

DANILO MANGABA DE CAMARGO

**Sensibilidade Ambiental ao Óleo na Bacia do Ribeirão Anhumas, Campinas-SP:**  
proposta metodológica para análise conjunta de ambientes terrestres e fluviais



**Danilo Mangaba de Camargo**

**Sensibilidade Ambiental ao Óleo na Bacia do Ribeirão Anhumas, Campinas-SP:**  
proposta metodológica para análise conjunta de ambientes terrestres e fluviais

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Claro, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

**Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Rosemarie Rohn Davies**

**Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Mara Lúcia Marques**

Rio Claro-SP  
2019

C172s

Camargo, Danilo Mangaba de

Sensibilidade Ambiental ao Óleo na Bacia do Ribeirão Anhumas, Campinas-SP : proposta metodológica para análise conjunta de ambientes terrestres e fluviais / Danilo Mangaba de Camargo. -- Rio Claro, 2019

105 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Rosemarie Rohn Davies

Coorientadora: Mara Lúcia Marques

1. Geociências. 2. Processo decisório. 3. Cartas SAO. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Danilo Mangaba de Camargo

**Sensibilidade Ambiental ao Óleo na Bacia do Ribeirão Anhumas, Campinas-SP:**  
proposta metodológica para análise conjunta de ambientes terrestres e fluviais

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Claro, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Mara Lúcia Marques (Co-orientadora)  
(PUC-Campinas)

---

Profa. Dra. Paulina Setti Riedel  
(UNESP)

---

Prof. Dr. Norton Roberto Caetano  
(UNIR)

---

Resultado: Aprovado

Rio Claro, SP 12 de abril de 2019

A minha amada mãe Maria Valdeci Mangaba (*In memoriam*).

## AGRADECIMENTO

Ao meu Bom Deus autor de todas as coisas, pois por meio Dele todas as coisas foram feitas e também sem Ele não haveria a concretização desse trabalho.

Agradeço a minha Mãe Santíssima a Virgem Maria que nunca me desamparou ao longo dessa jornada.

À minha falecida mãe que consumiu sua vida para que eu pudesse estudar, mesmo sem compreender aquilo que eu fazia, não poupou esforços, enquanto aqui estive, para que eu seguisse em frente com esse mestrado.

Agradeço também a meu querido pai que em sua humildade sempre me ensinou a honestidade, a importância e o valor do trabalho, valores esses que foram primordiais como guias para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Um agradecimento especial aos meus sempre mestres, hoje companheiros de trabalho e porque não amigos, da PUC-Campinas. Nomeio aqui a Professora Vera Lúcia dos Santos Plácido, mentora intelectual de minha carreira, obrigado professora pelos inúmeros conselhos e seu entusiasmo sempre contagiante. Agradeço também a Professora Mara Lúcia Marques, companheira de laboratório e co-orientadora desse trabalho, obrigado pela parceria e discussão de ideias, pelos ensinamentos e por partilhar de sua grande experiência comigo. Ao professor Estéfano Seneme Gobbi pela disposição rotineira em sanar dúvidas e pelos ensinamentos no campo da Geografia Física.

Agradeço a professora Paulina Setti Riedel por ter me acolhido na pós-graduação mesmo em situação tão adversa em sua vida pessoal, obrigado professora por abrir caminhos.

A professora Cenira Lupinacci pelo entusiasmo e ensinamentos no campo da Geomorfologia. A professora Rosemarie Rohn Davies pela generosidade em acolher-me como orientando propiciando a finalização desta pesquisa.

Ao professor Antônio Carlos Zuffo pelas lições no campo dos modelos de auxílio à tomada de decisão.

Entre os amigos agradeço o grande Vitor Oliveira, pela escuta e pela disposição de saída aos campos tão necessários nesse trabalho. Também agradeço a Mayara “discípula” pelas longas horas de conversa sobre ciência e pesquisa no Brasil e pela contribuição na etapa de caracterização da área de estudo.

A meu irmão Juninho Camargo pelo incentivo e por aguentar minhas queixas e meus deslumbres ao longo do desenvolvimento dessa pesquisa e pela companhia em muitas das viagens a Rio Claro.

Por último e não menos importante expresse minha gratidão a minha eterna companheira Gabriela que ao longo dessa pesquisa passou de namorada a esposa. Obrigado Gabi pelas vezes que veio a Rio Claro entregar documentos, pelos momentos em que suportou meu desespero e por não ter me deixado desistir. Espero tornar-me um grande homem para merecer estar ao lado dessa grande mulher.

“Aquele que avalia as coisas pelo que elas são e não conforme os outros dizem ou julgam,  
esse é verdadeiramente sábio e ensinado mais por Deus que pelos homens”  
(KEMPIS, 2010, p. 129).

## RESUMO

Dentre os diversos tipos de acidentes ambientais, aqueles vinculados ao derramamento de óleo têm sido recorrentes em diversos ambientes do globo e dadas as suas consequências, são alvos de destaque pela comunidade científica mundial. A Lei Federal 9.966, de 22 de abril de 2000 regulamenta as ações de transporte e armazenamento de petróleo no território brasileiro. De acordo com a referida lei, cabe ao órgão federal responsável pelo meio ambiente, a consolidação dos planos de contingência – local e regional, instituindo o Plano Nacional de Contingência. Nesse sentido, estão inseridas as cartas de sensibilidade a derrames de óleo (Cartas SAO), produtos cartográficos essenciais, constituídas como relevante fonte de informação na elaboração de planos de contingência e na avaliação de danos e impactos provenientes desse tipo de ocorrência. A presente pesquisa apresenta a proposição de uma metodologia de análise multicriterial para avaliação da sensibilidade ambiental ao óleo nas áreas continentais, tendo a bacia hidrográfica como unidade de análise. A Bacia do Ribeirão das Anhumas, localizada entre os municípios de Campinas-SP e Paulínia-SP foi selecionada para o estudo de caso. De acordo com as características da região e após o levantamento de dados bibliográficos, foram levantados dez critérios de mapeamento, os quais foram ponderados e classificados em níveis de sensibilidade. Após a ponderação dos critérios, os mapas descritores de cada um deles foram integrados em um software de geoprocessamento, a partir da equação característica de cada modelo. Três modelos de análise multicritério foram comparados, sendo *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Compromise Programming* (CP) e *Cooperative Games Theory* (CGT). Os resultados demonstram que áreas de alta sensibilidade podem ser encontradas tanto no do Planalto Atlântico quanto na Depressão Periférica, dada pela complexidade da fisiografia local. A classe de maior ocorrência nos três modelos foi a de média sensibilidade.

**Palavras-chave:** Análise multicritério; Modelagem de Sistemas Ambientais; Geoprocessamento; Planejamento Ambiental.



## ABSTRACT

Among the various types of environmental accidents, those linked to oil spills have been recurrent in several environments around the globe and given their consequences, they are highlighted by the world scientific community. The federal Law 9.966, of the April 22, 2000 regulates the transportation and storage of oil in the Brazilian territory. According to this law, it is the responsibility of the federal agency responsible for the environment to consolidate contingency plans - local and regional, establishing the National Contingency Plan. In this sense, the Oil Spill Sensitivity Map (SAO MAP), essential cartographic products, are included as a relevant source of information in the preparation of contingency plans and in the evaluation of damages and impacts arising from this type of occurrence. This work presents the proposal of a methodology based on multicriteria analysis to evaluate the environmental sensitivity to the oil in the continental areas, having the watershed as unit of analysis. The Ribeirão das Anhumas Watershed, located between the municipalities of Campinas-SP and Paulínia-SP was selected for the case study. According to the characteristics of the region and after the collection of bibliographical data, ten mapping criteria were collected, which were weighted and classified in sensitivity levels. After weighting the criteria, the descriptive maps of each of them were integrated in a geoprocessing software, from the equation characteristic of each model. Three models of multicriteria analysis were compared: Analytic Hierarchy Process (AHP), Compromise Programming (CP) and Cooperative Games Theory (CGT). The results demonstrate that areas of high sensitivity can be found in both the Planalto Atlântico and Peripheral Depression, due to the complexity of the local physiography. The highest occurrence class in all three models was medium sensitivity.

**Keywords:** Multicriteria analysis; Environment Systems Modeling; GIS; Environment Planning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de um mapa cognitivo para estruturação do problema.....	22
Figura 2 – Relação entre o “ponto ideal” e o “ponto meta” .....	25
Figura 3 – Mapa de Localização da área de estudo .....	31
Figura 4 – Litologias da Bacia do Ribeirão das Anhumas .....	33
Figura 5 – Solos da Bacia do Ribeirão das Anhumas.....	36
Figura 6 – Compartimentos do relevo na bacia do Ribeirão Anhumas.....	38
Figura 7 – Classes de declividade Bacia do Ribeirão das Anhumas .....	39
Figura 8 – Áreas verdes do município de Campinas .....	42
Figura 9 – Uso e cobertura da terra na Bacia do Ribeirão das Anhumas .....	43
Figura 10 – Densidade populacional e rendimento médio da população na Bacia do Ribeirão das Anhumas .....	44
Figura 11 – Fluxograma das etapas metodológicas.....	46
Figura 12 – Mapa cognitivo da estruturação do problema .....	49
Figura 13 – Carta SAO elaborada pelo método AHP considerando apenas os fatores físicos.68	
Figura 14 - Carta SAO elaborada pelo método AHP considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social .....	69
Figura 15 – Carta SAO elaborada pelo método CGT considerando apenas os fatores físicos.72	
Figura 16 – Carta SAO elaborada pelo método CGT considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social .....	73
Figura 17 – Carta SAO elaborada pelo método CP considerando apenas os fatores físicos....75	
Figura 18 – Carta SAO elaborada pelo método CP considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social .....	76
Figura 19 – Localização dos pontos de controle de campo .....	78
Figura 20 – Ponto de controle A.....	79
Figura 21 – Ponto de controle B .....	80
Figura 22 – Ponto de controle C.....	81
Figura 23 – Ponto de controle D.....	83
Figura 24 – Ponto de controle E.....	84
Figura 25 – Ponto de controle F .....	85

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Climograma do município de Campinas – SP (jun/1988 – Out/2008).....	40
Gráfico 2 – Percentual das classes de uso da terra na Bacia do Ribeirão das Anhumas .....	44
Gráfico 3 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando apenas os fatores físicos .....	67
Gráfico 4 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social.....	67
Gráfico 5 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método CGT considerando apenas os fatores físicos .....	70
Gráfico 6 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social.....	71
Gráfico 7 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método CP considerando apenas os fatores físicos .....	74
Gráfico 8 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social.....	74

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de comparação segundo o método AHP .....	23
Quadro 2 – Valores do Índice Randômico para matrizes de diversas ordens .....	24
Quadro 3 – Tabela <i>payoff</i> método CP .....	28
Quadro 4 – Tabela <i>payoff</i> método CGT .....	29
Quadro 5 – Indicadores utilizados no índice de vulnerabilidade social .....	50
Quadro 6 – Mapa de variáveis do meio físico .....	51
Quadro 7 – Chaves de interpretação para as formas de acumulação fluvial .....	57
Quadro 8 – Pesos obtidos pelo método AHP para as variáveis do meio físico .....	58
Quadro 9 – Pesos obtidos pelo método AHP com a inclusão da variável vulnerabilidade social .....	58
Quadro 10 – Comparação pareada das variáveis físicas de acordo com o método AHP .....	59
Quadro 11 – Comparação pareada das variáveis, inclusa a vulnerabilidade social, de acordo com o método AHP .....	60
Quadro 12 – Escala de Valores de preferência utilizada para os métodos CP e CGT .....	61
Quadro 13 – Aplicação da escala de valores de preferência aos critérios do meio físico .....	61
Quadro 14 – Aplicação da escala de valores de preferência aos critérios incluindo a vulnerabilidade social .....	62
Quadro 15 – Critérios e cargas utilizadas .....	63

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	11
<b>1. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
1.1. GERAL.....	13
1.2. ESPECÍFICOS .....	13
<b>2. REFERÊNCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
2.1. – CARTAS SAO: ORIGEM, PRESSUPOSTOS E TENDÊNCIAS ATUAIS.....	14
2.2. - NOTAS SOBRE A METODOLOGIA APLICADA NA ELABORAÇÃO DE CARTAS SAO NAS ÁREAS CONTINENTAIS DO ESTADO DE SÃO PAULO .....	17
2.3. – ELABORAÇÃO DE MODELOS COMO PROCEDIMENTO CIENTÍFICO .....	19
2.4. MODELOS MULTICRITERIAIS DE AUXÍLIO À TOMADA DE DECISÃO.....	20
2.4.1. <i>Método Analytic Hierarchy Process – AHP</i> .....	23
2.4.2. <i>Método Compromise Programming – CP</i> .....	25
2.4.3. <i>Método Cooperative Games Theory – CGT</i> .....	28
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>30</b>
3.1. LITOLOGIA.....	32
3.2. SOLOS .....	34
3.3. GEOMORFOLOGIA .....	37
3.4. CLIMA .....	40
3.5. VEGETAÇÃO .....	41
3.6. USO E COBERTURA DA TERRA .....	42
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
4.1. MÉTODOS.....	45
4.2. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA .....	47
4.3. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS.....	50
4.3.1. <i>Tabulação dos dados censitários e o índice de vulnerabilidade social</i> .....	50
4.3.2. <i>Mapas do meio físico</i> .....	51
4.3.2.1. <i>Densidade de drenagem</i> .....	52
4.3.2.2. <i>Litologia</i> .....	52
4.3.2.3. <i>Densidade de lineamentos</i> .....	53
4.3.2.5. <i>Textura / permeabilidade dos solos</i> .....	54
4.3.2.6. <i>Declividade</i> .....	54
4.3.2.7. <i>Uso e cobertura da Terra</i> .....	55
4.3.2.8. <i>Profundidade do nível freático</i> .....	56
4.3.2.9. <i>Formas de acumulação fluvial</i> .....	56
4.4. DEFINIÇÃO DOS PESOS PELO MÉTODO AHP .....	58
4.5. APLICAÇÃO DO MÉTODO CP .....	61
4.6. APLICAÇÃO DO MÉTODO CGT .....	62
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
5.1. SENSIBILIDADE INERENTE A CADA CRITÉRIO E SUA RELAÇÃO COM AS SAÍDAS DOS MODELOS.....	64
5.2. CARTAS SAO ELABORADA PELO MÉTODO AHP.....	67
5.3. CARTA SAO ELABORADA PELO MÉTODO CGT .....	70
5.4. CARTA SAO ELABORADA PELO MÉTODO CP .....	74
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A – MAPAS DE CADA CRITÉRIO RECLASSIFICADOS POR SUA SENSIBILIDADE .....</b>	<b>96</b>

## INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tipos de acidentes ambientais, aqueles vinculados ao derramamento de óleo têm sido recorrentes em diversos ambientes do globo e dadas as suas consequências, são alvos de destaque pela comunidade científica mundial. Tais eventos podem, a depender da sua magnitude, provocar danos severos às mais diversas atividades socioeconômicas, bem como aos recursos físicos e biológicos das regiões atingidas.

Historicamente diversos casos desse tipo de acontecimento podem ser citados, todavia, o acidente ocorrido em 1989, envolvendo o navio petroleiro Exxon Valdez, na baía de Prince William - Alasca, ganhou notoriedade, uma vez que, dadas as proporções do acidente, uma série de questionamentos sobre ações de prevenção e combate passaram a ser levantados por diversos órgãos e instituições internacionais. Tais questionamentos derivaram-se na formulação de uma legislação ambiental internacional para a regulação de ações de prospecção, transporte e armazenamento de petróleo e seus derivados.

Não obstante, no ano de 1995, tendo o Brasil como signatário, passou a vigorar a Convenção Internacional sobre Preparo, Responsabilidade e Cooperação em caso de poluição por Óleo (OPCR 90). Dentre os principais aspectos de ação conjunta definidos pela convenção, ganham destaque a indicação de que seus signatários possuem a responsabilidade pelo estabelecimento de planos nacionais de contingência, elaborados a partir de planos de emergência individuais. Especificamente no caso brasileiro, a Lei Federal 9.966, de 22 de abril de 2000 é que regulamenta as ações de transporte e armazenamento de petróleo. De acordo com a referida lei, cabe ao órgão federal responsável pelo meio ambiente, dentro das diretrizes definidas na OPCR 90, a consolidação dos planos de contingência – local e regional, instituindo o Plano Nacional de Contingência. O objetivo central desse tipo de planejamento é a busca pela redução dos danos e impactos inerentes à ocorrência desse tipo de acidente, contudo, para lograr tais objetivos, é imprescindível um conhecimento apurado dos ambientes afetados. Com efeito, o conhecimento das áreas mais sensíveis ao derramamento de óleo pode nortear ações e investimentos na remoção de resíduos e no tratamento prioritário de mitigação dos danos causados.

Nesse sentido, estão inseridas as cartas de sensibilidade a derrames de óleo, ou como mais conhecidas, Cartas SAO. Essas cartas são produtos cartográficos essenciais, constituídas como relevante fonte de informação na elaboração de planos de contingência e na avaliação de danos e impactos provenientes desse tipo de ocorrência. Embora se reconheça a existência

de diversas tipologias dessas cartas em diferentes países no mundo (MARTINS; RIEDEL; MILANELLI, 2013), pode-se reconhecer que tais cartografias são elaboradas visando o reconhecimento de três dimensões do ambiente: i) parâmetros físicos, notadamente o contexto geológico-geomorfológico; ii) recursos biológicos e; iii) recursos socioeconômicos. A metodologia mais difundida para sua realização é àquela dada pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2002) a metodologia brasileira é uma adaptação da metodologia da NOAA. Conquanto, cabe ressaltar que tais metodologias encontram-se consagradas no que tange à pesquisas em ambientes costeiros, mas a discussão a respeito de sua aplicação em ambientes fluviais e terrestres ainda é incipiente. Recentemente, alguns trabalhos têm sido divulgados no intuito de colaborar com o avanço da análise da sensibilidade de ambientes fluviais e terrestres a derrames de óleo. Dentro desse escopo, destacam-se os trabalhos de Costa (2014) e de Beneditti (2015).

A presente pesquisa aborda a sensibilidade ambiental ao óleo em áreas continentais tendo a bacia hidrográfica como unidade de análise, uma vez que ela fornece uma visão sistêmica e integradora do ambiente. A Bacia do Ribeirão Anhumas localizada nos municípios de Campinas-SP e Paulínia-SP foi escolhida para o estudo de caso. Pesam para essa escolha fatos como a bacia ser cortada por importantes rodovias, a proximidade com a refinaria de Paulínia (REPLAN), existência de trecho de dutos em seus limites e seu caráter urbano-rural que permite uma amplificação de cenários e variáveis envolvidas no estudo de caso. Dada a inexistência de dados apuradas sobre a fauna e flora local, optou-se pelo estudo da sensibilidade ambiental considerando as dimensões físicas e socioeconômicas da bacia.

Este volume está organizado em seis capítulos, o primeiro apresenta os objetivos gerais e específicos da pesquisa; o segundo foi dedicado ao referencial teórico que fundamenta o trabalho, nele são discutidos a origem e pressupostos da elaboração das cartas SAO, a elaboração de modelos como procedimento científico e, por fim, o funcionamento dos três modelos de análise multicritério utilizados na pesquisa; no capítulo três faz-se a caracterização da área de estudo a partir de informações sobre a litologia, solos, geomorfologia, vegetação e uso e cobertura da terra; o quarto capítulo é dedicado a discussão do método, metodologias e dados utilizados; no capítulo cinco são apresentados e discutidos os resultados obtidos; por fim, no sexto e último capítulo encontram-se as reflexões que compõem as conclusões do trabalho.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1.Geral**

Propor uma metodologia baseada em análise multicritério para o mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo em áreas continentais, tendo a bacia hidrográfica como unidade de análise a partir de um estudo de caso.

### **1.2. Específicos**

- Avaliar a sensibilidade ambiental ao óleo para o caso concreto da Bacia do Ribeirão das Anhumas.
- Comparar o desempenho dos métodos de análise multicritério AHP, CP e CGT na elaboração de mapeamentos de sensibilidade ambiental ao óleo em bacias hidrográficas.

## **2. REFERÊNCIAL TEÓRICO**

Nesse capítulo busca-se a inserção nos temas que são norteadores no desenvolvimento da pesquisa, desse modo são abordados a origem, pressupostos e avanços na elaboração das cartas SAO, a modelagem dos sistemas ambientais como metodologia geocientífica e a estrutura e funcionamento dos três modelos de análise multicritério adotados.

### **2.1. – Cartas SAO: origem, pressupostos e tendências atuais**

A indústria petroleira é uma das principais forças da economia mundial, com efeito, cotidianamente milhares de indivíduos em todo o globo fazem uso de seus derivados. Desse ponto de vista, pode-se vislumbrar a importância dessa matéria-prima em relação aos grandes progressos alcançados pela humanidade, sobretudo no século XX. Contudo, em que pese tais fatos, a história da exploração petrolífera é também marcada por diversos acidentes causadores de grandes impactos socioambientais. Dentre esses sinistros há aqueles que são tidos como marcos históricos, quer seja pela sua magnitude e/ou ainda pela emergência de ações de resposta deles derivadas.

Na década de 1970 observou-se um relativo adensamento no número de acidentes envolvendo derrames de óleo no território americano, dentre esses, destacam-se os ocorridos com os navios “Metula”, “Urquiola” e “Jacob Maersk”, tais acidentes serviram como pano de fundo para o desenvolvimento dos primeiros estudos relativos a sensibilidade do ambiente ao óleo (MICHEL et al. 1978). A esses acontecimentos é atribuída a gênese dos mapeamentos de sensibilidade ao óleo, convencionados, no Brasil, pelo título de Cartas de Sensibilidade Ambiental ao Óleo - Cartas SAO (MMA, 2002). As cartas SAO constituem-se em importantes documentos cartográficos que subsidiam ações de intervenção e planejamento em casos de derramamentos de óleo integrantes dos planos de contingência. Vale salientar que passados quarenta anos desde o surgimento dos primeiros estudos relativos a sensibilidade do ambiente ao óleo, muito se avançou em termos metodológicos e operacionais, sobretudo na elaboração das cartas SAO, de modo que a seguir, apresenta-se uma pequena revisão sobre esse desenvolvimento.

No final da década de 1970 pesquisadores da Universidade da Carolina do Sul, diante dos já referidos acidentes ocorridos à época, propuseram uma classificação dos ambientes costeiros de acordo com um índice que levasse em conta a perturbação causada pelo óleo



(MICHEL et al., 1978; GUNLACH; HAYES, 1978). Esses estudos iniciais, sugeriam uma classificação hierarquizada dos ambientes em termos de sua vulnerabilidade potencial em relação a ocorrência de derrames. A publicação de Michel et al., (1978), por exemplo, classifica os ambientes costeiros em um índice de escala variando entre 1 e 10, sendo esse último valor o maior grau de vulnerabilidade encontrado. Note-se que no campo dessas pesquisas, não há uma distinção entre os termos vulnerabilidade e sensibilidade, sendo nesse caso empregado como sinônimos (MARTINS; RIEDEL; MILANELLI, 2013). A partir desses estudos pioneiros os anos seguintes assistiram a uma profusão de propostas metodológicas para elaboração desse tipo de mapeamento, por vezes acompanhada de propostas que abarcassem também aspectos biológicos e socioeconômicos em sua elaboração.

Contudo, foi na década de 1990 que se verificou uma concentração de esforços para a difusão do uso e utilização das cartas SAO, impulsionada sobretudo pela proporção catastrófica no acidente ocorrido com o navio Exxon Valdez em 1989 (MARTINS; RIEDEL; MILANELLI, 2013). Com efeito, em 1993 a National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, estabelece um guia normativo para elaboração desses mapeamentos em território americano (MICHEL; DAHLIN, 1993). A metodologia proposta pela NOAA acabou por tornar-se referência servindo como base para elaboração das cartas SAO em diversos países incluindo o Brasil (ARAÚJO et al., 2006; MMA, 2002).

Estudos dessa temática em território brasileiro podem ser vistos desde a década de 1980, aplicados a ambientes costeiros e litorâneos no Estado de São Paulo (AWAZU; POFFO, 1986; MALDONADO et al. 1987). Não obstante, a primeira elaboração normativa na busca de uma padronização na elaboração das cartas SAO em território brasileiro, foi o “manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos”, regulando os documentos produzidos no âmbito da empresa (ARAÚJO et al., 2006). No que tange a padronização em nível nacional, coube ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) o estabelecimento das diretrizes técnicas para essa agenda, redundando em duas publicações (MMA, 2002; MMA, 2004).

Na atualidade, vê-se de modo crescente a ampliação de pesquisas relativas a sensibilidade dos ambientes ao óleo em outras áreas que não as costeiras (MARTINS; RIEDEL; MILANELLI, 2013). Esse fato pode ser entendido por duas razões, o adensamento e, em certo modo, saturação dos estudos em áreas litorâneas e a complexidade das redes de distribuição e transportes de hidrocarbonetos nas áreas continentais. Nesse sentido, algumas

iniciativas podem ser destacadas relativas à aplicação dos índices de sensibilidade em ambientes fluviais e terrestres.

Concernente aos ambientes fluviais, diversos esforços podem ser reconhecidos no sentido de aprimoramento de metodologias adaptadas para esse tipo de ambiente. Podem ser tidos como exemplo, a elaboração de Cartas SAO em ambientes fluviais amazônicos próximos a instalações da Petrobrás, através de uma adaptação dos índices de sensibilidade praticados em áreas costeiras. Outro exemplo é apresentado por Hayes *et al.* (1995) ao proporem uma metodologia baseada na análise da bacia hidrográfica, em casos de córregos e pequenos cursos d'água. Já em território mexicano, Mendoza-Cantú *et al.* (2011), lançando mão de uma abordagem sistêmica, propõem uma metodologia para a elaboração das Cartas SAO baseada no conceito de geossistema. Em território paulista, vale ressaltar os trabalhos de Beneditti *et al.* (2016) em que se mapeia a sensibilidade de trecho do Rio Tietê e Costa *et al.* (2015) que propõem um Modelo Orientado à Representação do Pensamento Humano (MORPH) para a estabelecimento de um Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF).

Em ambientes terrestres os estudos são em sua maioria focados nas faixas ao entorno de modais de transporte. Mattos (2008) apresenta uma classificação da sensibilidade no entorno de rodovias baseados em três classes (alta, média e baixa). Também trabalhando com o entorno rodoviário Martins *et al.* (2014) define a sensibilidade aplicando o método de compartimentação fisiográfica. No entorno de ferrovias o trabalho de Silva (2010) apresenta contribuição metodológica para o desenvolvimento de estudos nesse modal. De outro lado há também estudos realizados em outros contextos, como o entorno de dutos (MENDES *et al.* 2005; GOUNDLACH *et al.* 2005) e postos de combustíveis (SANTOS, 2008).

Dessa breve revisão fica demonstrado que desde os aparecimentos dos trabalhos pioneiros, os mapeamentos da sensibilidade ambiental vêm congregando esforços da comunidade científica, ampliando suas possibilidades de aplicação em diferentes contextos e ambientes. Dada a importância do petróleo e derivados na economia nacional e as dimensões continentais de seu território, o Brasil apresenta terra fértil a experimentação de novas possibilidades teórico-metodológicas para o desenvolvimento desse campo de conhecimento.

## **2.2. - Notas sobre a metodologia aplicada na elaboração de cartas SAO nas áreas continentais do Estado de São Paulo**

De acordo com Gundlach et al. (2001), a elaboração das cartas SAO devem apoiar-se em três seguimentos, sendo os dados físicos (geológico-geomorfológicos) aqueles que embasam a escala de sensibilidade, os outros dois são os fatores biológicos e socioeconômicos que não compõem o índice de sensibilidade, sendo então apenas inseridos nas cartas como elementos pictóricos. Essa metodologia internacionalmente consagrada para as áreas costeiras através do manual da NOAA, ao enfatizar os elementos físicos do ambiente propõe que os mesmos sejam classificados em um índice variando de 0 a 10, indo da menor a maior sensibilidade.

Estando ainda em estágio embrionário no contexto mundial, a análise da sensibilidade ao óleo nos continentes carece de maior discussão, contudo, essa mesma situação favorece a experimentação de diferentes metodologias técnico-científicas para sua execução.

Nesse interim, considerando o contexto brasileiro, podem ser salientados os esforços realizados pelo grupo de pesquisa “Sensibilidade Ambiental ao Óleo – UNESP/RC”, uma vez que por seu intermédio diferentes metodologias em diferentes áreas intracontinente tem sido testada ao longo dos últimos anos (LEME, 2018).

O trabalho de Martins (2012) é pioneiro nesse cenário. O autor faz a proposta de um Índice de Sensibilidade Terrestre para o mapeamento do entorno de rodovias considerando fatores como: textura; declividade; profundidade do manto de alteração; profundidade do nível de água e; permeabilidade relativa. Esse trabalho serviu como base para os demais produzidos pelo grupo até o momento. Nesse sentido, vale ressaltar os trabalhos de Ribeiro (2017) e Ferreira (2017) que embasadas por esse índice realizaram o mapeamento da sensibilidade ao óleo no entorno de importantes rodovias do Estado de São Paulo a SP-310 (Rod. Washington Luís) e SP-330 (Rod. Anhanguera) respectivamente. O trabalho de Leme (2018) também realiza o mapeamento da sensibilidade ao óleo no entorno de rodovias trabalhando com a SP-191 (Wilson Finardi), entretanto avança na busca da integração dos fatores socioeconômicos na composição do índice de sensibilidade, deixando esses de ser apenas elementos iconográficos no mapeamento.

De um ponto de vista teórico-metodológico, todos esses trabalhos seguem uma linhagem de execução ao construírem seus índices e mapeamentos a partir da compartimentação fisiográfica do terreno. Conforme Vedovello (1993) esse tipo de compartimentação do meio físico é dada através da fotointerpretação do terreno através de

produtos de sensoriamento remoto, identificando padrões de ocorrência de elementos da drenagem e relevo e assim propondo o estabelecimento de unidades-áreas de características semelhantes em termos do comportamento do ambiente. A premissa é de que os elementos fisiográficos da paisagem resultam da dinâmica e interação entre os diversos fatores do ambiente, por exemplo, a litologia, domínios tectônicos, morfologia do terreno e o clima. Dessa interação emanam as particularidades de cada paisagem (VEDOVELLO; MATTOS, 1998).

Ross (1995) indica a existência de dois procedimentos metodológicos possíveis para a elaboração da compartimentação fisiográfica, a saber:

- a) Análise integrada: em que os elementos do terreno são analisados de modo simultâneo pela identificação de padrões perceptíveis na fotointerpretação, estabelecendo desse modo as diferentes unidades.
  
- b) Análise multitemática: pressupõe a existência de uma coleção prévia de mapeamentos dos componentes do meio físico, a integração é feita posteriormente gerando um documento cartográfico de síntese dessas informações.

