



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**SENSIBILIDADE AMBIENTAL A HIDROCARBONETOS
PARA RODOVIAS - ESTUDO DE CASO EM TRECHO DA
RODOVIA ANHANGUERA (SP-330)**

MAYARA NICOLAU FERREIRA

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Paulina Setti Riedel

Rio Claro, agosto de 2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

MAYARA NICOLAU FERREIRA

SENSIBILIDADE AMBIENTAL A HIDROCARBONETOS PARA
RODOVIAS – ESTUDO DE CASO EM TRECHO DA RODOVIA
ANHANGUERA (SP-330)

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

Orientador: Prof.^a Dr.^a Paulina Setti Riedel

Rio Claro - SP

2017

550 Ferreira, Mayara Nicolau
F383s Sensibilidade ambiental a hidrocarbonetos para rodovias:
estudo de caso em trecho da Rodovia Anhanguera (SP-330) /
Mayara Nicolau Ferreira. - Rio Claro, 2017
130 f. : il., figs., tabs., quadros, fots., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientadora: Paulina Setti Riedel

1. Geologia. 2. Sensibilidade ambiental. 3.
Compartimentação fisiográfica. 4. Geotecnologias. 5.
Hidrocarbonetos. I. Título.

MAYARA NICOLAU FERREIRA

SENSIBILIDADE AMBIENTAL A HIDROCARBONETOS PARA
RODOVIAS – ESTUDO DE CASO EM TRECHO DA RODOVIA
ANHANGUERA (SP-330)

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

Comissão Examinadora

Prof.^a Dr.^a Paulina Setti Riedel

Prof.^a Dr.^a Mara Lúcia Marques

Dr.^a Lucilia do Carmo Giordano

Rio Claro, SP 26 de outubro de 2017

Dedico este trabalho à memória de minha
amada mãe Maria Demétria Nicolau Ferreira.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo quanto tem feito. Ao meus amados pais Marcos Antonio Silva Ferreira e Maria Demétria Nicolau Ferreira (in memoriam) pela dedicação, carinho, amor e esforço que fizeram para eu chegar até aqui, apesar de todas as dificuldades passadas. Papai e mamãe eu não seria nada sem vocês, os amo muito!!! Mamãe, tudo o que queria era te abraçar e agradecer por tudo, pois a senhora nunca me deixou desistir, saudades imensa !!!

Agradeço aos meus queridos irmãos Miriã Nicolau Ferreira e Marcos Antonio Silva Ferreira Júnior pela força nos momentos difíceis que passamos, pelo carinho e também pelo esforço que fizeram para eu estar aqui hoje, amo muito vocês!!! Contem sempre comigo.

À professora doutora Paulina Setti Riedel por ter me acolhido e se preocupado comigo no pior momento da minha vida, pela sua empatia e carinho, por sua paciência, por suas broncas necessárias e por toda a contribuição a minha pesquisa. Muito obrigada por tudo Paulina, na verdade nem tenho como agradecer, tenho um carinho imenso pela senhora, sei que a vida também não tem sido fácil para você, mas tenho certeza que a senhora irá superar tudo e será muito feliz, pois a senhora merece.

Agradeço ao Alexandre Magnum Leme por toda ajuda que me deu, e foram muitas, queria dizer que você é o máximo, uma pessoa maravilhosa, dedicada e supercompetente. Desejo muito sucesso em sua vida, pois você merece amigo, merece cada fruto que você colher, conheço pouquíssimas pessoas merecedoras de algo nessa vida e você é uma delas. Parabéns pela pessoa que é e obrigada por tudo!!

Agradeço a todos os meus familiares que direta ou indiretamente me ajudaram nesses anos, principalmente quando perdi minha mãe. Amo muito vocês e agradeço a Deus a família maravilhosa que ele me deu. Não citarei nomes porque é muita gente e também para não ser injusta com ninguém.

Agradeço ao meu amigo e companheiro de anos Fábio Lourenço Alberguini, pela imensa paciência que teve toda vez que chorei, e não foram poucas, pelo carinho, pelo amor, pelo companheirismo, por ter segurado a minha mão e não ter deixado eu desistir, pelos puxões de orelha, pelo incentivo e por me ajudar a acreditar que eu sou capaz quando nem eu mesma acreditava em mim. Obrigada por tudo amor!! Te amo muito!!! Espero ter você ao meu lado pela eternidade.

Às minhas amigas que sempre me ajudaram e sempre tiveram ao meu lado nesses últimos anos, pela paciência, pelo carinho e pelo companheirismo. Obrigada sempre Maria Anatania Pucci, Jaqueline Porto e Juliana Sousa amo muito vocês e espero sempre ter vocês ao meu lado. Ao meu amigo Rafael Fabrício de Oliveira pelo carinho e pelas considerações na minha dissertação, muito obrigada pela ajuda e por ter dispensado seu tempo em me ajudar. Saudadess Ituuuu...!!!

Agradeço também aos meninos da Rep Eskina por ter dividido a casa comigo por alguns meses e ter me aguentado por esse tempo lá, pelos “rolês” culinários e por todo carinho e ajuda sempre que precisei. Sentirei muitas saudades de vocês.

Agradeço aos professores e funcionários da Unesp por toda ajuda e pelo carinho, principalmente ao professor José Eduardo Zaine, pela ajuda no trabalho de campo e dedicação como professor nas aulas da pós-graduação. A técnica Darlene de Cássia Ambrust, por todo carinho, pelas risadas, pelas boas conversas, pela companhia no laboratório e por toda ajuda que me deu sempre que solicitada. Você é maravilhosa Darlene, bom descanso e boa aposentadoria mais que merecida, tudo de bom. Sentirei muita saudade!

Agradeço ao CNPQ pela bolsa durante todo o período do mestrado, sem essa bolsa jamais teria conseguido fazer o mestrado.

À toda população que contribui com seus impostos para a existência dessa instituição. Graças a vocês pude me graduar e pós graduar em uma universidade pública, uma das melhores do Brasil.

“Só sei que nada sei, e o fato de saber isso, me coloca em vantagem sobre aqueles que acham que sabem alguma coisa” (SÓCRATES).

RESUMO

Considerando o crescente número de acidentes com produtos perigosos em rodovias e que este é o modal mais utilizado para o transporte de cargas no Brasil, principalmente hidrocarbonetos e derivados de petróleo. Bem como, os insipientes estudos de índices de sensibilidade ambiental para ambientes terrestres. E que os mapas de sensibilidade são importantes ferramentas técnico-gerenciais utilizadas na tomada de decisões emergenciais em caso de combate a derrames de óleo. Além de fornecer informações para o planejamento de contenção e limpeza para mitigar os impactos ambientais, auxiliar a identificação de locais sensíveis antes que ocorra o acidente, de modo que as estratégias de proteção e contenção possam ser organizadas antecipadamente, objetiva-se a confecção de um índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias, utilizando como área de estudo um trecho da Rodovia Anhanguera (SP-330), segunda maior em números de acidentes com produtos perigosos no estado de São Paulo, e sua respectiva carta de sensibilidade ambiental. Para tanto, procede-se fazendo uso de geotecnologias para confecção de mapas básicos necessários a pesquisa; da compartimentação fisiográfica para dividir a área de estudo em zonas homólogas; do trabalho de campo para corroborar a compartimentação; da escolha dos cinco parâmetros e seus respectivos pesos, que compõem o índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias; e conseqüentemente, a confecção da carta de sensibilidade ambiental. Desse modo, observa-se que no trecho foram encontrados os índices 5, 7 e 8, sendo que o índice 7 é predominante em seis das oito Unidade Básicas de Compartimentação, o que permite concluir que a área estudada tem média-alta sensibilidade ambiental, levando em consideração que o índice vai de 1 a 10 A. Além de colaborar com o desenvolvimento de uma adaptação do método das cartas SAO utilizadas em ambientes costeiros e fluviais para um índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias. Por fim, conclui-se que o mapeamento de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para o modal rodoviário apresenta-se viável a partir da aplicação de um método adequado ao ambiente em que está inserido e o método da compartimentação fisiográfica foi extremamente apropriado e eficaz para os ambientes terrestres.

Palavras-chave: Sensibilidade ambiental. Compartimentação fisiográfica.

Geotecnologias. Hidrocarbonetos.

ABSTRACT

Considering the increasing number of accidents with hazardous products on highways and that this is the most used modal for the transport of cargoes in Brazil, mainly hydrocarbons and petroleum products. As well as, the insipient studies of environmental sensitivity indexes for terrestrial environments. And that sensitivity maps are important technical and managerial tools used in making emergency decisions in case of combating oil spills. In addition to providing information for containment and cleanup planning to mitigate environmental impacts, assisting the identification of sensitive locations before the accident occurs, so that protection and containment strategies can be organized in advance, it is aimed to create an Index of environmental sensitivity to hydrocarbons for highways, using as an area of study a section of the Anhanguera Highway (SP-330), second largest in numbers of accidents with dangerous products in the state of São Paulo, and its respective letter of environmental sensitivity. To do so, we make use of geotechnologies to create basic maps necessary for the research; the physiographic compartmentalization to divide the study area into homologous zones; the fieldwork to corroborate the compartmentalization; the choice of the five parameters and their respective weights, which make up the environmental sensitivity index for hydrocarbons for highways; and consequently, the preparation of the environmental sensitivity letter. Therefore, it can be observed that the indexes 5, 7 and 8 were found in this section, with index 7 being predominant in six of the eight Basic Compartmental Units, which allows to conclude that the studied area has medium-high environmental sensitivity, taking into account that the index ranges from 1 to 10 A. In addition to collaborating with the development of an adaptation of the SAO letters used in coastal and fluvial environments to an environmental sensitivity index to hydrocarbons for highways. Finally, it is concluded that the mapping of environmental sensitivity to hydrocarbons for the road modal is feasible from the application of a method appropriate to the environment in which it is inserted and the physiographic compartmentalization method was extremely appropriate and effective for the land environments.

