programa Floresta Indústria – RS.

Esse incremento de áreas ocupadas por silvicultura também foi observado por Marchett et al. (2011) no distrito de Criuva, adjacente ao distrito de Vila Seca. Os resultados mostram que em 1986 aproximadamente 93% de Criúva era ocupada pelas classes de campo nativo e florestas e apenas 2,08 e 0,3% correspondiam a cultivos agrícolas e silvicultura, respectivamente. No entanto, em 2009 as áreas de silvicultura mostravam um aumento de 690% em termos de área ocupada, seguido de aumento de 45% para cultivos agrícolas, em detrimento da redução das áreas de campo.

A evolução das áreas de fruticultura (maçã, cáqui, pera, pêssigo, ameixa), e olericultura estiveram estritamente vinculadas ao desenvolvimento do agronegócio nos Campos de Cima da Serra. A partir de 1990, quando os estudos apontaram a potencialidade climática para culturas temperadas, houveram investimentos vultosos para o desenvolvimento da fruticultura no estado do Rio Grande do Sul, ocasião em que os esforços foram voltados para o cultivo de maçã. Posteriormente a gama de espécies foi incrementada como forma de dar segurança e sustentabilidade à cadeia produtiva de frutas temperadas (BIZOTTO, 2011). Então, com o estabelecimento da fruticultura no Estado e no município de Caxias do Sul, parte do aporte financeiro foi investido nas atividades horticolturas, também em razão das experiências técnicas que já haviam sido acumuladas, tornando a região da Serra Gaúcha responsável pela produção de metade das olerícolas do estado do Rio Grande do Sul (TRICHES, 2004). Outro aspecto relevante é a tendência de expansão da urbanização na bacia, que praticamente inexistia em 1966 (à exceção da Vila Seca), tendo um incremento de 475% entre 2010 e 2015. Neste contexto, é relevante notar o crescimento da referida localidade e a implantação de condomínio residencial às margens da RS-453 (loteamento para sítios de lazer). Essa alteração pode ser explicada por uma série de transformações que trouxeram mudanças significativas aos padrões do meio rural nos último 30 anos. Primeiro, a revalorização do meio rural, seja pela tranquilidade, valor paisagístico ou contato com o “verde”. Este fenômeno é observado quando entraves à mobilidade são contornados, como melhores estradas. Assim uma parte da população pode optar pela moradia em locais afastados dos grandes centros urbanos, o que normalmente significa ocupar

zonas rurais. O incremento de urbanização, também pode ser explicado pela diversificação de atividades no meio rural, conceitualmente chamado de pluriatividade, ou seja, a integração no meio rural de atividades agrícolas e não agrícolas, ambas geradoras de renda, que por sua vez, pode ser motivada por fatores diversos, tais como: turismo rural, lazer, serviços ambientais, entre outros, que resultam em repovoamento do meio rural ou decréscimo do êxodo (ELESBÃO, 2007; BALSADI, 2001). Destaca-se que essa subclasse de uso das terras na bacia poderá ter grande impacto ambiental na qualidade das águas superficiais por estar localizada próximo às nascentes do Arroio Marrecas.

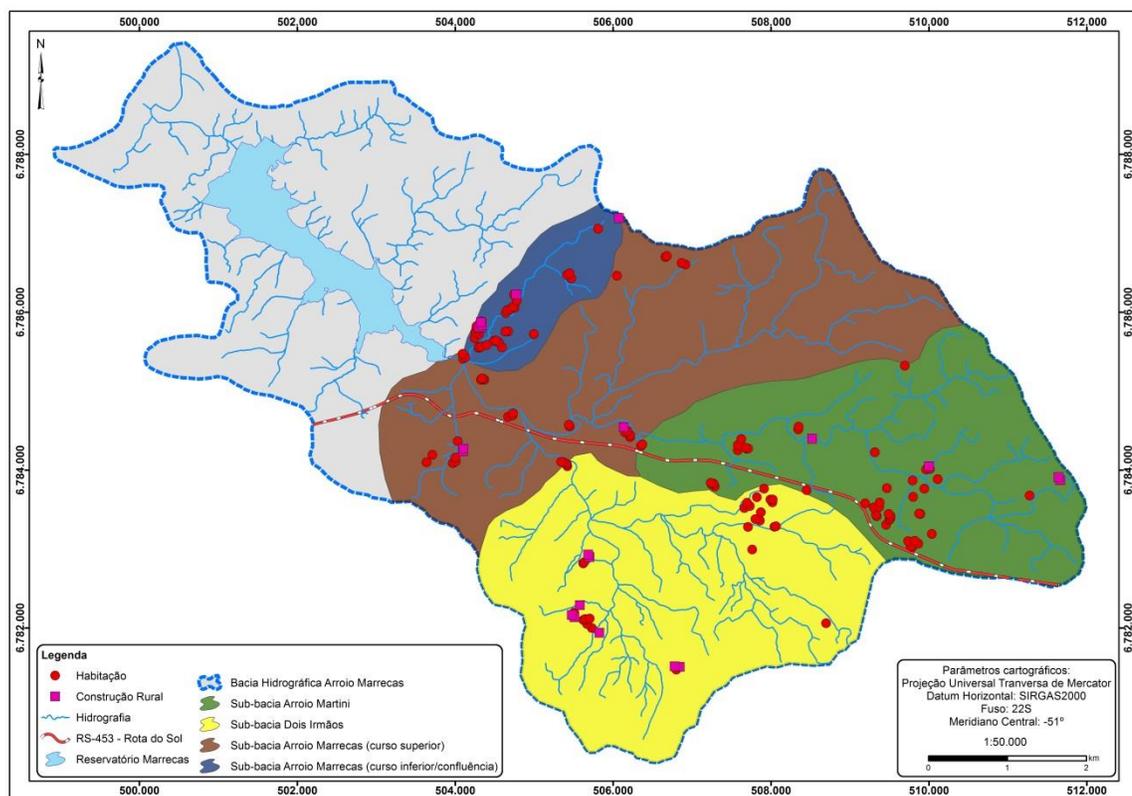
## **5.2. Qualidade das águas superficiais afetadas por usos das terras**

A Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas não tem enquadramento à luz da Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005), ou seja, o corpo hídrico não possui enquadramento pelo comitê de bacias. Assim, para avaliar a qualidade de água superficial, os dados obtidos nas campanhas de amostragem consideraram os valores máximos permitidos para Classe 2, pois foi considerado o disposto no Art. 42, o qual indica que “enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas classe 2, as salinas classe 1, exceto se as condições de qualidade atuais forem melhores, o que determinará a aplicação da classe mais rigorosa correspondente.”

### **5.2.1 Caracterização das sub-bacias nos pontos de amostragem**

A partir dos pontos de amostragem definidos pelo SAMAE (2010) foram delineadas as sub-bacias de contribuição de cada ponto, permitindo, portanto, analisar os impactos das atividades antrópicas sobre a qualidade das águas superficiais de forma espacial.

As tabelas 6, 7, 8 e 9 apresentam a caracterização de aspectos relevantes que podem afetar a qualidade das águas nestas sub-bacias. Adicionalmente, o levantamento de uso das terras de 2010 (SAMAE, 2010) permitiu a localização de residências e construções rurais (Figura 21).



**Figura 21.** Localização de residências e construções rurais distribuídas por sub-bacias do Arroio das Marrecas.

**Tabela 6.** Informações gerais por sub-bacia.

Sub-bacia	Área Total	Habitações	Construções Rurais	População de Bovinos
	(ha)			Cabeças de gado
S1 – Arroio Martini	1058,7	22	3	370
S2 - Arroio Dois Irmãos	1253,9	29	8	589
S3 - Arroio Marrecas (curso superior)	1375,8	31	3	482
S4 – Arroio Marrecas (curso Inferior/confluências)	212,3	29	6	76

**Tabela 7.** Uso das terras por sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas.

Classe	Sub-bacias			
	S1	S2	S3	S4
Área Degradada	0,4%	0,1%	0,6%	1,4%
Banhado	2,5%	1,2%	1,7%	2,0%
Campos	59,0%	65,8%	71,9%	36,6%
Construções Rurais	0,1%	0,1%	0,4%	0,1%
Corpo d'água	1,5%	0,6%	0,3%	1,5%
Cultura Anual	5,9%	6,1%	5,0%	9,7%
Fruticultura	1,4%	0,1%	2,1%	0,8%
Habitação	0,1%	0,2%	0,1%	0,2%
Mata	20,4%	21,3%	21,9%	37,7%
Silvicultura	0,6%	4,6%	2,5%	10,2%
Zona Urbana	8,1%	0,0%	0,0%	0,0%

**Tabela 8.** Características geomorfológicas das sub-bacias.

	Plano	Suave ondulado	Ondulado	Forte ondulado	Montanhoso
S1	11,1%	35,5%	43,3%	9,6%	0,1%
S2	8,8%	35,8%	44,0%	11,0%	0,1%
S3	8,2%	35,2%	46,7%	9,6%	0,0%
S4	5,4%	25,3%	55,8%	13,0%	0,4%

**Tabela 9.** Conflito entre uso atual das terras com APP por sub-bacia.

	Nº de nascentes	APP em nascente	APP Ripária*
		.....% de conflito*	.....
S1	25	16,1	10,0
S2	30	5,8	12,2
S3	26	9,5	10,0
S4	1	72,2	10,3

\*percentual da área das APP que não atendem a legislação vigente.

### 5.2.2 Análise de parâmetros de qualidade das águas superficiais

Inicialmente foi conduzida uma análise de correlação buscando entender como as principais variáveis geomorfológicas, agrônômicas e geográficas afetavam os parâmetros de qualidade das águas considerados, usando os dados amostrais de cada sub-bacia (Tabela 10).

O número limitado de amostras, com dados de amostras de águas coletadas em 4 sub-bacias restringiu a possibilidade de se identificar correlações

significativas, com exceção da forte correlação existente entre construções rurais e  $P_{total}$ . Por outro lado, as correlações negativas entre construções e SDT e turbidez, apesar de significativas, provavelmente se devem a outros fatores aleatórios que este estudo não pode isolar.