Os trabalhos apresentados anteriormente baseiam-se nessa análise integrada, essa opção é justificada, sobretudo, pela escassez de dados físicos em escala de detalhe no território brasileiro. Não obstante, a presente pesquisa utilizará da análise multitemática ancorando-a nas na utilização de modelos de auxílio à tomada de decisão e análise multicritério, bem como a álgebra de mapas em software SIG. Deve-se ter clareza, contudo, de que não se trata de uma disputa entre qual das duas análises produzem melhores resultados e sim de que são duas possibilidades, que podem ser levadas a cabo dependendo das circunstâncias e do contexto em que o pesquisador esteja envolvido.

### 2.3. – Elaboração de modelos como procedimento científico

A utilização de modelos como procedimento metodológico na análise ambiental, ancora-se sobre dois pilares, o primeiro diz respeito à perspectiva holística da natureza ligada a visão sistêmica do ambiente. O outro, apoia-se sobre um pilar tecnológico, propiciado por avanços nos instrumentos e mecanismos de coleta e processamento de dados ambientais (CHRISTOFOLLETI, 1999; XAVIER-DA-SILVA, 2007).

A noção de uma visão sistêmica remete a própria diversificação do entendimento do ser humano sobre o ambiente, não obstante Christofolleti (1999) divide em três grandes “visões” a abordagem do conhecimento humano sobre o meio: a) conhecimento apoiado sobre a visão religiosa do mundo; b) visão mecanicista – advindo com a Revolução Industrial; c) visão organicista. No escopo deste trabalho interessa-nos um melhor entendimento sobre a visão organicista, pois é nela que se apoia o paradigma sistêmico, tendo por pressuposto o axioma de que o funcionamento da totalidade é mais complexo que a simples somatória das partes. Cabe dizer que as três visões de mundo podem ser concomitantes em diversas situações e contextos. A construção social de cada uma dessas visões diz respeito a necessidade do ser humano de explicar e entender o mundo que o cerca, é sob esse ponto de vista a resposta da perplexidade diante da complexidade que o envolve.

Diante dessa complexidade o procedimento adotado é a busca por uma simplificação da realidade (CHORAFAS, 1965; APOSTEL, 1961), daí o desenvolvimento de modelos, caracterizados como “uma estruturação simplificada da realidade que apresenta supostamente características ou relações sob forma generalizada” (HAGGETT; CHORLEY, 1974).

A elaboração de modelos (modelagem) é instrumento amplamente utilizado no âmbito do conhecimento científico, possuindo assim, diversos casos de aplicação na análise ambiental (CHRISTOFOLLETI, 1999; XAVIER-DA-SILVA, 2007; MEIRELLES; CAMARA e ALMEIDA, 2007). Como simplificações da realidade cabe ressaltar as características inerentes aos modelos, tais características foram sumarizadas por Haggett e Chorley (1974) e comentadas por Christofolleti (1999) num total de seis, sendo-as:

- Seletividade: dado seu caráter de simplificação da realidade, um modelo não pode abarcar todas as informações sobre o mundo real de modo que sua construção, implica na seleção das informações de maior relevância pelo pesquisador.

- Estruturação: busca de que os elementos selecionados para um modelo em questão sejam explorados em termos de suas relações.
- Enunciativo: modelos bem-sucedidos são àqueles que contém a capacidade de proposição de uma ampliação e/ou generalização, a esse caráter de proposição de sugestão os autores denominam de significado enunciativo.
- Simplicidade: diz-se que em sua apresentação um modelo deva ser simples o suficiente para sua manipulação e compreensão, mas sem deixar de ser representativo da complexidade necessária para compreensão do sistema analisado
- Analógicos: funcionam como analogia justamente por serem diferentes do real e buscarem sua simplificação, a fim de aproximando-se dela possibilitarem sua compreensão.
- Reaplicabilidade: é condição *sine qua non*. Significa que um modelo não deve ser apenas descritivo de um caso isolado, mas passível de ser aplicados a outros casos da mesma categoria

#### **2.4. Modelos multicriteriais de auxílio à tomada de decisão**

Dentre as diversas tipologias de modelos aplicados nos estudos ambientais, os modelos multicriteriais de auxílio a tomada de decisão ganham destaque. Fato esse resultado, sobretudo, de sua usabilidade em contextos de planejamento e gestão ambiental (MEIRELLES; CAMARA e ALMEIDA, 2007).

Duas etapas fundamentais são reconhecidas para elaboração de ações de planejamento ambiental: o diagnóstico e o prognóstico. A primeira diz respeito ao conhecimento da atual situação do sistema ambiental, bem como a interpretação das inter-relações entre os seus componentes, por outro lado, na fase de prognóstico à luz do conhecimento obtido na etapa anterior, são elaborados cenários para avaliação do comportamento do sistema frente a ocorrência de intervenções antrópicas sobre o mesmo.

Na elaboração de prognósticos uma diversidade de técnicas e metodologias podem ser adotadas, contudo dada a origem e amplitude das variáveis analisadas, os modelos de auxílio à tomada de decisão baseados em técnicas de análise multicritério adquirem papel de destaque ao permitirem a análise conjunta de dados qualitativos e quantitativos. Não obstante, essas

técnicas permitem que uma gama de envolvidos no processo decisório, tais como especialistas técnico-científicos, gestores e representantes de comunidades envolvidas possam ter opiniões avaliadas na busca da proposição de um cenário ideal. No campo das geociências a utilização desse tipo de modelo está em íntima relação com o geoprocessamento da informação espacial em sistemas de informação geográficas (SIG) e nos últimos anos vem ganhando ainda mais expressão em áreas de conservação e recuperação ambiental (MALCZEWSKI, 2006; MEIRELLES; CAMARA; ALMEIDA, 2007; ALLAIN; PLUMECOCQ e LEENHARDT, 2017; ESMAIL; GENELETTI, 2017).

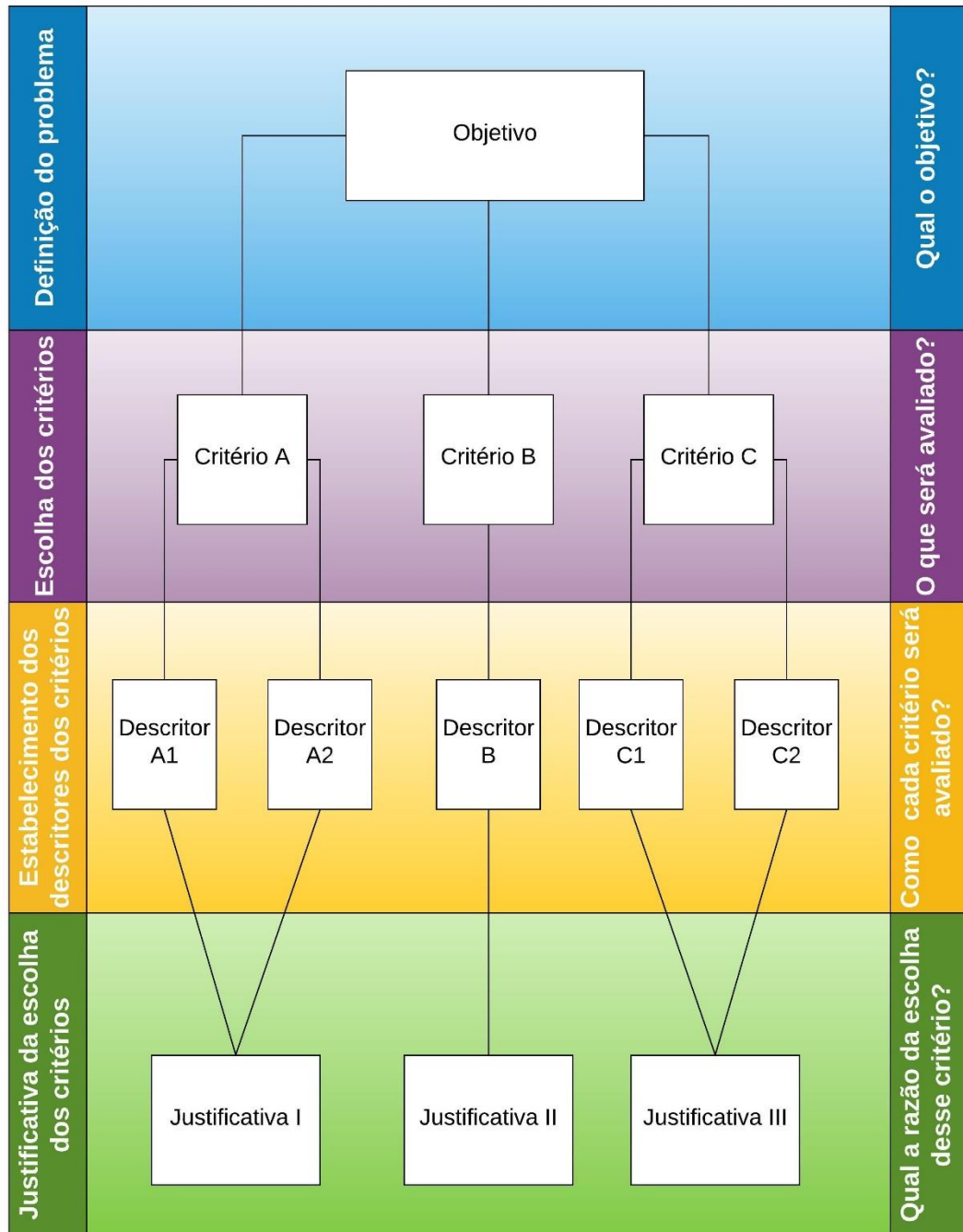
O surgimento das modernas técnicas de análise multicriterial remonta ao início do século XX, sendo que o trabalho publicado por Pareto em 1906 é tido como um marco nas pesquisas nessa área do conhecimento (KÖKSALAN; WALLENIUS e ZIONTS, 2013). Todavia, com as demandas estratégico-militares surgidas a partir do desenvolvimento da II Guerra Mundial é que esse campo ganha projeção em termos de publicações científicas, destaca-se desse período os trabalhos de Koopmans (1951), Kuhn e Tucker (1951), Markowitz (1952) e a proposição do método de programação por metas de Charnes e Cooper (1961).

Na atualidade uma miríade desses métodos é conhecida, podem ser citados, entre outros, os métodos *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE), *Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation* (PROMETHEE), *Ordinal Regression* (ORDREG), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), *Compromisse programming* (CP), *Cooperative Game Theory* (CGP). Contudo, independentemente do modelo escolhido três etapas são basilares para sua correta execução, quais sejam: a) estruturação do problema; b) definição dos pesos para cada critério e; c) integração dos critérios (KEENEY, 1992; GREGORY *et al.*, 2005).

Conforme apresentado por Keeney (1992) e Ensslin; Montibeller Neto e Noronha (2001), a estruturação do problema ocorre em níveis hierárquicos, no primeiro nível é definido o objetivo da análise, no segundo busca-se a escolha dos critérios a serem avaliados consoante o objetivo definido, no terceiro nível são estabelecidos os descritores de cada critério, isto é, o modo como o desempenho de cada critério será avaliado, no último nível devem ser apresentadas as razões e justificativas para a escolha dos critérios e seus descritores. A Figura 1 apresenta um exemplo de mapa cognitivo para estruturação do problema.

Sobre a definição dos pesos e a integração dos critérios é que reside a diferença entre os diferentes modelos de análise multicritério, desse modo, nos próximos parágrafos serão detalhados esses procedimentos na aplicação dos métodos AHP, CP e CGT.

Figura 1- Exemplo de um mapa cognitivo para estruturação do problema



Fonte: Adaptado de Kenny (1992); Ensslin; Montibeller Neto e Noronha (2001). Organizado pelo autor.



### 2.4.1. Método *Analytic Hierarchy Process* – AHP

O método AHP foi desenvolvido por Thomas Saaty (1977), sendo elaborado para a definição de pesos em um contexto decisório onde há diversidade de critérios a serem analisados. A primeira etapa para a definição dos pesos no método AHP, consiste na elaboração de uma matriz de comparação pareada entre os diversos critérios definidos no estudo. Em seguida deve-se aplicar um valor de importância relativa de cada par de variáveis de acordo com uma escala definida (SAATY, 1977), conforme apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de comparação segundo o método AHP

Valores	Importância comparativa
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente mais importante que
5	Fortemente mais importante que
7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que
2,4,6,8	Valores intermediários. Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i

Fonte: Saaty (1977).

Após o estabelecimento da matriz de julgamentos, os pesos de importância relativa de cada critério são calculados a partir de seus autovetores, valores de prioridade que tem a função de determinar a escala de prioridade entre os critérios (MALINOWSKI, 2006). Não obstante, os autovetores devem ser normalizados dividindo-os pela somatória dos autovetores de cada coluna da matriz. Esse procedimento escalona os valores em um intervalo entre zero e um, de acordo com Saaty (1990) tal procedimento permite alcançar uma maior precisão na resposta obtida.

Dado que certo grau de subjetividade é inerente ao julgamento dos critérios, o método AHP propõe a verificação do índice de consistência (IC) e a razão de consistência (RC) da matriz (SAATY, 1980). O IC é obtido através da Equação (1)

$$IC = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (1)$$

Onde:

$\lambda_{max}$  = maior autovetor da matriz de comparação

$n$  = a ordem da matriz

Por sua vez, a razão de consistência é dada pela Equação (2)

$$RC = IC/IR \quad (2)$$

Onde IR é o chamado índice randômico indicado por Saaty (1980), em que para cada valor de  $n$  há um índice respectivo, conforme apresentado no Quadro 2. Considera-se uma matriz consistente quando  $RC \leq 0,1$ .

Quadro 2 – Valores do Índice Randômico para matrizes de diversas ordens

Ordem da matriz	IR
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,51
11	1,52
12	1,54
13	1,56
14	1,58
15	1,59

Fonte: Saaty (1980).

O método não prevê nenhuma estrutura formal para agregação dos critérios, contudo a combinação linear por soma ponderada tem sido aplicada com sucesso em vários trabalhos (AYALEW *et al.*, 2005; CAMARGO *et al.*, 2017; MARQUES; SILVA e CAMARGO, 2017; ABRAMS *et al.*, 2018). Quando essa integração é realizada por álgebra de mapas em ambiente SIG, pode ser descrita conforme apresentado na Equação (3).

$$\sum X_i * P_i \quad (3)$$

Onde:

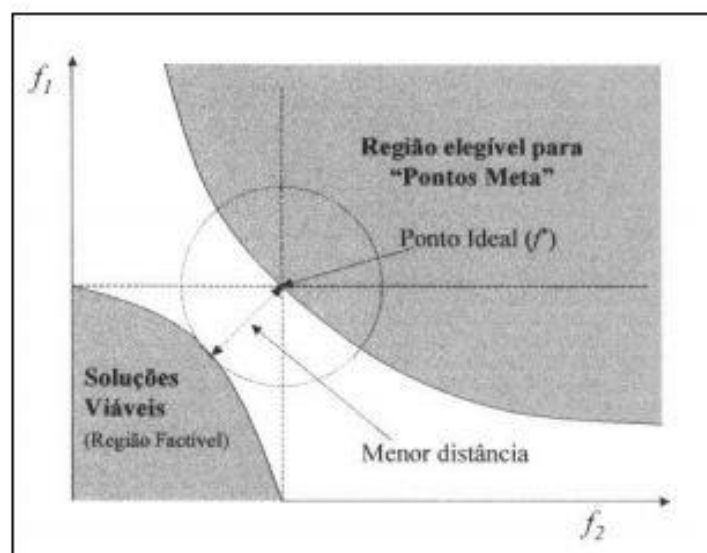
$X_i$  = mapa da  $i$ -ésima variável

$P_i$  = peso definido para a  $i$ -ésima variável

#### 2.4.2. Método *Compromise Programming* – CP

O método CP tem por premissa a distância métrica (teorema de Pitágoras) entre dois pontos com coordenadas conhecidas (ZENELY, 1982). A lógica intrínseca ao método é a busca da diminuição da distância do conjunto de pontos factíveis, em relação ao chamado “ponto ideal”, sendo este definido pelo tomador de decisão (DM – Decision Maker) (ZUFFO et al. 2002). Para diminuição da dificuldade da escolha de um “ponto ideal”, adota-se como restrição um “ponto meta” que seja menor ou igual ao “ponto ideal” (GERSHON; DUCKSTEIN, 1983; ZUFFO *et al.* 2002), a Figura 2 apresenta essa relação.

Figura 2 – Relação entre o “ponto ideal” e o “ponto meta”



Fonte: Zuffo et al. (2002), modificado de Gershon e Duckstein (1983).

Não há nesse método nenhuma descrição na forma de adoção dos pesos para cada critério, que pode ser definido subjetivamente ou por alguma estrutura de decisão, no entanto

para sua implementação os pesos devem ser normalizados trabalhando em intervalo de 0 a 1. Pereira e Duckstein (1993) salientam a aplicabilidade e a relativa facilidade de integração do método CP em ambiente SIG, os autores ainda descrevem o funcionamento do método bem como sua implementação conforme detalhamento a seguir.

A primeira etapa consiste na avaliação inicial do conjunto de alternativas, isto é, todas as células *raster* contidas no banco de dados geográficos (BDG), de modo que:

$$x = \{x^1, x^2, \dots, x^n\} \quad (4)$$

Onde:

$x$  = conjunto de células *raster*

$x^n$  = a um sítio para análise espacial local (BERRY, 1964)

Cada alternativa é caracterizada por  $n$  atributos que correspondem aos critérios adotados, são, portanto, mapas temáticos componentes do BDG.

$$x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_3^k) \quad k = 1, \dots, k \quad (5)$$

$x_i^k$  = corresponde ao score de um atributo  $i$  para a alternativa  $k$

$x^k$  = é o vetor dos números  $K$  assinalados para cada alternativa sintetizando toda a informação para ela, considerando a totalidade dos critérios.

Como  $i$  é compreendido como cada critério avaliado, então, o conjunto  $i$  produz um vetor com  $k$  números

$$x_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^k) \quad (6)$$

$x_i$  corresponde desse modo a todos os níveis alcançados pelo atributo  $i$ . Dentre desses conjuntos haverá ao menos um que será preferível aos outros, e.g. se o atributo analisado fosse a declividade do terreno, pixels com valores acima de 45% de declividade são preferíveis que àqueles com 3% em termos de sensibilidade ambiental ao óleo.

O vetor  $x^*$  representa o ponto ideal:

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_l^*) \quad (7)$$

A última etapa do método é então a avaliação de todas as alternativas disponíveis com base em sua distância multidimensional em relação ao ponto ideal, seguindo a seguinte formulação (ZUFFO *et al.* 2002):

$$l_s(x) = \left[ \sum_{i=1}^n \alpha_i^s \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right|^s \right]^{1/s} \quad (8)$$

Onde:

$l_s$  = distância do valor da solução tida como ideal

$\alpha_i$  = Pesos atribuídos subjetivamente ou através de processos de atribuições de preferências

$f_i^*$  = melhor valor obtido para o critério  $i$

$f_{i,w}$  = pior valor obtido para o critério  $i$

$f_i(x)$  = resultado da implementação  $x$  em relação ao  $i$ ésimo critério, ao se trabalhar com uma estrutura *raster*  $x$  será correspondente ao valor associado a cada pixel de cada mapa temático contido no BDG.

$s$  = reflete a importância que o tomador de decisão atribui aos desvios máximos, contudo em estudos que buscam comparar o método CP com outros adota-se esse valor como sendo igual a um (ZUFFO *et al.*, 2002).

Não obstante, como tem-se que  $s = 1$  a equação pode ser simplificada do seguinte modo (5).

$$l_s(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left| \frac{f_i^* - f_i(x)}{f_i^* - f_{i,w}} \right| \quad (9)$$

Para exemplificação pode se imaginar uma situação em que se queira avaliar os impactos em três bacias hidrográficas denominadas aqui por A, B e C; considera-se haver três critérios a serem avaliados, C1, C2, C3; cada um dos critérios recebeu por meio de avaliação subjetiva os seguintes pesos: 0,37, 0,30 e 0,33. Com essas informações é possível a montagem de uma planilha *payoff* e calcular o desempenho de cada bacia conforme proposto na Fórmula (5). O Quadro 3 apresenta a matriz *payoff* referente a esse exemplo.

Quadro 3 – Tabela *payoff* método CP

Critério	$\alpha$	Alternativas			$f_i^*$	$f_{i,w}$
		A1	A2	A3		
		$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$		
C1	0,37	3	4	5	5	3
C2	0,30	4	3	9	9	3
C3	0,33	10	8	6	10	6
Score		0,620	0,485	0,330		

Fonte: Organizado pelo autor.

Conforme apresentado no Quadro 3 a alternativa A3 foi aquela que apresentou menor distância em relação ao “ponto ideal” (0,33), seguida pela alternativa A2 (0,485) e A1 (0,620), respectivamente. Desse modo tem-se que a bacia que sofre maior impacto ambiental é a chamada A3.

#### 2.4.3. Método *Cooperative Games Theory* – CGT

O método CGT consiste em uma ferramenta matemática aplicada a resolução de conflitos, formulada por Von Neumann e Morgenstern (1944). De acordo com Osborne e Rubinstein (1994), entre outras possibilidades, o entendimento de conflitos no método pode ser estendido a situações em que haja a necessidade de escolha de alternativas dentre de um conjunto de possibilidades disponíveis. Da mesma forma que descrito no método CP o CGT não possui nenhuma estrutura formal para definição dos pesos entre as variáveis.

Em oposição ao método CP que funciona com a estimativa da menor distância para o “ponto ideal”, o método CGT utiliza o conceito de maior distância do “pior”, sendo este um ponto *status quo* definido pelo DM, isto é, uma situação mínima aceitável, neste caso a medida de distância utilizada é a geométrica (GERSHON; DUCKSTEIN, 1983; ZUFFO *et al.* 2002).

A implementação do modelo em SIG segue a mesma estrutura descrita no método CP, alterando-se somente a última etapa, que consiste na agregação dos critérios, que para o método CGT é dada pela Equação (10).

$$l_s(x) = \prod_{i=1}^n |f_i(x) - f_i^*|^{\alpha_i} \quad (10)$$

Em que:

$\alpha_i$  = Pesos atribuídos subjetivamente ou através de processos de atribuições de preferências

$f_i^*$  = o pior elemento do ponto “*Status Quo*”, isto é, o pior valor obtido, costuma-se decrescer em 1 unidade do  $f_i^*$  a fim de não zerar os resultados.

$f_i(x)$  = resultado da implementação  $x$  em relação ao  $i$ ésimo critério, ao se trabalhar com uma estrutura raster  $x$  será correspondente ao valor associado a cada pixel de cada mapa temático contido no BDG.

Considerando o mesmo exemplo dado no tópico anterior a matriz *payoff* com a implementação do CGT seria (Quadro 4):

Quadro 4 – Tabela *payoff* método CGT

Critério	$\alpha$	Alternativas			$f_i^*$
		A1	A2	A3	
		$f_1(x)$	$f_2(x)$	$f_3(x)$	
C1	0,37	3	4	5	2
C2	0,30	4	3	9	2
C3	0,33	10	8	6	5
Score		2,09	1,84	2,69	

Fonte: Organizado pelo autor.

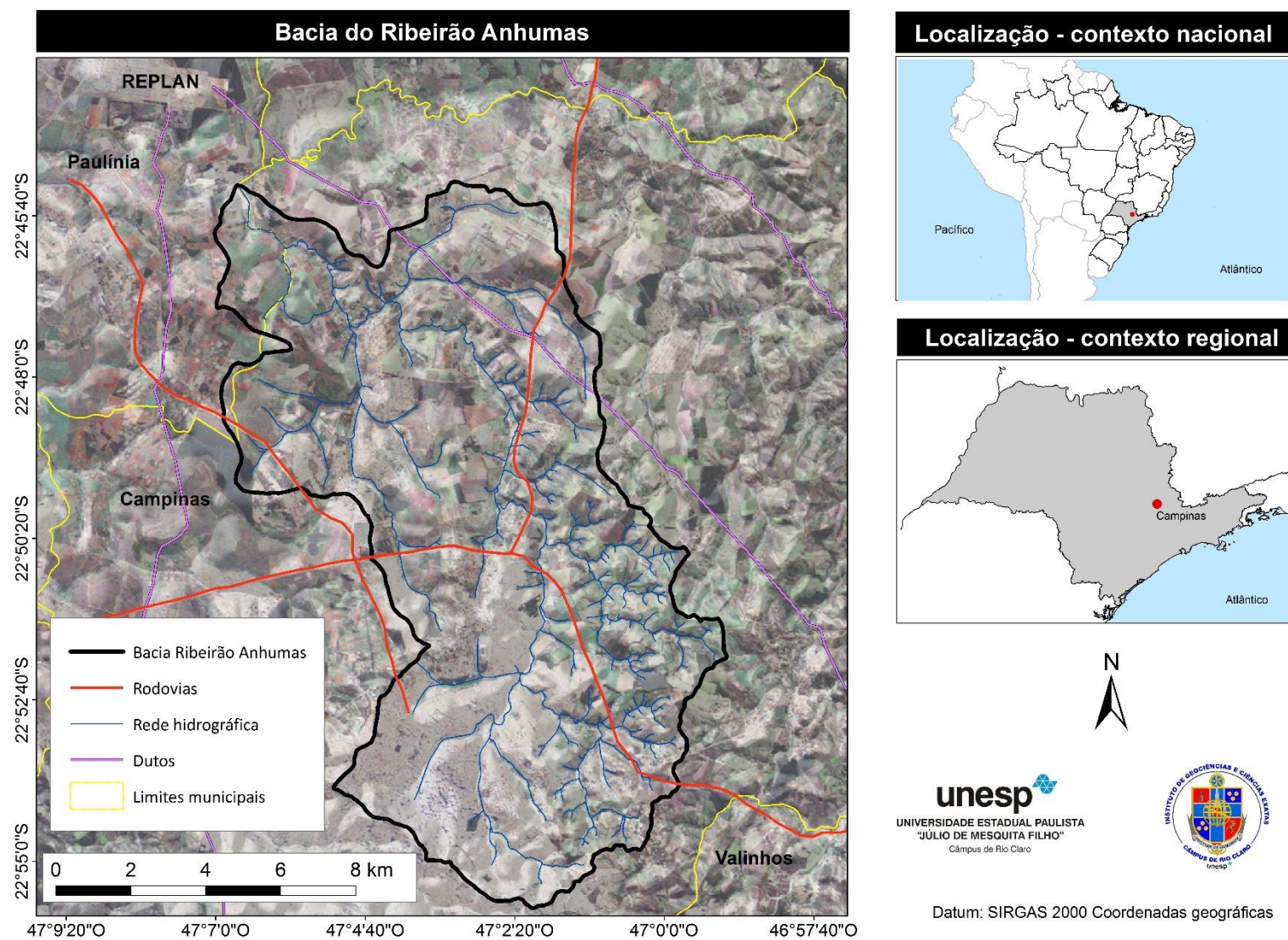
Nesse exemplo a alternativa de maior impacto, assim como no caso da aplicação do método CP, seria a bacia A3 (score = 2,69), contudo há uma diferença no ranqueamento das outras duas. Pelo método CGT a segunda alternativa com maior impacto seria a A1 enquanto para o método CP seria a A2.

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

O Ribeirão das Anhumas é afluente da margem esquerda do Rio Atibaia, localizado na região norte-central do município de Campinas e uma parte no município de Paulínia, na porção leste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas geográficas de 22°45'40" de latitude Sul e 47°0'0" de longitude Oeste (Figura 3), cortada pelas Rodovias Dom Pedro I e Zeferino Vaz, numa área que possui 150 km<sup>2</sup> de extensão. Seu território está inserido em uma área de contato entre duas unidades morfoesculturais, Depressão Periférica Paulista e Planalto Atlântico. A jusante da bacia encontra-se a refinaria de petróleo do município de Paulínia (REPLAN), de modo que para escoamento de sua produção são utilizadas as rodovias que cortam a área da bacia do Anhumas, além de haver um trecho de oleoduto no setor norte da bacia.



Figura 3 – Mapa de Localização da área de estudo



Fonte: SMA / IAC Organizado pelo autor.

### 3.1. Litologia

De acordo com o Instituto Geológico (2009), o município de Campinas abrange, basicamente, na porção leste/nordeste, rochas cristalinas pré-cambrianas e, na porção oeste/sudoeste, rochas sedimentares da Bacia do Paraná e rochas intrusivas básicas relacionadas à fragmentação do Gondwana.

As rochas cristalinas que afloram na Bacia do Ribeirão Anhumas são principalmente gnaisses mesoproterozoicas do Complexo Itapira e rochas granitoides neoproterozoicas da Suíte Granítica Jaguariúna, além de rochas miloníticas um pouco mais novas da Zona de Cisalhamento Campinas (Figura 4). A fisiografia dessas áreas é marcada por solos mais rasos, relevos mais declivosos, com litologias muito fraturadas, por estarem inseridas na zona de cisalhamento de Campinas ou em áreas adjacentes (YOSHINAGA et. al, 1995). No caso destes litologias, a permeabilidade é controlada pelas fraturas, que se constituem em acesso para a rápida contaminação das águas subterrâneas.