Keywords: Environmental sensitivity. Physiographic compartmentalization. Geotechnology. Hydrocarbons.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Folhas topográficas utilizadas	55
Quadro 2 - Parâmetros, classes e pesos que compõem o Índice de Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias (ISAHR)	73
Quadro 3 - Adaptação do ISA (NOAA/MMA, 2004) para o Índice de Sensibilidade Ambiental aos Hidrocarbonetos para Rodovias	74
Quadro 4 – Características e interpretação fotogeológica das UBCs.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento do NAPL em diferentes fases presentes na subsuperfície	27
Figura 2 - Distribuição de LNAPL em subsuperfície	29
Figura 3 - Distribuição de DNAPL em subsuperfície	30
Figura 4 - Análise e interpretação fotogeológica dos elementos de drenagem e relevo	35
Figura 5 - Análise e interpretação fotogeológica das formas e características do relevo	35
Figura 6 - Localização da área de estudo	37
Figura 7 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região da área de estudo ..	38
Figura 8 - Unidades litoestratigráficas da área de estudo	41
Figura 9 - Mapa Geomorfológico da área de estudo	43
Figura 10 - Mapa Pedológico da área de estudo	46
Figura 11 - Mapa de drenagem da área de estudo	48
Figura 12 - Mapa Florestal dos municípios da área de estudo	51
Figura 13 - Etapas de trabalho	57
Figura 14 - Mapa de Pontos de campo	66
Figura 15 - Mapa de Declividade.....	76
Figura 16 - Mapa Hipsométrico	78
Figura 17 - Mapa de fraturas da área de estudo	80
Figura 18 - Diagrama de rosetas das fraturas em frequência relativa	81
Figura 19 - Mapa do nível do lençol freático da área de estudo	84
Figura 20 - Mapa das Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) da área de estudo	88
Figura 21 - Características da Unidade Tatuí/Argissolo	90
Figura 22 - Características da Unidade Tatuí/Latossolo.....	92
Figura 23 - Características da Unidade Serra Geral/Latossolo	94
Figura 24 - Características da Unidade Itararé/Latossolo/Argissolo	96
Figura 25 - Características da Unidade Itararé/Latossolo	98
Figura 26 - Características da Unidade Serra Geral/Argissolo	100
Figura 27 - Características da Unidade Itararé/Argissolo	102
Figura 28 - Características da Unidade Itararé/Neossolo	104

Figura 29 – Sensibilidades parciais e Parâmetros do Índice de Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias	106
Figura 30 - Carta de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para Rodovias - trecho da Rod. Anhanguera (SP-330)	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados socioeconômicos gerais	52
Tabela 2 - Pontos de campo e suas coordenadas	65

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	18
1.1.1 <i>Objetivos específicos</i>	19
2 ESTADO DA ARTE	20
2.1 Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA)	20
2.2 Hidrocarbonetos em Ambientes Terrestres	24
2.3 Compartimentação Fisiográfica	30
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
3.1 Meio Físico	38
3.1.1 <i>Geologia Regional</i>	38
3.1.2 <i>Geomorfologia</i>	42
3.1.3 <i>Pedologia</i>	44
3.1.4 <i>Clima</i>	47
3.1.5 <i>Hidrografia</i>	47
3.1.6 <i>Hidrogeologia</i>	49
3.2 Meio Biótico	49
3.2.1 <i>Flora</i>	49
3.3 Meio Socioeconômico	52
3.3.1 <i>Uso e Ocupação</i>	52
3.3.2 <i>População e PIB</i>	52
4 MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1 Materiais	54
4.1.1 <i>Revisão e Levantamento Bibliográfico e Cartográfico</i>	54
4.1.2 <i>Base de Dados</i>	54
4.2 Métodos	56
4.2.1 <i>Etapa 1: Levantamento bibliográfico</i>	58
4.2.2 <i>Etapa 2: Escolha da área de estudo</i>	58
4.2.3 <i>Etapa 3: Elaboração da Base de Dados</i>	59
4.2.3.1 <u>Seleção da escala adequada</u>	<u>59</u>
4.2.3.2 <u>Levantamento cartográfico</u>	<u>59</u>
4.2.3.3 <u>Elaboração dos mapas básicos</u>	<u>60</u>
4.2.3.3.1 <i>Modelo Numérico de Terreno (MNT)</i>	60

4.2.3.3.2 Mapa de Declividade	60
4.2.3.3.3 Mapa Hipsométrico.....	60
4.2.3.3.4 Mapa de Fraturas	60
4.2.3.3.5 Mapa da profundidade do lençol freático.....	61
4.2.4 <i>Etapa 4: Compartimentação Fisiográfica.....</i>	62
4.2.4.1 <u>Trabalho de Campo.....</u>	64
4.2.5 <i>Etapa 5: Análise e elaboração do Índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias</i>	67
<u>4.2.5.1 Declividade</u>	68
<u>4.2.5.2 Textura do perfil de alteração.....</u>	68
<u>4.2.5.3 Espessura do perfil de alteração</u>	70
<u>4.2.5.4 Densidade de Drenagem.....</u>	70
<u>4.2.5.5 Profundidade do lençol freático</u>	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.1 Base de dados	75
5.2 Mapas de declividade e hipsométrico	75
5.3 Mapa de Fraturas.....	79
5.4 Mapa de profundidade do lençol freático.....	82
5.5 Compartimentação fisiográfica	85
5.5.6 <i>Caracterização dos compartimentos</i>	89
<u>5.5.6.1 UBC 1: Tatuí Argissolo</u>	89
<u>5.5.6.2 UBC 2: Tatuí Latossolo</u>	91
<u>5.5.6.3 UBC 3: Serra Geral Latossolo</u>	93
<u>5.5.6.4 UBC 4: Itararé Latossolo/Argissolo</u>	95
<u>5.5.6.5 UBC 5: Itararé Latossolo</u>	97
<u>5.5.6.6 UBC 6: Serra Geral Argissolo.....</u>	99
<u>5.5.6.7 UBC 7: Itararé Argissolo.....</u>	101
<u>5.5.6.8 UBC 8: Itararé Neossolo.....</u>	103
5.6 Índice de Sensibilidade Ambiental aos Hidrocarbonetos para Rodovias (ISAHR).....	105
5.6.1 <i>Declividade.....</i>	107
5.6.2 <i>Textura do perfil de alteração.....</i>	107
5.6.3 <i>Espessura do perfil de alteração</i>	108
5.6.4 <i>Profundidade do lençol freático</i>	109

5.6.5 Densidade de drenagem	110
5.7 Carta de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias	111
5.7.1 Índice 5.....	113
5.7.2 Índice 7.....	113
5.7.3 Índice 8.....	113
6 CONCLUSÕES	115
7 REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas em geral pode ser feito de diversas formas: rodoviário, ferroviário, aquaviário, dutoviário e aéreo. No Brasil, assim como em vários países europeus, o principal modal empregado para esse tipo de transporte é o rodoviário (TEIXEIRA, 2005).

Por ser o meio mais utilizado e com maior importância para o transporte de cargas, a malha rodoviária brasileira possui um total de 1.553.082,3 Km de extensão, entre rodovias federais, estaduais e municipais, pavimentadas ou não (CNT, 2016). Com essa extensão em rodovias o Brasil é o 4º país com maior malha rodoviária do mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos da América, Índia e China (DEARO, 2013). O estado de São Paulo conta com uma malha rodoviária de 198.995,55 Km de extensão (DER, 2015) e é considerada a melhor de todo o país com 83,6% avaliado entre ótimo e bom no que se refere à qualidade de pavimento, sinalização, geometria da via e conservação (CNT, 2015).

No Brasil, o modal rodoviário é responsável pelo transporte de 485.625 milhões de Toneladas por Quilometro Útil (TKU) de cargas, ou seja, 61,1% do total; seguido pelo ferroviário com 20,7%, o aquaviário com 13,6%, o dutoviário com 4,2% e o aéreo com 0,4% (CNT, 2016).

Levando em consideração o modal de transporte adotado no Brasil, é natural que a movimentação da produção dos setores químico, petroquímico e de refino de petróleo, entre outros, seja feita na sua maioria por rodovias e, por conseguinte, que essa atividade de transporte lidere as estatísticas de acidentes ambientais no estado de São Paulo, com 4632 (44,47%) dos 10417 acidentes com produtos perigosos ocorridos de 1983 a 2015. Entre esses produtos encontram-se explosivos, gases, líquidos inflamáveis, sólidos inflamáveis, substâncias sujeitas a combustão instantânea, substâncias que em contato com a água emitem gases inflamáveis, substâncias oxidantes, peróxidos orgânicos, substâncias tóxicas, substâncias infectantes, materiais radioativos, corrosivos e substâncias perigosas diversas (TEIXEIRA, 2005; CETESB, 2016). Esses acidentes têm aumentado nos últimos 10 anos (2005 a 2015) nas rodovias de São Paulo, onde foram registrados 2430 acidentes, ou seja, mais da metade do total dos últimos 32 anos.