**Tabela 10.** Resultados da análise de correlação.

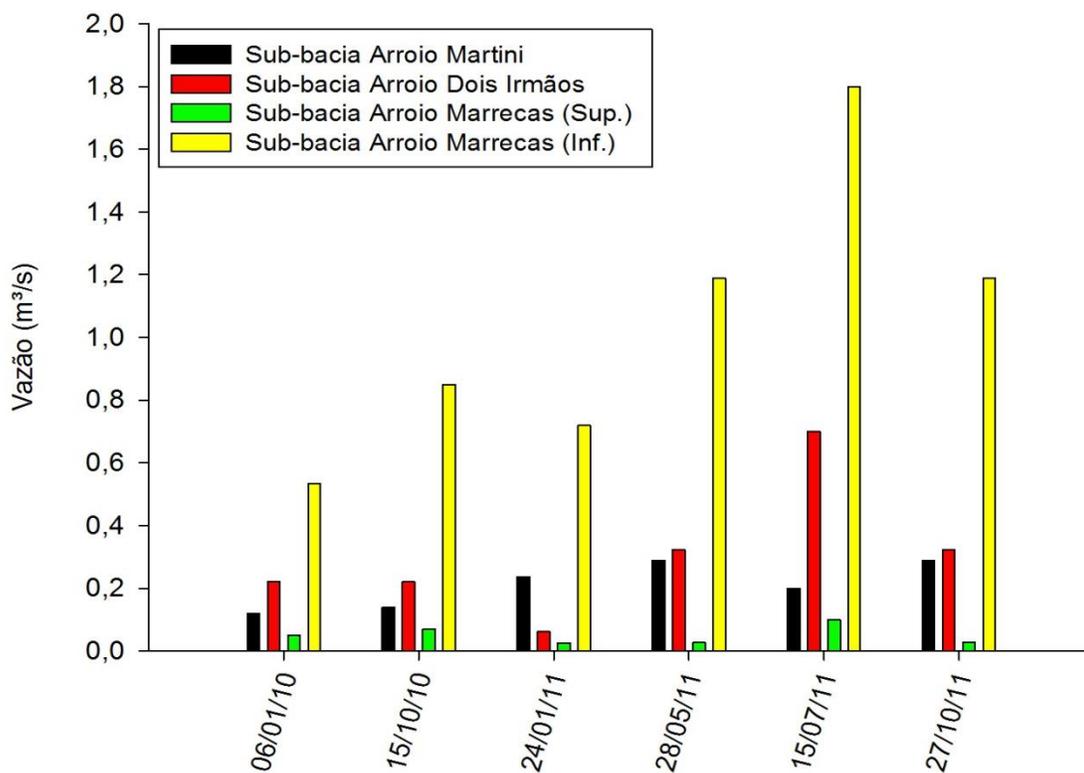
Classes	Fósforo Total		Nitrato		Coliformes		Sólidos Dissolvidos		Turbidez	
	$r^1$	$p^2$	$r$	$p$	$r$	$p$	$r$	$p$	$r$	$p$
Área da Sub-bacia	0,51	0,49	0,34	0,66	0,16	0,84	-0,59	0,41	-0,44	0,56
Número de Nascentes	0,28	0,72	0,11	0,89	0,26	0,74	-0,41	0,60	-0,20	0,80
População de Bovinos	0,51	0,49	0,35	0,66	0,16	0,84	-0,59	0,41	-0,44	0,56
Banhado	0,39	0,61	0,01	0,99	0,70	0,30	-0,72	0,28	-0,21	0,80
Campos	0,61	0,39	0,47	0,53	0,05	0,95	-0,63	0,37	-0,55	0,45
Construções Rurais	0,97	0,03	0,81	0,19	-0,06	0,94	-0,95	0,05	-0,91	0,09
Cultura Anual	0,31	0,69	0,18	0,82	0,17	0,83	-0,39	0,61	-0,25	0,75
Fruticultura	0,88	0,12	0,60	0,40	0,25	0,75	-	-	-0,76	0,24
Habitações	0,54	0,46	0,85	0,16	-0,94	0,06	-0,09	0,91	-0,71	0,29
Mata / Silvicultura	0,55	0,45	0,48	0,52	-0,10	0,91	-0,50	0,50	-0,53	0,47
Densidade da Rede de Drenagem	-0,35	0,65	-0,24	0,76	-0,09	0,91	0,39	0,61	0,30	0,70
Conflito APP de Nascente	-0,40	0,60	-0,18	0,82	-0,25	0,75	0,47	0,53	0,27	0,73
Conflito APP Ripária	0,88	0,12	-0,14	0,86	-0,44	0,56	0,61	0,39	0,28	0,72

<sup>1</sup> = coeficiente de correlação linear de Pearson; <sup>2</sup> = valor-p.

A análise dos dados de vazão por sub-bacias evidenciou diferenças importantes entre as sub-bacias (Figura 22). O ponto 1, correspondente à sub-bacia de contribuição do Arroio Martini (com cinco afluentes), apresentou amplitude de variação entre 0,12 e 0,28 L s<sup>-1</sup>. A sub-bacia de contribuição do Arroio Dois Irmãos (ponto 2), apresentou a segunda maior amplitude entre pontos (0,48 L s<sup>-1</sup>), o que pode ser explicado por sua fisiografia, com maior densidade de sua rede hidrográfica, quando comparada às demais sub-bacias.

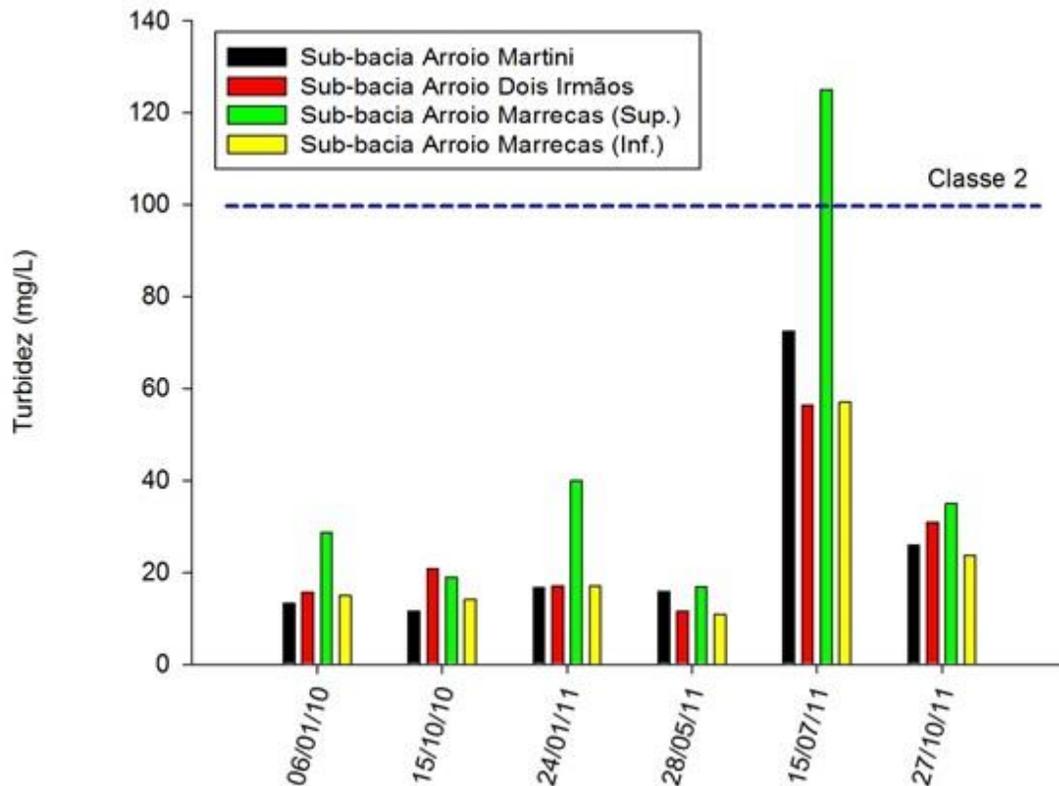
A menor área de contribuição do Arroio Marrecas, representada pelo ponto 3, apresentou os menores valores de vazão registrados em todas as campanhas. O ponto 4, por sua vez, apresentou os maiores valores observados, o que pode ser explicado por se tratar do ponto de monitoramento no local de convergência dos contribuintes à montante (Arroio Dois Irmãos, Arroio Korff e Arroio Martini).

Quando comparadas às campanhas de monitoramento, nota-se que embora na campanha de 15/07/2011 não tenham sido registradas as maiores vazões observadas em todos os pontos, o ponto 4 apresentou a maior vazão de todas as campanhas de amostragem. Avaliando os dados de precipitação para os períodos de amostragem, observa-se que não existe um padrão entre os volumes acumulados e as vazões registradas. Na campanha de 06/01/2010, a qual corresponde a menor vazão global, segundo dados disponibilizados por INMET (2016), a precipitação acumulada corresponde a 156 mm (período de referência de 01 a 06 de janeiro), enquanto na campanha na campanha de 15/07/2011 (período de referência de 01 a 15 de junho), a precipitação acumulada corresponda a 65,6 mm. Possivelmente tais observações possam ser explicadas por dois aspectos: a) a inexistência de dados de precipitação diária cumulativa ou mesmo com frequência sub-horária coletados na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas; b) distância entre a Estação Meteorológica de Caxias do Sul e a área objeto de estudo, o que pode tornar os dados de precipitação não representativos, especialmente quando da ocorrência de eventos meteorológicos localizados na bacia hidrográfica.



**Figura 22.** Vazões medidas nas sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas.

A turbidez atingiu o valor máximo permitido de 100 mg/L para Classe 2, em uma campanha de monitoramento (15/07/2011), justamente na sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior) (Figura 23).



**Figura 23.** Turbidez nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas.

Quando analisados os valores de turbidez e vazão, conjuntamente, nota-se que embora a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior) apresente as menores vazões registradas durante as campanhas, suas concentrações para o parâmetro turbidez são superiores aos demais pontos amostrados (exceto campanha de 15/10/2010). Isto pode estar relacionado aos usos preponderantes nesta sub-bacia. Observa-se que a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência) apresenta o maior número de habitações e construções rurais por área (Tabela 6), e que estes localizam-se predominantemente próximos aos seus recursos hídricos (Figura 21). Na Tabela 7 são apresentados os percentuais de uso e ocupação das terras por sub-bacia, permitindo analisar que as maior concentrações de lavouras anuais e área destinadas a silvicultura localizam-se na sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência).

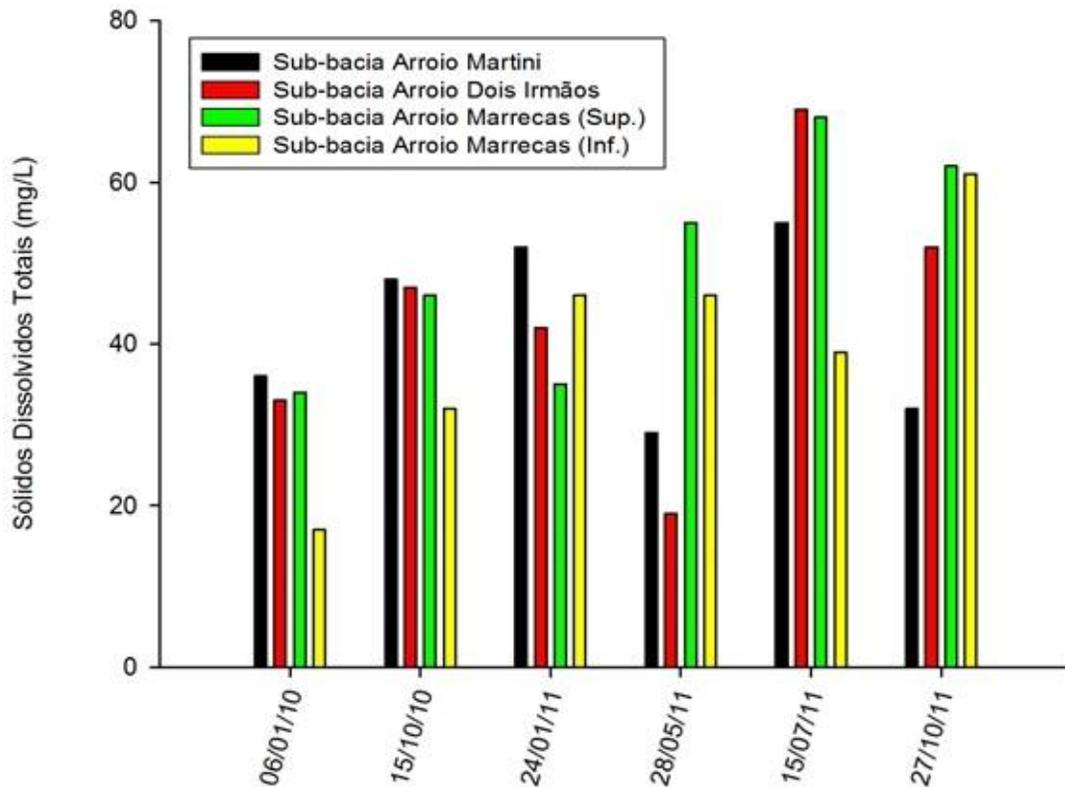
Desta forma, é possível inferir que as atividades antropogênicas favorecem o carreamento de sólidos para as áreas de drenagem. Raposo et al. (2010) corroboram esta assertiva, descrevendo que a turbidez é resultado da alteração da dinâmica hidrossedimentar e que, portanto, pode estar relacionada às ações antrópicas associadas

ao uso e cobertura das terras. Minella et al. (2007) observaram que as maiores concentrações de sedimento em suspensão ocorreram em períodos de uso intensivo do solo, sob sistema tradicional e sem manejo adequado. Ainda que o manejo não tenha sido objeto de avaliação deste estudo, é possível afirmar que as lavouras anuais, sejam voltadas à produção de olerícolas ou pastagem anuais, são as atividades mais intensivas mapeadas na bacia hidrográfica. Luíz, Pinto e Scheffer (2012), observaram relação direta entre os períodos de manejo do solo e as alterações no parâmetro turbidez, permitindo inferirem que períodos de solo descoberto ocorre maior carreamento de sedimentos.