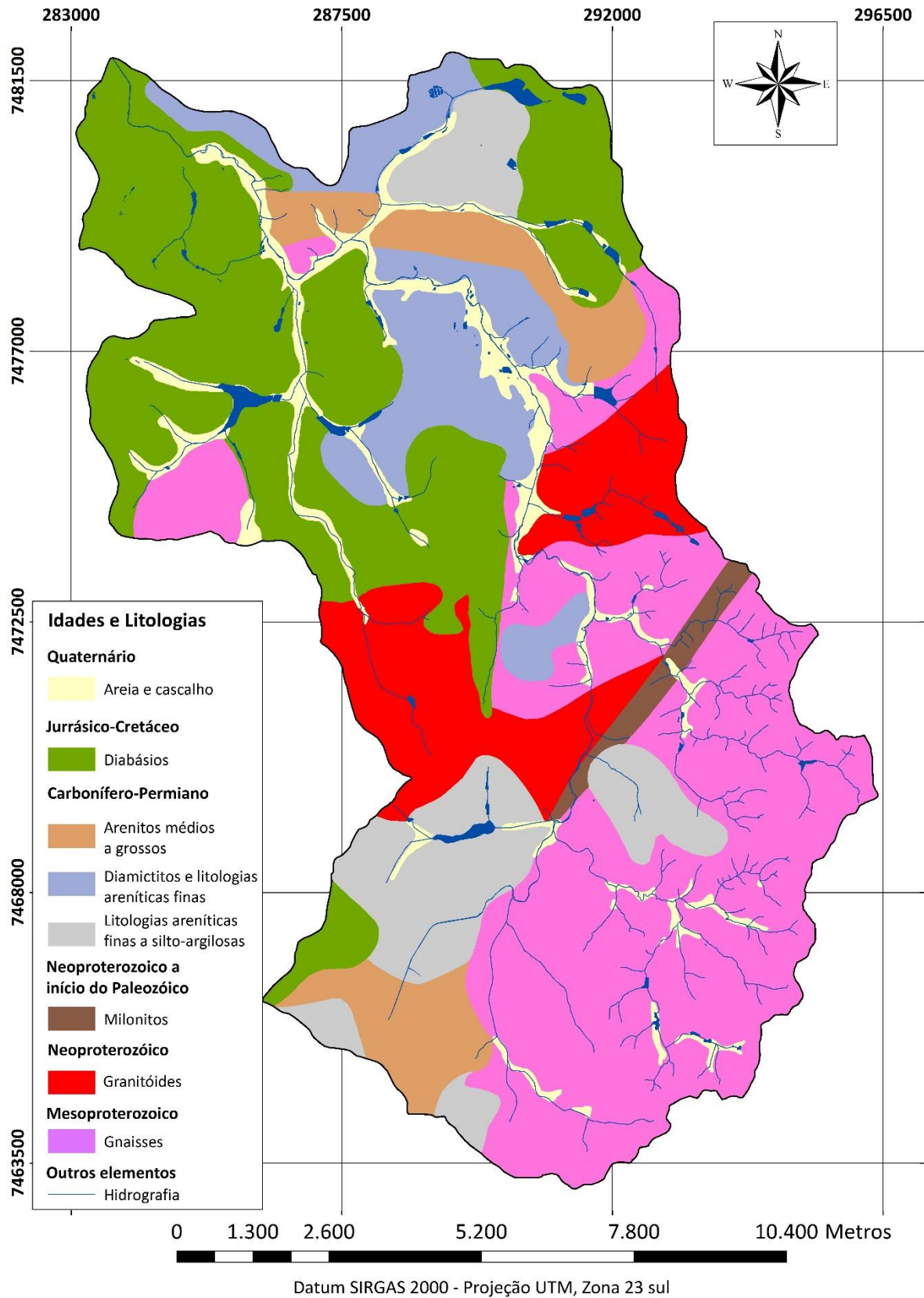
Já no domínio da bacia sedimentar estão presentes as litologias permo-carboníferas do Subgrupo Itararé, principalmente arenitos finos a grossos, ritmitos turbidíticos predominantemente areníticos finos ou ritmitos com maior proporção de pelitos, diamictitos e lamitos. Aqui a sensibilidade é dada sobretudo pela permeabilidade intergranular das rochas sedimentares. A contaminação, no caso de um acidente, dá pelo processo de infiltração, onde a velocidade de percolação pode ser inferior àquela que ocorre nos meios muito fraturados .

As rochas intrusivas básicas na região de Campinas são diabásios juro-cretáceos que ocorrem como sills relacionados aos basaltos da Formação Serra Geral. Os diabásios afloram nos topos de colinas, com a coloração variando entre cinza escura a preta, com granulação fina ou muito fina e estrutura maciça.

Ressalta-se ainda a ocorrência de aluviões quaternários ao longo das planícies e terraços fluviais, sendo sedimentos compostos por arenitos, argilitos e cascalhos (IG, 2009).

Esse arcabouço geológico é determinante na configuração das formas do relevo e das ocorrências minerais, exercendo influência direta sobre o padrão de drenagem e a capacidade hidrogeológica da bacia.

Figura 4 – Litologias da Bacia do Ribeirão das Anhumas



Fonte: Modificado de IG, 2009.

### 3.2. Solos

O clima, a geologia, o relevo, a cobertura vegetal e o regime hídrico influenciam nas características físicas, químicas e biológicas do solo. Sendo assim, os municípios de Campinas e Paulínia e a Bacia do Ribeirão Anhumas tem uma formação pedológica diversificada. “Os principais tipos de solos incidentes no município são: ARGISSOLOS Vermelho-Amarelos, LATOSSOLOS Vermelhos, LATOSSOLOS Vermelho-Amarelos e CAMBISSOLOS Háplicos, que juntos ocupam mais de 85% da área do município” (CAMPINAS, 2013).

Tratando-se especificamente da área de estudo, de acordo com o Atlas Socioambiental do Anhumas (TORRES; ADAMI e COELHO, 2014), a Bacia concentra principalmente LATOSSOLOS e ARGISSOLOS, com pequenas porções de NITOSSOLOS, CAMBISSOLOS e GLEISSOLOS (Figura 5).

A classe dos LATOSSOLOS é composta por solos profundos, muito intemperizados e de boa drenagem, apresentam homogeneidade de característica ao longo do perfil com a fração argila sendo predominantemente caulinítica ou ainda caulinítica-óxidica e ausência quase total de minerais primários (OLIVEIRA, 2007). O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SBCS) define esse tipo de solos como aqueles constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte (EMBRAPA, 2013). Distribuem-se na paisagem em áreas de baixa declividade, em geral, topos de morros e colinas.

Os ARGISSOLOS por definição são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E. O aumento do teor de argila do horizonte A para o B é característica marcante nessa classe de solos. No que tange a profundidade, variam de pouco profundo a profundo. Na paisagem estão associados a áreas com maior declividade em relação aos LATOSSOLOS em relevos mais acidentados (OLIVEIRA, 2007; EMBRAPA, 2013).

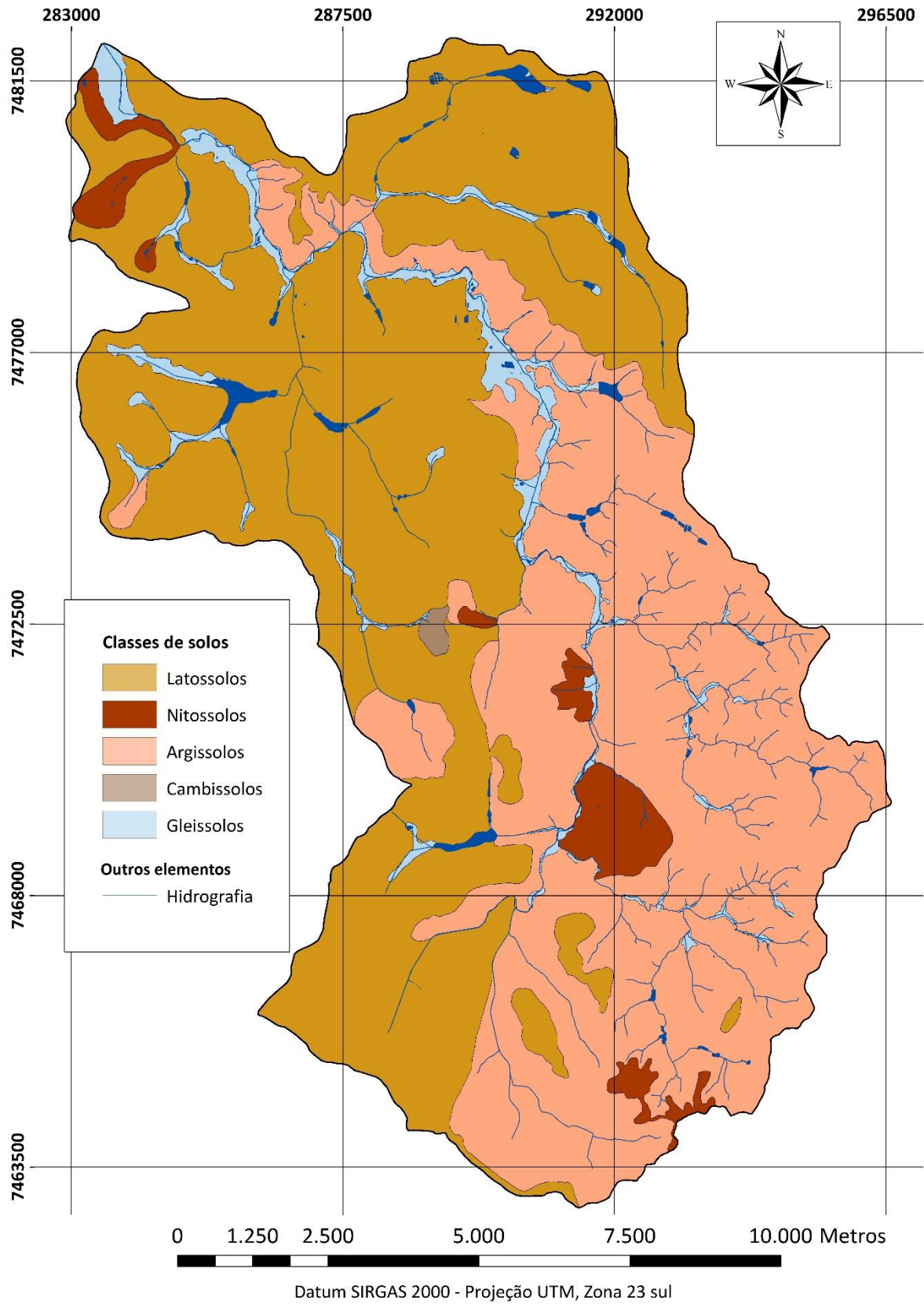
NITOSSOLOS caracterizam-se pela presença de um horizonte B nítico, desenvolvimento estrutural do tipo prismas ou blocos e apresentando cerosidade. Solos dessa classe possuem textura argilosa a muito argilosa com inexpressiva diferenciação textural. Distribuem-se espacialmente em áreas de diferentes tipos climáticos em relevos variando entre suave ondulado a forte ondulado (OLIVEIRA, 2007; EMBRAPA, 2013).

A classe dos CAMBISSOLOS tem como característica diagnóstica a ocorrência de um horizonte B incipiente, logo após um horizonte A. Apresentam grande variação no que tange a

profundidade variando de solos rasos até profundos. Os solos dessa classe possuem também intensa variação em relação as outras características, por exemplo, sua drenagem que pode variar de acentuada a imperfeita. São solos muitas vezes pedregosos, cascalhentos ou mesmo rochosos (OLIVEIRA, 2007; EMBRAPA, 2013).

Os GLEISSOLOS são solos hidromórficos característicos de áreas alagadas ou sujeitas a esse processo, como as planícies de inundação, por exemplo. Os solos dessa classe possuem um horizonte glei surgindo a partir dos 50 cm de profundidade. Ocorrem em áreas húmidas e de baixa declividade (OLIVEIRA, 2007; EMBRAPA, 2013).

Figura 5 – Solos da Bacia do Ribeirão das Anhumas



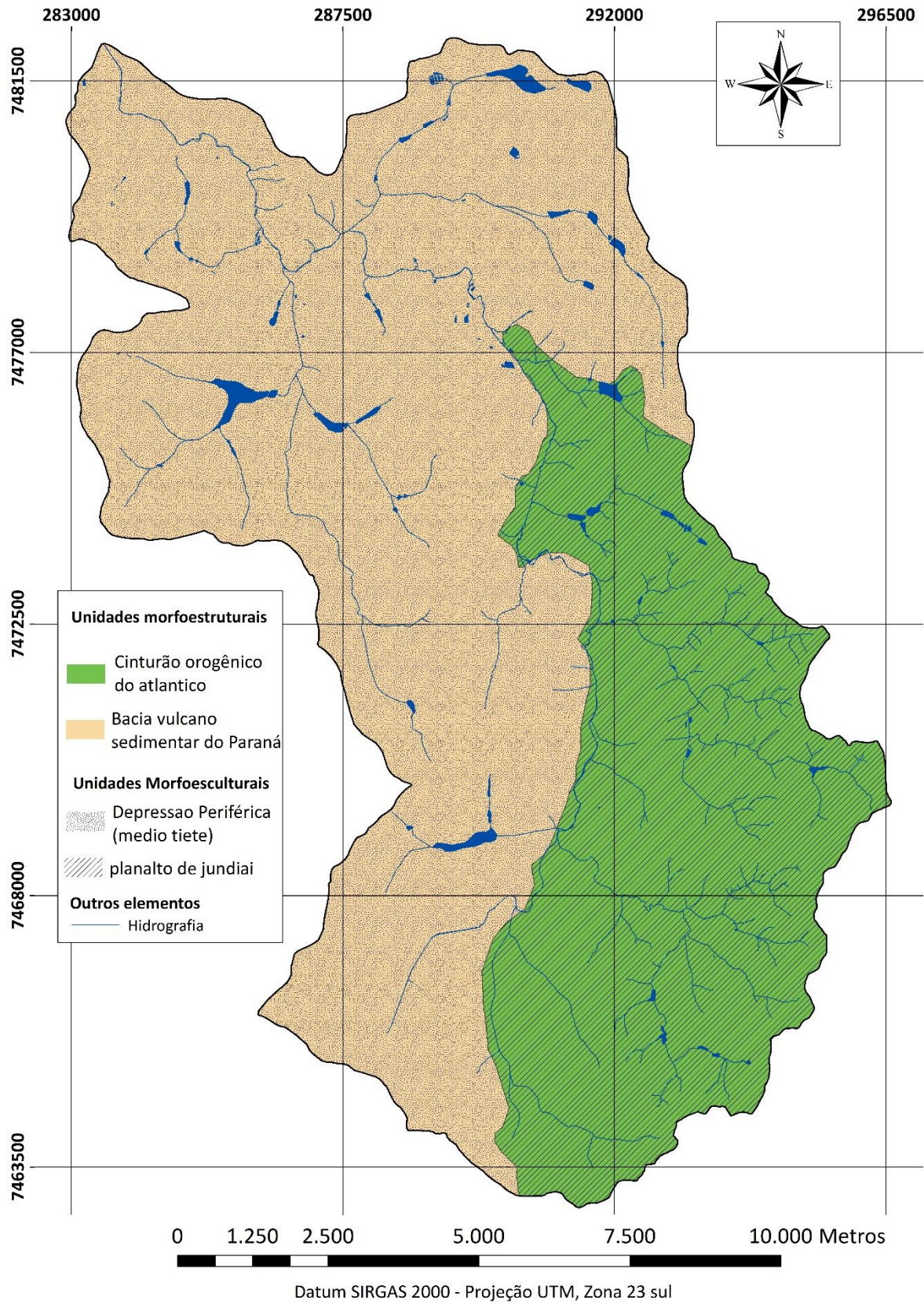
Fonte: COELHO *et al.* 2014. Organizado pelo autor

### 3.3. Geomorfologia

Campinas, assim como a Bacia do Ribeirão Anhumas, caracteriza-se por estar em uma região de contato entre duas províncias geomorfológicas: o Planalto Atlântico e a Depressão Periférica (Figura 6). O Planalto Atlântico corresponde aos relevos de morros e serras, com altitude máxima de 990 metros, localizados na porção leste do município. Na porção oeste, a Depressão Periférica, formada por relevos de colinas e morrotes, com altitude variando entre 600 e 700 metros, abrigam a maior parte da malha urbana de Campinas (IG, 2009).

De acordo com ROSS e MOROZ (1996), o Planalto Atlântico abriga dois tipos de terrenos: os amorreados de inclinação moderada a forte e os amorreados ondulados a inclinados. Ambos apresentam alta susceptibilidade à erosão devido ao tipo de solo e à declividade. Os terrenos colinosos ondulados a inclinados, onde ocorrem os gnaisses do Complexo Itapira, marcam a transição entre o Planalto Atlântico e a Depressão Periférica, com declividades as maiores declividades na área de estudo (Figura 7), sendo passíveis de ocupação exigindo cuidados específicos e rigorosos de implantação e conservação (CAMPINAS, 2007). Quanto à drenagem desses terrenos, é importante salientar que as planícies fluviais são pouco desenvolvidas no Planalto Atlântico. Já na Depressão Periférica, abrangem as planícies de inundação ou várzeas de inundação e os baixos terraços.

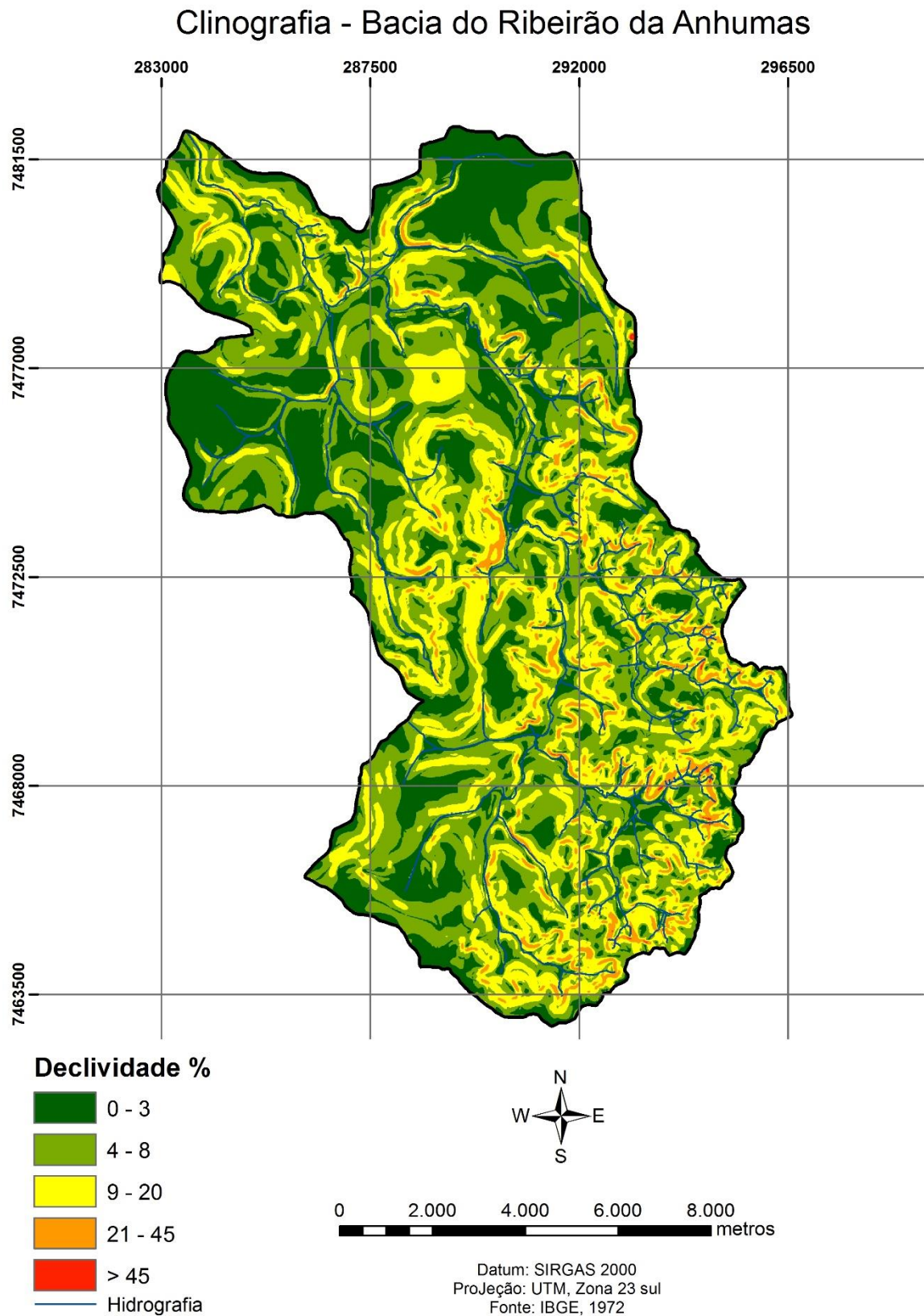
Figura 6 – Compartimentos do relevo na bacia do Ribeirão Anhumas



Elaborado pelo autor



Figura 7 – Classes de declividade Bacia do Ribeirão das Anhumas

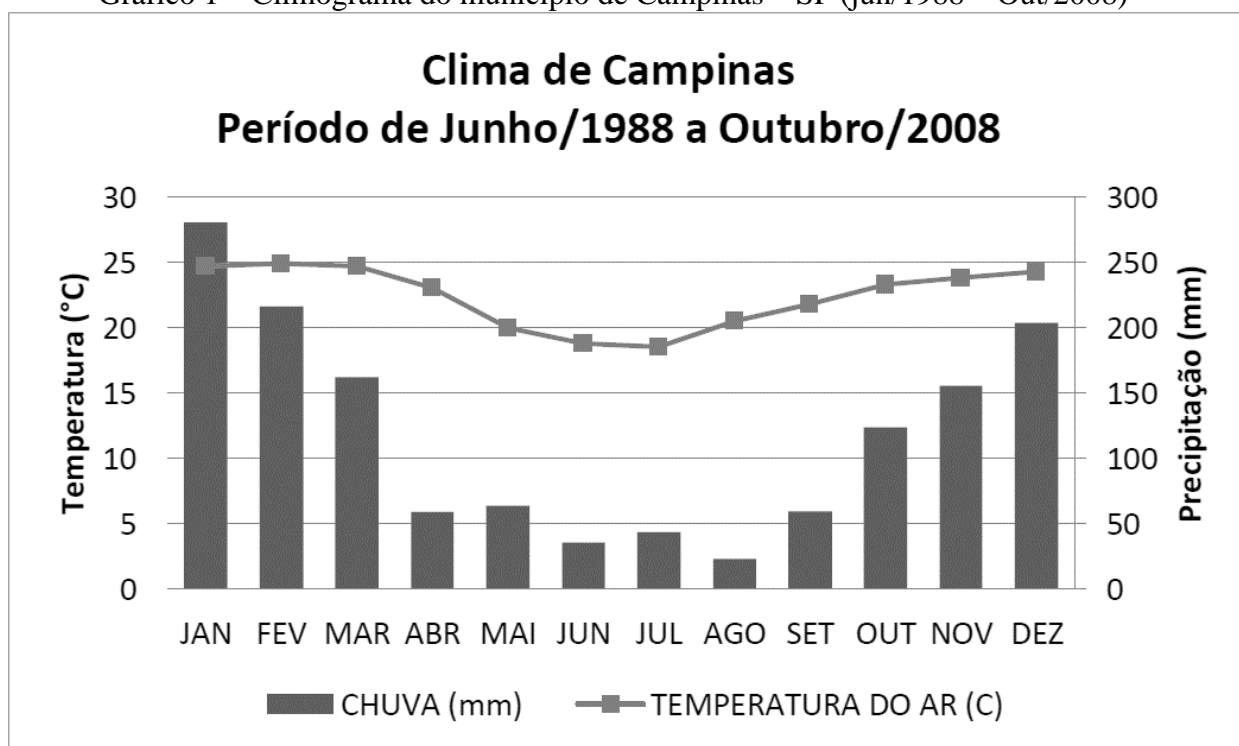


Fonte: IBGE, 1972. Organizado pelo autor

### 3.4. Clima

A caracterização climática se dá partir do município de Campinas, diante da ausência de informações detalhadas na escala da bacia hidrográfica. De acordo com os dados do CEPAGRI (2015), Campinas possui um clima tropical de altitude, com verão quente e úmido e inverno ameno e quase seco (Gráfico 1). A temperatura média é da ordem de 22°C. A umidade relativa do ar – média anual é de 73%. Predominam os ventos na direção sudeste, com velocidade média de 2,0 m/s.

Gráfico 1 – Climograma do município de Campinas – SP (jun/1988 – Out/2008)



Fonte: CEPAGRI (2015).

A precipitação média anual é de 1.424,5 mm, o que representa 1,42 m<sup>3</sup> de chuvas por ano para cada metro quadrado da cidade (CEPAGRI, 2015). Esse valor, se comparado com o de outras regiões do Brasil e do mundo, pode indicar uma elevada disponibilidade hídrica ao longo do ano, o que não representa a realidade, já que o clima da cidade apresenta um inverno normalmente seco, com poucas chuvas e deficiência hídrica acentuada. Devido à variação temporal das chuvas sobre a região, Campinas sofre com chuvas intensas nos meses de verão e com um período relativamente longo de estiagem, que vai de maio a setembro, a despeito da elevada precipitação registrada na cidade (CAMPINAS, 2006).

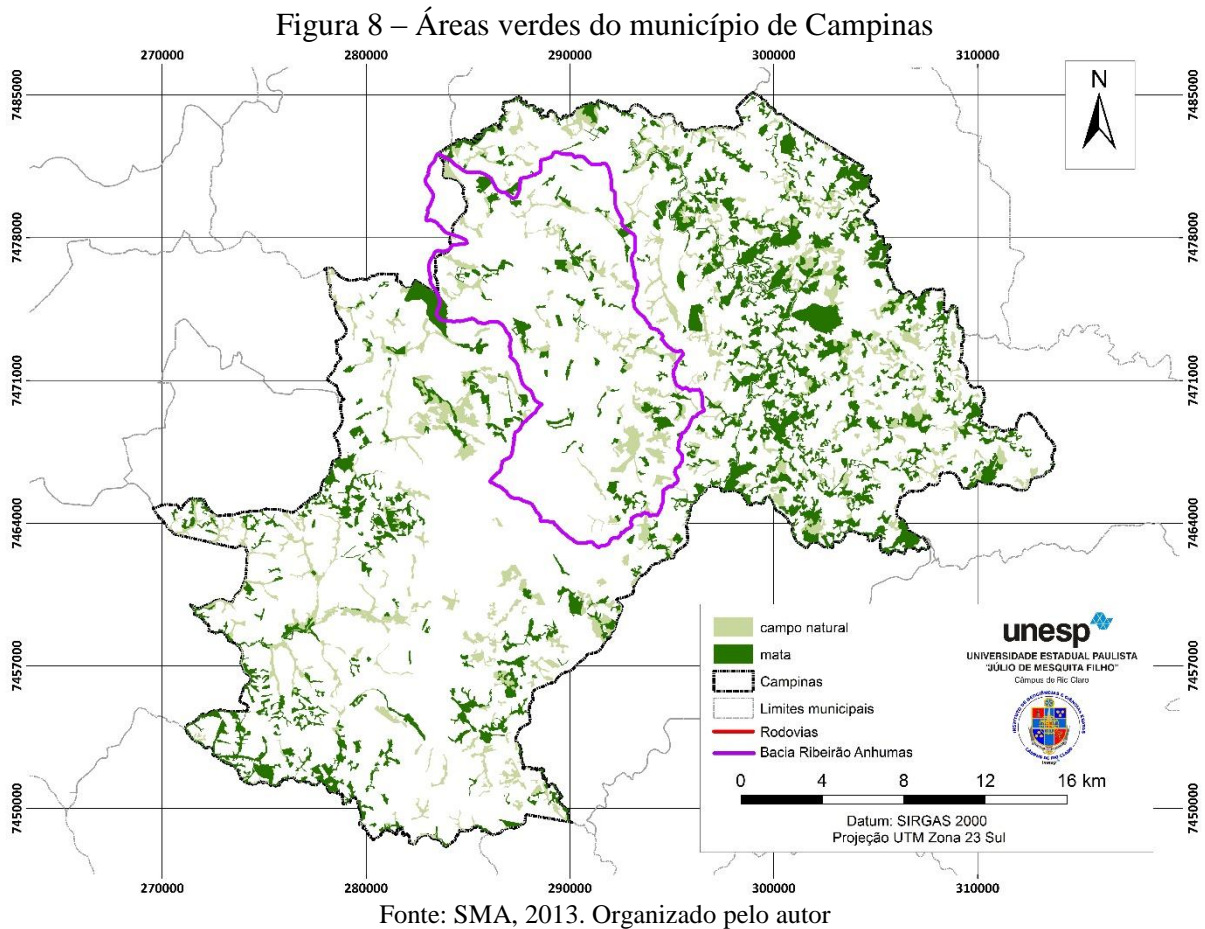
### 3.5. Vegetação

Nos dados disponíveis referentes à cobertura vegetal original do município de Campinas, consta que basicamente 80% do território eram cobertos por uma floresta tropical de médio a grande porte, pertencentes ao bioma Mata Atlântica. Nos demais 20% do território existiam os cerrados e campos cerrados, formando uma paisagem campestre de porte baixo, com indivíduos esparsos e geralmente apresentando troncos tortuosos (CAMPINAS, 2007). Sendo assim, Campinas está dividida em dois biomas principais: Mata Atlântica e Cerrado, no qual a sua formação está relacionada aos processos geológicos, geomorfológicos e pedológicos, como descrito a seguir:

Dado que as condições climáticas do município são constantes, as características do meio físico podem ser consideradas determinantes da diferenciação fisionômica verificada originalmente. Dessa forma, a qualidade do solo gerou as formações vegetais de terra firme: quando em solos arenosos derivados de arenitos e pobres em nutrientes, ou com problemas de acidez excessiva ou toxidez, ocorriam as formações mais próximas do cerrado, e quando em solos razoavelmente férteis com origem de rochas cristalinas, ocorria a mata semidecídua. Nas áreas mais úmidas, decorrentes da proximidade dos recursos hídricos superficiais ou subterrâneos (lençol freático), ocorriam as formações ciliares ou brejosas, dependendo do grau de hidromorfismo verificado na área (CAMPINAS, 2007, p. 12).

Atualmente, a cobertura vegetal original remanescente apresenta-se bastante fragmentada e representa apenas 2,5% da área total do município, em grande parte constituída por fragmentos isolados de Florestas Estacionais Semidecíduais e poucos trechos de cerrados, matas de brejo e vegetação rupestre (CAMPINAS, 2006).