Os acidentes envolvendo o transporte rodoviário de produtos perigosos apresentam sérios impactos ao ambiente devido às propriedades químicas presentes

nos materiais transportados, como, por exemplo, inflamabilidade, toxicidade, corrosividade, entre outros (TEIXEIRA, 2005). Acidentes desse tipo representam sérios riscos tanto no que diz respeito à segurança como na saúde da população, assim como compromete a sustentabilidade devido a vulnerabilidade e a sensibilidade ambiental das áreas impactadas (TEIXEIRA, 2005). Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2010) 76,4% dos acidentes no ano de 2009 geraram contaminação de solo, 16,9% nos recursos hídricos, 6,15% na flora e 1,54% na fauna.

A constatação da emergência de se estabelecer métodos para aferir e mapear a sensibilidade ambiental a derrames de óleo fez com que Gundlach e Hayes (1978) desenvolvessem um índice de vulnerabilidade com uma classificação de 1 a 10 que levava em conta a sensibilidade de um ambiente em relação a sua exposição ao hidrodinamismo e ao tipo de substrato. Posteriormente, a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) elaborou uma normatização para o mapeamento de sensibilidade ao derramamento de óleo envolvendo um Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA), no inglês *Environmental Sensitivity Index* (ESI), que reunia as informações em formatos padrão de sensibilidade da zona litorânea, de seus recursos biológicos e de utilidade humana (COSTA, 2014).

Essa metodologia é proveniente da zona marinha e costeira e foi adaptada para vários outros ambientes como: ambientes lacustres, fluviais e palustres (MICHEL; HAYES; DAHLIN; BARTON, 1994; PETERSEN; MICHEL; ZENGEL; WHITE; LORD; PLANK, 2002), para dutos com a análise de Risco Ambiental de Dutos – MARA (Mapeamento de Risco Ambiental) (MENDES; MINNITI; LOPES; MILANELI; TORRES; YOGUI; RODRIGUES; MARIZ, 2005), para índices de sensibilidade em postos de combustíveis (SANTOS, 2008) e para rodovias (MARTINS, 2012; RIBEIRO, 2017).

Os mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo são importantes ferramentas técnico-gerenciais utilizadas na tomada de decisões emergenciais em caso de combate a derrames de óleo. A utilização desses mapas apresenta grande importância, pois, além de fornecer informações para o planejamento de contenção e limpeza para mitigar os impactos ambientais, auxilia a identificação de locais sensíveis antes que ocorra o acidente, de modo que as estratégias de proteção e contenção possam ser organizadas antecipadamente (FERREIRA; BEAURMORD, 2008).

O papel do petróleo no mundo moderno criou a necessidade de metodologias de transporte cada vez mais complexos que permitem que o óleo e seus derivados sejam levados a todas as regiões do planeta. Infelizmente, as lacunas entre eficácia e segurança, combinada com a possibilidade de erro humano, resultaram em significativos desastres ecológicos (EPSTEIN; SELBER, 2002).

Vazamentos de petróleo em larga escala são mais divulgados e têm mais atenção do que aqueles de menor escala. Derramamentos menores também têm contribuído significativamente para a degradação ambiental. A quantidade de óleo liberado a partir da combinação de acidentes menores, vazamentos operacionais e explosões de oleodutos realmente ultrapassa significativamente a quantidade liberada de grandes derramamentos de super-petroleiros. Em grande parte do mundo, são esses acidentes de menor escala que contribuem fortemente para danos ambientais (EPSTEIN; SELBER, 2002), o que mostra a necessidade de estes também serem estudados e da importância ambiental da presente pesquisa.

Os derramamentos de petróleo que ocorrem em terra, principalmente de vazamentos de dutos e acidentes rodoviários, podem contaminar os solos circundantes e águas subterrâneas. Um grande derramamento de óleo pode fazer solos contaminados incultiváveis - colocando os agricultores de subsistência em risco de insegurança alimentar - e eliminar o fornecimento de água potável para uma comunidade (EPSTEIN; SELBER, 2002).

1.1 Objetivos

A presente dissertação almeja contribuir, testar e aplicar uma metodologia adaptada a metodologia do sistema NOAA/MMA (2004), utilizadas para o litoral, para a elaboração de um índice de sensibilidade ambiental terrestre aplicando-o em rodovias, de fácil utilização e replicação em outras áreas e, por conseguinte, a confecção de uma carta de sensibilidade ambiental terrestre a hidrocarbonetos apoiada em soluções geotecnológicas, nos espaços adjacentes de um trecho, mais especificamente entre os municípios de Americana-SP e Araras-SP, da rodovia Anhanguera (SP – 330), no estado de São Paulo.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar a sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos de um trecho da (SP-330), por meio do mapeamento, caracterização dos ambientes adjacentes à rodovia e seus parâmetros do meio físico;
- Analisar metodologias relacionadas à sensibilidade ambiental ao óleo a fim de determinar a aplicabilidade e buscar parâmetros para o desenvolvimento do índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para o modal rodoviário;
- Colaborar com estudos futuros, visto que pesquisas relacionadas ao tema ainda se apresentam incipientes no mundo e pioneiro no Brasil.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA)

A indústria do petróleo surgiu no século XIX, mas se desenvolveu efetivamente a partir do século XX e tornou-se a fonte de energia mais utilizada desde a Segunda Revolução Industrial (UFRJ, 2014).

Desde o surgimento da indústria do petróleo até os dias atuais, ocorreram muitos acidentes que causaram grandes prejuízos ambientais, trazendo danos às espécies que integram os ecossistemas marinho, lacustre, fluvial e terrestre, impactando de forma negativa às populações humanas, a biota e conseqüentemente a economia.

O mapeamento da sensibilidade ambiental vem sendo utilizado desde a década de 1970 e representa uma importante ferramenta técnico-gerencial, uma vez que ocorre a priorização dos ambientes a serem protegidos e, a serem aplicados ou concentrados esforços em episódios de acidentes e/ou emergências, no intuito de reduzir as conseqüências ambientais, tanto do derrame quanto dos esforços de limpeza (ARAÚJO; SILVA; MUEHE, 2002).

Um método de classificação e mapeamento da sensibilidade ambiental, especificamente voltado a derramamentos de óleo, foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores da Divisão de Pesquisas Costeiras da Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos (MICHEL; HAYES; BROWN, 1978). O grupo se baseou no estudo de três grandes derramamentos ocorridos nos navios petroleiros *Metula*, no Chile em 1974; *Urquiola*, em 1976 na Espanha e *Jakob Maersk*, Portugal em 1975 (MICHEL; HAYES; BROWN, 1978).

Em 1978, Gundlach e Hayes apresentaram e aplicaram o primeiro Índice de Vulnerabilidade ao Derrame de Óleo a partir da classificação dos ambientes costeiros em uma escala de 1 a 10, onde o indicador 1 representa o menos vulnerável e 10 o mais vulnerável, em termos de vulnerabilidade potencial ao dano por derramamento de óleo. Esta classificação foi baseada na interação da linha de costa com os processos físicos que controlam a deposição do óleo, persistência ou longevidade do óleo no ambiente e extensão do dano biológico.

A partir dos trabalhos desenvolvidos por Gundlach e Hayes (1978) e Michel; Hayes; Brown (1978) foram fundamentadas as bases aos estudos de sensibilidade ambiental ao óleo que são utilizadas até o presente.

Observa-se nos estudos pioneiros a utilização do termo “vulnerabilidade” em detrimento do termo “sensibilidade”, que são abordadas como sinônimos nos estudos. Entretanto, por serem conceitos-chave e não apresentarem definições explícitas, no presente estudo é necessário a distinção entre os termos. Serão utilizados os conceitos de Zacharias e Gregr (2005) para vulnerabilidade e sensibilidade.

De acordo com Zacharias e Gregr (2005), a sensibilidade consiste no grau pelo qual os ambientes irão responder à um determinado stress. A sensibilidade é medida utilizando um ou mais indicadores (como exemplo tipos de espécies, comunidades e habitats) que respondem a um ou mais fatores de stress naturais ou humanos. A vulnerabilidade caracteriza-se pela probabilidade de um recurso ser atingido por um fator de stress ao qual será sensível (ZACHARIAS; GREGR, 2005).

Já a classificação de Michel, Hayes e Brown (1978) é relacionada principalmente ao modo de ocorrência e da longevidade do óleo em diferentes ambientes costeiros, embora seja considerado também a suscetibilidade biológica e facilidade de limpeza manual.

A partir de 1989, os mapas de sensibilidade começaram a ser elaborados contendo três tipos principais de informações espaciais: a classificação da sensibilidade dos ambientes de acordo com os índices de sensibilidade na escala de 1 a 10; os recursos biológicos sensíveis ao óleo; e os recursos de uso humano de valor comercial, recreacional ou de subsistência (JENSEN; HALLS; MICHEL, 1998).

O serviço nacional de administração dos oceanos e da atmosfera dos Estados Unidos (NOAA) estabeleceu um manual de elaboração de mapeamento de sensibilidade a derrames de óleo, em razão da necessidade de se padronizar os mapas produzidos naquele país (PETERSEN et al., 2002). No Brasil, a primeira tentativa neste sentido foi realizada por Araújo, Silva e Muehe (2002). Depois o Ministério do Meio Ambiente (MMA), baseando-se amplamente nas propostas de Petersen et al. (2002), elaborou um documento oficial visando padronizar a elaboração das Cartas de Sensibilidade Ambiental, Cartas SAO (MMA, 2004).