Outro aspecto relevante, e que pode ter influência sobre as concentrações de turbidez na sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior), diz respeito a declividade do terreno em sua sub-bacia de contribuição. É possível observar que 55,8%, 13,0% e 0,4%, de sua área correspondem a revelo ondulado, forte ondulado e montanhoso, respectivamente (Tabela 8). Essa condição de declividade pode resultar em condições favoráveis à instalação de processos erosivos, explicando a maior turbidez neste ponto, considerando a sua pequena área de contribuição.

Cabe destacar ainda que não obstante a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência) tenha os maiores registros de vazão, seus valores para o parâmetro turbidez sempre foram os menores registrados, o que pode ser relacionado ao efeito diluição, conforme descrevem Basso, Moreira e Pizzato (2011).

As concentrações de sólidos, sejam totais, suspensos ou dissolvidos, em ambientes hídricos de regime lótico, podem estar relacionadas as impurezas, conforme descreve Espíndola et al., (2000). Observa-se que as concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT) (Figura 24), apresentam um padrão de comportamento relacionado as maiores concentrações observadas nas campanhas de 15/07/2011 e 27/10/2011, para o parâmetro turbidez e vazão. O menor valor de SDT corresponde a 17 mg/L (06/01/2010 – sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência) e o maior a 69 mg/L (15/07/2011 – sub-bacia do Arroio Dois Irmãos). Embora alguns autores, como Sardinha et al., (2008), Santos e Hernandez (2013) e Brito et al. (2006) relacionem o aumento do SDT à diminuição da vazão, que resulta em maior tempo de interação entre solos e água, e menor efeito diluição, essa tendência não foi observada no Arroio Marrecas, corroborando o que observaram Santi et al. (2012).



**Figura 24.** Sólidos dissolvidos totais nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas.

Muito embora a bacia hidrográfica do Arroio Marrecas apresente atributos que permitam caracterizá-la como ambientalmente conservada, a existência de atividades agrícolas, principalmente aquelas mais intensivas, como olericultura, silvicultura e bovinocultura leiteira, aliado ao fator declividade e pequenos aglomerados urbanos, ou ainda, as áreas urbanas já consolidadas, podem causar algum tipo de influência que resulte em degradação da qualidade das águas superficiais, considerando o parâmetro SDT.

Schneider et al. (2011) indicam que o aumento das concentrações de sólidos dissolvidos podem estar relacionado ao lançamento de efluentes não tratados aos cursos d'água. Santos e Hernandez (2013) descrevem que o SDT pode ser influenciado também à geoquímica ou adubação de áreas agrícolas, ou ainda pelo manejo inadequado do solo, pelo escoamento superficial e áreas com altas densidades de estradas. Tanto Guedes et al. (2012) quanto Vanzela et al. (2010) observaram maiores concentrações de sólidos dissolvidos em pontos de monitoramento próximos a áreas agrícolas e habitadas (contribuição de esgoto doméstico) e a áreas de mata degradada. Para Xiao et al. (2012), a presença de sólidos suspensos em águas superficiais pode estar tanto relacionada a

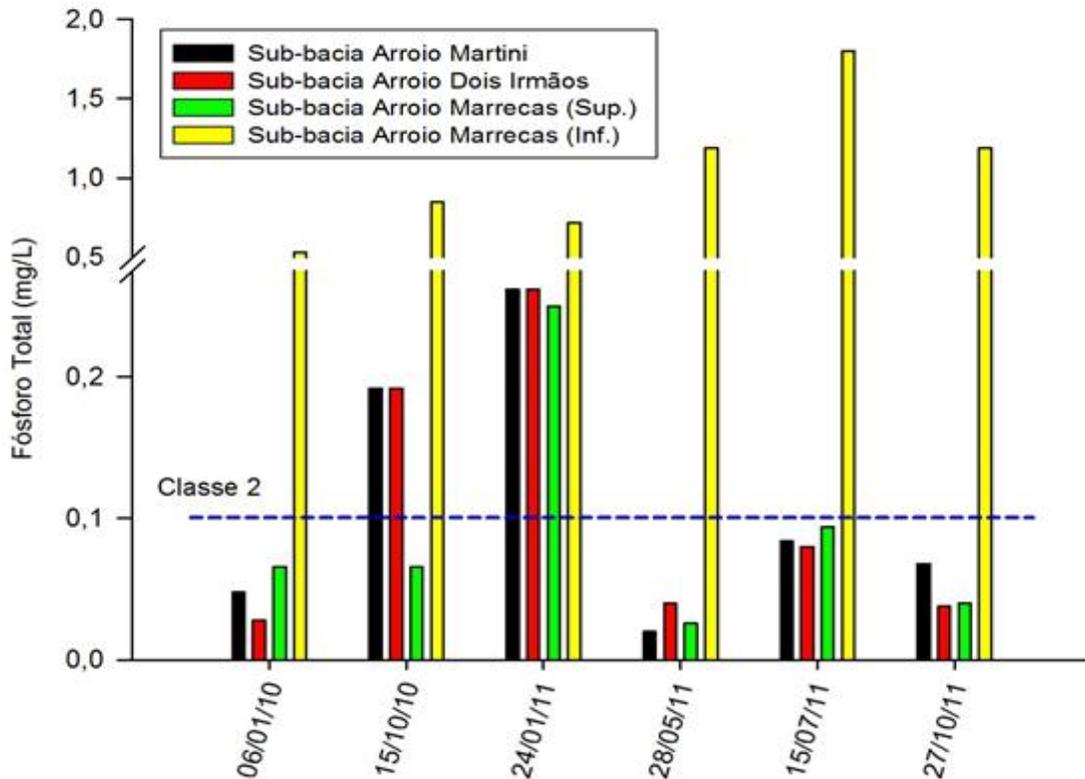
expansão de atividades agrícolas quanto à utilização dos recursos hídricos de forma não planejada.

Embora os valores observados para o parâmetro SDT encontram-se muito abaixo do valor máximo permitido para enquadramento como Classe 2, corresponde a 500 Mg/L, segundo a Resolução CONAMA nº 257 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005), deve-se atentar para o expansão de atividades mais intensivas o que pode resultar em alteração da qualidade da água superficial e do reservatório. Neste caso, incluem-se lavouras anuais e aglomerados urbanos, sendo esse último, relevante fonte de poluição difusa.

Observando-se as concentrações do parâmetro fósforo nas diferentes campanhas de monitoramento (Figura 25), nota-se que em todas as campanhas a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência) apresentou valores superiores ao valor máximo permitido (VMP) para enquadramento como Classe 2 (0,100 mg/L), segundo resolução CONAMA nº 257 de 18 de março de 2005 (CONAMA, 2005). Na campanha de 15/10/2010, com exceção da sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior), todos os pontos ficaram acima do VMP, enquanto na campanha de 24/01/2011 todos os pontos amostrados superaram o VMP.

O aumento das concentrações na sub-bacia do Arroio Martini (15/10/2010 e 24/01/2001) pode estar relacionados ao uso e ocupação das terras (Tabela 7), que corresponde a segunda maior área de fruticultura e maior zona urbana (8,12%) dentro da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas. Ainda, soma-se 5,85% de ocupação por área de lavouras anuais. A sub-bacia do Arroio Dois Irmãos, por sua vez, apresentou as maiores concentrações, possui 5,85% de suas terras ocupadas por lavouras anuais e 4,63% como área de silvicultura.

As alterações de uso e ocupação das terras que possivelmente explique o aumento da concentração de fósforo em determinados pontos de monitoramento na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas corroboram com trabalhos publicados por outros autores. Toledo e Nicoletta (2002) descrevem que o aumento das concentrações de fósforo nos recursos hídricos superficiais estão em grande parte relacionados à contribuição de áreas agrícolas e zonas urbanas. Schwarzenbach et al. (2007), afirmam que as atividades antrópicas podem ser responsáveis por até 60% do fósforo presente nos recursos hídricos.



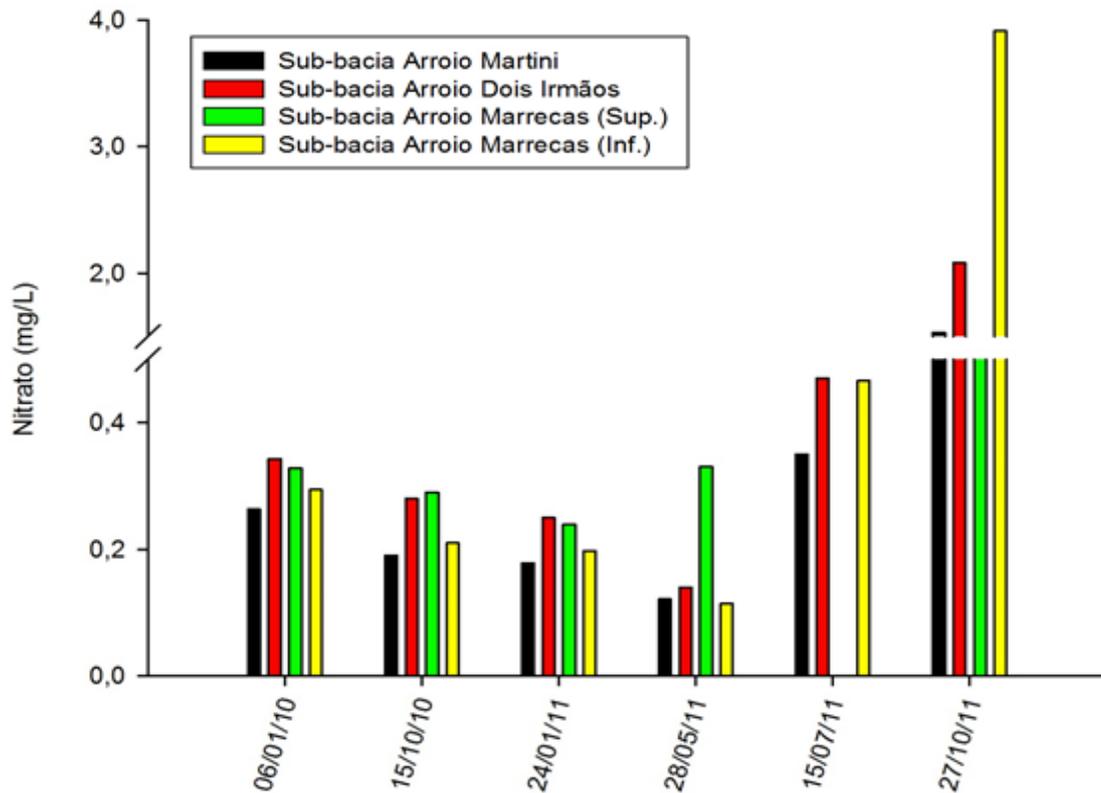
**Figura 25.** Fósforo total nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas.

Bourgeois-Calvin (2008) citou que o aumento da taxa de urbanização apresentou correlação positiva com a disponibilidade de fósforo nos cursos d'água estudados. Conforme descreve von Sperling (2005), o elemento fósforo além de ser resultante da dissolução no solo, pode ser resultante de fontes de origem antrópica, como despejos domésticos, fertilizantes e excrementos de animais. Danelon et al. (2012), em trabalho desenvolvido na bacia hidrográfica do Corrego Terra Branca (MG), também observou a influência das áreas agrícolas com aplicação de fertilizantes sobre a qualidade das áreas superficiais, resultando em 70% dos pontos monitorados com valores acima do limite de fósforo total para águas de classe 2. Macleod e Haygarth (2003) relacionaram fontes de fósforo oriundas de esterco animal e áreas de confinamento. Efetivamente, dentre as atividades produtivas potencialmente impactantes das águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas, foi identificada a bovinocultura, especialmente para a produção de leite. A maior população de bovinos ocorre na sub-bacia 2 (Tabela 6). Assim sendo, tal atividades também pode explicar, as maiores concentrações de fósforo na sub-bacia do Arroio Dois Irmãos.

Nota-se que embora a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior) corresponda a área mais conservada da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, com de áreas 71,89% e 21,86% ocupados por campos naturais e mata nativa, respectivamente, as concentrações de fósforo neste local sempre excederam o VMP para Classe 2. Essa observação poderia ser explicada porque a sub-bacia do Arroio Marrecas (curso inferior/confluência) recebe a contribuição de toda a área a montante do Arroio Marrecas, e portanto, sofre a influência das concentrações das quatro sub-bacias.