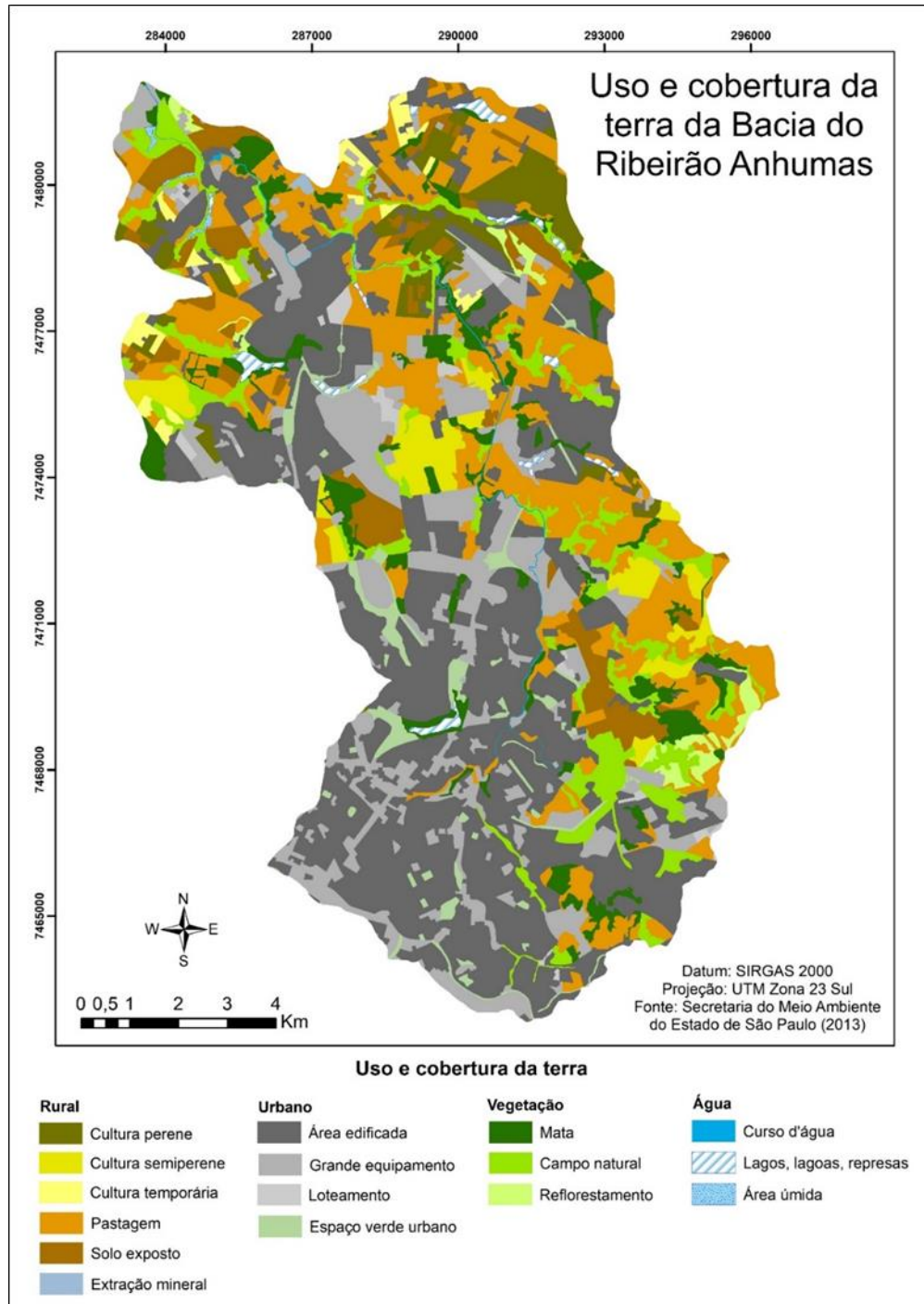
Observando a Figura 8 a seguir, nota-se que a maior parte desses fragmentos florestais se situam na área rural, em especial na porção nordeste (região da APA Municipal), “os quais apresentam também melhor estado de conservação, em decorrência da manutenção das características rurais dessa região, aliado ao relevo mais acentuado, garantindo baixa influência de fatores indutores à urbanização e perturbação” (CAMPINAS, 2006). Já na região central do município e na porção da Bacia do Ribeirão Anhumas, que se encontra intensamente urbanizada, a cobertura vegetal remanescente é mais pobre, e os poucos fragmentos encontram-se ilhados na malha urbana, representados por bosques naturais e parques municipais (CAMPINAS, 2006).



### 3.6. Uso e cobertura da terra

A bacia do ribeirão das Anhumas concentra grande parte da mancha urbana do município de Campinas tanto de seu núcleo histórico, quanto de áreas que passaram por uma urbanização diferenciada nos últimos trinta anos, em virtude da consolidação urbana e tecnológica no cenário nacional, relacionando-se ao novo sistema econômico e produtivo globalizado (TORRES; ADAMI e COELHO, 2014). A dinâmica dos usos das terras na bacia do Anhumas é um reflexo desse cenário mais amplo, pois as formas de urbanização tornam-se mais seletivas e segregadas, a partir da década de 1960, resultando no ano de 2013, no atual cenário do uso e cobertura da terra no território da bacia (Figura 9).

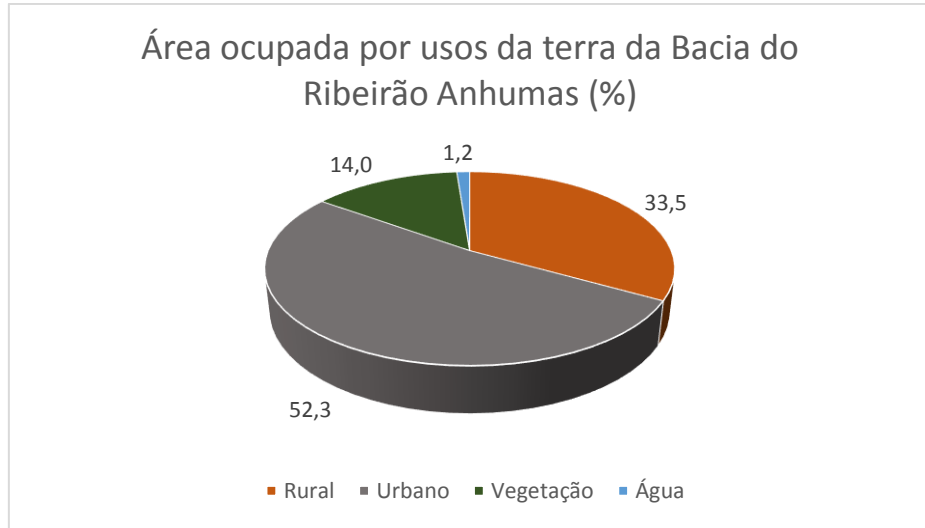
Figura 9 – Uso e cobertura da terra na Bacia do Ribeirão das Anhumas



Fonte: SMA, 2013. Organizado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 9 e no Gráfico 2, os usos predominantemente rurais caminham para uma matriz urbana, que se expande nas áreas de solo exposto, em detrimento das áreas de vegetação e de rios e lagos.

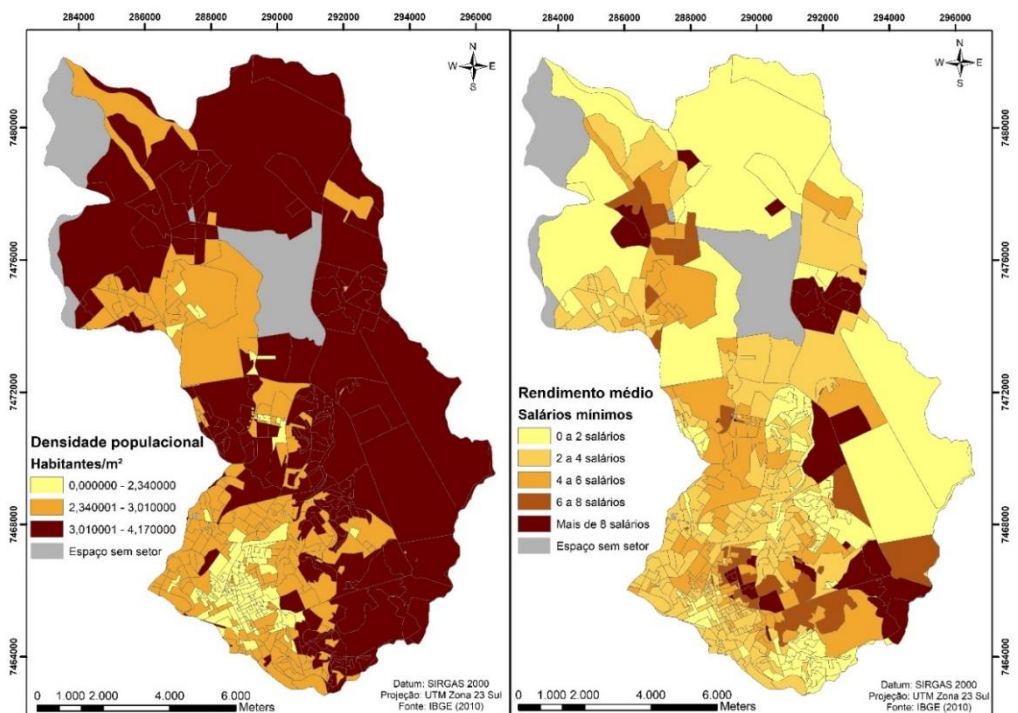
Gráfico 2 – Percentual das classes de uso da terra na Bacia do Ribeirão das Anhumas



Fonte: SMA, 2013. Organizado pelo autor

De acordo com o Censo IBGE de 2010, a população da bacia do Anhumas é de aproximadamente 310.000 habitantes, com densidade de 2 a 4 habitantes por m<sup>2</sup>. Observa-se na Figura 10, que na parte sudeste da bacia, apesar de altamente urbanizada, possui baixa densidade populacional, enquanto as áreas de uso rural, a densidade populacional é maior.

Figura 10 – Densidade populacional e rendimento médio da população na Bacia do Ribeirão das Anhumas



Fonte: IBGE, 2011. Organizado pelo autor

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta primeira seção do capítulo são apresentados os aspectos metodológicos da pesquisa, os dados de diversas origens que foram utilizados para elaboração da dissertação, bem como o ferramental utilizado para sua correta manipulação nesse contexto.

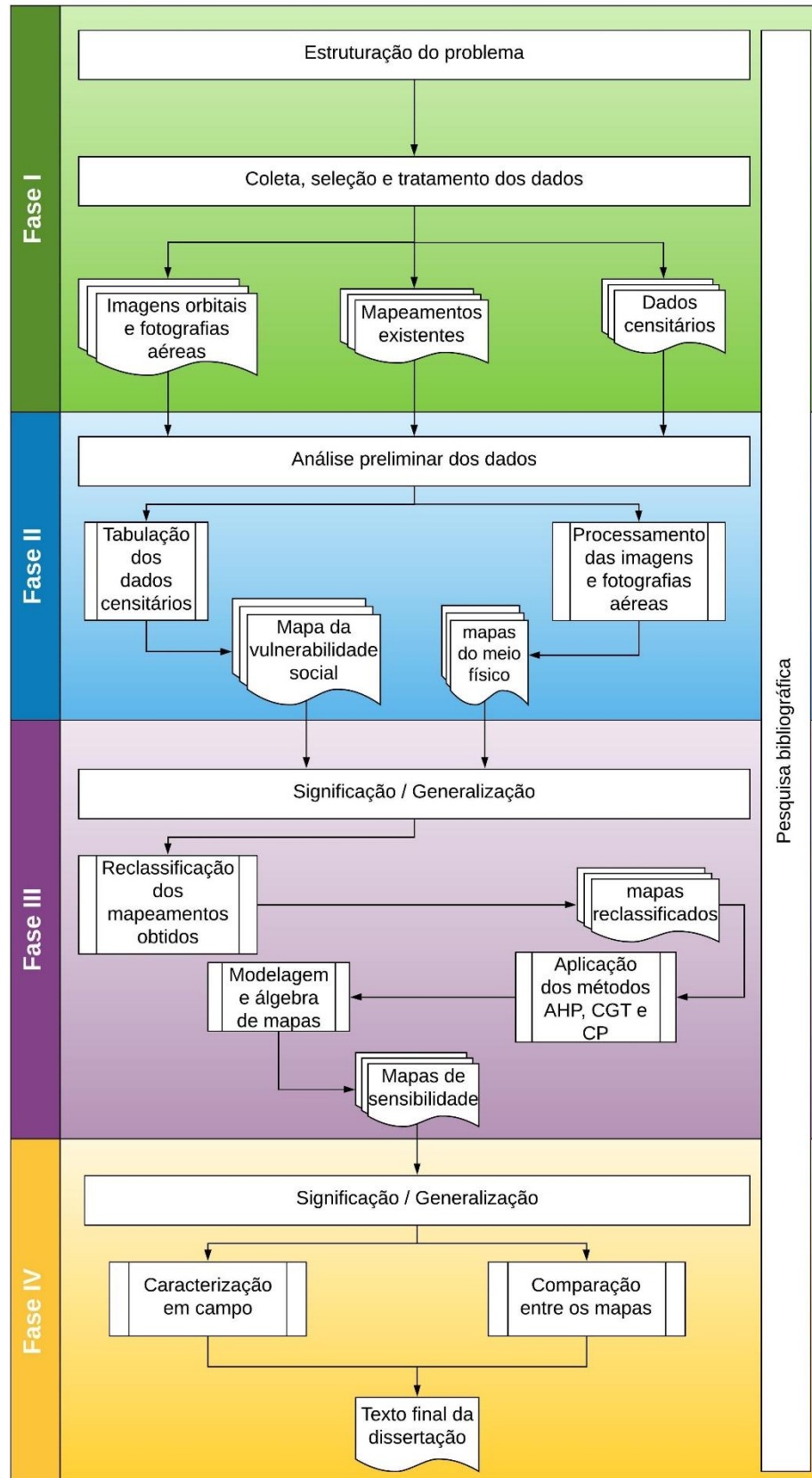
### 4.1. Métodos

A pesquisa tem como método a abordagem hipotético-dedutiva amparada pela visão sistêmica do ambiente. Adaptando a metodologia de pesquisa proposta por Libault (1971), a pesquisa foi dividida quatro fases:

- Fase I: Estruturação do problema; coleta e tratamento de imagens orbitais e fotografias aéreas; coleta e tratamento de dados censitários, pesquisa e digitalização de outros mapeamentos existentes realizados na área de estudo.
- Fase II: corresponde a uma primeira análise, compreende: i) Interpretação das imagens e fotografias aéreas com vistas ao entendimento do comportamento da paisagem na área de estudo e a geração dos mapas do meio físico; ii) mapeamento da vulnerabilidade social da população na bacia através dos dados censitários.
- Fase III: Essa é a etapa em que se busca trazer significação para os dados trabalhados nos níveis anteriores. Nesse ponto foram realizadas: i) reclassificação dos dados mapeados na etapa anterior de acordo com critérios que reflitam a sensibilidade do ambiente ao óleo; ii) definição dos pesos para cada variável através da utilização dos métodos de análise multicritério AHP, CGT e CP iii) aplicação de modelagem e geoprocessamento algébrico sobre os mapas reclassificados e com peso obtido pelos métodos multicriteriais aplicando os métodos de agregação correspondente a cada um deles.
- Fase IV: Esse nível corresponde a modelização do produto de pesquisa. Realização da caracterização dos pontos de campo; comparação entre as cartas geradas por cada modelo; redação do texto final da dissertação.

A Figura 11 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas.

Figura 11 – Fluxograma das etapas metodológicas



Fonte: organizado pelo autor



## 4.2. Estruturação do problema

A estruturação do problema é etapa fundamental na aplicação de técnicas multicritério para o apoio à tomada de decisão (KEENEY, 1992; GREGORY *et al.*, 2005), diz-se que é fundamental pois dela se depreendem as etapas seguintes de modo que sua omissão pode levar a propagação de inconsistências as demais, reduzindo a capacidade preditiva do modelo.

No desenvolvimento dessa pesquisa, em conformidade com uma visão sistêmica, a estruturação do problema foi definida através de diferentes níveis hierárquicos, detalhados em seguida.

### *Nível I*

O primeiro nível consiste na definição do objetivo/problema posto em análise. Nesse caso, o objetivo é estabelecer o grau de sensibilidade ambiental ao óleo em diferentes localidades dentro da bacia do Ribeirão das Anhumas. A pergunta a ser respondida nesse nível é: qual o objetivo a ser alcançado com a análise multicriterial?

### *Nível II*

No segundo nível são estabelecidos os critérios e como ele serão avaliados, aqui a pergunta a ser respondida é: o que será avaliado a fim de alcançar o objetivo proposto? Essa etapa foi subdividida em três:

- IIa – em que foram estabelecidos os critérios a serem avaliados, sendo eles: impactos sobre recursos hídricos; impactos sobre ambientes de terra firme e; impactos socioeconômicos.
- IIb – esse nível apresenta detalhamento do anterior, portanto, para o critério “recursos hídricos” (nível IIa) foram definidos os subcritérios “águas superficiais” e “águas subsuperficiais e subterrâneas”; para o critério “impacto sobre ambientes de terra firme” (IIa) definiu-se os subcritérios “solos e morfologia do terreno” e “fauna e flora”; para o critério “impactos socioeconômicos” os subcritérios foram “produção agrícola” e “população atingida”.
- IIc – aqui foram definidos os subcritérios daqueles definidos no nível IIb, sendo: “corpos d’água”, “substrato”, “solos”, “morfologia do terreno”, “biodiversidade”, “uso

e cobertura da terra” e “vulnerabilidade social”. Cabe ressaltar que nesse nível a ligação entre os critérios e do tipo um para muitos, isto é, diferentemente do que ocorrera nas etapas anteriores, um mesmo subcritério do nível IIc pode estar vinculado com mais de um daqueles definidos no nível IIb, como é o caso do subcritério “solos” que vincula-se tanto com a “águas subsuperficiais e subterrâneas” como com o “solos e morfologia do terreno”.

### *Nível III*

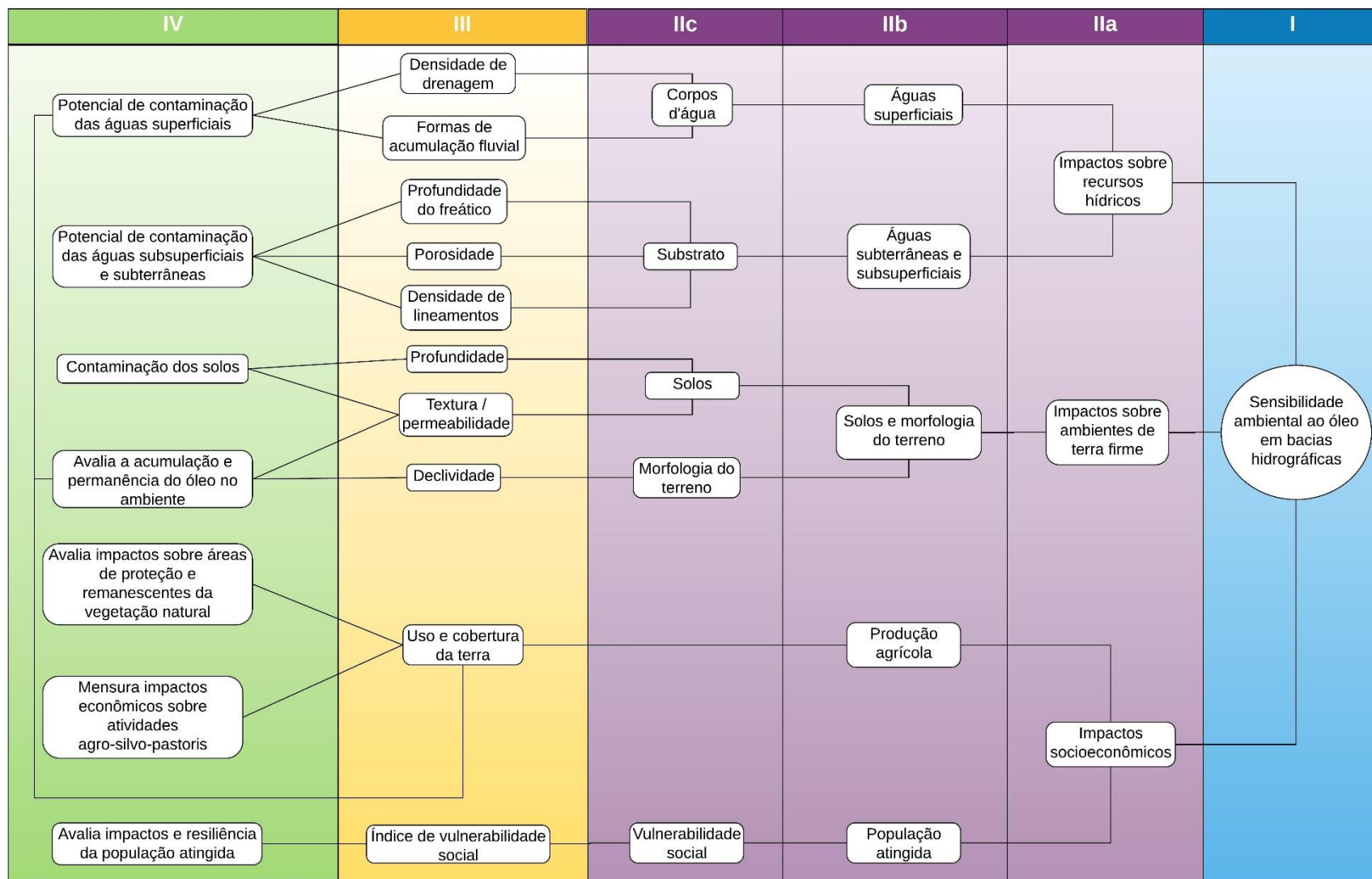
No nível III são definidos os descritores de cada critério. Os descritores são importantes, pois, demonstram como cada alternativa poderá ser avaliada em cada critério definido nas etapas anteriores. A pergunta fundante desse nível é como os critérios estabelecidos podem ser avaliados?

### *Nível IV*

O último nível é onde se descreve a razão/justificativa da escolha daquele critério e seus respectivos descritores. Responde o porquê da escolha de cada um dos critérios.

A Figura 12 apresenta graficamente o relacionamento entre esses níveis hierárquicos na descrição do problema.

Figura 12 – Mapa cognitivo da estruturação do problema



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.3. Coleta e tratamento dos dados

Dado que a avaliação da sensibilidade ao óleo em uma bacia hidrográfica, como aqui considerada, deve incorporar à análise elementos do meio físico, biótico e socioeconômico, a origem dos dados utilizados é bem diversa. Deve-se ter, contudo, a clareza de que os dados obtidos precisam atender a demanda originada na delimitação dos descritores de cada critério avaliado.

#### 4.3.1. Tabulação dos dados censitários e o índice de vulnerabilidade social

De modo a avaliar os impactos e a resiliência da população afetada em caso de um derrame de óleo, foi utilizado o índice de vulnerabilidade social, conforme proposto por Marques, Silva e Camargo (2017) e Goerl, Kobiyama e Pellerin (2012). Tal índice é formulado pela tabulação de oito parâmetros advindos do Censo Demográfico de 2010 – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), posteriormente agregados em seis indicadores conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Indicadores utilizados no índice de vulnerabilidade social

Dados Demográficos	Indicadores de Vulnerabilidade	Sigla
Densidade Demográfica	Densidade Demográfica	$D_d$
Número de moradores no setor	Número de moradores no setor censitário	$N_m$
Média de moradores por domicílio	Média de moradores por domicílio	$M_m$
Porcentagem de população $\geq 65$ anos	Soma da proporção da população $\geq 65$ anos e $< 12$ anos	$T_xDEP$
Porcentagem de população $< 12$ anos		
Porcentagem de pessoas analfabetas acima de 12 anos	Proporção de pessoas analfabetas acima de 12 anos	$T_xA$
Porcentagem de responsáveis sem rendimento	Soma da proporção dos responsáveis sem rendimento e com rendimento de até 1 salário mínimo*	$T_xRENDA_{carente}$
Porcentagem de responsáveis com rendimento até 1 salário mínimo		

\* Salário mínimo em 2010, aproximadamente, correspondia a US\$ 342,00.

Fonte: Adaptado de Marques; Silva e Camargo (2018).

Para garantir a isonomia dos dados, as variáveis componentes do índice foram normalizadas em uma escala que varia de 0 a 1, mínimo e máximo respectivamente (FRITZCHE et al., 2014). Por fim a equação para elaboração do índice de vulnerabilidade

(Equação 1) social, estabelece que a somatória dos indicadores seja ponderada dividindo-a pelo valor do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM). Os valores do IDHM para dos municípios de Campinas e Paulínia são de respectivamente 0,805 e 0,795, portanto caracterizados nas faixas de muito alto e alto na classificação desse indicador (IBGE, 2011).

$$IV_{social} = \frac{D_d + N_m + M_m + TxDEP + TxA + TxRENDAcarente}{IDHM} \quad (1)$$

#### 4.3.2. Mapas do meio físico

Os dados selecionados para avaliação do meio físico e biótico nessa pesquisa podem ser observados no Quadro 6, juntamente sua classificação nos critérios estabelecidos no nível II de estruturação do problema.

Quadro 6 – Mapa de variáveis do meio físico

Mapa de variável utilizado	Dado de origem	Classes de nível II na estruturação do problema		
		IIC	IIB	IIA
Densidade de drenagem	Shapefile ANA	Corpos d'água	Águas superficiais	Impactos sobre recursos hídricos
Formas de acumulação fluvial	Fotografias aéreas			
Profundidade do freático	Cartas topográficas / MDE	Substrato	Águas subterrâneas e subsuperficiais	
Litologia	Mapa geológico			
Densidade de lineamentos	Imagens Landsat			
Profundidade dos solos	Mapa de solos	Solos	Solos e Morfologia do terreno	Impactos sobre ambientes de terra firme
Textura / permeabilidade dos solos	Mapa de solos			
Declividade	Cartas topográficas / MDE	Morfologia do terreno	Fauna e Flora / Produção agrícola	Impactos socioeconômicos
Uso e cobertura da Terra	Shapefile SMA	-		
Índice de Vulnerabilidade social	Censo Demográfico IBGE	Vulnerabilidade social	População atingida	

Organizado pelo autor

Nos itens abaixo, os mapas das variáveis serão apresentados destacando sua procedência e os processamentos realizados para sua entrada nos modelos finais de análise. A classificação desses mapas em termos de sua sensibilidade ao óleo será discutida, contudo ao final do capítulo é apresentado um quadro geral sintetizando essas informações.

#### 4.3.2.1. Densidade de drenagem

Esse mapa corresponde a relação entre o comprimento total dos cursos d'água dividido por uma unidade de área, que pode ser uma bacia ou sub-bacia hidrográfica, ou ainda uma unidade arbitrária como células quadráticas (CHRISTOFOLETTI, 1979; HORTON, 1945; CARLSTON; LANBGBEIN, 1960; McCOY, 1971; MARK, 1974). Consoante com o objetivo de tornar a metodologia aqui apresentada replicável em outros contextos espaciais, optou-se pela utilização do método das células quadráticas para cálculo da densidade de drenagem. Desse modo, o mapeamento apresenta a densidade de drenagem em unidades de um quilometro quadrado que recobrem toda a área da bacia.

O *shapefile* da rede hidrográfica da bacia do Ribeirão das Anhumas, escala 1:50.000 foi obtido a partir do site da Agência Nacional das Águas (ANA, 2018). A partir desse dado inicial a densidade foi calculada através da ferramenta “Densidade de linhas” no software ArcGIS (ESRI, 2016). O mapa resultante foi classificado em cinco classes tendo como referência a divisão apresentada por Villela e Mattos (1975), quais sejam:

- $<0,5 \text{ km/km}^2$  - pobre
- $0,5 \text{ a } 1,5 \text{ km/km}^2$  - regular
- $1,5 \text{ a } 2,5 \text{ km/km}^2$ - boa
- $2,5 \text{ a } 3,5 \text{ km/km}^2$  - muito boa
- $> 3,5 - \text{ km/km}^2$  - áreas excepcionalmente bem drenadas

#### 4.3.2.2. Litologia

O mapa contendo as litologias presentes na bacia do Ribeirão das Anhumas foi elaborado a partir da vetorização do mapa geológico do município de Campinas em escala 1:50.000 (IG, 2009). Como o referido mapa encontra-se disponível em formato PDF, foi necessária sua conversão para um formato *raster* e em seguida seu georreferenciamento antes da execução da vetorização dos polígonos das litologias.

Esse dado está inserido no trabalho no sentido de se avaliar o potencial de contaminação das águas subsuperficiais e subterrâneas. Nesse sentido, as litologias reconhecidas são interpretadas com base em características como sua textura, porosidade e granulometria, reconhecendo-se, por exemplo que rochas sedimentares de granulação

grosseira como os arenitos encontrados na área, apresentam grau de sensibilidade mais elevados que os corpos gnáissicos.

#### 4.3.2.3. Densidade de lineamentos

Os lineamentos estruturais foram obtidos a partir da fotointerpretação de imagens do satélite Landsat-5, utilizando-se o software SPRING (CAMARA *et al.*, 1996). *A posteriori*, foi calculada a densidade de lineamento em células quadráticas de 1 km<sup>2</sup> (processo idêntico ao cálculo da densidade de drenagem) através da ferramenta “Densidade de linhas” no software ArcGIS.

Com a densidade de lineamentos estruturais busca-se avaliar o grau de fraturamento do substrato da bacia, interpretando-o de maneira proporcional ao nível de sensibilidade, isto é, quanto maior a densidade de lineamentos de uma área, mais sensível ao óleo ela será, considerando aí o potencial de contaminação das águas subterrâneas. Com o conhecimento estatístico dos dados foram definidas quatro classes para a densidade de lineamentos, a saber:

- 0 – 1 km/km<sup>2</sup>
- 1 – 2 km/km<sup>2</sup>
- 2 – 3 km/km<sup>2</sup>
- > 3 km/km<sup>2</sup>

#### 4.3.2.4. Profundidade dos solos

A profundidade dos solos foi obtida a partir da vetorização do mapa de solos em escala 1:25.000 da bacia do Ribeirão Anhumas (COELHO *et al.*, 2014). A interpretação da profundidade para cada classe de solo deu-se pelo reconhecimento das questões genéticas e características diagnósticas de cada classe, seguindo as indicações da literatura especializada em nível nacional (COELHO *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2006).

Em termos de sensibilidade ao óleo, a interpretação dada a profundidade dos solos é de que como apresentado por Martins (2012) e Leme (2018), quanto menor a profundidade dos solos (ou perfil de alteração) maior a sensibilidade do ambiente, resultado tanto da menor distância do nível freático como também da dificuldade e dos custos inerentes a aplicação de técnicas de limpeza do óleo. As classes definidas para esse plano de informação foram:

- Raso
- Intermediário
- Profundo

#### 4.3.2.5. Textura / permeabilidade dos solos

De modo análogo ao parâmetro anterior, a textura dos solos foi obtida a partir da vetorização do mapa de solos em escala 1:25.000 da bacia do Ribeirão Anhumas (COELHO et al., 2014). Sua interpretação também foi dada pelo reconhecimento das questões genéticas e características diagnósticas de cada classe, seguindo as indicações da literatura especializada em nível nacional (COELHO et al., 2014; SANTOS et al., 2006).

No caso da textura / permeabilidade dos solos, a sensibilidade é dada pela capacidade de retenção e sua condutividade hidráulica (MARTINS, 2012; LEME, 2018). Adota-se que quanto maior a granulometria do perfil maior será sua permeabilidade e daí maior sua sensibilidade, de outro lado, quanto menor a granulometria menor a permeabilidade, resultando em um potencial menor de contaminação, reduzindo a sensibilidade do meio (MARTINS, 2012). Foram adotadas 3 classes para essa variável, de acordo com a tipologia dos solos encontrada na área:

- Muito argilosa (Argissolos)
- Argilosa (Gleissolos)
- Areno-argilosa (Latosolos, Nitossolos e Cambissolos)

#### 4.3.2.6. Declividade

O parâmetro declividade juntamente com a curvatura da vertente formam um conjunto de descritores morfométricos do terreno, para sua obtenção em escala compatível foi necessária a elaboração de um modelo digital do terreno (MDT). O modelo foi elaborado de acordo com a metodologia descrita por Camargo, Galdino e Quartaroli (2016), considerando as etapas de associação das cotas das curvas de nível e dos pontos cotados das folhas topográficas SF-23-Y-A (Campinas) e SF-23-Y-A-VI-3 (Valinhos) em escala 1:50.000 (IBGE, SD), ajuste da rede de drenagem em mesma escala obtida pela ANA (2018), usando



como base as ortofotos do Estado de São Paulo (EMPLASA, 2011), com seguindo-se com a interpolação dos dados pela ferramenta “*Topo to Raster*” no software ArcGIS (ESRI, 2016).