Nas três décadas que se transcorreram desde os primeiros estudos publicados de mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo até o presente, muitos métodos foram propostos, visando tanto a classificação dos ambientes quanto o

ferramental a sua implementação. Nesses, há aqueles que incorporam dados socioeconômicos, outros destacam os aspectos biológicos, enquanto alguns fornecem maior liberdade à interpretação do mapa, apresentando um inventário de recursos, sem referenciar áreas prioritárias à proteção e/ou limpeza (ARAÚJO; SILVA; MUEHE, 2002). Seguem autores que se utilizaram deste método por todo o mundo como: Austrália (THOMPSON; MC ENALLY, 1984), Mar Vermelho no Egito (WENNINK; NELSON-SMITH, 1979; HANNA, 1995), Venezuela (GARCIA, 1986), Emirados Árabes (JENSEN et al., 1993), Ilha de Trinidad no Caribe (NANSINGH; JURAWAN, 1999), Ilha de Svalbart (MOE et al., 2000), Egito (LOTFY, 2004), Israel (ADLER; INBAR, 2007), entre outros. No Brasil, diversos trabalhos também já foram realizados, como por exemplo, Awazu e Poffo (1986), Gherardi, Braga e Eichenberger (2001), Beisl et al. (2003), Carvalho (2003), Wieczorek, Dias-Brito e Milanelli (2007), Pincinato (2007) e muitos outros.

Assim como aconteceu nos ambientes costeiros e marinhos, o mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo se expandiu para outros ambientes (lacustres, fluviais, palustres e terrestre) e também resultou em uma diversidade metodológica.

Em 1994, a NOAA incluiu na atualização dos índices do seu guia a sensibilidade de ambientes lacustres, fluviais e palustres (MICHEL et al., 1994; PETERSEN et al., 2002).

Com a inclusão de ambientes aquáticos interiores pela NOAA, outros estudos passaram a aplicar ou propor métodos semelhantes. Dentre eles cita-se: Hayes et al. (1995), para os Grandes Lagos canadenses; Hayes, Michel e Montello (1997), para o sudeste dos EUA; Zengel et al. (2001a), para o Caribe; Zengel et al. (2001b), para o sul do Estado da Flórida (EUA); Araújo et al. (2006), para a Região Amazônica; Ferreira e Beaumord (2008), para Itajaí, Santa Catarina; Costa (2014), dentre outros.

No Brasil, a partir de 1996, a Petrobras iniciou a produção de estudos de desenvolvimento de Cartas SAO utilizando de embasamento a padronização e a metodologia produzida pela NOAA (ARAÚJO; SILVA; MUEHE, 2002).

O primeiro guia produzido no Brasil consistiu no “Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos” (ARAÚJO; SILVA; MUEHE, 2002). Este manual foi utilizado como embasamento para a produção das “Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para

derramamentos de óleo” (ARAÚJO; SILVA; MUEHE, 2002; MMA, 2002, 2004). Este documento tornou-se referência para o mapeamento de Carta SAO no Brasil.

Nos ambientes terrestres, ou seja, aqueles que não correspondem às regiões litorâneas e a áreas fluviais, as principais regiões passíveis de serem atingidas por derrames de óleo são locais próximos a rodovias e ferrovias, devido à possibilidade de acidentes envolvendo veículos e composições transportadores; e regiões próximas a dutos e postos de combustíveis, que apresentam risco de rompimento e vazamento de produto para o ambiente.

Nessa conjuntura, os dutos já possuem algumas tentativas metodológicas, sendo um dos primeiros a possuir um mapa de sensibilidade ao óleo, com o trabalho de Walker et al., em 1978.

Atualmente, os trabalhos de Mendes et al. (2005) e Gundlach et al. (2005) se destacam por resgatar a sensibilidade para áreas de dutos. Em ambos os casos há a tentativa de alinhamento ao método NOAA, sendo utilizada a classificação 1 - 10 para os índices e os símbolos padronizados daquele órgão. No caso brasileiro, onde é proposto o Mapeamento do Risco Ambiental (MARA) (MENDES et al., 2005), há uma proposta de como se aferir os índices a partir da atribuição de pesos aos diferentes parâmetros ambientais baseados na biodiversidade, recuperação ambiental e sensibilidade dos habitats.

Essa abordagem é conveniente ao estudo que aqui se propõe, pois avaliam ambientes interiores/continentais tropicais, os quais são semelhantes ao que são encontrados em rodovias, além de constituírem um modal linear, semelhante ao rodoviário. Os dutos, todavia, possuem maior potencial poluidor em se tratando de volume.

Outro exemplo para ambientes terrestres foi o trabalho de Santos (2008) que elaborou uma carta de sensibilidade ambiental aplicada a postos de combustíveis da cidade de Rio Claro (SP).

A composição de Carta SAO para rodovias e ferrovias ainda está em estágio embrionário, não havendo publicações representativas para o segundo caso. A sensibilidade ambiental em áreas rodoviárias tem no trabalho de Mattos (2008) um dos poucos estudos pioneiros nesse tipo de modal. O estudo de Mattos (2008) propõe o Índice de Sensibilidade Rodoviário e sugere três classes: sensibilidade ambiental baixa, média e alta. Há também a tese de Martins (2012) que apresentou uma proposta de metodologia para a construção de uma Carta SAO para ambientes

adjacentes às rodovias, utilizando aplicações geotecnológicas. O autor utilizou como área de estudo cinco trechos da Estrada dos Tamoios (SP – 099) localizada no estado de São Paulo, propondo um Índice de Sensibilidade Terrestre (IST) que considera como variáveis a declividade do terreno, a textura e a profundidade do perfil de alteração, a profundidade do nível d'água e a permeabilidade relativa.

Além disso, há também o trabalho de Ribeiro (2017) que se utilizou da metodologia proposta por Martins (2012) e outras informações relevantes para elaborar um Índice de Sensibilidade Ambiental ao Óleo em Ambientes Terrestres fazendo-se do uso dos parâmetros físicos de trecho da rodovia Washington Luís (SP-310).

A partir do exposto, o presente estudo utilizará das metodologias propostas por Martins (2012) e Ribeiro (2017) para elaborar um Índice de Sensibilidade Ambiental aos hidrocarbonetos para o modal rodoviário, além de buscar acrescentar outras informações que possam ser relevantes à análise de sensibilidade ambiental para ambientes terrestres.

Ressalva-se que se utilizam os termos “ambientes terrestres” para determinar áreas que não são compostas por ambientes litorâneos e fluviais, pois estes possuem metodologias próprias para a sensibilidade ambiental ao óleo.

2.2 Hidrocarbonetos em Ambientes Terrestres

Segundo Viana (2009), os contaminantes provenientes do petróleo quando em contato com o solo, podem ser adsorvidos, transportados pelo vento ou pelas águas pluviais, lixiviados pelas águas de infiltração e/ou podem atingir as águas subterrâneas.

Em regiões com presença de solos impermeáveis, o contaminante irá fluir seguindo a declividade do terreno, podendo atingir drenagens e cursos d'água, além disso, pode formar poças e penetrar locais fraturados (MARTINS, 2012).

Em caso de regiões com solos permeáveis, o óleo irá mover-se em direção ao subsolo, pela influência da gravidade e pelos processos de capilaridade (MARTINS, 2012).

De acordo com Guiguer (1996) os processos de capilaridade referem-se às forças que influenciam o movimento dos hidrocarbonetos, em fase líquida, pelos poros do solo. Estas forças são influenciadas pelas características do solo, propriedades

físicas e químicas do poluente em fase líquida e pela quantidade de água e poluente em fase líquida presente no solo.

O comportamento do solo com possíveis contaminantes está diretamente relacionado com a capacidade de troca de cátions (CTC), ou seja, a quantidade de cátions que um solo é capaz de reter por unidade de peso (TEDESCO et al., 1992).

Os solos arenosos apresentam menor CTC, em comparação aos solos com maiores teores de argila, desta forma, os solos arenosos possuem menor capacidade de adsorção (PICARELLI, 2003). Além disso, o teor e tipo de matéria orgânica presente no solo deve ser considerado, pois este irá determinar a adsorção dos compostos. A biota presente também apresenta grande importância, principalmente em relação à contaminação por hidrocarbonetos, visto que, a energia para o crescimento microbiano é obtida através da decomposição enzimática dos compostos orgânicos e da oxidação de compostos inorgânicos e metais (ALEXANDER, 1977).

De acordo com Guiguer (1996), o transporte de hidrocarbonetos no solo caracteriza-se pela formação de quatro fases distintas que regulam os processos de migração do contaminante, são elas: fase líquida residual, fase líquida livre, fase dissolvida e fase vapor.

A fase líquida residual caracteriza-se pelos resíduos líquidos relativamente imóveis que podem ser adsorvidos ou retidos entre os sólidos do solo. Já a fase líquida livre corresponde ao líquido livre não residual que passa pelo solo. Este, quando atinge o nível d'água subterrâneo, passa a flutuar sobre ele (GUIGUER, 1996).

A fase dissolvida refere-se aos hidrocarbonetos dissolvidos que podem estar presentes na superfície sólida do solo, formando películas, ou na água do solo. Em casos em que atinge o nível d'água subterrâneo, podem formar uma pluma de contaminação. Por fim, a fase de vapor, caracteriza-se pelos hidrocarbonetos em vaporização que podem existir como componentes do vapor do solo e também podem se condensar e adsorver-se na superfície sólida ou dissolver-se na água do solo (GUIGUER, 1996).