Em nenhuma das campanhas de amostragem as concentrações de nitrato ultrapassaram o VMP estabelecido para este parâmetro no enquadramento como Classe 2 ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) (Figura 26). Pode-se inferir que as atividades e práticas que estão usualmente associadas com contaminação por nitrato, como a utilização intensiva de fertilizantes na agricultura, tem pouca expressão nesta região. De outra parte, como foi identificado que as criações de bovinos tem relevância na região (Tabela 6), o que seria uma fonte potencial de contaminação por N, é possível que quantidades de nitrato que eventualmente poderiam chegar aos cursos d'água examinados estão sofrendo desnitrificação em ambientes mais úmidos (como as zonas ripárias), o que mitigaria o impacto destas atividades.

Embora o nitrato não seja um fonte considerável de degradação ambiental na Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas, pode-se inferir pela variação das concentrações analisadas, que algumas atividades podem estar relacionadas com o aporte deste elemento nos recursos hídricos superficiais. Neste caso, pode-se deduzir que as habitações rurais e zona urbana, que não possuem rede de esgotamento sanitário totalmente estabelecida, podem ser potencial fonte difusa de contaminação. SAMAE (2010) indica que 87,64% da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas possui esgotamento sanitário por meio de fossa séptica e 6,5% dos moradores ainda dispõem os resíduos a céu aberto. Quanto a coleta por rede de esgotamento, essa corresponde apenas a 5,86%. CETESB (2004) indica que esgotos sanitários representam a principal forma de aporte de nitrogênio orgânico no meio ambiente, enquanto Nobrega et al. (2008), indica que uma forma comum de contaminação de nitrato corresponde ao processo de degradação de desejos humanos.



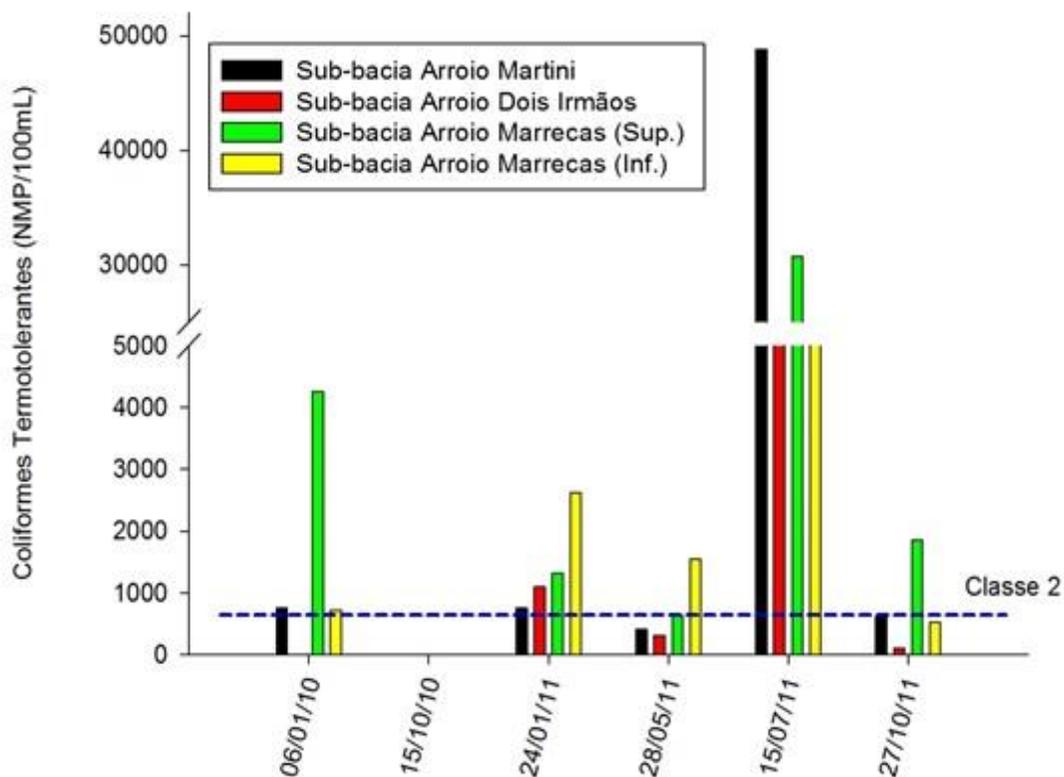
**Figura 26.** Nitrato nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas.

Além disto, as áreas de fruticultura e lavouras anuais se fazem da adubação nitrogenada em determinados períodos do ano, e portanto, representam uma fonte pontual de dispersão de nitrato ao meio por escoamento superficial, considerando a alta mobilidade deste elemento. Pinheiro et al. (2013), encontraram relação entre o aumento das concentrações de nitrato e pontos amostrais próximos a lavouras que se utilizavam de fertilizantes com compostos nitrogenadas, justificando tal ocorrência à fraca retenção do ânion nitrato as cargas positivas do solo, que por sua vez, propiciam um maior tempo de permanência na solução do solo, favorecendo a lixiviação. Os mesmos autores, ainda, associaram a baixa porosidade e condutividade hidráulica dos solos, como fator facilitador a lixiviação do nitrato, tendo em vista que, sob estas condições, o nitrato permanece mais tempo nas camadas superficiais do solo. Tais discussões, podem subsidiar em partes as inferências sobre o comportamento do nitrato na bacia do Arroio Marrecas, tendo em vista a presença de solos com baixa profundidade e estruturação.

Embora as concentrações de nitrato estejam abaixo do VMP para classificação como Classe 2, há que atentar que os pontos amostrados estão localizados à montante do

reservatório do Arroio Marrecas. Considerando a carga de nitrato associada às elevadas concentrações de fósforo e a modificação de ambiente lótico para lântico, cria-se ambiente favorável à ocorrência de eutrofização, a qual deve ser constantemente monitorada.

Os coliformes termotolerantes são de grande importância para identificar impactos nas águas devido à contaminação por dejetos animais e mesmo humanos (Figura 27). Observa-se que em apenas uma campanha (15/10/2010) não foi detectada a presença de coliformes. Em todas as demais campanhas de monitoramento, em pelo menos um ponto, as concentrações foram superiores até mesmo ao valor máximo permitido para enquadramento como Classe 3, segundo Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005), que corresponde a 1000 NMP/100mL. A sub-bacia do Arroio Marrecas (curso superior) foi a única que apresentou valores superiores ao VMP em todas as campanhas. Quando as flutuações de concentração de coliformes são comparadas às vazões (Figura 22), nota-se que não há relação entre ambos, com exceção da campanha de 15/07/2011, que apresentou a maior vazão média e as maiores concentrações de coliformes em todos os pontos amostrais.



**Figura 27.** Coliformes termotolerantes nas águas superficiais na bacia do Arroio Marrecas.

Já que nesta bacia aproximadamente 87% das fontes emissoras de esgoto sanitário fazem uso de fossa séptica, a contaminação observada pode se dever a fossas que requerem manutenção (limpeza) ou mesmo foram mal construídas. As contaminações evidenciadas na Figura 27 (valores acima do VMP pela Res. 357/2005) podem estar relacionadas ao grande número de habitações e construções rurais nesta sub-bacia. Santos et al. (2010), explicam que tanto a poluição quanto a contaminação de rios e arroios são em grande parte resultantes da drenagem de águas superficiais com carga de patógenos oriundos de esgotos e que são indicadores de dejetos sanitários, o que corrobora com as relações encontradas. Embora os mesmos autores tenham encontrado relação direta entre o acréscimo das concentrações de coliformes termotolerantes e os períodos chuvosos, esta tendência nem sempre foi observada no monitoramento da qualidade das águas superficiais do Arroio Marrecas.

Haddad (2007) também encontrou relação entre a presença de coliformes termotolerantes e fontes relacionadas ao lançamento de esgoto doméstico. Ainda, o autor apresenta como possíveis fontes de poluição a pecuária bovina e a carga de dejetos animais. Neste sentido, considerando o histórico de uso e ocupação das terras do Arroio Marrecas, com um total de 3319ha destinados à pecuária extensiva e leiteira e um rebanho aproximado de 1500 cabeças de gado, pode-se inferir que a pecuária consiste em uma atividade potencialmente poluidora, ainda mais, quando se considera o percentual de não atendimento à legislação permanente ao que se refere as Áreas de Preservação Permanente (Tabela 9). Lubenow et al. (2012), encontram indícios de alteração da qualidade de águas superficiais e a presença de animais nos limites estabelecidos como APP e/ou baixa preservação das mesmas.

### **5.3 Cenários futuros de uso das terras**

A aplicação do modelo CLUE-S possibilitou aplicar relações observadas entre fatores biogeomorfológicos explanatórios e usos das terras para obter cenários futuros de alocação das terras. De uma maneira geral, a partir da análise de regressão logística prevista na aplicação do CLUE-S, pode-se inferir que a dinâmica de realocação dos usos e coberturas das terras nos planos de informação são definidos ou explicitados prioritariamente pelos seguintes fatores explanatórios de entrada do modelo: Cambissolo Háplico, Cambissolo Húmico e Neossolo Litólico, e em menor parte pela declividade e

elevação do terreno. Esses resultados denotam que a maior probabilidade de alocação dos usos e cobertura das terras, durante as simulações de cenários futuros ocorrerá em função da sobreposição destes fatores sobre os demais, pois demonstram as potencialidades locais.

### 5.3.1 Cenário 1

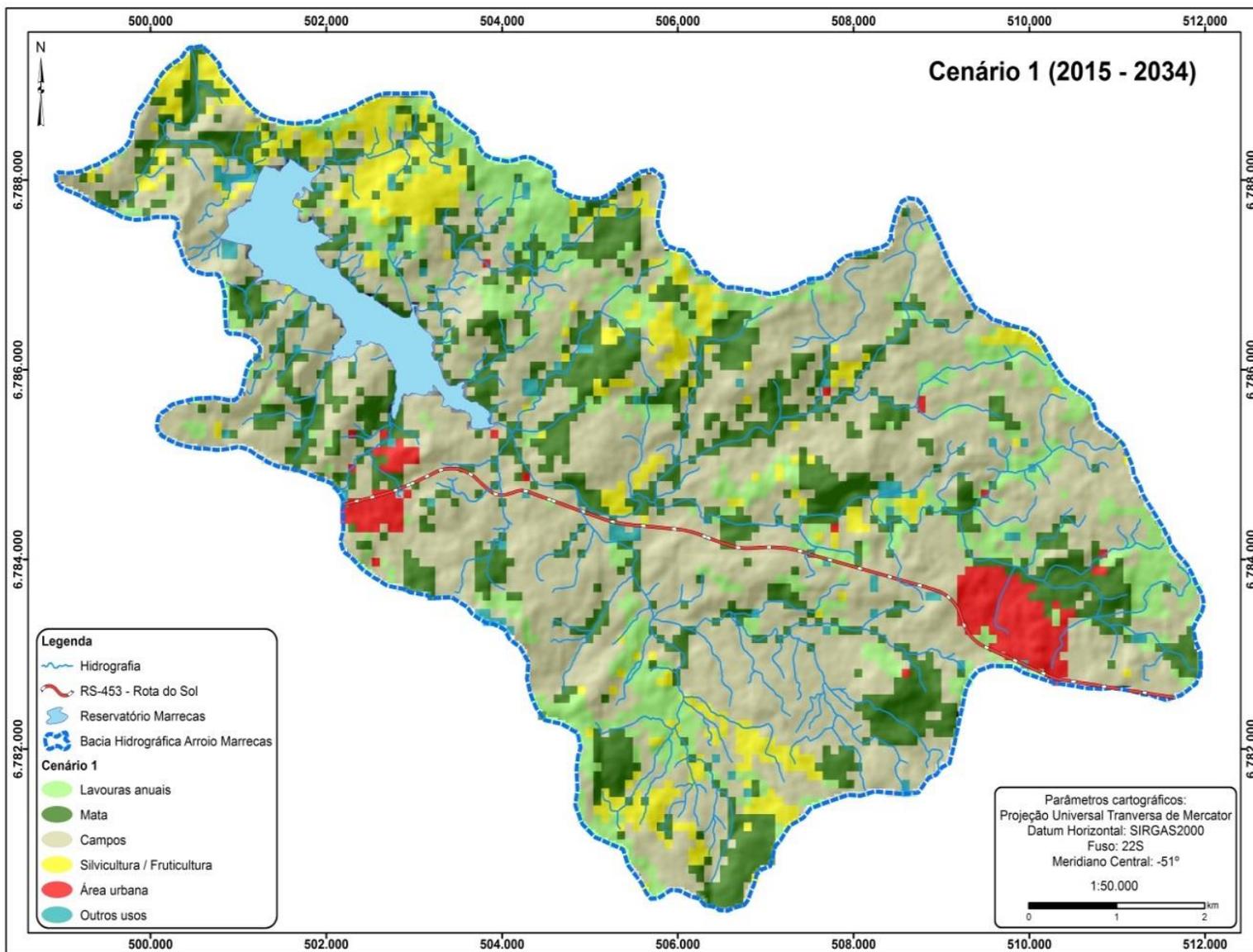
O presente cenário, intitulado pessimista, utilizou como premissa as alterações de cobertura das terras que vem se intensificando na região dos campos de cima da serra nos últimos 20 anos, considerando a substituição da matriz de produtiva de campos naturais, explorada principalmente por pecuária extensiva, por áreas lavouras anuais, fruticultura e silvicultura, e também por processos de urbanização ou nucleação urbana em espaços rurais. Além disto, para esse cenário não foi considerado o impedimento de supressão florestal, tal como regulamenta a legislação vigente, pois sabe-se que em regiões mais afastadas e sem fiscalização ambiental, muitas vezes procedesse à derrubada de indivíduos vegetais nas bordas de mata com o intuito de aumento das áreas exploradas por campos.