Posteriormente a elaboração do MDT, foi então elaborado o mapa de declividade em porcentagem, sendo este classificado em 5 classes de acordo com a proposta da Embrapa (1979), quais sejam:

- 0 – 3 % terrenos planos
- 3 – 8 % terrenos suave-ondulados
- 8 – 20 % terrenos ondulados
- 20 – 45 % terrenos fortemente ondulados
- > 45% terrenos montanhosos

A interpretação desse parâmetro em relação a sensibilidade ao óleo, diz respeito a dinâmica da percolação do óleo, uma vez que quanto menor a inclinação do terreno os fluídos, nesse caso o óleo, tendem a infiltração por ação gravitacional (FUSSEL et al.;1981) configurando-se como ambientes mais sensíveis em caso de derrames desse tipo de produto (MARTINS, 2012; RIBEIRO, 2017; LEME, 2018).

#### 4.3.2.7. Uso e cobertura da Terra

Os dados de uso e cobertura da terra utilizados foram extraídos do mapeamento realizado pelo comitê PCJ (SMA, 2013) em escala 1:25.000. Como apresentado na caracterização da área de estudo, a bacia do Ribeirão das Anhumas possui uma diversidade de usos passando de áreas urbanas para atividades agro-silvo-pastoris até áreas de importantes remanescentes florestais. A sensibilidade ambiental foi então pensada a partir de duas dimensões, a primeira referente aos impactos as atividades socioeconômicas relacionadas aos usos agro-silvo-pastoris, já a segunda em termos de impacto a biodiversidade representada pela presença dos remanescentes de vegetação nativa. A área urbana nesse contexto foi tida como de baixa sensibilidade devido ao caráter da impermeabilização do solo e pelo fato de as características socioeconômicas das populações terem sido avaliadas através do índice de vulnerabilidade social.

#### 4.3.2.8. Profundidade do nível freático

A profundidade do nível freático foi estabelecida a partir de uma adaptação da metodologia apresentada por Leme (2018). Primeiramente cada ponto inicial dos canais de primeira ordem (STRALER, 1952) do plano de informação da rede drenagem foi estabelecida uma nascente, em seguida foram registradas as cotas altimétricas de cada nascente, com o interpolador inverso da distância ponderada (IDW), no software ArcGIS (ESRI, 2016) foi obtida uma superfície estatística representativa do nível piezométrico que por fim, fora subtraída do MDT, representando assim a profundidade no nível d'água. Foram obtidos os seguintes valores para classificação dessa variável:


- 0 – 15 metros
- 15 – 30 metros
- 30 – 45 metros
- > 45 metros

No contexto dessa variável, considera-se que quanto mais rasa a profundidade do nível freático maior a sensibilidade do ambiente afetado.

#### 4.3.2.9. Formas de acumulação fluvial

As formas de acumulação foram fotointerpretadas a partir das ortofotos do Estado de São Paulo (EMPLASA, 2011). As propriedades analisadas na fotointerpretação para identificação das feições foram aquelas indicadas por Panizza e Fonseca (2011): forma; tamanho; tonalidade; localização da feição na paisagem; textura e; estrutura. Vale salientar que essa variável, dada a escala de análise adotada para o mapeamento final (1:50.000), foi avaliada somente para o rio principal. As formas de acumulação fluvial encontradas na área de estudo foram: i) praias fluviais; ii) ilhas fluviais; iii) canais abandonados. Considerou-se que as áreas onde ocorrem esse tipo de formações são classificadas como de alta sensibilidade ao óleo, dado o caráter de permanência desse produto no sistema fluvial. O Quadro 7 apresenta a chave de interpretação elaborada para identificação dessas feições.

Quadro 7 – Chaves de interpretação para as formas de acumulação fluvial

<b>Praias fluviais</b>	
	Textura de rugosa a lisa, localizada nas margens, coloração branca
<b>Ilhas fluviais</b>	
	Textura lisa, estrutura mais homogênea dos sedimentos, localizada no leito, coloração branca
<b>Canais abandonados</b>	
	Textura lisa, localizada em área de planície de inundação, coloração variando entre tons esverdeados e aczentados

Fonte: Emplasa, 2011. Organizado pelo autor

#### Reclassificação e definição dos pesos através nos métodos multicritério

#### *Reclassificação dos mapas em níveis de sensibilidade ao óleo*

As variáveis descritoras dos critérios e suas respectivas classes foram reinterpretadas e reclassificadas em termos de sua sensibilidade ao óleo, definiu-se para isso quatro níveis de sensibilidade, quais sejam:

- Baixa
- Média
- Média Alta
- Alta

Não obstante, para essa etapa de trabalho todos os planos de informação foram convertidos para o formato *raster*, com pixel no tamanho de 10 m<sup>2</sup>, condizente com o erro aceitável na escala 1:50.000. Essa conversão fez-se necessária para a realização das operações de álgebra de mapas, descritas mais adiante.

#### 4.4. Definição dos pesos pelo método AHP

Os pesos definidos pelo método AHP são apresentados nos Quadros 8 e 9, sendo o primeiro relativo a carta elaborada somente com os fatores físicos e o segundo com a inclusão dos valores de vulnerabilidade social. Na mesma linha, os Quadros 10 e 11 apresentam a matriz de comparação pareada utilizada para a definição dos pesos de cada critério, consoante com a aplicação desse método como descrito no capítulo 3. A razão de consistência – RC obtida foi de 0,09 para ambas as matrizes, dentro, portanto, do intervalo indicado por Saaty (1980). Para agregação dos diferentes critérios utilizou-se o procedimento de soma ponderada conforme apresentado no Capítulo 3. O preenchimento da matriz foi realizado pelo autor empiricamente, tendo consultado especialistas do campo de geociências quando oportuno, além de apoiado na literatura sobre o tema apresentado ao longo desse trabalho.

Quadro 8 – Pesos obtidos pelo método AHP para as variáveis do meio físico

<b>Critério</b>	<b>Peso normalizado</b>
Declividade	0,191
Textura dos solos	0,052
Profundidade dos solos	0,067
Densidade de drenagem	0,161
Densidade de lineamentos	0,029
Formas de acumulação	0,140
Cobertura da terra	0,104
Profundidade do nível freático	0,203
Litologia	0,052

Organizado pelo autor

Quadro 9 – Pesos obtidos pelo método AHP com a inclusão da variável vulnerabilidade social

<b>Critério</b>	<b>Peso normalizado</b>
Declividade	0,148
Textura dos solos	0,057
Profundidade dos solos	0,057
Densidade de drenagem	0,119
Densidade de lineamentos	0,041
Formas de acumulação	0,184
Cobertura da terra	0,103
Profundidade do nível freático	0,070
Litologia	0,027
Vulnerabilidade social	0,194

Organizado pelo autor

Quadro 10 – Comparação pareada das variáveis físicas de acordo com o método AHP

	Cob. da terra	Declividade	Densidade de drenagem	Formas de acumulação	Prof. do freático	Prof. dos solos	Textura do solo	Litologia	Densidade de lineamentos
Declividade	1	2	2	1	2	3	3	3	4
Cobertura da terra	1/2	1	1/3	1/3	1/3	3	3	3	4
Densidade de drenagem	1/2	3	1	3	1/3	3	3	3	4
Formas de acumulação	1	3	1/3	1	1/3	3	3	3	4
Profundidade do freático	1/2	3	3	3	1	3	3	3	4
Profundidade dos solos	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	3
Textura do solo	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	3
Litologia	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	3
Densidade de lineamentos	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1

Organizado pelo autor

Quadro 11 – Comparação pareada das variáveis, inclusa a vulnerabilidade social, de acordo com o método AHP

	V. social	Cob. da terra	Declividade	Densidade de drenagem	Formas de acumulação	Prof. do freático	Prof. dos solos	Textura do solo	Litologia	Densidade de lineamentos
Vulnerabilidade social	1	2	2	3	2	3	3	3	4	3
Cobertura da terra	1/2	1	1/3	1/3	1/3	3	3	3	4	3
Declividade	1/2	3	1	3	1/3	3	3	3	4	3
Densidade de drenagem	1/3	3	1/3	1	1/3	3	3	3	4	3
Formas de acumulação	1/2	3	3	3	1	3	3	3	4	3
Profundidade do freático	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	2	2	3	3
Profundidade dos solos	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	3	3
Textura do solo	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1	3	3
Litologia	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1	1/3
Densidade de lineamentos	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1

Organizado pelo autor

Os diferentes mapas foram agregados de acordo com o que fora apresentado na Equação 3. O mapeamento resultante foi classificado em quatro classes utilizando-se o método conhecido como “quantis” implementado no software ArcGIS (ESRI, 2018). Essas quatro classes foram compreendidas semanticamente como baixa, média, média alta e alta sensibilidade ambiental ao óleo.

#### 4.5. Aplicação do método CP

Para definição dos pesos na programação por compromisso optou-se pela escala de valores proposta por Bana e Costa (2005) uma vez que autores como Kenny (1992) criticam a escala proposta por Saaty no método AHP. A escala de valores utilizadas é apresentada no Quadro 12 e nos Quadros 13 e 14 apresentam-se a aplicação dessa escala as variáveis adotadas neste estudo. Vale ressaltar que para aplicação do método, os valores de preferência adotados foram normalizados dividindo-os pelo valor total dos pesos.

Quadro 12 – Escala de Valores de preferência utilizada para os métodos CP e CGT

Escala numérica adaptada	Escala semântica segundo Bana e Costa (2005)
1	Nula
2	Muito fraca
3	Fraca
4	Moderada
5	Forte
6	Muito Forte
7	Extrema

Bana e Costa (2005). Organizado pelo autor

Quadro 13 – Aplicação da escala de valores de preferência aos critérios do meio físico

Critério	Peso (escala de preferência)	Peso normalizado
Declividade	7	0,13
Textura dos solos	6	0,12
Profundidade dos solos	6	0,12
Densidade de drenagem	5	0,10
Densidade de lineamentos	4	0,08
Formas de acumulação	7	0,13
Cobertura da terra	6	0,12
Profundidade do nível freático	6	0,12
Litologia	5	0,10
Total	52	1

Organizado pelo autor

Quadro 14 – Aplicação da escala de valores de preferência aos critérios incluindo a vulnerabilidade social

<b>Critério</b>	<b>Peso (escala de preferência)</b>	<b>Peso normalizado</b>
Declividade	7	0,12
Textura dos solos	6	0,10
Profundidade dos solos	6	0,10
Densidade de drenagem	5	0,08
Densidade de lineamentos	4	0,07
Formas de acumulação	7	0,12
Cobertura da terra	6	0,10
Profundidade do nível freático	6	0,10
Litologia	5	0,08
Vulnerabilidade social	7	0,12
Total	68	1

Organizado pelo autor

A agregação dos critérios foi implementada através dos procedimentos descritos nas Equações (8) e (9) apresentadas no Capítulo 3. Os procedimentos algébricos foram aplicados sobre todos os mapas pela ferramenta “Calculadora Raster” no software ArcGIS. Visando a isonomia na comparação entre os modelos, o mapeamento resultante foi igualmente classificado em quatro classes utilizando-se o método dos “quantis”, compreendendo as classes de baixa, média, média alta e alta sensibilidade ambiental ao óleo.

#### **4.6. Aplicação do método CGT**

A definição dos pesos para os critérios no método CGT foi a mesma utilizada para o método CP. A agregação dos critérios seguiu o estabelecido na Equação (10) (Capítulo 3). Desse ponto em diante a aplicação do método seguiu os passos descritos nos métodos AHP e CP, quais sejam: geoprocessamento algébrico e fatiamento das classes. Apresenta-se no Quadro 14 as cargas, valores de sensibilidade adotada para cada critério.



Quadro 15 – Critérios e cargas utilizadas

Critério	Grandeza	Classificação	Sensibilidade (escala semântica)	Sensibilidade (escala numérica)
Declividade	%	0-3	Alta	4
		3-8		
		8-20	Média Alta	3
		20-45	Média	2
		>45	Baixa	1
Textura dos solos	Adimensional	Muito Argilosa	Baixa	1
		Argilosa	Baixa	1
		Areno-argilosa	Média Alta	3
Profundidade dos solos	Adimensional	Raso	Alta	4
		Intermediária	Média	2
		Profundo	Baixa	1
Densidade de drenagem	km/km <sup>2</sup>	>3,5	Alta	4
		2,5-3,5	Alta	4
		1,5-2,5	Média Alta	3
		0,5-1,5	Média	2
		<0,5	Baixa	1
Densidade de lineamentos	km/km <sup>2</sup>	0-1	Baixa	1
		1-2	Média	2
		2-3	Média Alta	3
		>3	Alta	4
Formas de acumulação	Adimensional	Margens de acumulação / Praias fluviais	Alta	4
		Ilhas fluviais		
		Canais abandonados		
Cobertura da terra	Adimensional	Área edificada	Baixa	1
		Área úmida	Alta	4
		Campo natural	Alta	4
		Cultura Perene	Alta	4
		Cultura semiperene	Alta	4
		Cultura temporária	Média Alta	3
		Cursos d'água	Alta	4
		Espaço verde urbano	Alta	4
		Extração mineral	Média	2
		Grande equipamento	Baixa	1
		Lagos, lagoas, represas	Alta	4
		Loteamento	Baixa	1
		Mata	Alta	4
		Pastagem	Alta	4
		Reflorestamento	Alta	4
Solo exposto	Média Alta	3		
Profundidade do nível freático	metros	0-15	Alta	4
		15-30	Média Alta	3
		30-45	Média	2
		>45	Baixa	1
Litologia	Adimensional	Aluviões	Alta	4
		Arenitos	Alta	4
		Diabásios	Média	2
		Diamictitos - lamitos - Ritmitos	Média Alta	3
		Gnaisses	Média	2
		Granitos	Média	2
		Milonitos	Média	2
Vulnerabilidade social	Adimensional	Alta	Alta	4
		Média Alta	Média Alta	3
		Média	Média	2
		Média Baixa	Baixa	1
		Baixa		

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os mapeamentos resultantes da aplicação dos três modelos multicritério, segue-se com uma caracterização desses com a paisagem da bacia e por fim a comparação entre os três métodos.

### 5.1. Sensibilidade inerente a cada critério e sua relação com as saídas dos modelos

Os resultados (saídas - *output*) de cada um dos modelos refletem em certo grau a disposição espacial da sensibilidade inerente a cada um dos critérios de entrada (*input*), de modo que sua compreensão é fundamental para a interpretação dos resultados.

Para o critério declividade foram verificadas classes variando de 0 a 3% nas áreas de planícies e terraços fluviais chegando a locais em que esse número chega a estar acima de 45% em áreas no rebordo do planalto Atlântico. Contudo, a predominância é das classes mais baixa chegando a ordem de 20% de declive. Essa situação redundante na ocorrência predominante de classes de média e média alta sensibilidade ao óleo na bacia. Obteve-se após a reclassificação o seguinte panorama: as áreas mapeadas como de alta sensibilidade para esse critério ocupam 69,12 % da área da bacia; as de média alta 27,39%; as de média 3,44%; e por fim as de baixa sensibilidade somente 0,05%.

Três classes de textura dos solos são encontradas na bacia correspondendo a solos com textura muito argilosa, argilosa e areno-argilosa. Quando reclassificadas em termos de sua sensibilidade obteve-se apenas duas classes, a de baixa sensibilidade e a de média alta sensibilidade. A classe de baixa sensibilidade corresponde a 59% da área da bacia, estando associada aos solos com pouco ou nula presença de minerais de quartzo em sua estrutura. De outro lado, as áreas de média alta sensibilidade, que ocupam os outros 41% da área, estão relacionadas aos solos presença de quartzo e menor influência da fração argila, daí a presença arenosa considerável em seu perfil. Nesse aspecto há que se ressaltar a influência das características fisiográficas das duas grandes unidades morfoestruturais em que a Bacia do Ribeirão das Anhumas se encontra, não obstante, as áreas de baixa sensibilidade localizam-se quase que exclusivamente na Depressão Periférica, ao passo que as de média alta estão ligadas ao Planalto Atlântico.

Foram mapeadas três classes de profundidade do solos, tal qual discutido no parágrafo anterior, também a profundidade dos solos se relaciona aos aspectos fisiográficos das unidades morfoesculturais em que a bacia se insere. Nesse sentido, as classes de baixa

sensibilidade para esse critério, que ocupam 54 % da área, encontram-se predominantemente no domínio da Depressão Periférica, setor em que o relevo é menos movimentado e com os perfis do manto de alteração alcançando maiores profundidades. Por sua vez, a maior proporção dos solos do domínio do Planalto Atlântico, ao se desenvolverem sobre áreas de relevo mais movimentado e com maiores declividades apresentam profundidades intermediárias, o que lhes confere a classificação de média sensibilidade. Essa última classe representa 41 % da área da bacia. As áreas de alta sensibilidade (5% da área da bacia), isto é, onde ocorrem os solos mais rasos não são totalmente independentes dessas características fisiográficas, contudo sua distribuição espacial é mais relacionada com os processos hidrossedimentológicos culminando na gênese de complexos de GLEISSOLOS e NEOSSOLOS flúvicos. A exceção ocorre em áreas de solos rasos da classe dos CAMBISSOLOS relacionados a processos gravitacionais nas vertentes mais íngremes da faixa de contato entre as duas unidades morfoesculturais.

Sob o ponto de vista da rede de drenagem local, as áreas com maiores densidades ocorrem no setor leste da bacia. Como já mencionado, esse setor é uma zona de planalto sustentado pelo embasamento cristalino, com solos relativamente mais rasos e rochas com menor grau de permeabilidade do que àquelas situadas a oeste, já na Depressão Periférica. A classe de baixa sensibilidade é a que encontra maior expressão territorial, na ordem de 49 km<sup>2</sup> correspondendo a 33% da área da bacia; a classe de média sensibilidade corresponde a 24% da área; a de média alta 26% e por fim; a classe de alta sensibilidade ocupa 25 km<sup>2</sup>, representando 17% da área.

O critério densidade de lineamentos reflete o grau de fraturamento das rochas que compõe o substrato da bacia, de modo que, como esperado, as áreas com densidades mais elevadas encontram-se no setor leste da bacia, que possui litologia composta por rochas do Escudo Cristalino . Contudo é possível notar áreas com densidade elevadas em outras porções da bacia quase sempre associadas a presença de *sills* de diabásios com auto grau de fraturamento. A distribuição espacial da sensibilidade ao óleo para esse critério (Figura 17) é dada do seguinte modo: A classe de baixa sensibilidade ocupa 84 km<sup>2</sup> correspondente a 56% da área total da bacia; a classe de média sensibilidade com 45 km<sup>2</sup> representa 30% da área; 17 km<sup>2</sup> é a área mapeada como de média alta sensibilidade (11% do total); por fim a classe de alta sensibilidade é da ordem de 4 km<sup>2</sup> correspondendo a pouco mais de 2% da área da bacia.

As classes de cobertura da terra demonstram o grau de diversificação dos usos ocorrentes na Bacia do Ribeirão das Anhumas, passando de áreas de mata para culturas perenes e temporárias até os usos extritamente urbanos, configurando um mosaico territorial

extremamente complexo. Em termos de sensibilidade ao óleo, consoante com a estruturação proposta para o problema, apresenta como possuindo o grau mais elevado os tipos de cobertura ligados a preservação ambiental e atividades econômicas do seguimento agro-silvo-pastoril. Não obstante, essas áreas de maior sensibilidade são encontradas nos setores norte e leste da bacia, uma vez que as áreas a sul e oeste possuem tipologias de cobertura da terra essencialmente urbana. Certamente que nas áreas urbanas, dada as condições de vida da população exista também diferenças no gradiente de sensibilidade, contudo, na metodologia aqui implementada, essa diferenciação é avaliada pelo critério vulnerabilidade social. Com a espacialização das classes de sensibilidade para o critério cobertura da terra tem-se que: 50% da área corresponde a classe de baixa vulnerabilidade; menos de 1% da área foi mapeado como pertencente a classe de média sensibilidade; a classe de media alta sensibilidade corresponde a 5% da área da bacia e; a classe dealta sensibilidade corresponde a 44% da área da bacia.

No tocante ao critério relativo a profundidade do nível freático, vê-se uma vez mais como a questão das características fisográficas dos compartimentos do relevo exercem influência. Com efeito, as maiores profundidades encontradas estão nos domínios da Depressão periférica, no entanto, vale ressaltar que a maior parte da bacia possui profundidades de até 15 metros. Dado estes fatores a classe de sensibilidade que predomina é a de alta sensibilidade ocupando 75% da bacia, seguida pela classe de média alta com ocupação na ordem de 13%, a classe de média sensibilidade corresponde a 10% e por fim, a classe de baixa sensibilidade representa 2% desse total.

Como discutido anteriormente, o fato da Bacia do Ribeirão das Anhumas situar-se em zona de contato entre duas grandes unidades geológica-geomorfológicas garante a ela uma complexidade em termos de tipologias litológicas. Em que pese essa diversidade, em grande parte fora associado o grau de média sensibilidade para esse critério. Todavia as formações mais recentes, correspondentes aos aluviões quaternários é que recebem a maior atenção associando-se ao mais alto grau de sensibilidade definido. Refletindo essa situação verificou-se que 58% da área foi mapeada dentro da classe de média sensibilidade; 17% na classe de media alta; 10% como de baixa sensibilidade e; 15% dentro da classe de alta sensibilidade.

Como dito anteriormente a vulnerabilidade social, dentro do escopo do problema aqui abordado, tem função de avaliar a sensibilidade dentro da heterogeneidade no mosaico territorial da bacia. Embora possa ser encontrada em menor escala em outras posições, as áreas de maior vulnerabilidade social situam-se na parte norte da bacia. Em termos da distribuição das classes de sensibilidade (Figura 21) tem-se que 59% da área fora classificada

como de baixa sensibilidade; 17% como de sensibilidade média; 13% como de média alta e; 11% como de alta sensibilidade.

Três tipologias de formas de acumulação foram encontradas ao longo do curso do Ribeirão das Anhumas todas elas foram associadas a classe de alta sensibilidade ao óleo, por serem locais de deposição potencializando o tempo de permanência do óleo no ambiente. Vale ressaltar que a forma de acumulação de maior ocorrência foram as margens de acumulação.

## 5.2. Cartas SAO elaborada pelo método AHP

A quantificação é a distribuição espacial das classes de sensibilidade mapeadas pelo método AHP são apresentados no Gráfico 3 e na Figura 13 para aquela elaborada somente com os dados do meio físico, no Gráfico 4 e Figura 14 para a carta elaborada considerando também os aspectos da vulnerabilidade social.

Gráfico 3 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando apenas os fatores físicos

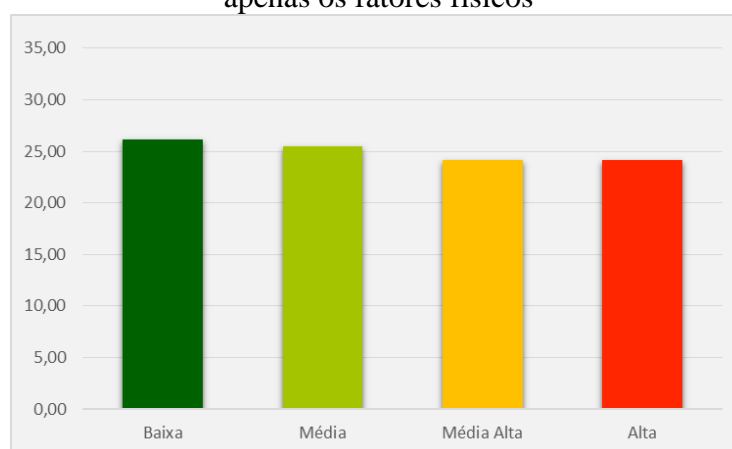
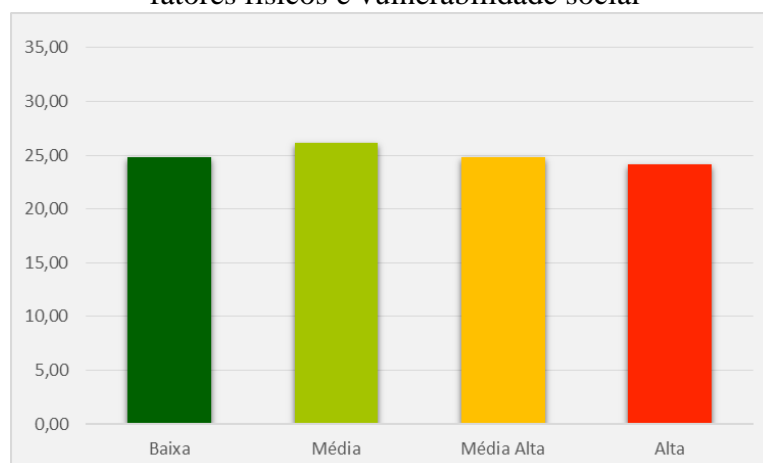
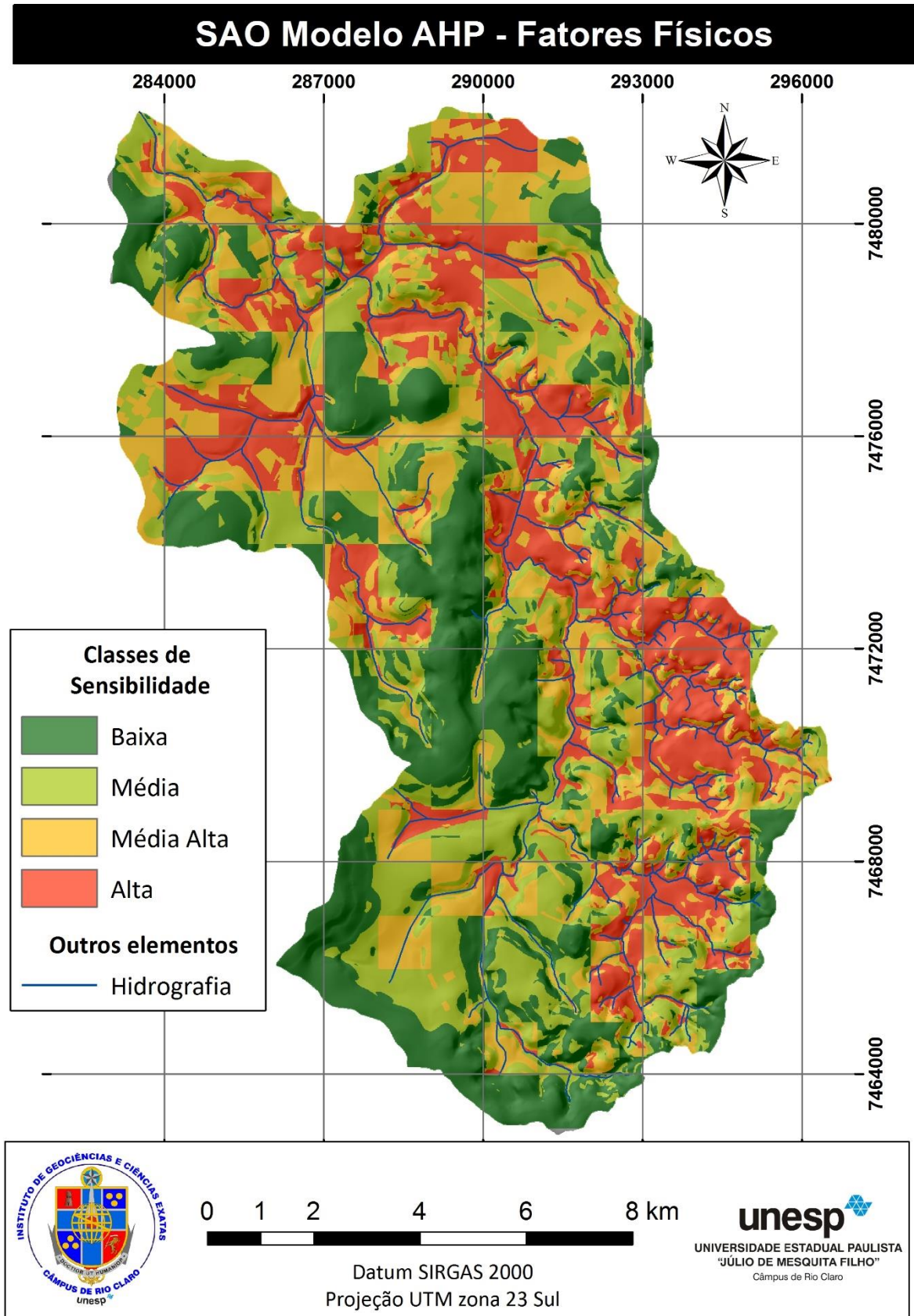


Gráfico 4 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social



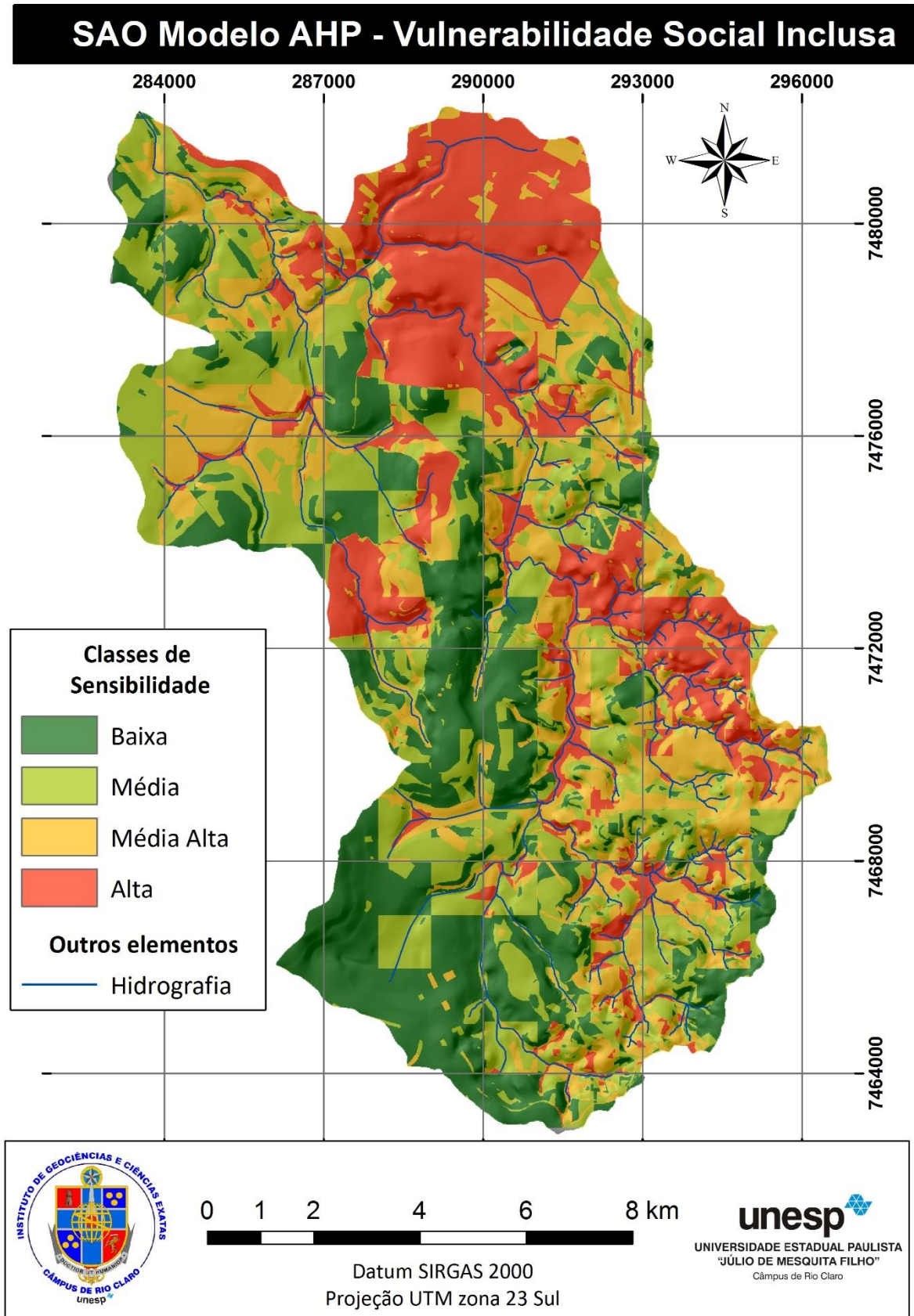
Elaborado pelo autor

Figura 13 – Carta SAO elaborada pelo método AHP considerando apenas os fatores físicos



Elaborado pelo Autor

Figura 14 - Carta SAO elaborada pelo método AHP considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social



Elaborado pelo Autor

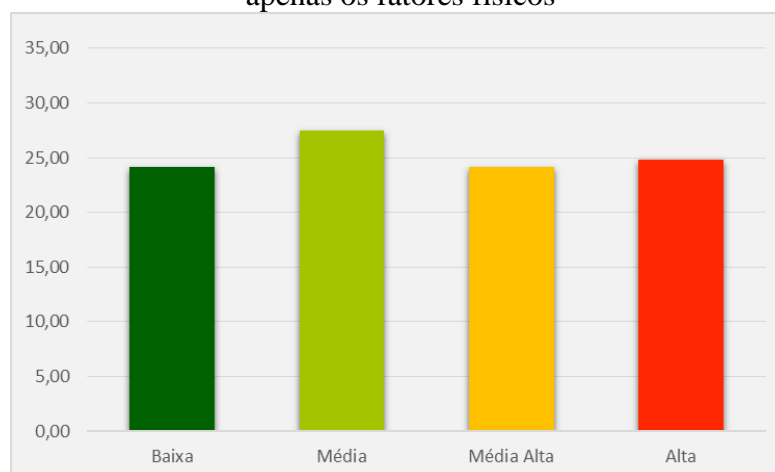
Em ambas as cartas não é observada grandes variações entre a área mapeada em cada classe de modo que a classe predominante na carta elaborada com os critérios do meio físico é a de baixa sensibilidade, correspondendo a 26%, enquanto as classes de menor expressão (média alta e alta possuem 24% da área mapeada cada. Quando inclusa a vulnerabilidade social há uma pequena inversão de modo que a classe mais representativa passa ser a de média sensibilidade seguida pela de baixa, mas também sem grandes variações em termos da amplitude dos dados. Nos dois casos, as áreas de alta e média alta sensibilidade distribuem-se ao longo da bacia, contudo são ressaltadas nas áreas de rochas mais fraturadas embasamento cristalino e nas planícies e áreas aluvionares nas áreas sedimentares.