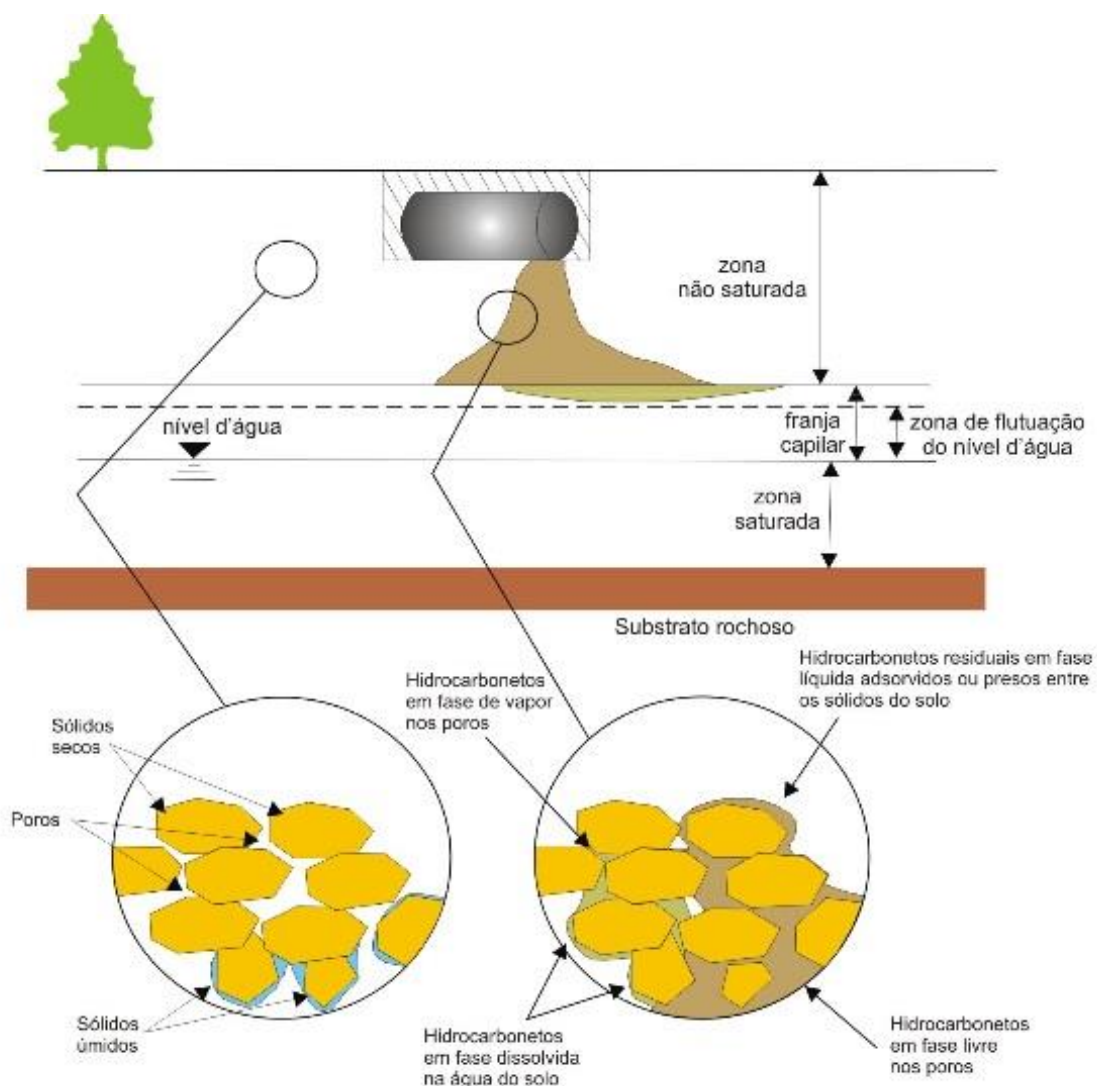
Segundo Guiguer (1996), o escoamento em meio saturado será sempre bifásico, ou seja, apresentará uma fase separada denominada "fase líquida não aquosa" ou NAPL (*non-aqueous phase liquid*), isto ocorre devido aos compostos orgânicos possuírem baixa miscibilidade em água.

O escoamento em subsuperfície também será influenciado pelo tipo de hidrocarboneto contaminante. E de acordo com Guiguer (1996) os NAPLs podem ser subdivididos em duas classes:

- LNAPL (*light non-aqueous phase liquids*): líquido não aquoso menos denso do que a água, caracterizado por ser mais leve que a água. Os hidrocarbonetos com essa característica estão comumente associados com a produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, por exemplo, a gasolina, o óleo diesel e o querosene (CODUTO, 1998).
- DNAPL (*dense non-aqueous phase liquids*), líquido não aquoso mais denso do que a água, ou seja, mais pesado que a água. Os hidrocarbonetos com essa característica estão relacionados principalmente às atividades industriais, onde são utilizados, por exemplo, hidrocarbonetos clorados, PCBs (bifenilas poli cloradas), antraceno, pireno, 1,1,1-TCE e fenol.

A Figura 1 mostra o comportamento do NAPL quando em contato com o solo.

Figura 1 - Comportamento do NAPL em diferentes fases presentes na subsuperfície



Fonte: GUIQUER, 1996.

O transporte da LNAPL através das zonas não saturadas e saturadas depende da quantidade de hidrocarbonetos liberados no meio. Um pequeno volume de LNAPL flui pela zona não saturada até atingir o estado de saturação residual, em razão do desenvolvimento de um sistema de quatro fases como resultado da entrada de LNAPL nesta zona (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

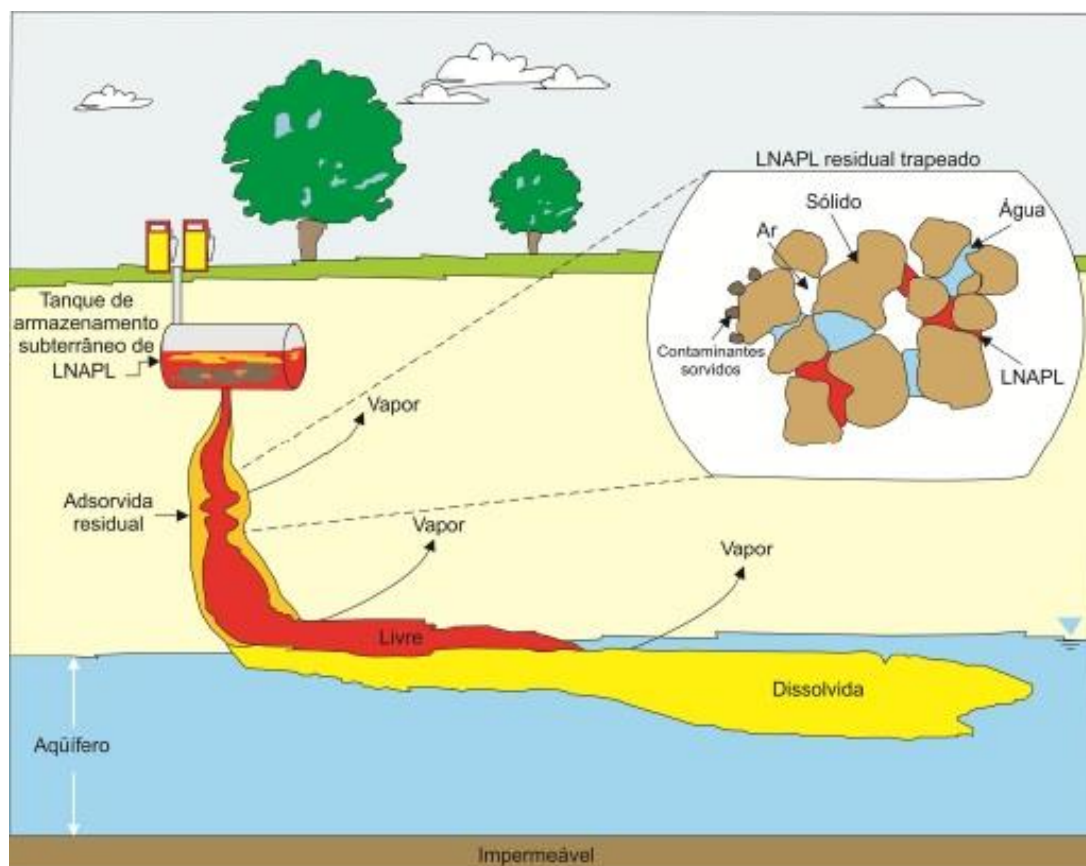
Em casos de vazamento de LNAPL, o contaminante ficará retido à zona não saturada até atingir o grau de saturação residual (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998). O estado de saturação residual corresponde à dissolução dos componentes solúveis do LNAPL, tais como o benzeno, o tolueno e os xilenos, pelas águas de infiltração. Estes contaminantes dissolvidos serão lixiviados até a zona saturada, formando ali uma pluma que se distribui por difusão e advecção.

De acordo com Ferreira e Zuquette (1998), os componentes voláteis do LNAPL irão se particionar, desta forma o gás sofre partição de modo que uma parte fica retida no solo e outra no ar, estes podem ser transportados, por difusão molecular, a outras partes do aquífero, podendo atingir áreas muito extensas, através de ciclos de volatilização, transporte e liquefação.