Neste cenário (Figura 28), os resultados mostraram um incremento de 161,10% de lavouras anuais, aumento de 59,76% de áreas ocupadas por fruticultura e silvicultura e 19,33% da zona urbana. Todos esses aumentos ocorreram em detrimento da diminuição das áreas de campo e mata, correspondendo a 7,72% e 15,80%, respectivamente.

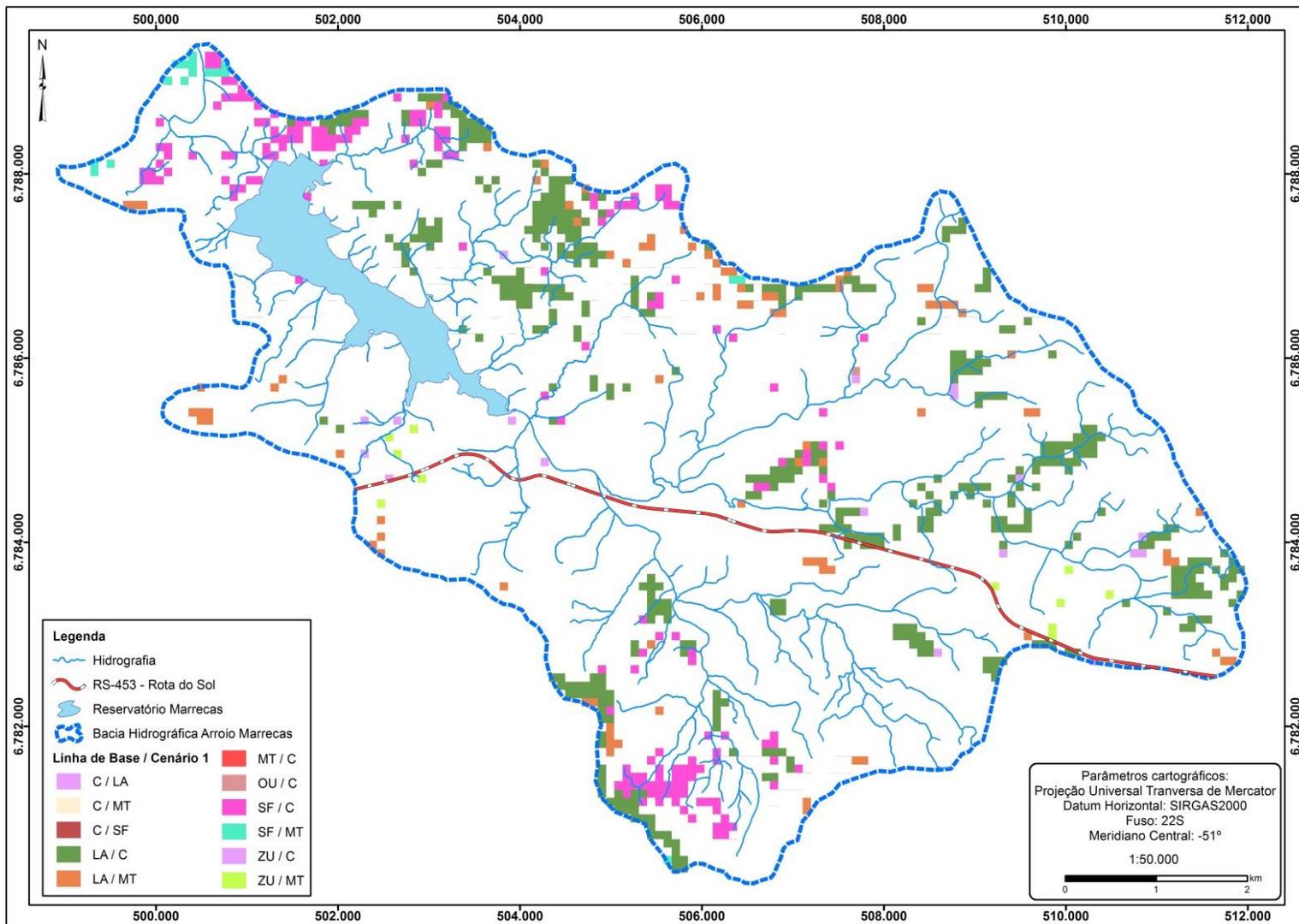
A alocação das áreas de lavouras anuais ocorreram prioritariamente junto às variáveis independentes Cambissolo Háplico e Nitossolo Bruno, enquanto o uso fruticultura e silvicultura foram alocados próximo a recursos hídricos e distante de estradas, embora tais alterações não sejam explicadas pelas tendências observadas na regressão logística. Isso ocorre, pois são planos celulares (*pixels*) que não tiveram uso preponderante pelas demais variáveis dependentes. O mesmo se observou durante a alocação das áreas correspondentes a zona urbana, que embora tenham apresentado algum crescimento no entorno das áreas já ocupadas, conforme percebido espacialmente comparando-se o resultado final a linha de base, também apresentou alocações esparsas que não são explicadas pelo resultado estatístico. Outra possível explicação para a alocação das áreas de lavouras anuais na porção nordeste da bacia hidrográfica pode estar relacionada a presença de uma estrada municipal próximo aos limites da bacia, resultando em um efeito

de borda. A estrada, por tanto, poderia facilitar o escoamento de produtos, e ser fator de decisão para a escolha de áreas para a instalação de novas lavouras.

Na Figura 29 podem ser visualizadas as alterações dos usos das terras alocadas pelo CLUE-S para o cenário 1.



**Figura 28.** Mapa de simulação do Cenário 1 para o ano de 2034.



**Figura 29.** Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 3. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fruticultura, OU = Outros Usos).

### 5.3.2 Cenário 2

O cenário 2 (Figura 30), chamado de produtivista, considerou apenas o incremento de áreas ocupadas por lavouras anuais, com acréscimo de 7,5% ao ano, e a manutenção do crescimento das áreas urbanas na Bacia Hidrográfica do Arroio Marrecas. Nota-se que tal cenário também considerou alterações históricas e temporais que estão ocorrendo na Serra Gaúcha, que se explicam pelo valor agregado de produtos hortícolas, as condições favoráveis de produção e a alta produtividade por área, que se comparada a pecuária, apresenta maior lucratividade por área utilizada. Neste cenário, ainda, não foi permitido a substituição de áreas de floresta por outros usos, em respeito ao Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), que proíbe a supressão de mata ciliar por considerá-la área de preservação permanente.

Assim, os resultados da simulação apresentaram um acréscimo de 294,79% das áreas de lavouras anuais e 19,33% das áreas de zona urbana. Todas as alterações ocorreram em detrimento, única e exclusivamente, da diminuição das áreas de campos, ocupando áreas contíguas as áreas de lavouras presentes na linha de base.

Quanto a Zona Urbana, essa apresentou o mesmo padrão de comportamento observado no cenário 1. Na Figura 31 são apresentadas as alterações dos usos das terras alocadas pelo CLUE-S para o cenário 2.