Se do ponto de vista quantitativo não é observado grande variação entre as cartas mapeadas com e sem a inclusão da vulnerabilidade social, uma inspeção visual sobre os dois produtos permite constatar que espacialmente houveram transferências entre as áreas mapeadas. Veja-se, por exemplo no norte da bacia, em que há um incremento da área de alta sensibilidade proveniente do fato de ser uma área de alta vulnerabilidade social. Em outra mão, na região noroeste e sul da bacia áreas mapeadas como de alta sensibilidade na carta construída sem a inclusão da vulnerabilidade social, tem sua expressão territorial diminuída quando esse dado é incluído na análise.

### 5.3. Carta SAO elaborada pelo método CGT

Os Gráficos 5 e 6 apresentam proporção das áreas mapeadas para cada classe no modelo CGT.

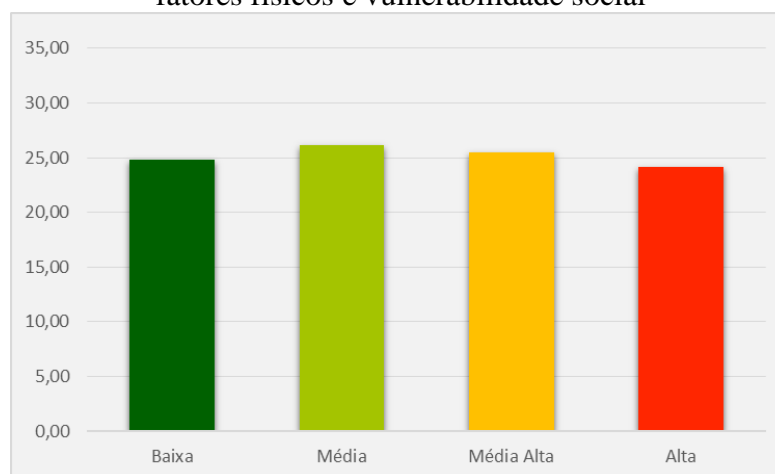
Gráfico 5 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método CGT considerando apenas os fatores físicos



Elaborado pelo autor



Gráfico 6 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social

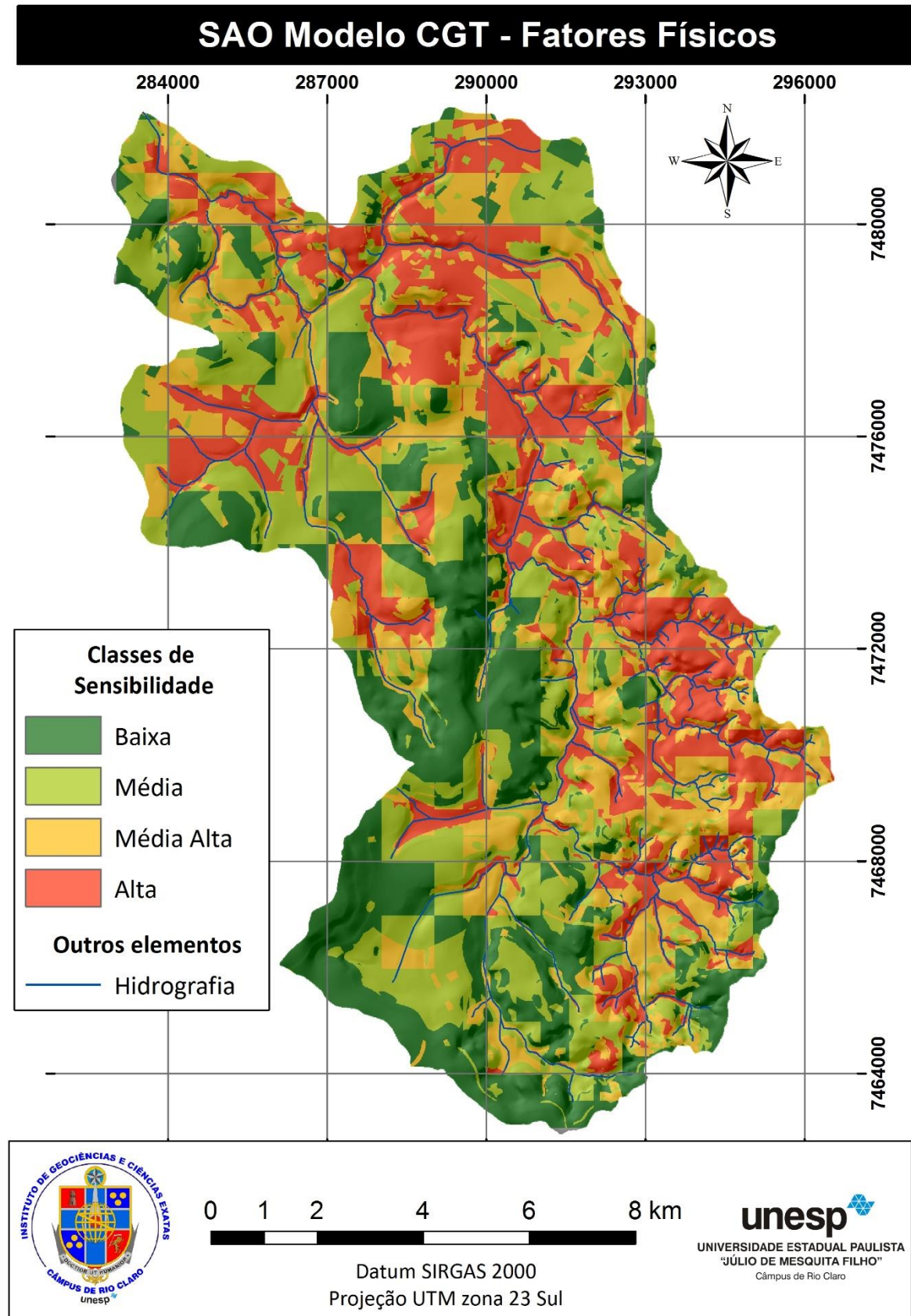


Elaborado pelo autor

A aplicação desse modelo também resultou em um certo equilíbrio na distribuição das classes de sensibilidade. Em ambos os casos a classe de média sensibilidade foi a de maior área mapeada, com valores na ordem de 27% e 26% para o modelo sem a inclusão da vulnerabilidade e com ela incluída, respectivamente. Uma alteração sensível é percebida, no entanto, para a classe de alta sensibilidade uma vez que ocupa a segunda posição na primeira carta e passa a ser a última na segunda, contudo salienta-se em termos absolutos essa queda representa menos de 1% da área mapeada para classe nos dois mapeamentos.

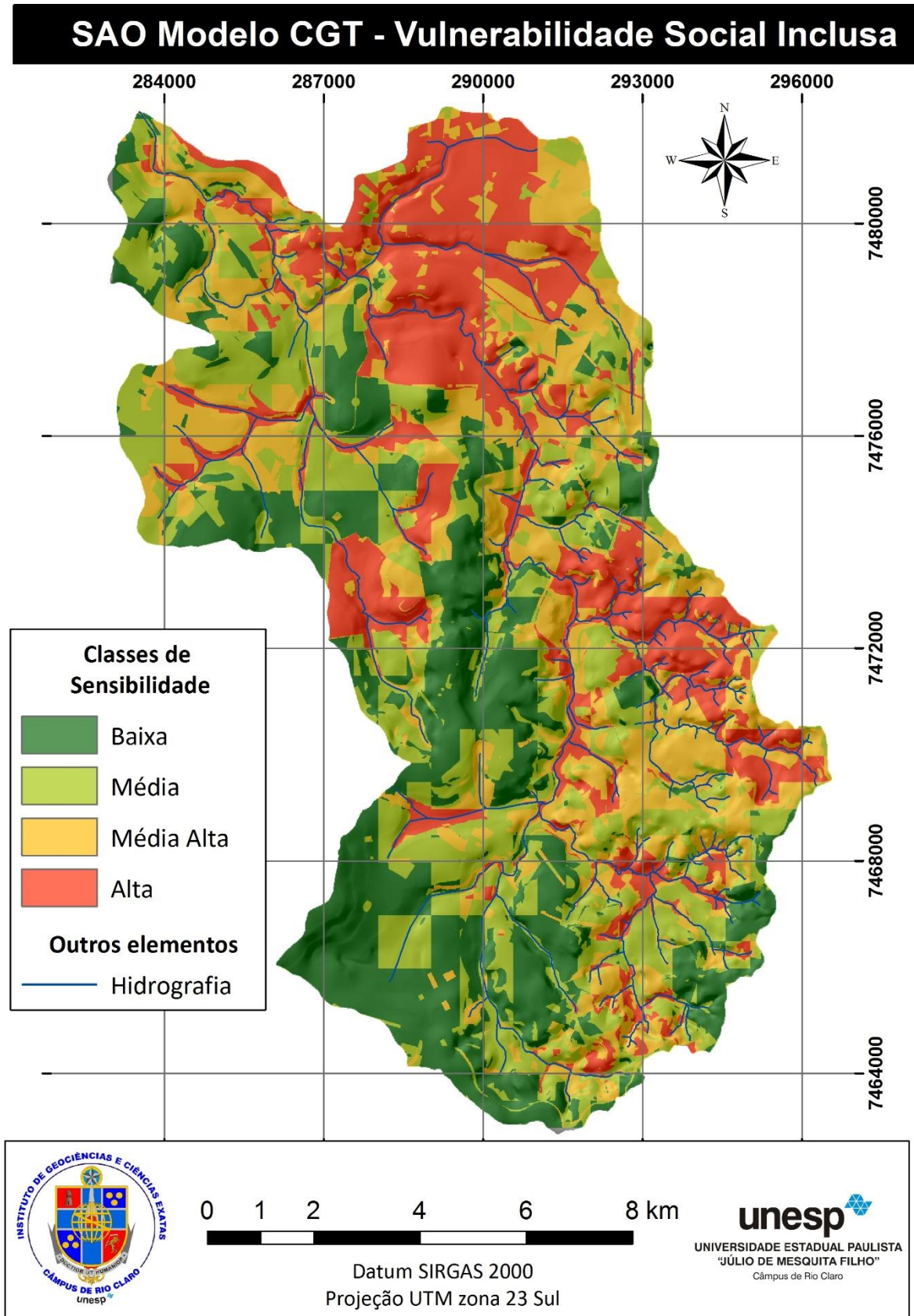
Em termos da distribuição das áreas mapeadas em cada classe ocorre o mesmo processo mencionado para o modelo AHP, ampliação das áreas de alta sensibilidade na parte norte da bacia e redução a noroeste e sul. Os mapeamentos produzidos com a aplicação do modelo CGT são apresentados nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 – Carta SAO elaborada pelo método CGT considerando apenas os fatores físicos



Elaborado pelo autor

Figura 16 – Carta SAO elaborada pelo método CGT considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social

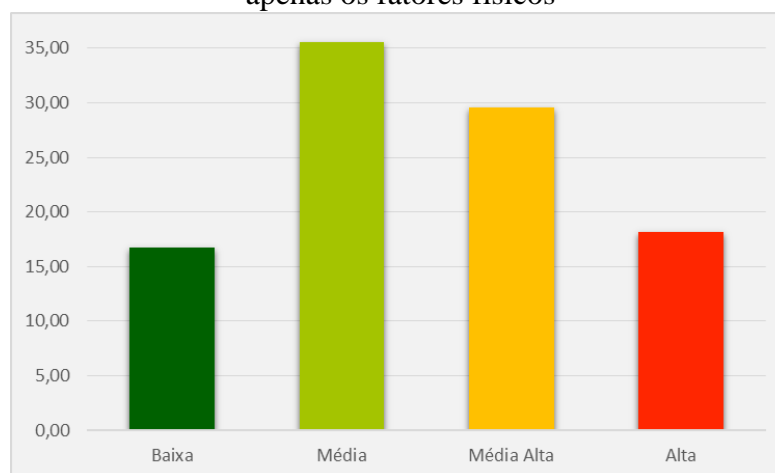


Elaborado pelo autor

#### 5.4. Carta SAO elaborada pelo método CP

O método CP foi aquele que apresentou maior diferenciação entre as classes mapeadas conforme pode-se verificar nos Gráfico 7 e 8. Novamente a classe predominante é a de média sensibilidade com área mapeada acima dos 30% em ambas as cartas seguida da classe média alta com valores de 29% e 28% respectivamente. Ao contrário dos dois modelos anteriores, o CP apresentou incremento significativo da classe de alta sensibilidade na carta elaborada com a vulnerabilidade social inclusa. As Figuras 17 e 18 apresentam a distribuição espacial das classes para as duas cartas elaboradas com esse modelo. Outra diferença notável com os modelos anteriores é que áreas da zona sedimentar mapeadas como de alta sensibilidade nos modelos AHP e CGT, foram mapeadas como de média alta no modelo CP.

Gráfico 7 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método CP considerando apenas os fatores físicos



Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Percentual das áreas mapeadas em cada classe pelo método AHP considerando fatores físicos e vulnerabilidade social

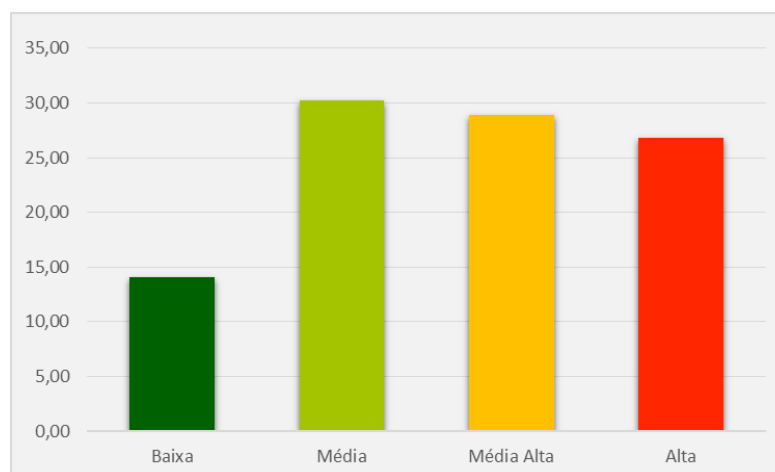
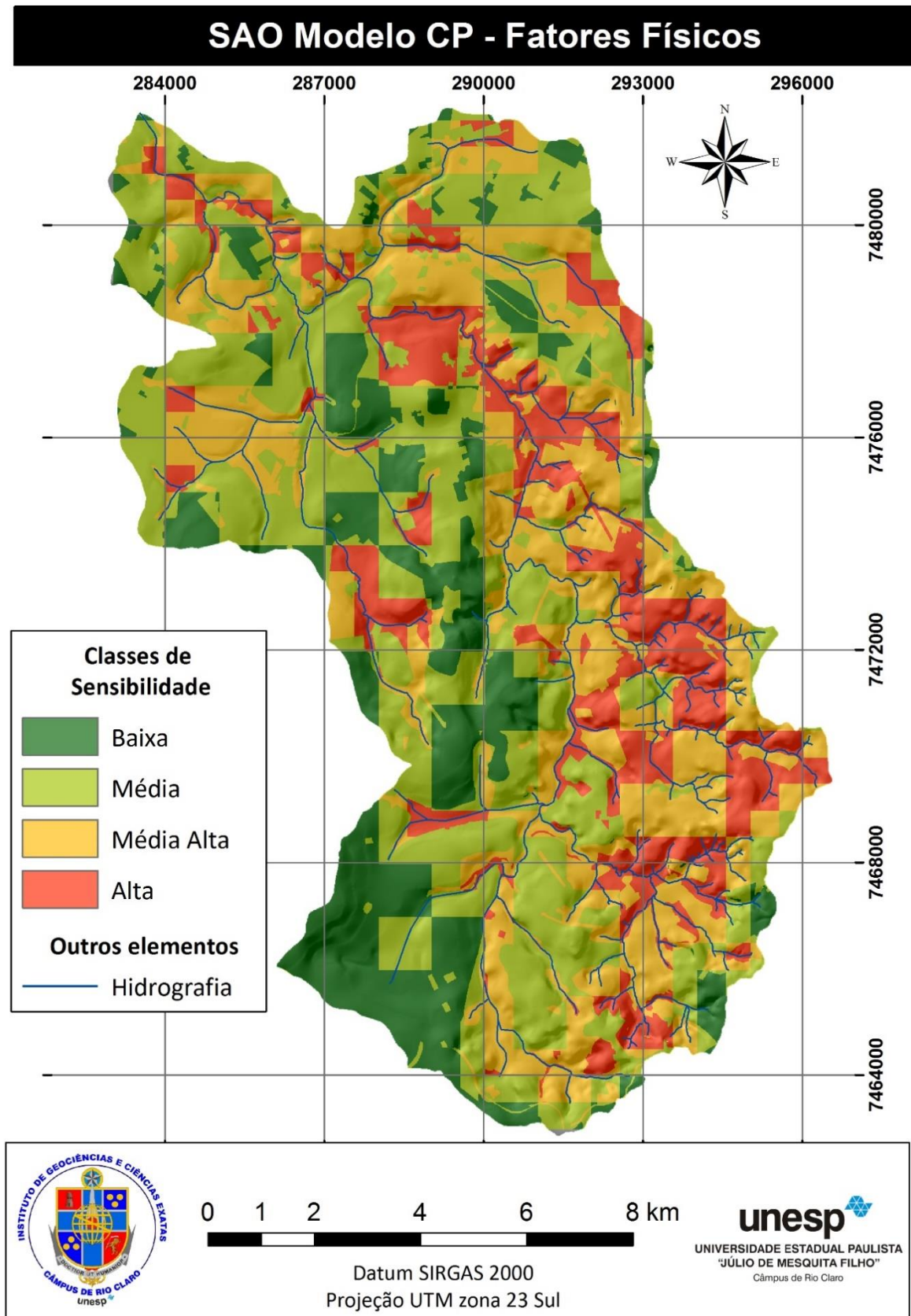
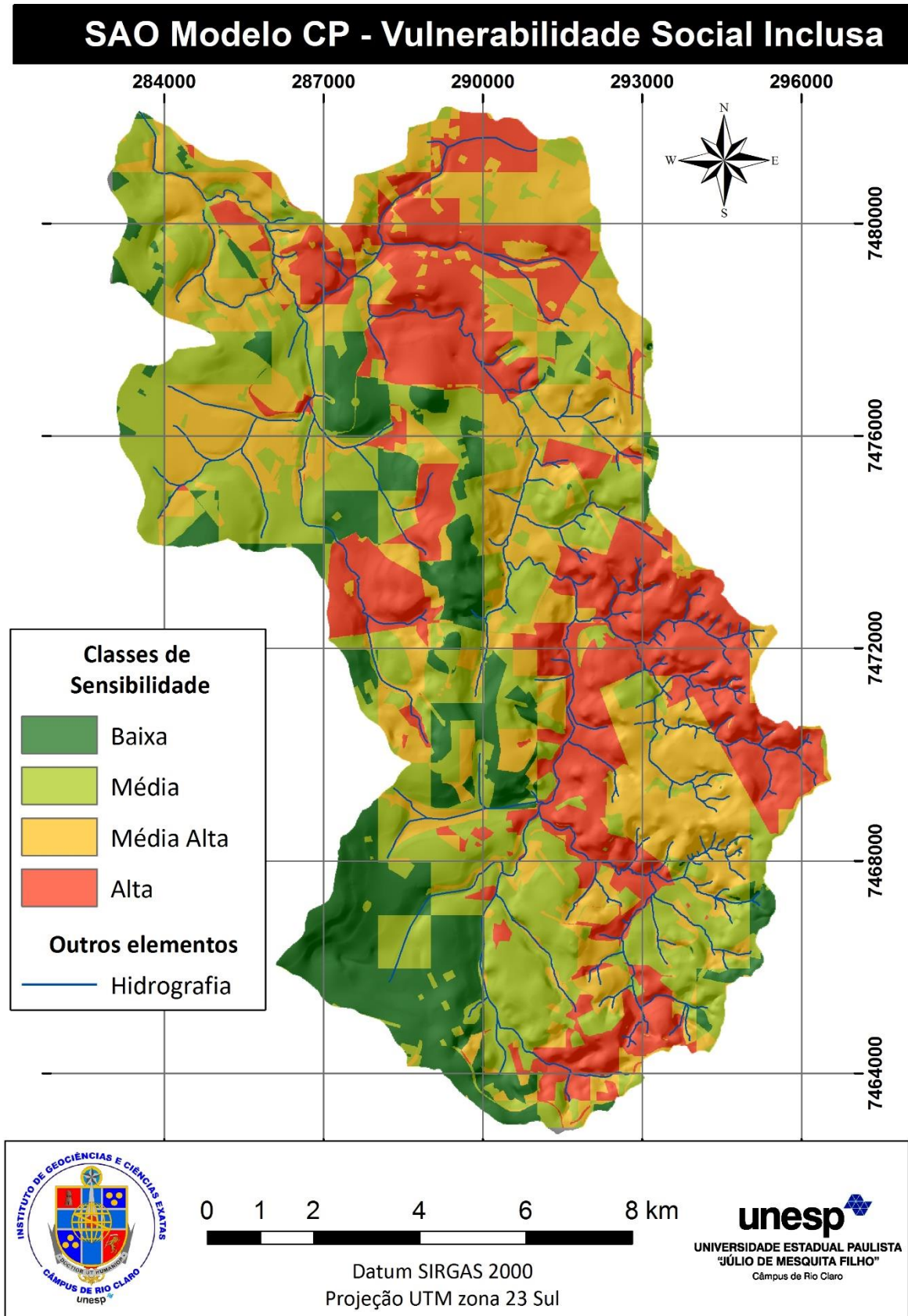


Figura 17 – Carta SAO elaborada pelo método CP considerando apenas os fatores físicos



Elaborado pelo autor

Figura 18 – Carta SAO elaborada pelo método CP considerando os fatores físicos e a vulnerabilidade social



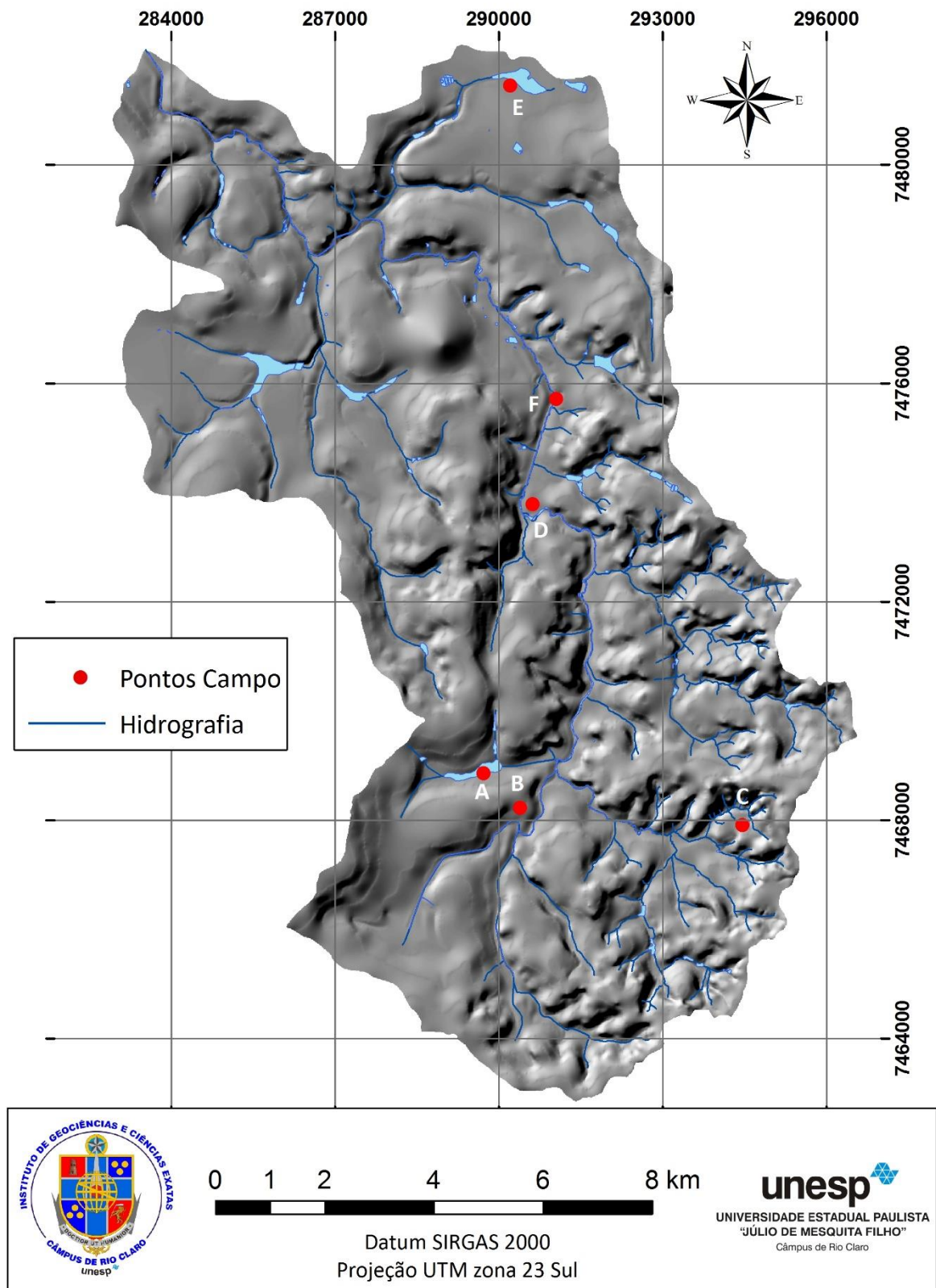
Elaborado pelo autor

Embora tendo trabalhado com a compartimentação fisiográfica como método, Leme (2018) também observou que a inclusão dos aspectos sociais de forma estrutural na análise da sensibilidade ao óleo promoveu uma alteração nas classes mapeadas, de modo que houve uma tendência da diminuição das classes de alta sensibilidade e incremento das classes intermediárias. Essa situação foi aqui observada em relação aos modelos AHP e CGT, sendo como visto o oposto no modelo CP. Essa diminuição das áreas da classe de alta sensibilidade é justificada pelo fato de que as atividades sociais, sobretudo, às ligadas a habitação, são concentradas em algumas áreas dentro dos grandes compartimentos da paisagem. Ao valorar tais áreas como de alta sensibilidade restringe-se a demarcação de todo um compartimento como de risco máximo.