Em situações de vazamento de um grande volume de LNAPL, este irá migrar até encontrar uma barreira física ou será afetado por forças de empuxo presentes próximas ao lençol freático (MARTINS, 2012). Em solos heterogêneos, o transporte pode ser complexo, migrando lateralmente a partir de vias mais permeáveis. O óleo também pode acumular-se e migrar ao longo de camadas de baixa permeabilidade acima do lençol freático (NEWELL et al., 1995).

Os componentes do LNAPL perdem sua permeabilidade relativa chegando ao topo da franja capilar, pois neste local a água satura um grande volume de poros. Desta forma, ocorre o impedimento do movimento descendente do contaminante, que se acumula, fluindo na mesma direção da água subterrânea. Por apresentarem baixa densidade, os LNAPLs flutuam próximo ao nível d'água subsuperficial, na zona de capilaridade (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998). A Figura 2 apresenta a dinâmica de espalhamento de LNAPL no subsolo.

Figura 2 - Distribuição de LNAPL em subsuperfície



Fonte: SALVADOR, 2015.

Nos DNAPL (Figura 3), há uma dinâmica semelhante ao da LNAPL na zona não saturada, impedindo que o óleo chegue ao lençol freático, caso a saturação residual do solo não seja atingida. Esta situação se altera com a lixiviação dos componentes solúveis do óleo pela água de percolação ou mesmo pela flutuação do lençol freático (HULING; WEAVER, 1991). Também pode ocorrer, devido à alta densidade, baixa viscosidade e solubilidade baixa intrínseca aos DNAPLs, uma grande mobilidade, fazendo com que haja infiltração até a zona saturada. O DNAPL pode sofrer partição para a fase de vapor denso, o qual infiltrará até o topo da zona saturada (zona de capilaridade) e pode migrar dissolvido em água por uma grande distância (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

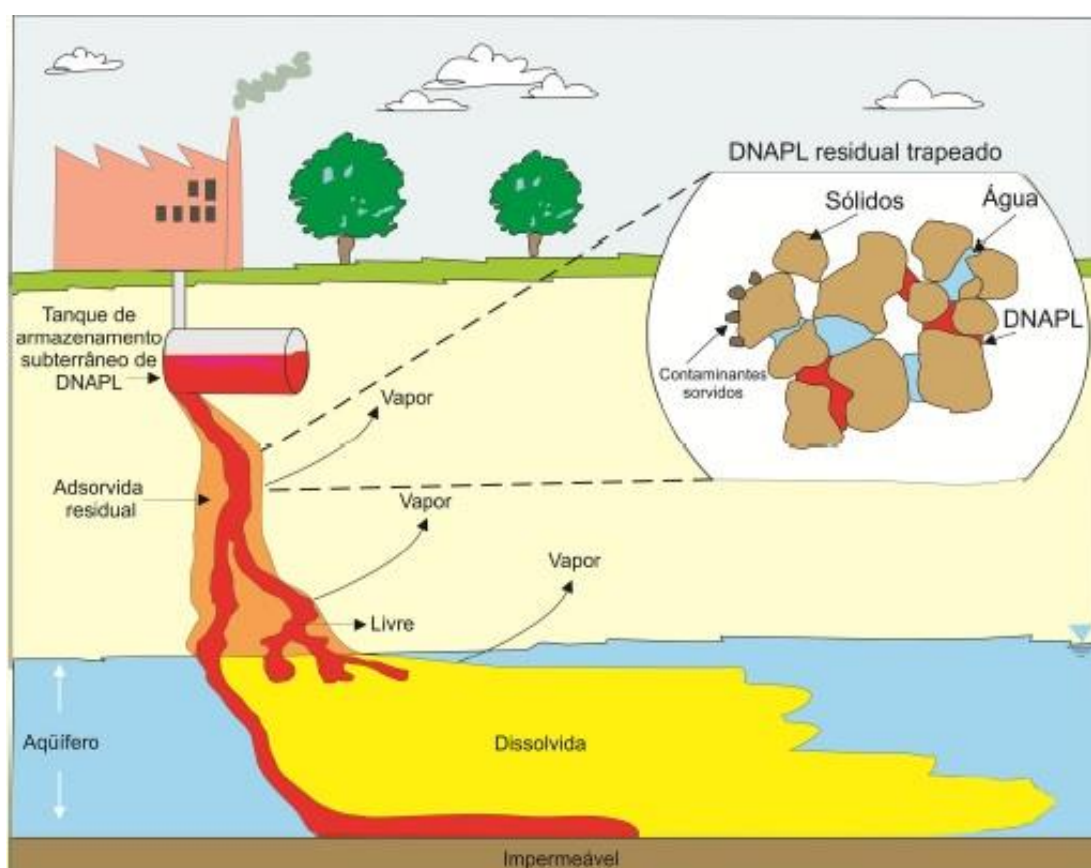
No processo de migração, uma das zonas que o óleo pode atingir é a de rocha, a qual pode estar fraturada ou não. O deslocamento do óleo nesse tipo de camada pode ser utilizado para entender como se dá o transporte do poluente caso este seja derramado diretamente sobre o substrato rochoso (MARTINS, 2012).

Tanto o LNAPL quanto o DNAPL tendem a seguir um caminho complexo que irá depender das características da rocha, tais como densidade de fraturas, orientação e distribuição das aberturas (NEWELL et al., 1995; HULING; WEAVER, 1991).

Desta forma, independente do volume, o contaminante pode alcançar regiões profundas de forma muito rápida, pois a capacidade de retenção da rocha tende a ser muito baixa (MACKAY; CHERRY, 1989).

Para a situação de o substrato rochoso ser impermeável, sem fraturas, o óleo migrará por gravidade para áreas mais baixas e acumulará formando poças (HULING; WEAVER, 1991).

Figura 3 - Distribuição de DNAPL em subsuperfície



Fonte: SALVADOR, 2015.

2.3 Compartimentação Fisiográfica

A compartimentação de terrenos é um método que tem por definição a divisão de terrenos, em diversas unidades, com aspectos homogêneos. A utilização deste procedimento pode ser empregada em diferentes tipos de trabalho, desde avaliação

territorial para fins específicos, como para monitoramentos de diferentes características do meio físico e pode ser considerada uma etapa da pesquisa nos trabalhos relacionados à análise integrada.

Desde o início do século passado, muitos autores vêm utilizando-se dessas técnicas de compartimentação de terrenos, e criou-se duas abordagens, baseadas em critérios e elementos de análise de terrenos diferentes: uma de essência mais ecológica e outra de essência mais geomórfica. E até a década de 70, surgiram inúmeras particularizações metodológicas, conceituais e terminológicas para a compartimentação de terrenos (VEDOVELLO, 2000).

A abordagem ecológica contextualiza os elementos da paisagem, geomorfológicos e não-geomorfológicos, tais como vegetação e feições de natureza antrópica, reconhecendo o padrão de organização destes elementos e a sua combinação dinâmica.

Já a abordagem fisiográfica, que deriva da geomórfica, utiliza o termo fisiografia, na avaliação de terrenos para fins agrícolas e estudo de solos (VERSTAPPEN, 1977). Posteriormente, geólogos e engenheiros passaram a utilizar este termo, na área de planejamento territorial, quando o elemento ambiental de análise é representado por solos, rochas, relevos e eventualmente vegetação.

A avaliação integrada do meio físico surge na década de 80, com o aumento da preocupação com os problemas ambientais, aumentando consideravelmente a utilização de trabalhos de compartimentação de terrenos de caráter fisiográfico. Porém, assim muitos termos, conceitos e métodos dificultam a adoção de uma sistemática e podem gerar frequentes confusões entre mapeamento de relevo e identificações de unidades fisiográficas (CARDOSO, 2005).

Vedovello (1993), refere-se à classificação hierárquica entre classes de unidades, como taxonomia e hierarquia. No primeiro caso, a classificação é feita a partir de uma relação natural específica, como a natureza genética. Em relação à hierarquia, a classificação se baseia na escala e na finalidade do estudo.

O autor considera que, na prática, apenas um ou alguns elementos do meio físico responsáveis por variações fisiográficas significativas em determinado nível hierárquico são usados na compartimentação fisiográfica.

Vedovello e Mattos (1998) consideram que, dependendo do nível hierárquico ou taxonômico considerado, há predomínio de determinados elementos fisiográficos sobre outros, como critério ou fator de compartimentação.

Para Maretti (1989), a proposta de compartimentação fisiográfica parte do princípio de que há uma correlação natural entre os elementos constituintes do meio físico, de modo que a seleção de um ou vários elementos serve para identificar unidades com associações específicas das formas de ocorrência dos vários elementos fisiográficos.

A compartimentação fisiográfica se baseia na análise dos elementos componentes do meio físico, em relação a sua natureza geológica, geomorfológica, pedológica etc. e na identificação das formas de ocorrência desses elementos, as quais dependem também do nível taxonômico e/ou hierárquico considerado (OLIVEIRA, 2004).

Atualmente têm-se utilizado de imagens orbitais e fotografias aéreas para a definição de compartimentos fisiográficos e no que se refere ao uso destes produtos, Vedovello (1993), afirma que apresentam grande potencial para a definição de compartimentos do meio físico, uma vez que constituem "objetos" concretos (refletindo a organização espacial do meio físico), sobre os quais é possível se traçar limites. A utilização de imagens de satélite tem ocorrido, normalmente, pela identificação de formas da paisagem (em geral, o relevo), reconhecidos na imagem pelo foto-intérprete. Tal procedimento depende de um conhecimento prévio das formas da paisagem que a serem individualizadas, bem como das características texturais associadas a essas formas (VEDOVELLO; MATTOS, 1998).