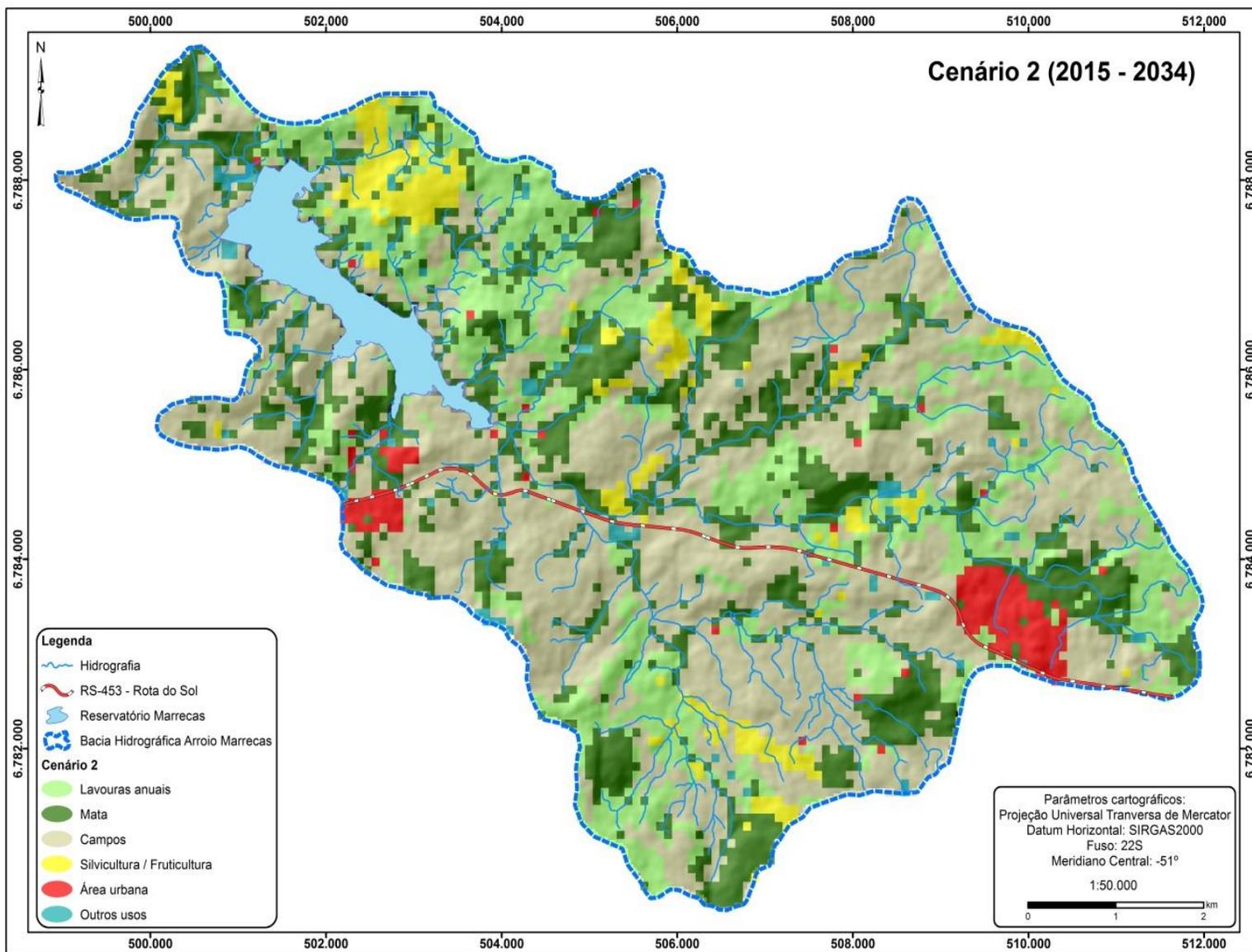
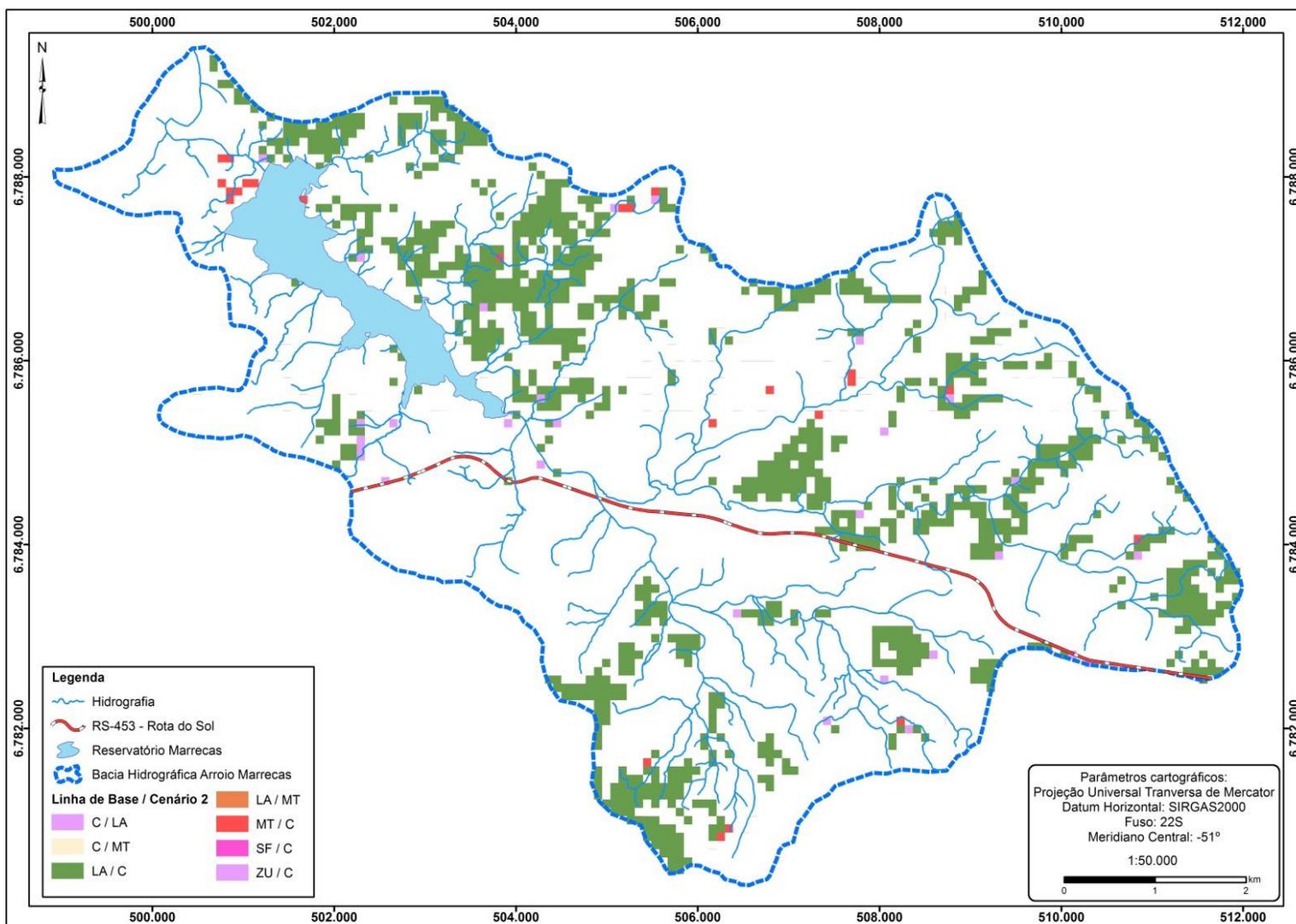


Figura 30. Mapa de simulação do Cenário 2 para o ano de 2034.



**Figura 31.** Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 2. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fructicultura, OU = Outros Usos).

### 5.3.3 Cenário 3

O cenário 3, apresentado como a opção conservacionista, vislumbrou um decréscimo de -2% ano de áreas de lavoura anual e diminuição de 5ha ao ano das áreas de fruticultura/silvicultura. Esse cenário foi proposto considerando a conscientização e importância da conservação das zonas produtoras de águas do Município de Caxias do Sul, a qual a bacia do Arroio Marrecas faz parte, a ampliação do projeto “Preservação das áreas de produção de água”, e ainda, a implantação de pagamento por serviços ambientais na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas, considerando de tratar de uma zona estratégica para o município. Tal cenário teria como consequência a substituição gradativa de usos mais intensivos da matriz produtiva, resultando na melhoria da qualidade e quantidade das águas superficiais da bacia hidrográfica. Neste cenário, como no anterior, foi preconizado o cumprimento da legislação ambiental vigente.

Os resultados da simulação (Figura 32) apresentaram um decréscimo de 31,78% e 35,50% das áreas ocupadas por lavouras anuais e fruticultura/silvicultura, respectivamente, tendo como consequência a reconversão destas áreas em campos, com aumento de 4,98% da área de campos. Quanto a zona urbana, houve manutenção da área existente.

Cabe destacar que não foi considerado nesta simulação o incremento de áreas destinadas da preservação permanente no entorno do reservatório, que são resultado de compensação ambiental pela instalação do Sistema Marrecas. Contudo, essas ocorreram em razão da aquisição de terras pelo SAMAE e, por consequência, resultaram na conversão de certas área em florestas, que por sua vez, trarão benefícios ao ecossistema local como um todo e melhorias ao cenário simulado. Na Figura 33 são exibidas as alterações dos usos das terras alocadas pelo CLUE-S para o cenário 3.

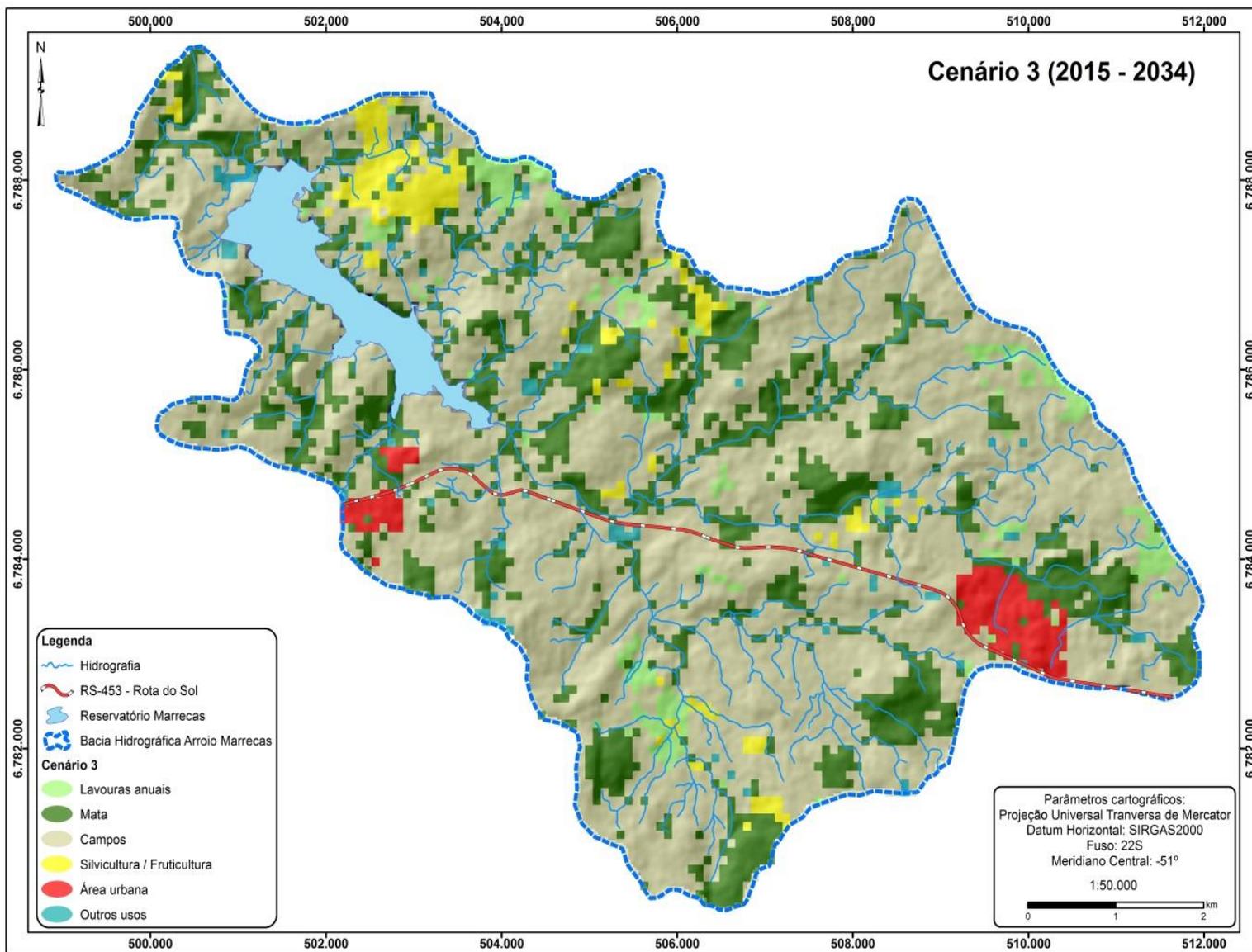
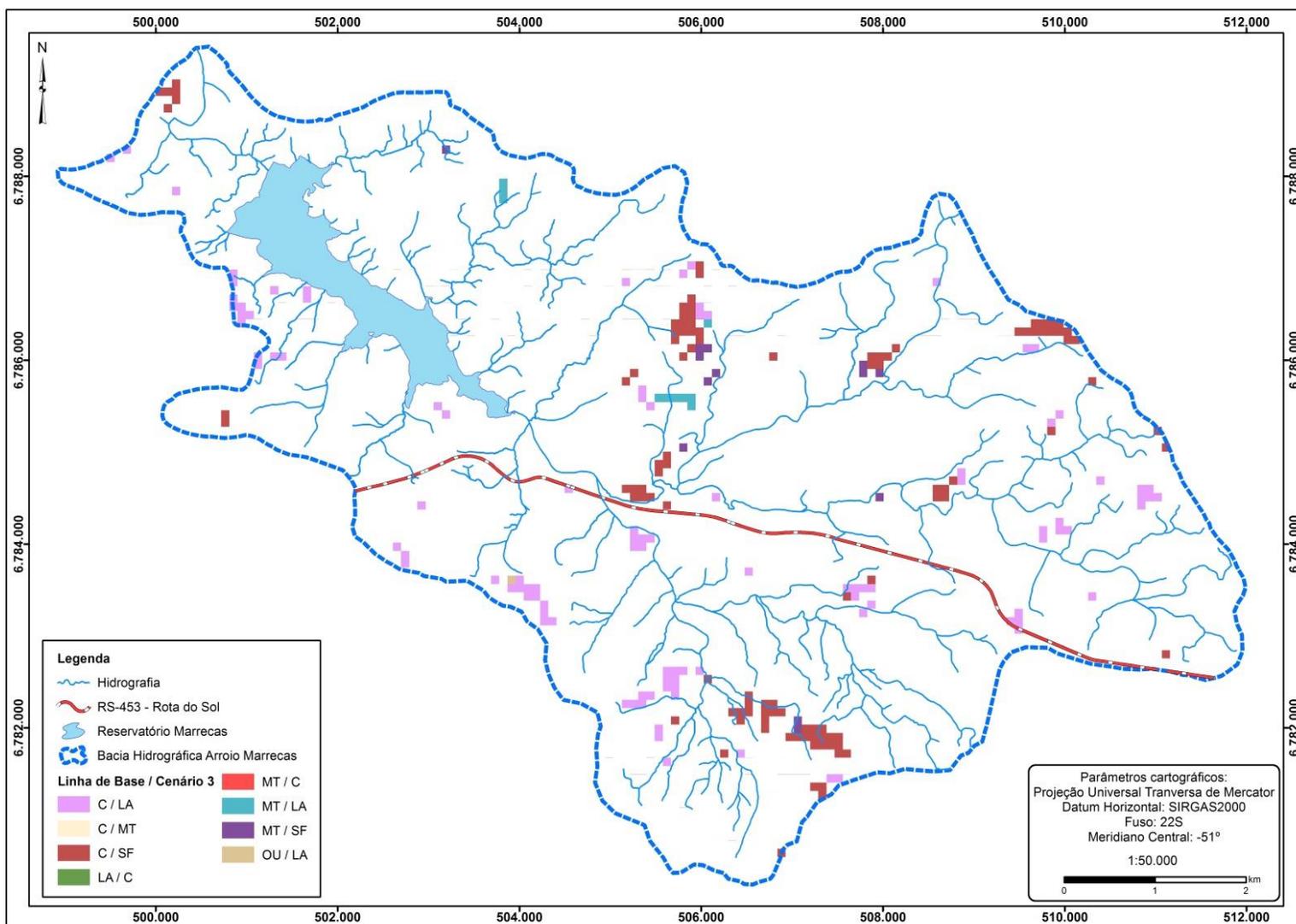


Figura 32. Mapa de simulação do Cenário 3 para o ano de 2034.