Cabe ainda ressaltar que de acordo com Dagnino (2007), a região noroeste da bacia do Ribeirão Anhumas apresenta diversas áreas potencialmente vulneráveis a contaminação dos solos e da água. Os modelos AHP e CGT, sobretudo no caso das cartas elaboradas somente com os dados do meio físico incorporaram essa realidade, podendo ser observado áreas de alta vulnerabilidade nessa porção da bacia, o mesmo não ocorreu com o método CP. Essa discrepância entre os modelos CGT e CP não foi observada em outra aplicação na mesma bacia realizada por Francisco et. al. (2008), que utilizou tais métodos para a seleção de áreas prioritárias para proteção de mananciais e recuperação florestal na bacia do Anhumas.

Para melhor caracterização e compreensão das saídas dos modelos foi realizado um campo apoiado em resgistro fotográfico. A Figura 19 apresenta a localização desses pontos ao longo da bacia.

Figura 19 – Localização dos pontos de controle de campo





O ponto A encontra-se em um baixo topográfico na Depressão Periférica e é um conhecido parque público (Parque Portugal) conhecido localmente como “Lagoa do Taquaral”. A sensibilidade inerente da área vem de um lado de sua dinâmica natural com a ocorrência de baixas declividades do terreno e sua dinâmica hidrossedimentológica como área de acumulação fluvial e, potencialmente, de acumulação de fluídos derivados de óleo em caso de um acidente (Figura 20). De outro lado há que se considerar a valoração e a importância da paisagem local e o uso social do parque conferindo assim um grau de sensibilidade socioeconômico.

Figura 20 – Ponto de controle A



O ponto B é representativo da região com mais alto grau de urbanização na bacia, no domínio da Depressão Periférica no local da confluência dos correços que formam o Ribeirão das Anhumas. A Figura 21 apresenta vistas do local, em “A” tem-se vistas para os morrotes sustentados por gnaisses na região do planalto com alto grau de ocupação urbana, em “B” e “C” ve-se a confluência dos Corrêgos Serafim e Proença, destaca-se as margens erosivas e as zonas ne acumulação fluvial.

Figura 21 – Ponto de controle B





O Ponto C localiza-se no domínio do Planalto Atlântico, a densidade urbana é menor (Figura 22) diminuindo a influência dos aspectos socioeconomicos na análise da sensibilidade local, no entanto, do ponto de vista físico-natural, e ali que encontram-se os aspectos como os solos mais rasos, inclusive com afloramento de rochas do cristalino em alguns pontos, menor profundidade do nível freático entre outros.

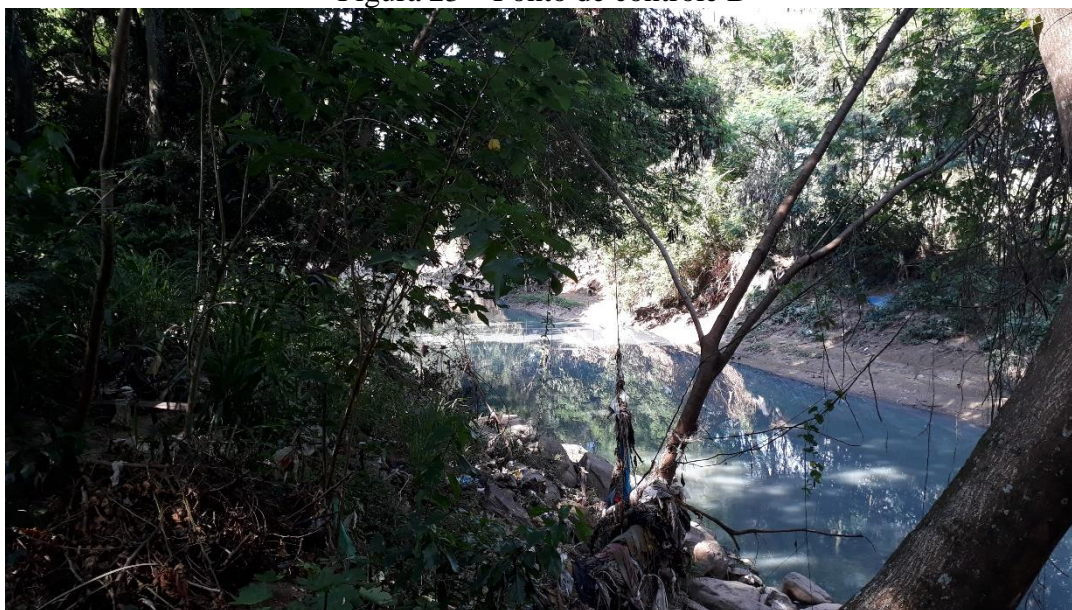
Figura 22 – Ponto de controle C





No contato entre depressão e planalto fica localizado o ponto D. Destaca-se nessa localidade a existência de uma pequena faixa de mata ciliar e as margens de acumulação do Ribeirão das Anhumas nesse ponto (Figura 23). Essa área foi classificada como de média alta sensibilidade pelos modelos AHP e CGT e como alta sensibilidade no modelo CP.

Figura 23 – Ponto de controle D



O ponto E situa-se no extremo norte da bacia em área da Depressa Periférica. Em oposição aos demais pontos discutidos, esse possui caráter predominantemente rural, favorecido pelas declividades mais suavizadas que propiciam o desenvolvimento de Latossolos derivados dos diabásios locais (Figura 24). A declividade é também fator importante na avaliação da sensibilidade nessa área por possibilitar o acúmulo e empoçamento em caso de derrame. A área possui importância socioeconômica sublinhada dado as atividades agro-silvo-pastoris ocorrentes. O ponto F segue a mesma lógica do E. Na Figura 25 captada próxima ao ponto pode-se verificar o dinamismo das formas Fluviais no ribeirão das Anhumas com presença de margens erosivas, margens de acumulação e uma pequena ilha fluvial.

Figura 24 – Ponto de controle E



Figura 25 – Ponto de controle F



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas considerações e conclusões podem ser elencada as final da pesquisa frente aos resultados apontados no capítulo anterior. A primeira dela diz respeito a utilização dos modelos de auxílio à tomada de decisão nos estudos relativos a sensibilidade ambiental ao óleo. Com efeito, esses se mostraram uma ferramenta bastante eficaz para esse tipo de mapeamento, primeiro por seu arcabouço teórico na etapa da estruturação do problema permitindo identificar as diversas variáveis-componentes de uma situação complexa como o entendimento da sensibilidade do ambiente em caso de um derrame de óleo e derivados. Em segundo, por permitir diante dessa complexidade a inclusão de variáveis mensuradas tanto de modo quantitativo como qualitativo. Por fim, a estruturação de pesos diferentes para cada uma das variáveis permite uma maior liberdade para aproximações do conhecimento especialista, o sistema modelado e o modelo resultante. Não obstante, a integração desse tipo particular de modelo com as ferramentas SIG mostra-se como metodologia promissora para a elaboração de cartas SAO em áreas continentais, considerando como discutido anteriormente que esse tipo de estudo é ainda embrionário. A bacia hidrográfica como unidade de análise nesse caso facilita essa integração entre essas duas ferramentas por representar um recorte sistêmico do ambiente compatível com a estrutura do modelo e do software SIG.

Na avaliação da sensibilidade ambiental ao óleo, a análise multitemática não opõe-se à integrada, ao contrário é posta como uma possibilidade em áreas onde haja um material cartográfico dos critérios utilizados previamente disponível.

Estando encrustada em duas províncias geomorfológicas, em termos próprios da sensibilidade ao óleo, a bacia do Ribeirão das Anhumas apresenta a predominância de áreas com alta sensibilidade correlatas com as localidades do Planalto Atlântico na Bacia, situação essa derivada da combinação de uma série de fatores fisiográficos da paisagem local. As áreas de alta sensibilidades no domínio da Depressão Periférica dizem respeito a duas situações, em primeiro plano as áreas de fundo de vale com menor entalhamento e baixas declividades, com desenvolvimento de morfologias como planícies e terraços fluviais. Em outra mão está a influência dos fatores socioeconômicos uma vez que na porção da bacia inserida na depressão encontram-se tanto as áreas mais urbanizadas como aquelas de maior preponderância em termos de atividades agro-silvo-pastoris.

Em que pese as divergências e diferenciações entre os modelos, os três que foram aplicados nesse estudo captaram essa relação entre a fisiografia das duas unidades, de modo que embora verificam-se diferenças quantitativas entre as áreas mapeadas, todo eles



indicaram a predominância das classes de maior sensibilidade no Planalto Atlântico e as de menor da Depressão Periférica. Os modelos AHP e CGT foram aqueles que apresentaram resultados mais próximos da dimensão natural da bacia, guardando em seu resultado final semelhança e certo grau de coincidência com as delimitações das unidades fisiográficas da bacia. O modelo CP por sua vez apresentou maior influência dos aspectos socioeconômicos considerados no estudo. De modo geral a inclusão da vulnerabilidade social na elaboração das cartas SAO causou uma diminuição das áreas mapeadas como de alta sensibilidade, exceto no modelo CP em que a situação foi ao contrário

Considerando a proporção das áreas mapeadas nas classes de média alta e alta sensibilidade, pode-se concluir que nas cartas elaboradas considerando apenas os aspectos físicos os modelos apresentam grande isonomia em termos quantitativos, não obstante a soma dessas áreas é da ordem de 48% nos modelos AHP e CGT e de 47% no modelo CP. Para as cartas elaboradas com a inclusão da vulnerabilidade social, o modelo CP mostrou-se mais conservador com 55% da área mapeada nessas classes, no modelo AHP mantiveram-se ainda 48% e no modelo CGT houve um pequeno incremento para 49%. Deve ser salientado que a escolha entre um ou outro modelo é papel do tomador de decisão podendo este escolher por um modelo mais conservador ou não, assim como realizar a opção da inclusão dos aspectos sociais nessa análise, podendo escolher o modelo a partir dessas realidade.

Por fim no delinear dessa pesquisa algumas perspectivas para estudos futuros podem ser apontadas. A primeira delas refere-se a aplicação das metodologia aqui apresentada em outros contextos espaciais, isto é, bacias hidrográficas de maior ou igual porte inseridas em outras provincias naturais. Além disso, outros modelos de auxilio à tomada de decisão podem ser testados, ou ainda, uma combinação entre eles, como por exemplo a definição de pesos pelo AHP e a integração dos dados pelo método CGT. Uma outra direção seria a incorporação se aspectos biológicos relativos a fauna e flora local que como apontado nos objetivos não fez parte do escopo dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMS, W.; GHONEIM, E.; SHEW, R.; LaMASKIN, T.; Al-BLOUSHI, K.; HUSSEIN, S. AbuBAKR, M.; Al-MULLA, E.; Al-AWAR, M; El-BAZ, F. Delineation of groundwater potential (GWP) in the northern United Arab Emirates and Oman using geospatial technologies in conjunction with Simple Additive Weight (SAW), Analytical Hierarchy Process (AHP), and Probabilistic Frequency Ratio (PFR) techniques. **Journal of Arid Environments**. v.157, p.77-96, 2018.
- ALLAIN, S.; PLUMECOCQ, G.; LEENHARDT, D. How Do Multi-criteria Assessments Address Landscape-level Problems? A Review of Studies and Pratices. **Ecological Economics**. v.136, p.282-295, 2017.
- ANA – AGENCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas de Bacias do Atlântico Sul e Sudeste**, 2018. Disponível em: <<http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>> acesso em: 05 de julho de 2018.
- APOSTEL, L. Towards the formal study of models in the non-formal sciences. in: FREUDENTHAL, H. (ed.). **The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1961, p.1-37.
- ARAUJO, S. I; SILVA, G. H.; MUEHE, D. CARVALHO, M. T. M; MENEZES, P. M. L.; ALCÂNTARA, A. V.; VARGAS, M. A. M.; TAKAHASHI, L. T. **Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais**. Rio de Janeiro: Petrobras: Jauá, 2006. 168p.
- AWAZU, L. A.; POFFO, I. R. F. Mapeamento de áreas a serem protegidas quando da ocorrência de derrames de petróleo e derivados no Litoral Norte de São Paulo. **CETESB**: São Paulo, 1986. 40p.
- AYALEW, L.; YAMAGISHI, H.; MARUI, H.; KANNO, T. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. **Engineering Geology**. v.81, n.4, p.432-445, 2005.
- BANA e COSTA, C. A. On the Mathematical Foundations of MACBETH. In: FIGUEROA, J.; GRECCO, S.; EHRGOTT, M. (ed.). **Multiple Criteria decision analysis: state of art surveys**. Boston, USA: Springer Science, Business Media, 2005. p.409-442.
- BENEDITTI, C. A. **Vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial**: estudo de caso rio Tietê/Reservatório de Barra Bonita-SP. 2015. 155 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2015.
- BENEDITTI, C. A.; RIEDEL, P. S; MILANELLI, C. C.; CUNHA, C. M. L.; AGUILAR, R. L. Mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo em trecho do Rio Tietê. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 35, p. 220-230, 2016.
- BERRY, B. J. Approaches to Regional Analysis: a Synthesis. **Annals of the Association of American Geographers**, 54, p.2-11, 1964.

CAMARA, G. *et al.* SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computers & Graphics**. v.20, n.3, p.395-403, 1996.

CAMARGO, A. A., GALDINO, S., QUARTAROLI, C.F. Delimitação de Bacias Hidrográficas Utilizando Modelo Digital de Terreno Gerado a Partir de Mapas Topográficos e Imagens de Alta Resolução Espacial. In: Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica, 10, 2016, Campinas. **Anais...** Campinas: EMBRAPA, 2016. p.1-11.

CAMARGO, D. M.; SOUZA, N. M.; PACHECO, T. C. K. F.; ALCÂNTARA, G. C.; DOTA, E. M. Geospatial Modeling for Identifying Vulnerable Areas to Contagious Related to Lack of Basic Sanitation: The Case of Metropolitan Region of Campinas. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.69, n.3, p.561-573, 2017.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **GEOAMBIENTAL: informações ambientais especializadas**. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas-SP, 2018. Disponível em: <<https://geoambiental.campinas.sp.gov.br/>> acesso em: 05 de julho de 2018.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **Áreas verdes de Campinas**. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas-SP, 2014.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **Caracterização Urbana do Plano Diretor de Campinas**. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas-SP, 2006.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **Plano Local de Gestão da Macrozona 5**. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas-SP, 2007.

CAMPINAS. Prefeitura Municipal. **Plano Municipal de Saneamento Básico: diagnóstico, caracterização e análise crítica**. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas-SP, 2013.

CARLSTON, C. W.; LANGBEIN, W. B. Rapid approximation of drainage density and streamflow: line intersection method. **U. S. Geological Survey Water Resources Division Bulletin**. p.1-8, 1960.

CARMO, A. M. do; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R. Qualitative and Comparative Analysis of the Massif Central in Ceará Generated Through MDE: SRTM, ASTER GDEM, and TOPODATA. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.67, n. 3, p. 603-620, 2015.

CHARNES, A.; COOPER, W. W. **Management Models and Industrial Application of Linear Programming**. Wiley, New York, 1961.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999, 236p.

CHRISTOFOLETTI, A. A análise da densidade de drenagem e suas implicações geomorfológicas. **Geografia**. v.4, n.8, p.23-42, 1979.

CHORAFAS, D. N. **Systems and Simulation**, New York: Academic Press, 1965, 503p.

COELHO *et al.* Solos da Bacia do Ribeirão das Anhumas. *In:* TORRES, R. B. ADAMI, S. F.; COELHO, R. M. (Orgs.). **Atlas socioambiental da bacia do ribeirão das Anhumas**. Campinas, SP: Pontes Editores, 2014.

COSTA, D. M. **Estabelecimento de um índice de sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais, com o suporte da ferramenta MORPH**. 2014. 193 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Meio Ambiente, Universidade Paulista, Rio Claro. 2015.

COSTA, D. M. ; Riedel, P.S. ; CUNHA, C.M.L. ; ZAMBON, A. C. . Utilização do Modelo Orientado à Representação do Pensamento Humano (MORPH) no estabelecimento do Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF): uma proposta de contribuição à Classificação da Sensibilidade Ambiental ao Óleo. **Pesquisas em Geociências** (UFRGS. Impresso), v. 42, p. 25-44, 2015.

DAGNINO, R.S. **Riscos ambientais na Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 2007. 137 f.

ENSSLIN, L. Montibeller Neto G.; Noronha, S. M. **Apoio a Decisão: metodologia para estruturação de problemas e avaliação de multicritérios de alternativas**. Florianópolis: insular, 2001.

EMBRAPA – **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ª ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Rio de Janeiro. 2013. 353 p.

EMPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano. **Geoserviços WMS: Ortofotos**, de 2010/2011, do Estado de São Paulo, com 1 m de resolução espacial. 2011. Disponível em: < [www.emplasa.sp.gov.br/ProdutosCartograficos/Produto/Lista-De-Produtos-Do-Sistema-Cartografico-Metropolitano-Da-Emplasa-Disponiveis-Via-Servico](http://www.emplasa.sp.gov.br/ProdutosCartograficos/Produto/Lista-De-Produtos-Do-Sistema-Cartografico-Metropolitano-Da-Emplasa-Disponiveis-Via-Servico)> acesso em: 05 de fevereiro de 2018.

ESMAIL, B. A.; GENELETTI, D. Multi-criteria decision analysis for nature conservation: A review of 20 years of applications. **Methods in Ecology and Evolution**. v.9, p.42-53, 2017.

ESRI. **ArcGis advanced: release 10.4.1**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2016.

FERREIRA, M. N. **Sensibilidade ambiental ao óleo para rodovias: Estudo de caso de trecho da rodovia Washington Luís (SP 310)**. 2017. Dissertação - (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017.

FRANCISCO, C. E. S.; COELHO, R. M. TORRES, R. B.; ADAMI, S. F. Análise multicriterial na seleção de bacia hidrográfica para recuperação ambiental. **Ciência Florestal**. v.18, n.1, p. 1-13, 2008

FRITZSCHE, K. *et al.* **The Vulnerability Sourcebook: Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments**. Verlag nicht ermittelbar, 2014. 180 p.

FUSSEL, D. R. *et al.* **Revised inland oil spill clean-up manual**. CONCAWE. Report n°. 7/81. 1981.

GERSHON, M.; DUCKSTEIN, L. Multiobjective approaches to river basin planning. **Journal of Water Planning and Management**, 109(1), jan., p.13-28, 1983.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho-SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 81-100, 2012.

GREGORY, A, K. et al. Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making. **Integrated Environmental Assessment and Management**. v.1, n.2, p. 95-108, 2005.

GUNDLACH, E. R.; HAYES, M. O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. **Marine Technology Society Journal**. v. 12, p. 18-27. 1978.

GUNDLACH, E.; IMEVBORE, V. O; WITHERSPOON, B.; AINODION, J. Incorporating biodiversity into sensitivity maps of the Niger River delta. **International Oil Spill Conference**, p. 391-403, 2001.

GUNDLACH, E. R.; CEKIRGE, M.; ANUL, C.; ORHAN, C.; SUTHERLAND, P. Pipeline and coastal environmental sensitivity mapping for the BTC pipeline system in Turkey. **International Oil Spill Conference**, p. 1-5, 2005.

HAGGETT, P; CHORLEY, R. J. Modelos, Paradigmas e a Nova Geografia. in: CHORLEY, R. J; HAGGETT, P. (ed.). **Modelos integrados em Geografia**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos / Ed. da Universidade de São Paulo, 1974. p. 1-20.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basin: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**. v.53, n. 8, p.275-370, 1945.

HAYES, M.O.; MICHEL, J.; DAHLIN, J.A. Identifying and mapping sensitive resources for inland area planning. In: 1995 INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE. **Proceedings**, 1995 p. 343-350.

IBGE - Censo Demográfico 2010. **Resultados do universo por setores censitários**, 2011. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>> Acesso: 15 de julho de 2017.

IBGE. Campinas – **Folha topográfica (SF-23-Y-A-V-4)**. Escala: 1:50.000. Rio de Janeiro, 1974.

INSTITUTO GEOLÓGICO (IG/SMA). **Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)**. Mapa Geológico do Município de Campinas. São Paulo. 2v. (Relatórios Técnicos), 2009.

KEENY, R. L. **Value-focused thinking**: a path to creative decision-making. Cambridge: Harvard University Press, 1992.

KEMPIS, T. **Imitação de Cristo**. São Paulo: Editora Ave-Maria, 2010. 470 p.

KÖKSALAN, M.; WALLENIUS, J.; ZIONTS, S. An Early History of Multiple Criteria Decision Making. **Journal of Multi-criteria Decision Analysis**. v.20, p.87-94, 2013.

KOOPMANS, T. C. Efficient Allocation of Resources. **Econometrica**, vol. 19, p. 455- 465, 1951.

KUHN, H.; TUCKER, A. Nonlinear Programming. **Proc Second Berkeley Symp on Math Statist and Prob**, p. 481–492, 1951.

LEME, A. M. **Proposta metodológica para elaboração de Cartas SÃO terrestre: estudo de caso de trecho da rodovia Wilson Finardi**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2012. 183 f.

LIBAUT, A. Os quatro níveis da pesquisa geográfica, in: **métodos em Questão**, 1, IGEOG-USP, São Paulo, 1971.

MALCZEWSKI, J. GIS-based decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**. v.20, n.7, p. 703-726. 2006.

MALDONADO, S. R. C.; ISHIHATA, L.; POLETTE, M. Vulnerabilidade dos ambientes costeiros do município de Ubatuba ao impacto de derramamentos de óleo (Litoral Norte do Estado de São Paulo). São Paulo: **CETESB**. 1987. 57p.

MALINOWSKI, A. **Aplicação de metodologia para estruturação de diretrizes para o planejamento do reuso de água no meio urbano**. (Dissertação de Mestrado). Curitiba: UFPR, 2006. 242p. Disponível em: <[https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/113-Adriana\\_Malinowski.pdf](https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/113-Adriana_Malinowski.pdf)>. Acesso em: 18 nov. 2017.

MARK, D. M. Line intersection method for estimating drainage density. **Geology**. v.2, n.5, p.235-237, 1974.

MARKOWITZ, H. M. Portfolio selection. **The Journal of Finance**, v. 7, n. 1, p. 77-91, 1952.

MARQUES, M. L.; SILVA, M. C.; CAMARGO, D. M. Spatial analysis of socio-environmental vulnerability in Campinas, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Cartografia**. v.69, n.9, p.1711-1723, 2017.

MARTINS, P. T. A. **Carta de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo em rodovias: proposta aplicada a Estrada dos Tamoios (SP – 099)**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2012. 172 f.

MARTINS, P. T. A.; RIEDEL, P. S.; MILANELLI, J. C. C. Carta de sensibilidade ambiental ao óleo: origem, evolução e tendências. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v.35, n. 2, p. 163-175 dezembro, 2013.

MARTINS, P.T.A.; RIEDEL, P. S.; MILANELLI, J.C.; STURARO, J. R. Carta da sensibilidade ambiental ao derramamento de óleo em rodovias: aplicação piloto na estrada dos

Tamoios (SP-099), estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Cartografia** (Impresso), v. 66, p. 59-74, 2014.

MATTOS, M. B. C. Application of oil spill environmental sensitivity analyses to Brazilian road networks. **International Oil Spill Conference**, p. 169-175, 2008.

McCOY, A. Rapid measurement of drainage density. **Geological Society of America Bulletin**. v.82, n.3, p.757-762, 1971.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: Modelos e Aplicações ambientais** (ed.). UERJ/EMBRAPA, 2007. 593.

MENDES, R. F.; MINNITI, V.; LOPES, C. F.; MILANELI, J.; TORRES, C.; YOGUI, R.; RODRIGUES, G.; MARIZ, E. MARA – Elaboração de metodologias para análise dos riscos ambientais. In: **Rio Pipeline Conference & Exposition**, 2005, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2005.

MENDOZA-CANTÚ, A.; HEYDRICH, S.C.; CERVANTES, I.S.; OROZCO, O.O. Identification of environmentally vulnerable areas of priority of prevention and management of pipeline crude oil spills. **Journal of Environmental Management**. v. 92 , 2011. p.1706-1713.

MICHEL, J.; HAYES, M. O.; BROWN, P. J. Application of an oil spill vulnerability index to the shoreline of lower Cook Inlet, Alaska. **Environment geology**, v. 2, p. 107-117, 1978.

MICHEL, J; DAHLIN, J. **Guidelines for Developing Digital Environmental Sensitivity Index Atlas Databases. Hazardous Materials Response and Assessment Division - NOAA**. 1993, 192p.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos. Programa de Gerenciamento Ambiental Territorial. Projeto de Gestão Integrada dos Ambientes Costeiro e Marinho. **Especificações e Normas Técnicas para a Elaboração de Cartas de Sensibilidade Ambiental para derramamentos de óleo**. Brasília, 2004.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. Rio de Janeiro: MMA, 2002, 22p.

OLIVEIRA, V. A. de (Coord.). **Manual técnico de pedologia**. 2.ed. Rio de Janeiro: IBGE, Coordenação de recursos naturais e estudos ambientais, 2007. 300p. (Manuais técnicos em Geociências, n. 4).

OSBORNE, M.; RUBINSTEIN, A. **A Course of Game Theory**. New York: MIT Press, Cambridge, 1994.

PANIZZA, A. de C.; FONSECA, F. P. Técnicas de interpretação visual de imagens. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, nº 30, pp. 30 - 43, 2011.

RIBEIRO, D. F. **Sensibilidade ambiental ao óleo para rodovias: Estudo de caso de trecho da rodovia Washington Luís (SP 310)**. 2017. 120 f. Dissertação - (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2017. Disponível em:<<http://hdl.handle.net/11449/150890>>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

ROSS, J. L. S. Análise e sínteses na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. **Geografia**, Rio Claro, v.9, n.1, p.65-75, 1995.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: Ambiente e Planejamento**. 9. ed. São Paulo: Contexto, 2012.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: DG/FFLCH/USP, IPT, Fapesp, 1997. 2 mapas. Escala 1:500.000. 2 v.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of mathematical psychology**, v. 15, n. 3, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. **Analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: the Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v.48, p. 9-26, 1990.

SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

SANTOS, S. M. **Proposta de elaboração de carta de sensibilidade ambiental aplicada a postos de combustíveis em Rio Claro-SP**. 2008. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2008. 50p.

SMA - COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL, INSTITUTO GEOLÓGICO, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO **Mapeamento do Uso e Cobertura do Solo da UGRHI 5 (PCJ)**. Escala 1:25.000, 2013.

TORRES, R. B. ADAMI, S. F.; COELHO, R. M. (Orgs.). **Atlas socioambiental da bacia do ribeirão das Anhumas**. Campinas, SP: Pontes Editores, 2014.

STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p.1117-1142, 1952.

SILVA, R. O. **Mapeamento de Vulnerabilidade Ambiental para o Gerenciamento de Riscos no Transporte Ferroviário de Produtos Perigosos – uma Proposta Metodológica**. 2010. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2010. 245p.

VEDOVELLO, R.; MATTOS, J. T. de. A utilização de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) como base para definição de Unidades Geotécnicas: Uma abordagem a partir de sensoriamento remoto. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA**, 3., Florianópolis, 1998. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 1998, CD-ROM.



VEDOVELLO, R. **Zoneamento geotécnico, por sensoriamento remoto, para estudos de planejamento do meio-físico – aplicação em expansão urbana.** 1993. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993, 90p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245p.

Von NEUMANN, J; MORGENTERN, O. **Game Theory and Economic Behavior.** New Jersey: Princeton Univ. Press, 1944.

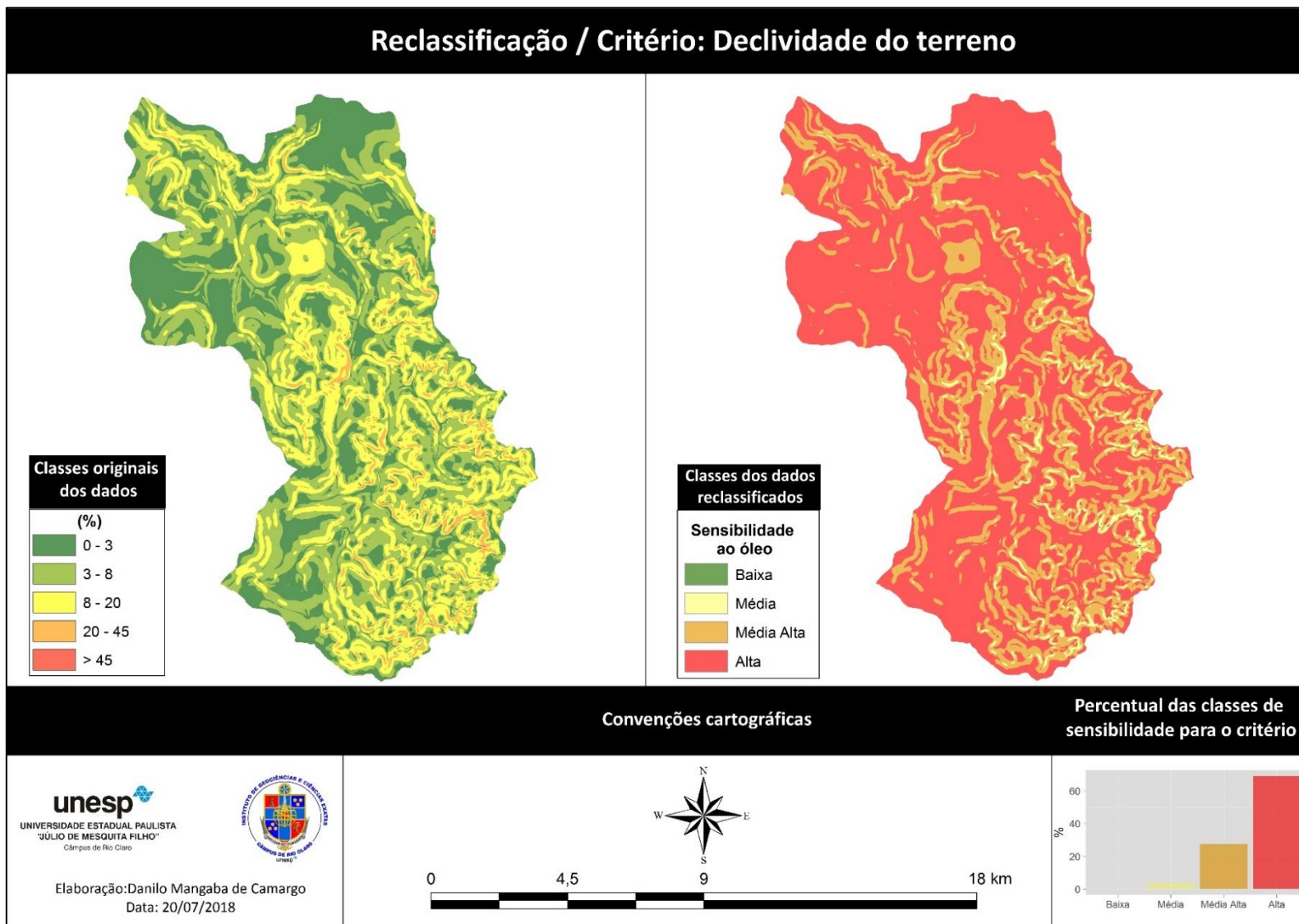
XAVIER-DA-SILVA, J. Geoprocessamento em Estudos Ambientais: Uma perspectiva Sistêmica. in: MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: Modelos e Aplicações ambientais** (ed.). UERJ/EMBRAPA, 2007. p.23-53.