A análise dos critérios homogeneidade, tropia e assimetria condiciona a textura e a estrutura da imagem, permitindo a compartimentação da cena em áreas que mostram disposição espacial de elementos texturais com propriedades comuns (forma), o que possibilita a caracterização de zonas homogêneas ou zonas homólogas (VEDOVELLO; MATTOS, 1998).

Dentre os trabalhos pode-se destacar a proposta de Guy (1966), que instituiu um método lógico de fotointerpretação de fotografias aéreas, o qual teve continuidade com Riverau (1972), baseado não estabelecimento de parâmetros para realizar a análise e interpretação da textura e estrutura das imagens.

No Brasil, a primeira contribuição relevante foi feita por Soares e Fiori (1976), baseando-se nos trabalhos de Guy e Riverau, conceituando e detalhando os elementos texturais e estruturais da imagem, apresentando critérios para a classificação, com base nas formas de arranjo da drenagem e relevo. Posteriormente,

Soares, Fiori e Mattos (1978) estenderam para imagens de satélite o método proposto para fotografias aéreas.

Segundo Zaine (2011), a obtenção de informações geotécnicas pode ser feita a partir da interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite, efetuando-se correlações entre as propriedades texturais da foto/imagem e propriedades e ou características de interesse geotécnico.

Tais correlações foram debatidas por inúmeros autores, sobressaindo-se os trabalhos de Soares e Fiori (1976) e Veneziani e Anjos (1982), além de Zuquette (1987), Riedel (1988), Oliveira (1989), Lollo (1991), Vedovello (1993), Zuquette e Gandolfi (2004), Zaine (2011), dentre outros.

Na área de mapeamento geotécnico, a análise integrada está diretamente relacionada ao método de avaliação de terreno (GRANT, 1970), o qual, de acordo com Lollo (1995), se baseia no reconhecimento, interpretação e análise das feições do relevo, as denominadas *landforms*, as quais refletem a atuação dos processos naturais sobre os materiais da superfície terrestre.

A aplicação da técnica de avaliação do terreno permite dividir a área de estudo em unidades cada vez menores, a partir do uso de sensores remotos e/ou de trabalhos de campo, com base na uniformidade de formas do terreno, seguida da avaliação das propriedades dos materiais presentes nas unidades delimitadas (LOLLO, 1995).

Segundo o autor, a utilização do método de avaliação do terreno é compatível com grandes escalas (igual ou superior a 1:25.000), permitindo a análise da relação dos elementos de terreno com a espessura e a natureza de materiais inconsolidados; a avaliação de áreas urbanas e de expansão urbana, além da análise de riscos, principalmente nos casos de instabilidade dos terrenos. No último caso, é aconselhável a combinação do enfoque fisiográfico com o enfoque paramétrico.

Zuquette e Gandolfi (2004) colocam que a avaliação do terreno pode ser realizada sob dois enfoques: o fisiográfico (*landscape approach*) e o paramétrico (*parametric approach*). No enfoque fisiográfico, as diferentes feições de relevo são delimitadas a partir de um conjunto de observações derivadas da fotointerpretação e da fase de campo, com a distinção e delimitação de áreas homogêneas no processo de zoneamento.

Os níveis hierárquicos utilizados na aplicação da técnica de avaliação do terreno sob o enfoque fisiográfico são: sistema de terreno (*land system*), unidade de terreno (*land unit*) e elemento de terreno (*land element*).

Já, o enfoque paramétrico, na concepção de Zuquette e Gandolfi (2004), considera a existência de parâmetros representativos da geometria das feições do terreno, como: declividade, amplitude, entre outros.







Conseqüentemente, para a determinação de áreas com característica homogêneas será usado o método de compartimentação fisiográfica. Conforme Zuquette e Gandolfi (2004), esta técnica, tem sido frequentemente utilizada como etapa preliminar de zoneamento do meio físico, para elaboração de modelos teóricos de evolução do terreno, de forma a diminuir e orientar os trabalhos de campo, as amostragens e os ensaios laboratoriais, colaborando para obtenção de resultados mais consistentes na caracterização das unidades geológico-geotécnicas.

Souza (1992) explicita que, para fins de mapeamento, a delimitação de compartimentos homogêneos deve considerar o perfil típico de alteração de cada unidade identificada no relevo, individualizando os diversos níveis de alteração com características físicas e comportamentos geotécnicos distintos. De forma geral, tais compartimentos estão intimamente ligados às formas de relevo identificadas, à evolução do perfil de alteração quanto à espessura e ao grau de evolução genética de cada nível.

Além da subdivisão do terreno em função dos elementos fisiográficos, a etapa de caracterização das unidades de compartimentação em função de propriedades e características de interesse é constituída por um conjunto de procedimentos que visam selecionar e analisar as características das unidades de compartimentação e as propriedades dos materiais presentes na área estudada (ZAINE, 2011).



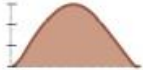
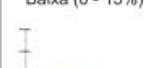










Zaine (2011), ainda destaca que a escolha da forma de obtenção dos dados depende do tipo e classes dos atributos analisados, da viabilidade ou não de aquisição de informação in situ e da precisão necessária às avaliações dos produtos previstos, em função da escala de trabalho. Nas figuras 4 e 5 pode-se observar os critérios adotados para análise e interpretação fotogeológica sugerido por Zaine (2011), e que serão utilizados e adaptados a esta pesquisa.

Figura 4 - Análise e interpretação fotogeológica dos elementos de drenagem e relevo

1. Análise da densidade textural		CLASSES		
Elementos de análise	Elementos de drenagem e relevo	Baixa (0 a 5/10 km ²)	Média (5 a 30/10 km ²)	Alta (> 30/ km ²)
Critérios de análise	Densidade dos elementos de drenagem			
	Densidade dos elementos do relevo (dissecação e rugosidade do terreno)	Baixa (mais lisa) 	Média 	Alta (mais rugosa) 
Propriedade a ser interpretada	PERMEABILIDADE (intergranular)	Alta (Permeável)	Média	Baixa (Pouco permeável a impermeável)
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Relação escoamento superficial/infiltração	Baixa	Média	Alta
	Espessura e características do manto de alteração	Grande (Espesso; > 5m)	Média	Pequena (Raso/rocha aflorante)

Fonte: ZAINE, 2011.

Figura 5 - Análise e interpretação fotogeológica das formas e características do relevo

2. Análise das formas e características do relevo		CLASSES		
Elementos de análise	Declives, vertentes, topos, vales, rupturas de declive (quebras de relevo), cristas e escarpas	Pequena (0 a 100 m)	Média (100 a 300 m)	Grande (> 300 m)
Critérios de análise	a) Amplitude local (variações de cotas na unidade)			
	b) Declividade	Baixa (0 - 15%) 	Média (15 - 30%) 	Alta (> 30%) 
	c) Forma de encosta / vertente (* representação em planta)	Convexa 	Côncava 	Retilínea 
	d) Forma do vale (* representação em planta)	Aberto 		Fechado 
	e) Forma do topo	Aplainados 	Arredondados 	Angulosos 
	f) Feições particulares de relevo	Identificar e descrever. Associar modelos geológicos já conhecidos <small>*Consultar quadros Howard (1967); Soares e Fiori (1976); Nunes et. al. (1995)</small>		
Propriedades a serem interpretadas	Solubilidade	Não solúvel	Média	Solúvel
	Resistência à erosão natural (dureza)	Baixa (Pouco resistente)	Média (Resistência média)	Alta (Muito resistente)
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Profundidade do topo rochoso	Profundo	Intermediário	Raso a sub aflorante
	Espessura de materiais inconsolidados	Espesso	Intermediário	Delgado a inexistente
	Grau de escavabilidade	Pouco resistente	Resistência média	Muito resistente
	Potencial a erosão linear (induzida)	Médio a alto	Médio a alto	Médio a baixo
Registros de processos geológicos	Potencial a movimentos gravitacionais de massa	Baixo	Médio a Alto	Alto

Fonte: ZAINE, 2011.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A rodovia selecionada para esta pesquisa foi a SP-330 (rodovia Anhanguera) com trechos pertencentes a várias concessionárias. Dentro da área de estudo, o trecho que vai de Americana a Cordeirópolis pertence a concessionária CCR AutoBAN e o trecho de Cordeirópolis até Araras pertence a Intervias (ARTESP, [201-]).

O trecho estudado possui uma extensão de aproximadamente 45 Km com uma área de influência (*buffer*) de 2,5 Km para cada lado da margem da via e abrange os municípios de Araras, Cordeirópolis, Limeira e Americana (Figura 6).