**Figura 33.** Mudanças de uso das terras alocadas pelo CLUES para cenário 3. (Legenda: C = Campo, MT = Mata, LA = Lavoura Anual, ZU = Zona Urbana, SF = Silvicultura/Fructicultura, OU = Outros Usos).

### 5.3. Análise integrada

A bacia hidrográfica do Arroio Marrecas apresenta bom estado de conservação, mas está sob risco de degradação ambiental em razão das recentes e acentuadas alterações da matriz de uso e cobertura das terras. Nota-se um incremento das áreas ocupadas por culturas anuais, fruticultura e silvicultura em substituição as áreas de campos naturais. Somado a isso, houve um acréscimo considerável da zona urbana que praticamente quintuplicou entre 2010 e 2015. Tais alterações acompanham as recentes alterações da paisagem dos Campos de Cima da Serra e diversificação das atividades no meio rural.

Por meio dos monitoramentos de qualidade das águas superficiais, pode-se observar um aumento da concentração de fósforo na sub-bacia do Arroio Marrecas (inferior) que pode estar relacionado as atividades antrópicas na bacia hidrográfica. A presença de nitrato foi constatada em todos os pontos monitoramento, possivelmente em razão da poluição difusa das habitações rurais e urbanas. Ademais, as concentrações de coliformes termotolerantes atingiram níveis acima do valor máximo permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, também podendo estar relacionado a fatores antrópicos.

Considerando os Cenários 1 e 2, pessimista e produtivista, respectivamente, os quais foram inferidos a partir de tendências históricas observadas, é possível deduzir que tais cenários teriam impacto significativo sobre os parâmetros de qualidade das águas superficiais, resultando em degradação ambiental a médio e longo prazo, pois em ambos os cenários ocorre a conversão da matriz naturalmente constituída (campos de altitude e mata nativa) pelo uso

intensivo das terras (lavouras anuais, fruticultura, silvicultura e urbanização). Frente ao exposto, e considerando a importância estratégica da bacia hidrográfica do Arroio Marrecas para o abastecimento de água do município de Caxias do Sul/RS, recomenda-se utilizar práticas de manejo conservacionista de solo, restaurar as APPs (ripária e de nascente), instalar um sistema de esgotamento sanitário eficiente a realidade local, adotar um ordenamento do uso do solo que tenha respaldo legal e a fiscalização ambiental permanente.

O cenário 3 (conservacionista), por sua vez, poderia ser aquele com maiores benefícios para qualidade ambiental da bacia hidrográfica, pois implicaria na reconversão da matriz de uso e cobertura das terras e diminuição dos efeitos antrópicos. Embora este cenário seja fundamentalmente contrastante com a realidade atual e tendências históricas notadas, talvez fosse aquele de maior sintonia com as políticas públicas impostas a bacia do Arroio Marrecas (como a Lei das Águas de Caxias do Sul) por conta da instalação do barramento para aproveitamento das águas ainda com boa qualidade.

## 6. CONCLUSÕES

A avaliação dos resultados do estudo sobre qualidade das águas superficiais revelaram que as alterações nas concentrações de alguns parâmetros podem ser explicadas pela influência de certos usos das terras. De modo geral, os pontos amostrais localizados próximos às áreas de uso mais intensivo (lavouras anuais e fruticultura) e/ou mais alteradas (zonas urbanas ou habitações/construções rurais, ou ainda, onde existe conflitos de usos com APP) apresentaram maiores concentrações de turbidez, fósforo e coliformes termotolerantes. Considerando que na bacia do Arroio Marrecas estão localizados os principais mananciais de água potável remanescentes na região, apresentam-se desafios excepcionais frente à necessidade de manutenção da qualidade e quantidade de água, principalmente em razão da recente alteração da matriz de uso e cobertura das terras, por usos mais intensivos.

A alocação espaço-temporal de cenários futuros de uso das terras que podem ocorrer na bacia hidrográfica do Arroio Marrecas com o modelo CLUE-S possibilitou localizar a distribuição espacial das tendências de intensificação das atividades antrópicas, as quais deverão ocorrer pelo incremento na ocupação dos campos com atividades agropecuárias mais intensivas, como culturas anuais, fruticultura e silvicultura, além do crescimento populacional e de novos usos, como loteamentos (sítios para lazer), seguindo comportamento similar observado em outras localidades da Serra Gaúcha (Cenário 1 e 2).

Os resultados desta modelagem ambiental mostraram tendência de realocação dos usos e coberturas das terras prioritariamente sobre às áreas ocupadas por campos.

## **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Análises apoiadas em ferramentas de estatística, geoprocessamento e campanhas de levantamento *in situ* como as aplicadas neste estudo podem ser instrumentos cruciais para o entendimento da evolução dos usos das terras, servindo de referencial para resolução de potenciais conflitos e mitigação dos impactos ambientais e socioeconômicos que se apresentam.

Adicionalmente, podem constituir uma base estruturada e espacialmente explícita para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à proteção da qualidade ambiental e garantia do abastecimento de água potável para a população da região de Caixas do Sul, tendo como base os resultados gerados pela modelagem ambiental.

## 8.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALSADI, O. V. Mudanças no meio rural e desafios para o desenvolvimento sustentável. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 155-165, jan./mar. 2001.

BARRETO, L. V. et al. Relação entre vazão e qualidade da água em uma seção de rio. **Rev. Ambiente água**, Taubaté, v. 9, n. 1, p.118-129, 26 mar. 2014.

BASSO, L. A.; MOREIRA, L. G. R.; PIZZATO, F. A influência da precipitação na concentração e carga de sólidos em cursos d'água urbanos: o caso do arroio Dilúvio, Porto Alegre-RS. **Geosul**, Florianópolis, v. 26, n. 52, p.145-163, jun. 2011.

BRAGA, B. et al. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305 p.

BIGGS, R. et al. Linking Futures across Scales: a Dialog on Multiscale Scenarios. **Ecology And Society**, Wolfville, , v. 12, n. 1, p.1-16, jun. 2007.

BIZOTTO, B. L. S. **Caracterização da cadeia produtiva de pequenas frutas nos campos de cima da serra sob a ótica da produção e comercialização**. 2011. 94 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2011.

BLAINSKI, E. et al. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Agropecuária catarinense**, Florianópolis, v. 24, n. 1, p. 65-70, 2011.

BOURGEOIS-CALVIN, A. **Relationship between Land Use and Surface Water Quality in a Rapidly Developing Watershed in Southeast Louisiana**. 2008. 171 f. Tese (Doutorado) - Engineering And Applied Science, Universidade de New Orleans, New Orleans, 2008.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil (1988)**. Disponível em: < [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm)>. Acesso em: 09 mar. 2016.

BRASIL. Lei nº 9.443, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 jan. 1997 Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em: 20 fev. 2016.

BRASIL. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 dez. 2011. Seção 1. Disponível em: <[http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914\\_12\\_12\\_2011.html](http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html)>. Acesso em: 18 mar. 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 302, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno. **Diário Oficial da União**, Brasília, 13 de maio de 2002.

BRASIL. Ministério da Defesa. Banco de Dados Geográfico do Exército Brasileiro v. 3.1. Disponível em: <<http://www.geoportal.eb.mil.br/mediador/>>. Acesso em: 18 jul. 2016.

BRITO, L. T. de L et al. Uso de análise multivariada na classificação de fontes hídricas superficiais na bacia hidrográfica do Salitre. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 58-66, jan./abr. 2006.

CAXIAS DO SUL. Lei nº 1474, de 05 de janeiro de 1966. **Cria O Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Dá Outras Providências. Gabinete Do Prefeito municipal De Caxias do Sul, em 5 de janeiro de 1966.**

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 189, de 02 de dezembro de 2002. **Aprova o Plano Diretor de Esgotamento Sanitário da Cidade de Caxias do Sul e Dá Outras Providências. Gabinete Do Prefeito municipal De Caxias do Sul, em 02 de dezembro de 2002.**

CAXIAS DO SUL. Lei Complementar nº 246, de 06 de dezembro de 2005. Estabelece Conceitos e Funções da Zona das Águas (ZA) - Bacias de Captação e Acumulação de Água Para o Abastecimento do Município de Caxias do Sul, Disciplina o Uso e Parcelamento do Solo Para Estes Espaços e Dá Outras Providências. **Gabinete Do Prefeito municipal De Caxias do Sul, em 6 de dezembro de 2005.**

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo 2003**. São Paulo: CETESB, 2004.

CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem**. São Paulo: CETESB, 2009.

CIBIM, J. C.; CLARO, C. de A. B. Desafios de escala territorial na gestão e governança da água. **Geosp: Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, n. 31, p. 57-65, 30 ago. 2012.

CLUE-S. Course material 2010. IVM, Amsterdam, Holanda. Disponível em: <[http://www.ivm.vu.nl/en/Images/setup\\_demo\\_tcm234-423389.zip](http://www.ivm.vu.nl/en/Images/setup_demo_tcm234-423389.zip)>. Acesso em: 18 jul. 2016

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Brasília. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/index.cfm>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

CARVALHO NETO, J. G.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. Aplicação do modelo SWAT para estudo de cenários hipotéticos na bacia hidrográfica do Riacho dos Namorados no Cariri Paraibano. **Revista Geográfica Acadêmica**, Goiânia, v. 5, n. 2, p. 30-40, 2011.

CLAVERO, I. et al Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía. In: OJEDA, J.; PITA, M.F.; VALLEJO, I. (Ed.). **Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos**. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 2010. p. 759-776.

DANELON, J. R. B.; NETO, F. M. da L.; RODRIGUES, S. C.. Análise do nível de fosforo total, nitrogênio amoniacal e cloretos nas águas do córrego Terra Branca no município de Uberlândia (MG). **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 1, n. 24, p. 412-421, 2012.

DIAS, L. T.; WALDE, D. H. Modelagem da dinâmica espacial do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Lago Paranoá-DF. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 1, p. 77-94, 2013. Tese.

ELESBÃO, I. O espaço rural brasileiro em transformação. **Finisterra**, Lisboa, v. 42, n. 84, p. 47-65, 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: SiBCS, 2013. 353 p.

ESRI.- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUT. **ArcGIS Professional GIS for the desktop**. Versão 10.2. 2013.

ESPÍNDOLA, E.L.G. **A Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho**. São Carlos: Rima, 2000. 188 p.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em sistemas de informação geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. 2001. 215 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

FOLHES, R.; AGUIAR, A. P. D. de; JUNIOR, R. A. de O. S. Cenários participativos de mudanças no uso da terra na Amazônia: o caso de Vila Brasil no Projeto de Assentamento Agroextativista do Lago Grande, PA. **CAMPO-TERRITÓRIO: revista de geografia agrária**, Uberlândia, v. 7, n. 14, p. 1-34, ago. 2012.

FLORES, C. A. et al. **Os solos do Vale dos Vinhedos**. Brasília: Embrapa, 2012. 176 p.