YOSHINAGA, S.; FERNANDES, A. J.; NOGUEIRA, S. A. A.; HASSUDA, S.; PIRES NETO, A. G. Subsídios ao planejamento territorial de Campinas: a aplicação da abordagem de tipos de terreno. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, vol. 16, n. esp., 1995, p. 71-75.

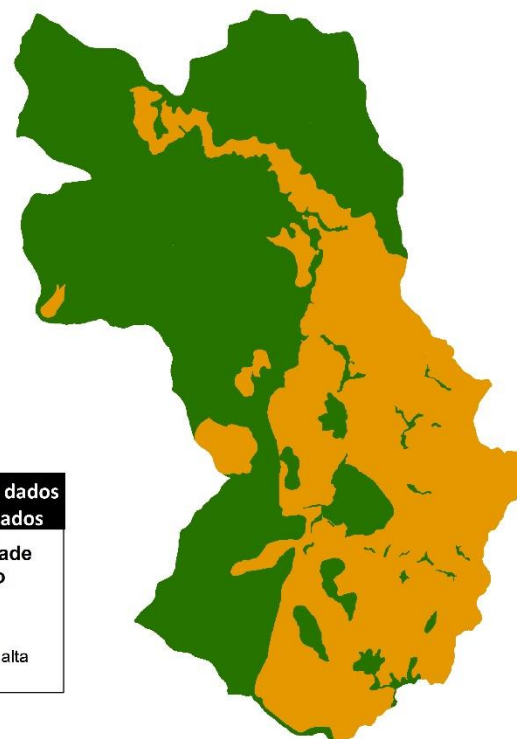
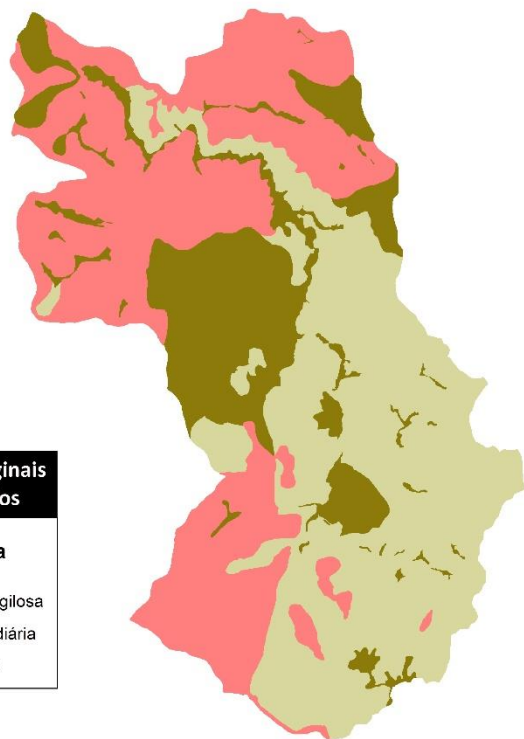
ZELNY, M. **Multiple criteria decision making.** McGraw-Hill Book Company. New York. 1982, 563 p.

ZUFFO, A.C.; REIS, L.F.R.; SANTOS, R.F.; CHAUDRY, F.H. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n.1, p. 81-102, 2002.

## APÊNDICE A – MAPAS DE CADA CRITÉRIO RECLASSIFICADOS POR SUA SENSIBILIDADE



## Reclassificação / Critério: Textura dos solos



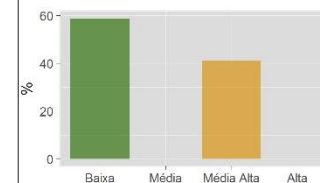
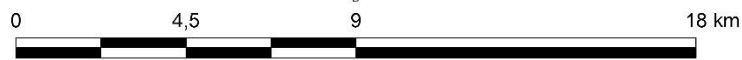
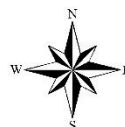
**Convenções cartográficas**

**Percentual das classes de sensibilidade para o critério**

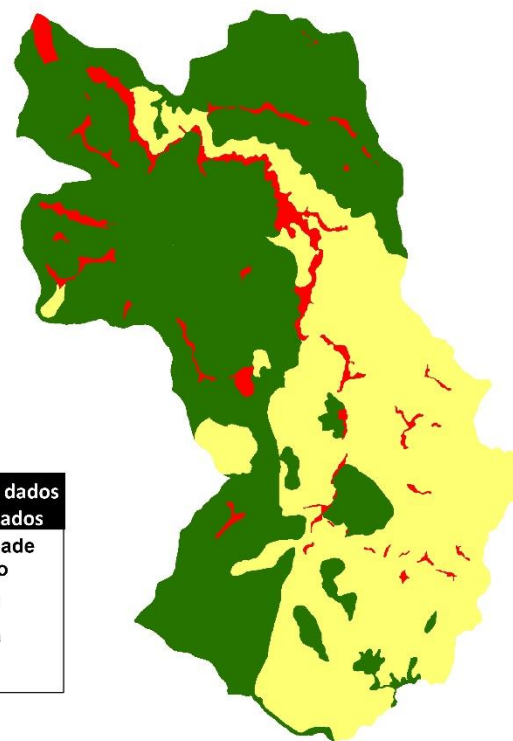
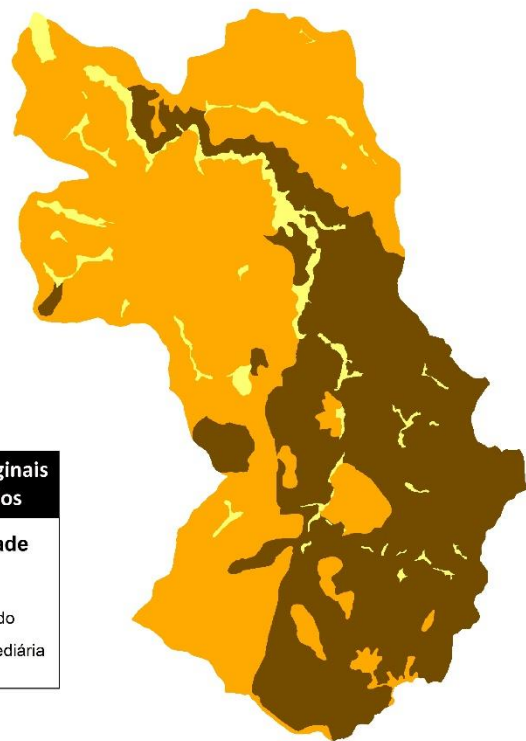
**unesp**  
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Câmpus de Rio Claro



Elaboração: Danilo Mangaba de Camargo  
Data: 20/07/2018



## Reclassificação / Critério: Profundidade dos solos

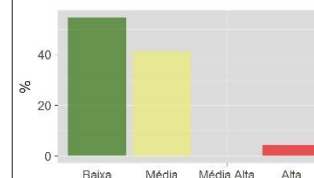
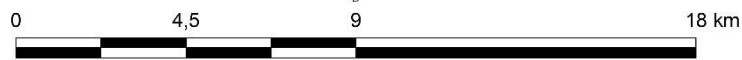
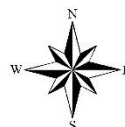


**Convenções cartográficas**

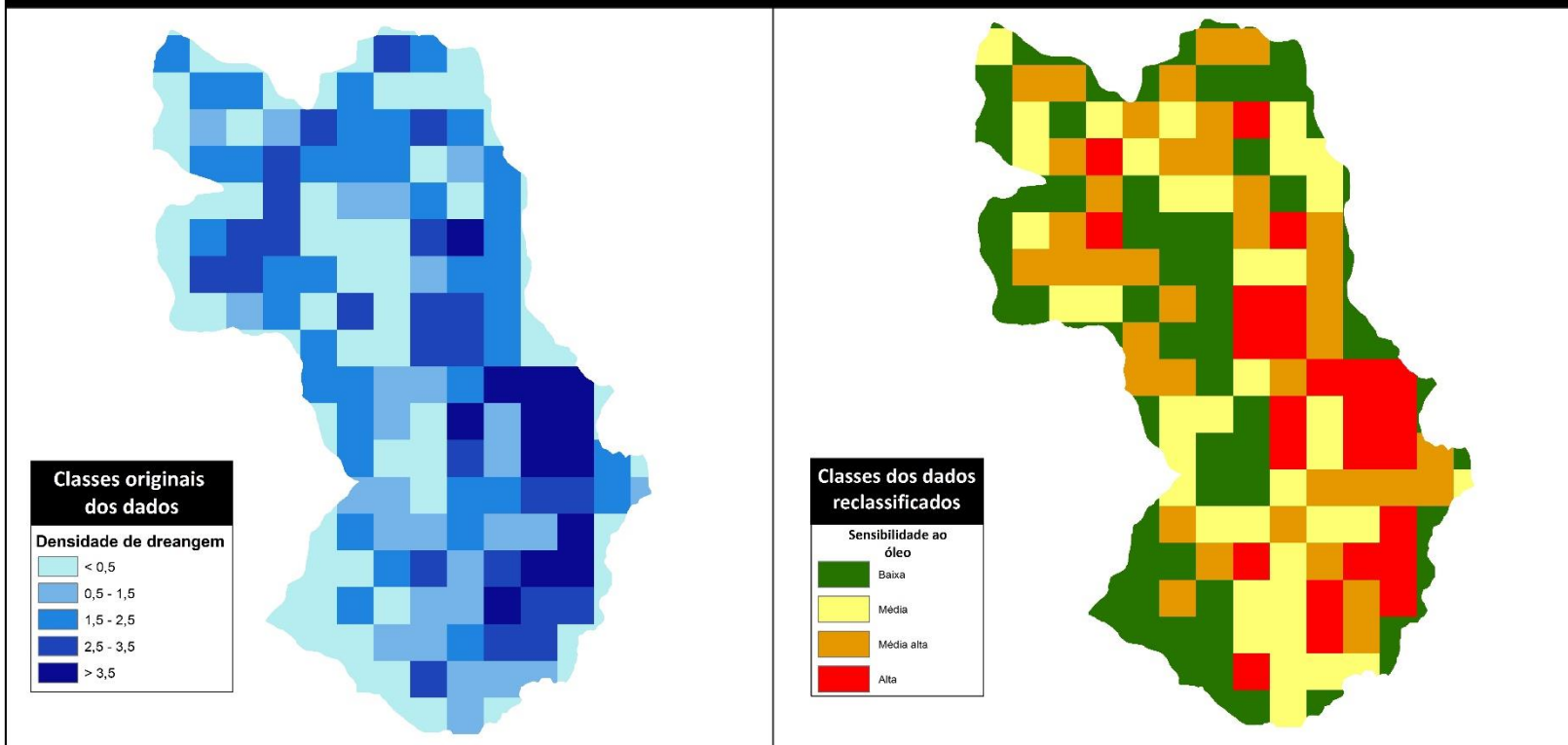
**Percentual das classes de sensibilidade para o critério**



Elaboração: Danilo Mangaba de Camargo  
Data: 20/07/2018



## Reclassificação / Critério: Densidade de drenagem



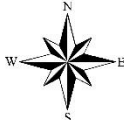
### Convenções cartográficas


### Percentual das classes de sensibilidade para o critério

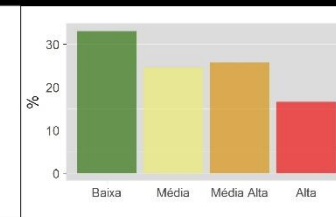


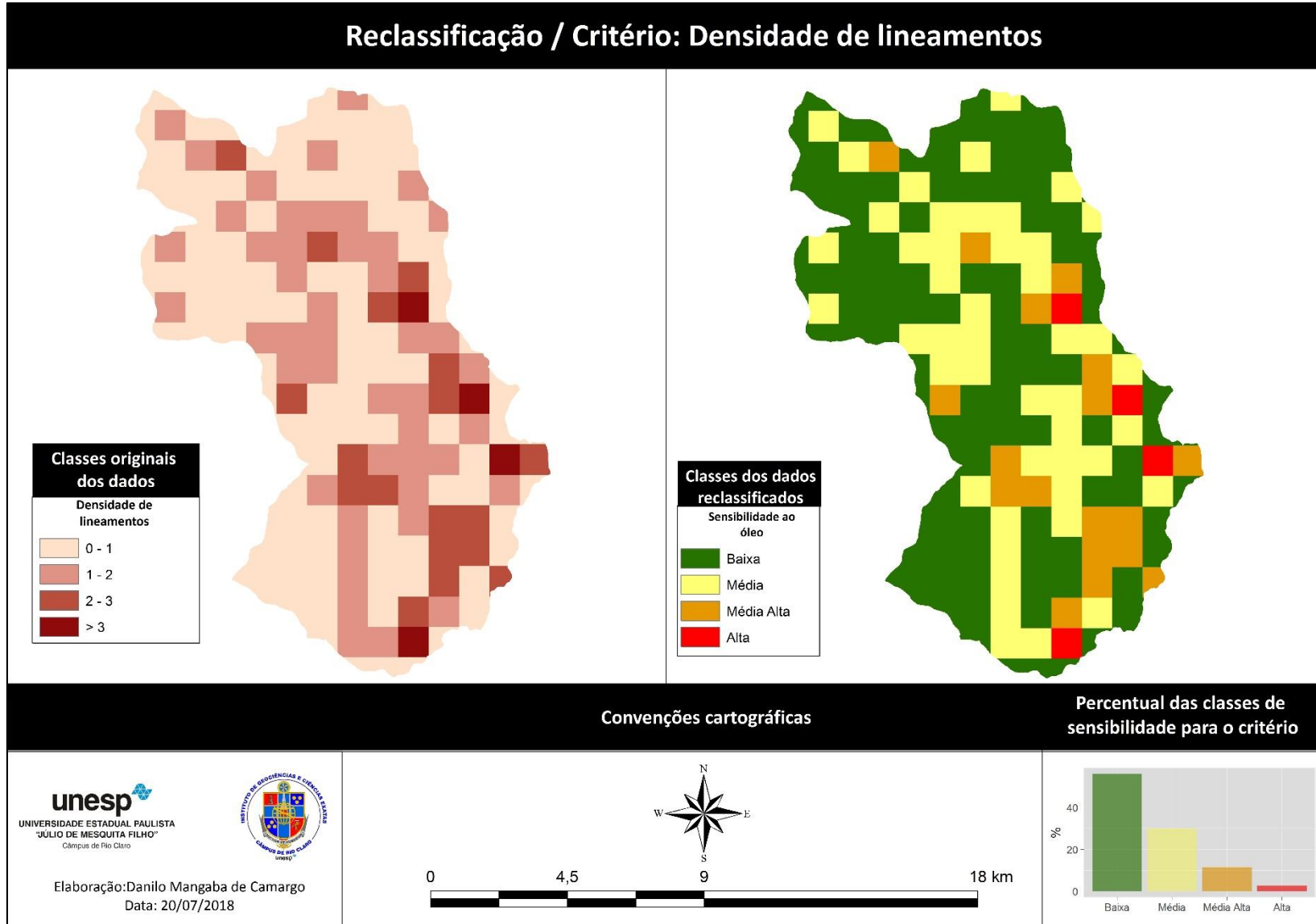

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
 "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
 Câmpus de Rio Claro

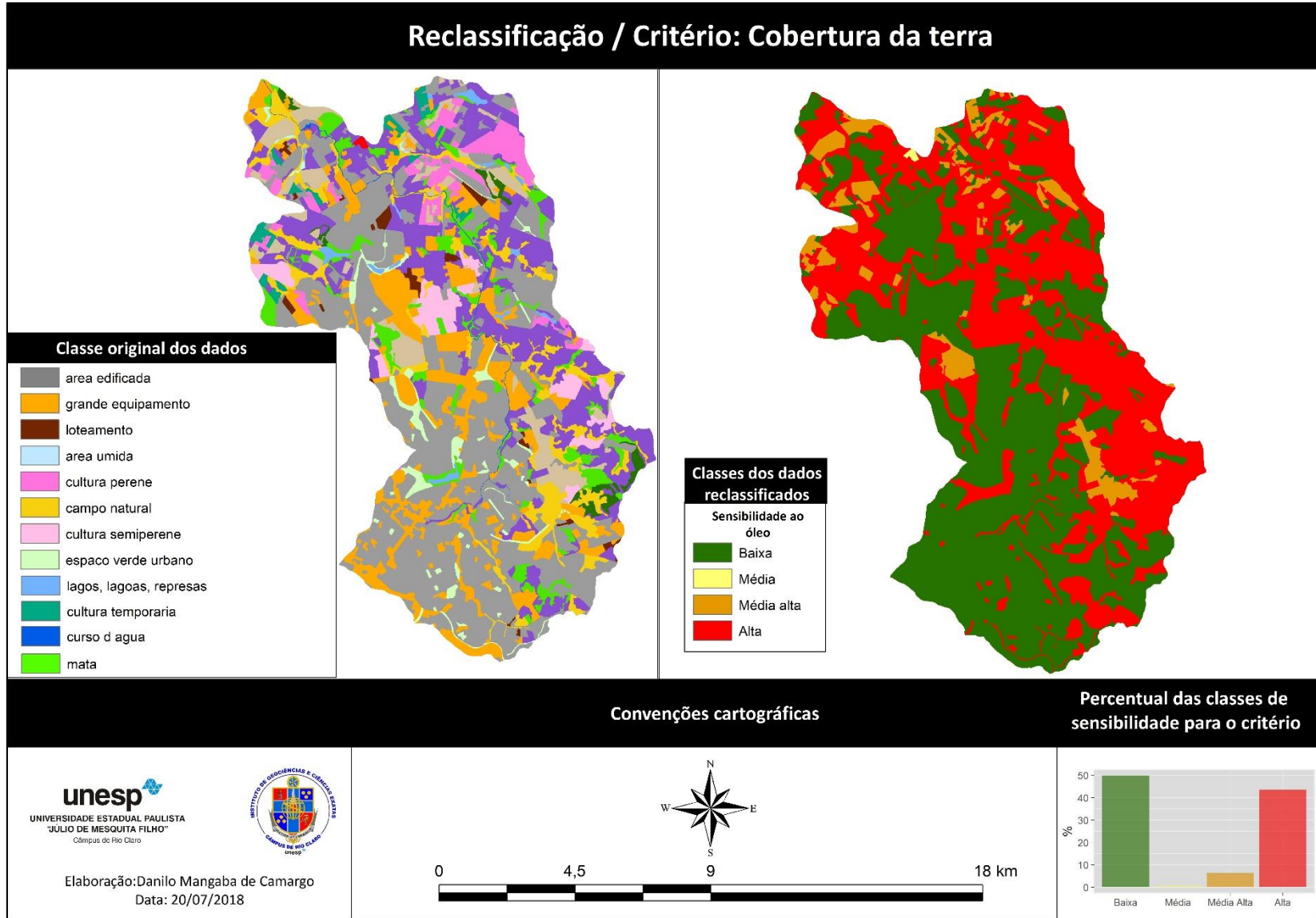
Elaboração: Danilo Mangaba de Camargo  
 Data: 20/07/2018



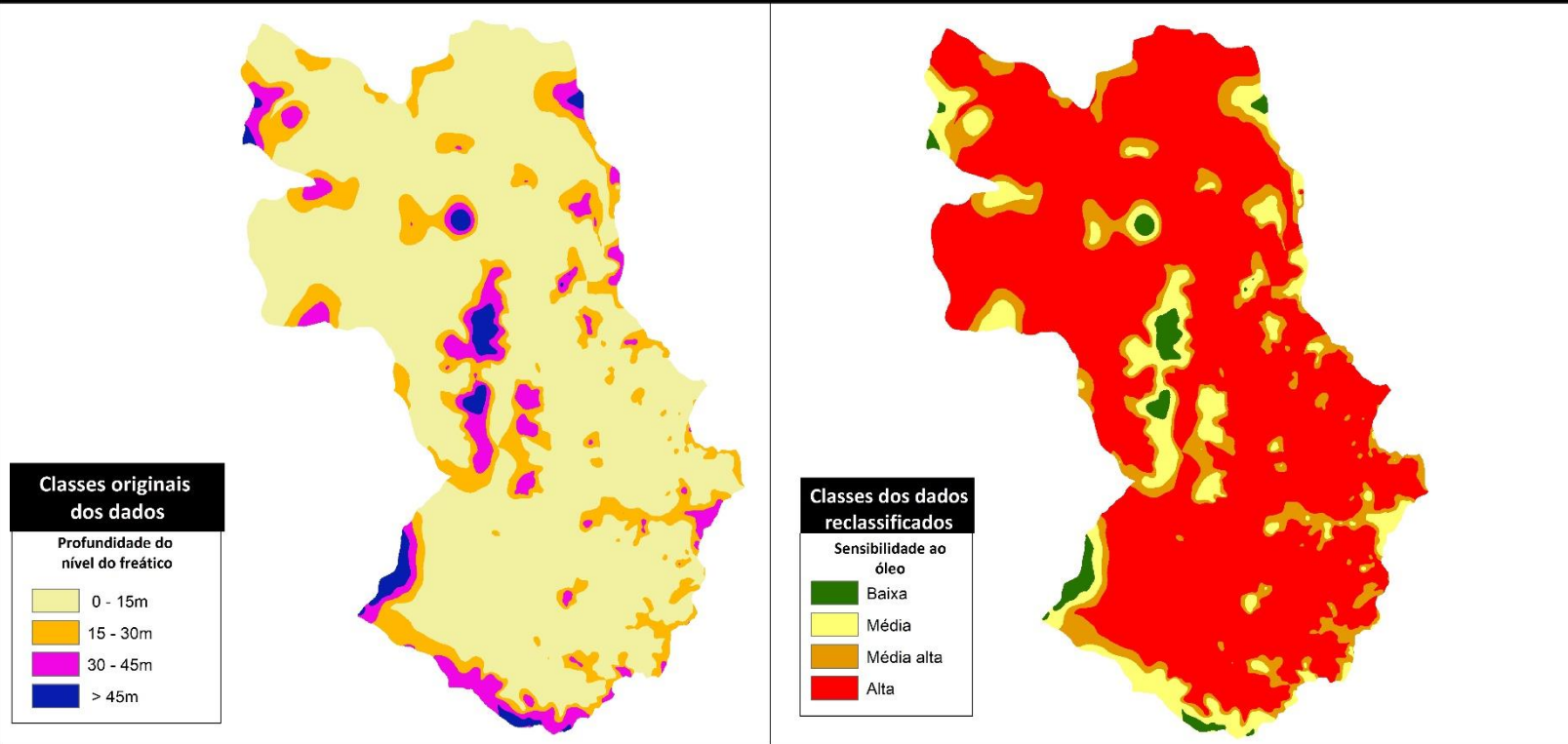








## Reclassificação / Critério: Profundidade do nível freático

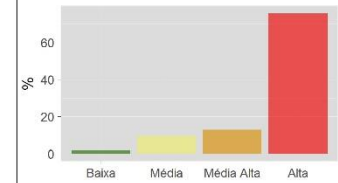


### Convenções cartográficas

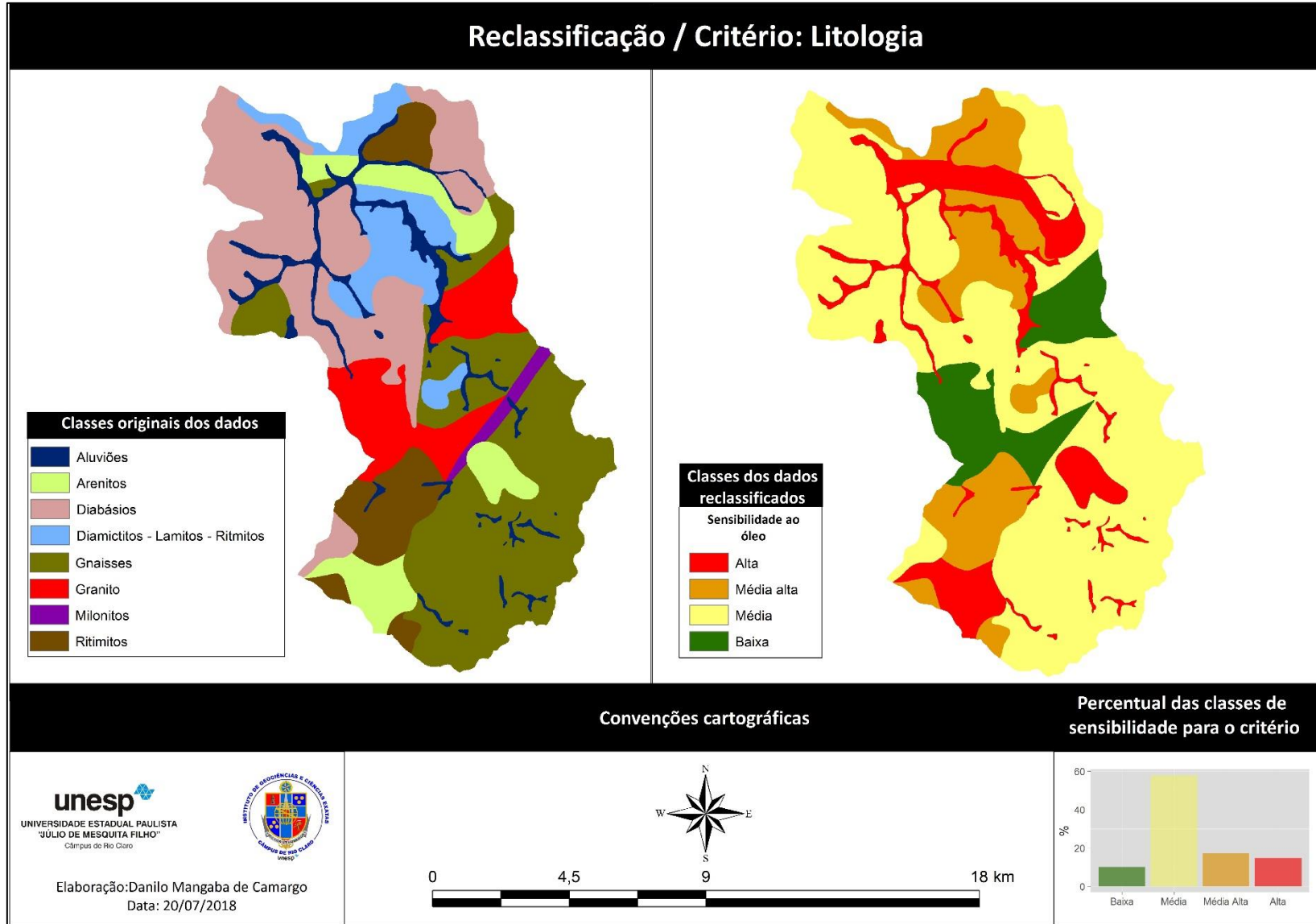
### Percentual das classes de sensibilidade para o critério



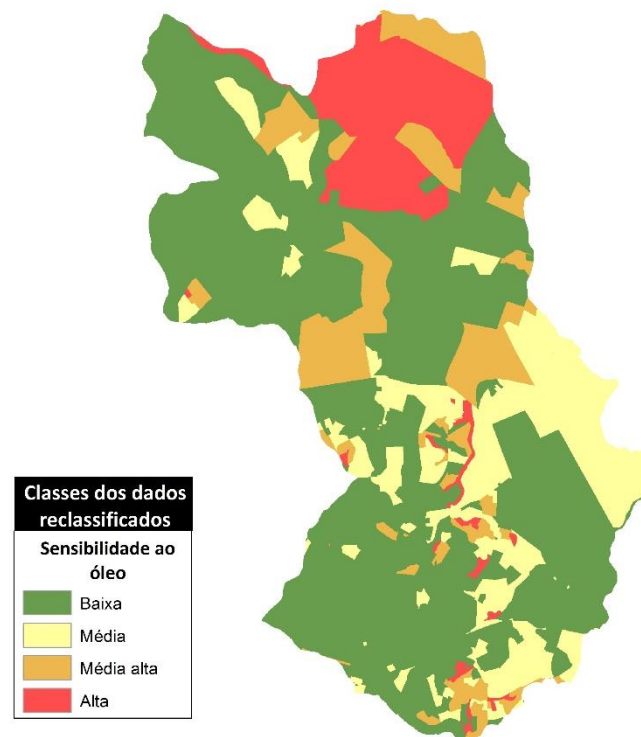
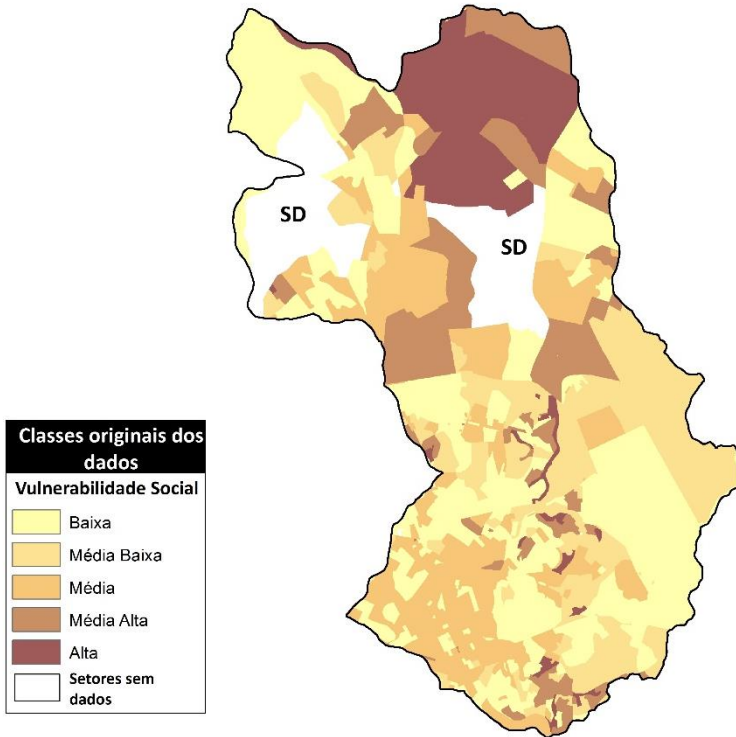
Elaboração: Danilo Mangaba de Camargo  
Data: 20/07/2018







## Reclassificação / Critério: Vulnerabilidade social



### Convenções cartográficas

### Percentual das classes de sensibilidade para o critério