GALHARTE, C. A. **Estimativa do escoamento superficial e da produção de sedimentos em áreas de atividades agrossilvopastoris, no Estado de São Paulo, em função da mudança de uso e cobertura do solo**. 2011. 224 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

GONÇALVES, R. I. L de S. **Metodologia para acreditação dos métodos de análise de sólidos suspensos e dissolvidos em águas**. 2009. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade do Porto, Porto, 2009.

GUEDES, H. A. S et al. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia**

**Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 5, p. 558-563, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v16n5/v16n05a12.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2016.

HADDAD, E. A. **Influência antrópica na qualidade da água da bacia hidrográfica do Rio São Miguel, Carste do Alto São Francisco, Minas Gerais**. 2007. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

IBGE. **IBGE Cidades**. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em 18 jul. 2016.

INMET. **Dados Históricos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 4 abr. 2016.

IVM. INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES. **CLUE model**. Disponível em: <<http://www.ivm.vu.nl/en/Organisation/departments/spatial-analysis-decision-support/Clue/>>. Acesso em: 21 jul. 2016.

LUÍZ, A. M. E.; PINTO, M. L. C.; SCHEFFER, E. W. de O. Parâmetros de cor e turbidez como indicadores de impactos resultantes do uso do solo, na bacia hidrográfica do rio taquaral, São Mateus do Sul-PR. **Ra'e Ga**, Curitiba, v. 24, n. 1, p. 290-310, 28 mar. 2012.

KAISER, D. R. **Nitrato na solução do solo e na água de fontes para consumo humano numa microbacia hidrográfica produtora de fumo**. 2006. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/ppgcs/images/Dissertacoes/DOUGLAS-RODRIGO-KAISER.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

KOK, K.; VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A. Integrated Assessment of the land system: The future of the land use. **Land Use Policy**, Guildford, v. 24, n. 3, p. 517-520, 2007.

LUBENOW, A. T. et al. Impacto do uso e ocupação da terra na qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Nhapindazal, Irati (PR) / Impact of land use and occupation on the water quality of Nhapindazal river watershed, Irati, (PR). **Revista Ambiência**, Guarapuava, v. 8, n. 3, p. 845-858, 30 dez. 2012.

LUCAS, A.; FOLEGATTI, M. V.; DUARTE, S. N. Qualidade da água em uma microbacia hidrográfica do Rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, São Paulo, v. 14, n. 9, p. 937-943, abr. 2010.

Köppen, W. **Climatologia**: con un estudio de los climas de la tierra. Mexico: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 479 p.

MACLEOD, C.; HAYGARTH, P. A review of the significance of non-point source agricultural phosphorus to surface water. **Scope Newsletter**, Devon, v. 1, n. 51, p. 1-10, jun. 2003.

MACHADO, R. E.; VETTORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 727-733, maio, 2003.

MARCHETT, C. A.; SCUR, L.; AHLERT, S. Análise multitemporal do uso e cobertura da terra no distrito de Criúva, Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais eletrônicos...** Curitiba: INPE, 2011. p. 6230-6237. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0512.pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

MEDEIROS, P. C.; CANALI, N. E. Relações de poder e resistências na gestão territorial das bacias hidrográficas no estado do Paraná. **Geosp: Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, n. 31, p. 04-17, 30 ago. 2012.

MERTEN, G.; MINELLA, J. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 33-38, out. 2002.

MINELLA, J. P. G. et al. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1637-1646, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v31n6/39.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

MUNIZ, D. H. de F. et al. Caracterização da qualidade da água superficial de três corpos hídricos rurais do distrito federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABrh, 2013. p. 1 - 8.

NASCIMENTO, N. C. C. do. **Cenários de uso da terra nas mesobacias hidrográficas dos Igarapés Timboteua e Buiuna, Pará.** 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) – Núcleo de Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

NÓBREGA, M. M. S. da; ARAÚJO, A. L. C.; SANTOS, J. P. dos. Avaliação das concentrações de nitrato nas águas minerais produzidas na região da grande natal. **Holos**, Rio Grande do Norte, v. 3, n. 24, p. 4-35, jan. 2008.

OVERMARS, K. P.; VERBURG, Peter H.; VELDKAMP, A. Comparison of a deductive and a inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. **Land Use Policy**, Guildford, v. 24, n. 3, p. 584-599, 2007.

PARAÍBA, L. C.; SAITO, M. L. Distribuição ambiental de poluentes orgânicos encontrados em lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 9, p. 853-860, set. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v40n9/a03v40n9.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

PESSOA, M. C. P. Y.; SCRAMIN, S. Modelagem Matemática e Simulação da exposição do ambiente à aplicação de agrotóxicos: Apoio à avaliação de risco ambiental. In: SILVA, Célia Maria M. de Souza; FAY, Elisabeth Francisconi (Ed.). **Agrotóxicos e Ambiente**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 319-364.

PINHEIRO, A. et al. Concentrações e cargas de nitrato e fosfato na Bacia do Ribeirão Concórdia, Lontras, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 86-93, 2013.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T.; **Qualidade das águas e poluição: Aspectos Físico-Químicos**. São Paulo: ABES, 2006.

PORTO, M. F. A.; LALAINA, R. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 43-60, jun. 2008.

RAPOSO, A. A. et al. O uso de taxas de turbidez da bacia do Alto Rio das Velhas – Quadrilátero Ferrífero/MG – como indicador de pressões humanas e erosão acelerada. **Revista de Geografia**, Recife, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, set. 2010.

RESENDE, A. V. de. **Agricultura e Qualidade da Água: Contaminação da Água por Nitrato**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 29 p.

RIBEIRO, C.; MIGUEL, L. de A. Agricultura familiar, desenvolvimento rural e proteção dos recursos hídricos: o caso do distrito de Vila Seca – Caxias do Sul/RS. In: ENCONTRO DE ECONOMIA GAÚCHA, 6., 2012, Porto Alegre. **Anais eletrônicos**... Porto Alegre: FEE: PUCRS, 2012. Disponível em: <[http://cdn.fee.tche.br/eeg/6/mesa8/Agricultura\\_Familiar\\_desenvolvimento\\_rural\\_e\\_protecao\\_dos\\_recursos\\_hidricos-o\\_caso\\_do\\_distrito\\_de\\_Vila\\_Seca-Caxias\\_do\\_SulRS.pdf](http://cdn.fee.tche.br/eeg/6/mesa8/Agricultura_Familiar_desenvolvimento_rural_e_protecao_dos_recursos_hidricos-o_caso_do_distrito_de_Vila_Seca-Caxias_do_SulRS.pdf)>. Acesso em: 30 mar. 2016.

SANTI, G. M. et al. Variabilidade espacial de parâmetros e indicadores de qualidade da água na sub-bacia hidrográfica do Igarapé São Francisco, Rio Branco, Acre, Brasil. **Ecología Aplicada**, Lima, v. 11, n. 1, p. 23-31, 2012.

SANTOS, M. E. P.; PINHO, J. A. G. de; MORAES, L. R. S. (Org.). **O Caminho das águas em Salvador: Bacias hidrográficas, bairros e fontes**. Salvador: Ciags / Sema, 2010. p. 1-486. v. 1.

SARDINHA, D. de S. et al. Avaliação da qualidade da água e autodepuração do Ribeirão do Meio, Leme (SP). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, São Paulo, v. 13, n. 3, p. 329-338, jul./set. 2008.

SCHLINDWEIN, J. R. et al. Mapeamento do uso e cobertura do solo do município de Caxias do Sul (RS) através de imagens do satélite CBERS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais eletrônicos**... Florianópolis: INPE, 2007. p. 1103-1107. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2006/11.16.02.04/doc/1103-1107.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

SCHNEIDER, R. M. et al. Estudo da influência e ocupação de solo na qualidade da água de dois córregos da Bacia hidrográfica do rio Pirapó. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 33, n. 3, p. 295-303, 2011.

SAMAE. SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO DE CAXIAS DO SUL. **Relatórios Técnicos**. Caxias do Sul: [SAMAE], 2008.

SAMAE. SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO DE CAXIAS DO SUL. **Relatórios Técnicos**. Caxias do Sul: [SAMAE], 2010.

SAMAE. SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO DE CAXIAS DO SUL. **Histórico de demanda de água em Caxias do Sul**. Mensagem recebida por: <<http://www.samaecaxias.com.br/>>. Em: 02 abr. 2016.

SANTOS, G.; HERNANDEZ, F. Uso do solo e monitoramento dos recursos hídricos no córrego do Ipê, Ilha Solteira, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 1, p. 60-68, jun. 2013.

SEMA. **Plano da Bacia do Taquari-Antas**. Porto Alegre: Sema, 20012.

SOLER, L. S. **Modelagem espacial de uso da terra utilizando o CLUE-S**: Conceito e aplicações para estudos de dinâmica de uso da terra. Material de apoio. São Carlos, SP: Embrapa CNPTIA, 2010. 49 p.

SOMMER, J. A. P.; SALDANHA, D. L. Alterações nas paisagens dos campos de cima da serra e estratégias de desenvolvimento econômico. In: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS, 16., 2010, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** São Paulo: AGB, 2010. Disponível em: <<http://www.agb.org.br/evento/download.php?idTrabalho=3809>>. Acesso em: 30 mar. 2016.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. 2007. 185 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2008. 222 p.

SUERTEGARAY, D. M. A., FUJIMOTO, N. S. V. M. Morfogênese do relevo do Estado do Rio Grande do Sul. In: VERDUM, R., BASSO, L. A., SUERTEGARAY, D. M. A. (Org.). **Rio Grande do Sul**: paisagens e territórios em transformação. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2004. 26 p.

TRICHES, D. **Agropólo da Serra Gaúcha**: uma alternativa de desenvolvimento regional a partir da inovação e difusão tecnológica. Caxias do Sul: Instituto de Pesquisas Econômicas e Sociais, UCS, 2004. Disponível em: <[https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/IPES\\_TD\\_003\\_JAN\\_2004.pdf](https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/IPES_TD_003_JAN_2004.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2016.

TOLEDO, L G de; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. **Scientia Agrícola**, São Paulo, v. 58, n. 1, p. 181-186, jan. 2002.

TURNER, M. G.; GARDNER, R. H.; O'NEILL, R. V. **Landscape Ecology in Theory and Practice**. New York: Springer-verlag, 2001. 401 p.

VANZELA, L. S.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R A. M. Influência do uso e ocupação do solo nos recursos hídricos do Córrego Três Barras, Marinópolis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 55-64, jan. 2010.

VELDKAMP, A.; FRESCO, L. O. CLUE-CR: an integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 91, n. 1-3, p. 231-248, 1996.

VERBURG, P. H et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. **Applied Geography**, Oxford, v. 26, n. 2, p. 153-173, 2007.

VERBURG, P. H. et al. Modeling the spacial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. **Environmental Management**, New York, v. 30, n. 3, p. 391-405, 2002.

VERBURG, P. H.; OVERMARS, K. P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. **Landscape Ecol**, Dordrecht, v. 24, n. 9, p. 1167-1181, 2009.

VERBURG, P. H.; VELDKAMP, A. Projecting land use transitions at forest fringes in the Philippines at two spatial scales. **Landscape Ecology**, Dordrecht, v. 19, n. 1, p. 77-98, 2004.

VERBURG, P. H. et al. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. **Applied Geography**, The Netherlands, v. 26, n. 2, p.153-173, abr. 2006.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Minas Gerais: Desa/ufrgs, 2005.

XIAO, J. et al. Geochemistry and solute sources of surface waters of the Tarim River Basin in the extreme arid region, NW Tibetan Plateau. **Journal Of Asian Earth Sciences**, China, v. 54-55, p. 162-173, ago. 2012.

WASSENAAR, T. et al. Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. **Global Environmental Change**, Guildford, v. 17, n. 1, p. 84-104, 2007.

WMO. **The Dublin statement on water and sustainable development**. UN Documents. Gathering a body of global agreements Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/english/icwedece.html>>. Acesso em: 18 mar. 2016.

WILKINSON, A.; EIDINOW, E. Evolving practices in environmental scenarios: a new scenario typology. **Environ. Res. Lett.**, v. 3, n. 4, p. 0-11, out. 2008.