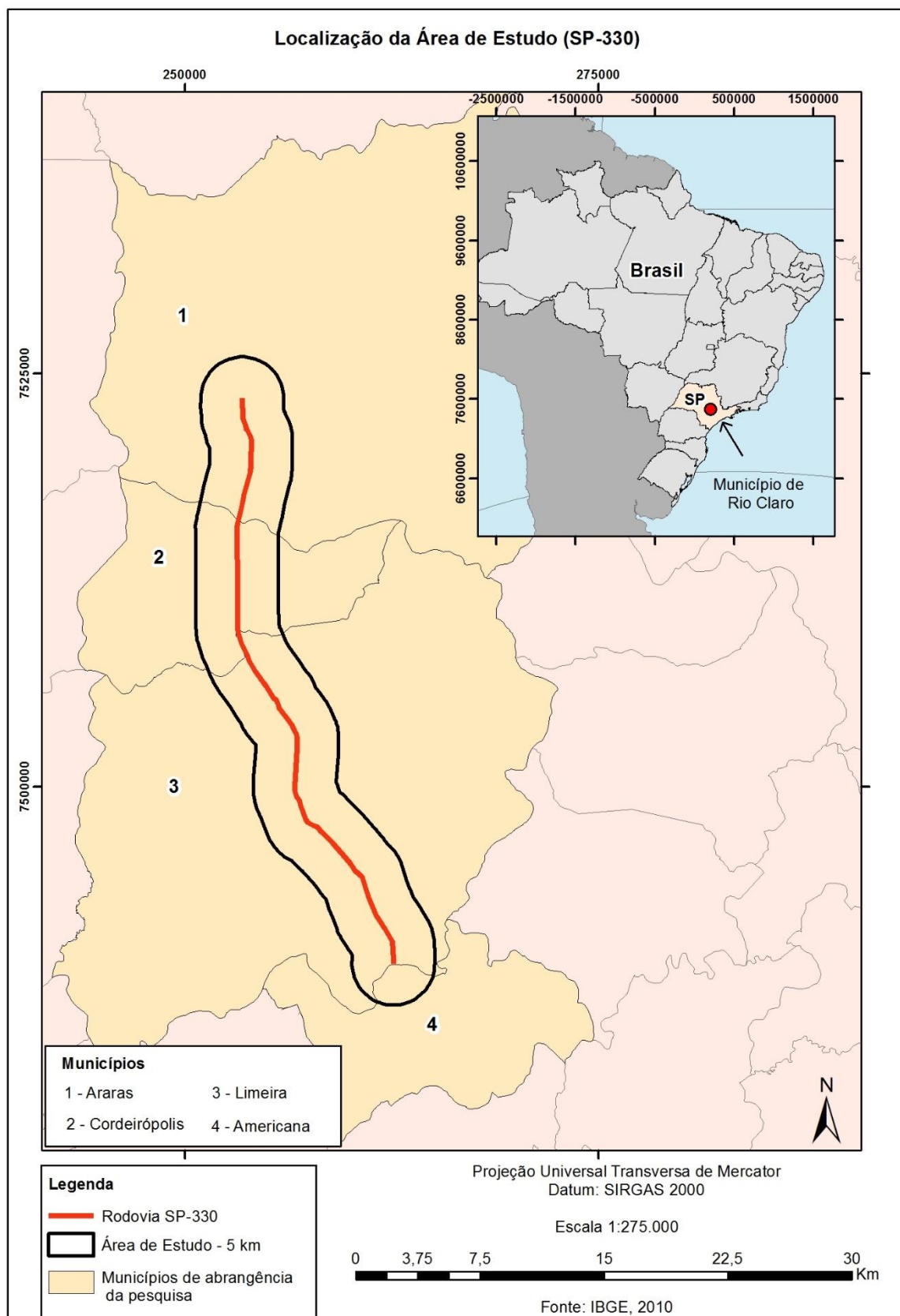
A escolha da área de estudo deve-se primeiramente ao alto índice de acidentes com produtos perigosos que sucedem nesta rodovia (272 registros de 1998 a 2015), sendo assim a 2ª rodovia em número de acidentes com produtos perigosos no estado de São Paulo, atrás apenas da rodovia Regis Bittencourt (CETESB, 2016). Segundo, pela proximidade da área de estudo do campus da UNESP – RC, facilitando os trabalhos de campo.

A Anhanguera foi inaugurada em 1940, originalmente, com 80 km de extensão, entre São Paulo e Campinas, e hoje soma 453 km de extensão sendo a terceira maior rodovia do estado. Inicia-se na Rua Monte Pascal, ainda no bairro da Lapa, na capital paulista e vai até o km 453, em Igarapava, junto à ponte sobre o Rio Grande, divisa natural com o estado de Minas Gerais onde torna-se BR-050, sistema que liga Brasília a Santos (RODOVIA ANHANGUERA, [200-?]).

Liga São Paulo à região norte do estado e suas principais cidades industriais, uma das mais produtivas áreas agrícolas. Pista dupla, tráfego intenso, de São Paulo a Limeira, com acesso à Rodovia Washington Luís para Rio Claro, São Carlos, Araraquara, São José do Rio Preto e outras (RODOVIA ANHANGUERA, [200-?]).

É uma das mais importantes rodovias do Brasil e uma das mais movimentadas. É considerada, juntamente com a Rodovia dos Bandeirantes e Rodovia Washington Luís, o maior corredor financeiro do país, pois interliga algumas das regiões metropolitanas do estado como São Paulo e Campinas, assim como o Aglomerado Urbano de Jundiaí, a Região Administrativa Central e a Região de Ribeirão Preto (RODOVIA ANHANGUERA, [200-?]).

Figura 6 - Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora

3.1 Meio Físico

3.1.1 Geologia Regional

A área em questão localiza-se, geologicamente, no setor paulista do flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná. Esta bacia é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano, totalizando uma área que se aproxima dos 1,5 milhão Km² e seu registro estratigráfico é composto por um pacote sedimentar-magmático com aproximadamente sete mil metros de espessura (MILANI et al., 2007), na figura 7 é possível observar a coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região onde está inserida a área de estudo bem como informações intrínsecas a cada unidade litoestratigráfica.

Figura 7 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná na região da área de estudo

COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Média (Metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZOICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE <i>(Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRES. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		MARILIA ADAMANTINA		50	ARENITOS COM MATRIZ ARGILOSA OU CIMENTO CALCÍFERO, SILTITO	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRE
MESOZOICA	CRETÁCEO	BAURURU	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO <i>(Basalto e diabásio = matéria-prima para brita - pavimentação e construção civil na região de Rio Claro)</i>	MAGMATISMO FISSURAL
		SÃO BENEDITO	BOTUCATU PIRAMBOIA		100 150	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA <i>Aquífero Guarani</i>	CONTINENTAL: DESÉRTICO CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
	JURÁSSICO		CORUMBATAI		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilitos = matéria-prima para indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: LACUSTRE MISTO: PLANÍCIE DE MARÉ
	TRIÁSSICO		IRATI		40	SILTITOS, FOLHINHOS PROBTUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS <i>(pedreiras de calcário na região de Assistência e Ipecema)</i>	MISTO: LAGUNA/PLATAFORMA
PALEOZOICA	PERMIANO	PASSA DOIS	PALERMO TATUI		50 (Tatui)	SILTITOS ESQUITOS ARENOSOS	MISTO: PLANÍCIE COSTEIRA/PLATAFORMA
			RIO BONITO		20 (Pa+RB)	ARENITOS E SILTITOS COM INTERCALAÇÕES DE DELGADAS CAMADAS DE CARVÃO	CONTINENTAL: FLUVIAL/COSTEIRO MISTO: DELTAICO/MARINHO RASO
			ITARARÉ		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS) <i>(Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)</i>	CONTINENTAL: GLACIAL FLUVIAL LACUSTRE MISTO MARINHO (GLÁCIO-MARINHO)
	CARBONIFERO	TUBARÃO	AQUIDAUANA				
	Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS

Fonte: PERINOTTO; ZAINÉ, 2008.

Como pode ser observado na figura 8, apenas quatro unidades litoestratigráficas afloram na área de estudo: o Grupo Itararé indiviso, a Formação Tatuí, a Formação Corumbataí e a Formação Serra Geral intrusivas básicas (PERROTA et al., 2005).

O Grupo Itararé é indiviso no estado de São Paulo, correspondendo a uma única unidade constituída de arenitos com granulação variável, predominando granulometria média a grossa (SOARES, 1972). Ocorrem também pacotes expressivos de diamictitos e sedimentos pelíticos, representados por siltitos, folhelhos e ritmitos, podendo conter seixos e blocos erráticos. Subordinadamente, ocorrem camadas delgadas de carvão, pesquisadas pelo IPT no início dos anos 80 (CABRAL JR., 1991; SAAD, 1977 e FULFARO; GAMA JR; SOARES, 1980). A formação Itararé atinge espessura de até 1.400 m no sudoeste do estado, adelgaçando para nordeste.

Ascendendo na estratigrafia da área, tem-se a Formação Tatuí, bem desenvolvida na faixa de afloramentos do centro-leste do estado, sendo representada por siltitos e siltitos arenosos (PERINOTTO; ZAINE, 2008). A espessura aproximada da Formação Tatuí é de 50 metros e seu contato basal é admitido como transicional com o Grupo Itararé. Litologicamente, é composta por siltitos e lamitos de cores verde, creme e chocolate, geralmente maciços e bioturbados, constituindo-se numa sequência eminentemente pelítica. Subordinadamente ocorrem arenitos, conglomerados e calcários (ZAINE, 1994).

Sobre a Formação Tatuí, ocorre o Grupo Passa Dois, constituído pelas formações Irati e Corumbataí, na área estudada ocorre somente o afloramento da Formação Corumbataí.

A Formação Corumbataí apresenta em sua parte inferior, argilitos, folhelhos e siltitos de cores cinza escura, e na parte superior, argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados, com intercalações carbonáticas e camadas de arenitos muito finos e atinge uma espessura de 100 metros (PERINOTTO; ZAINE, 2008).

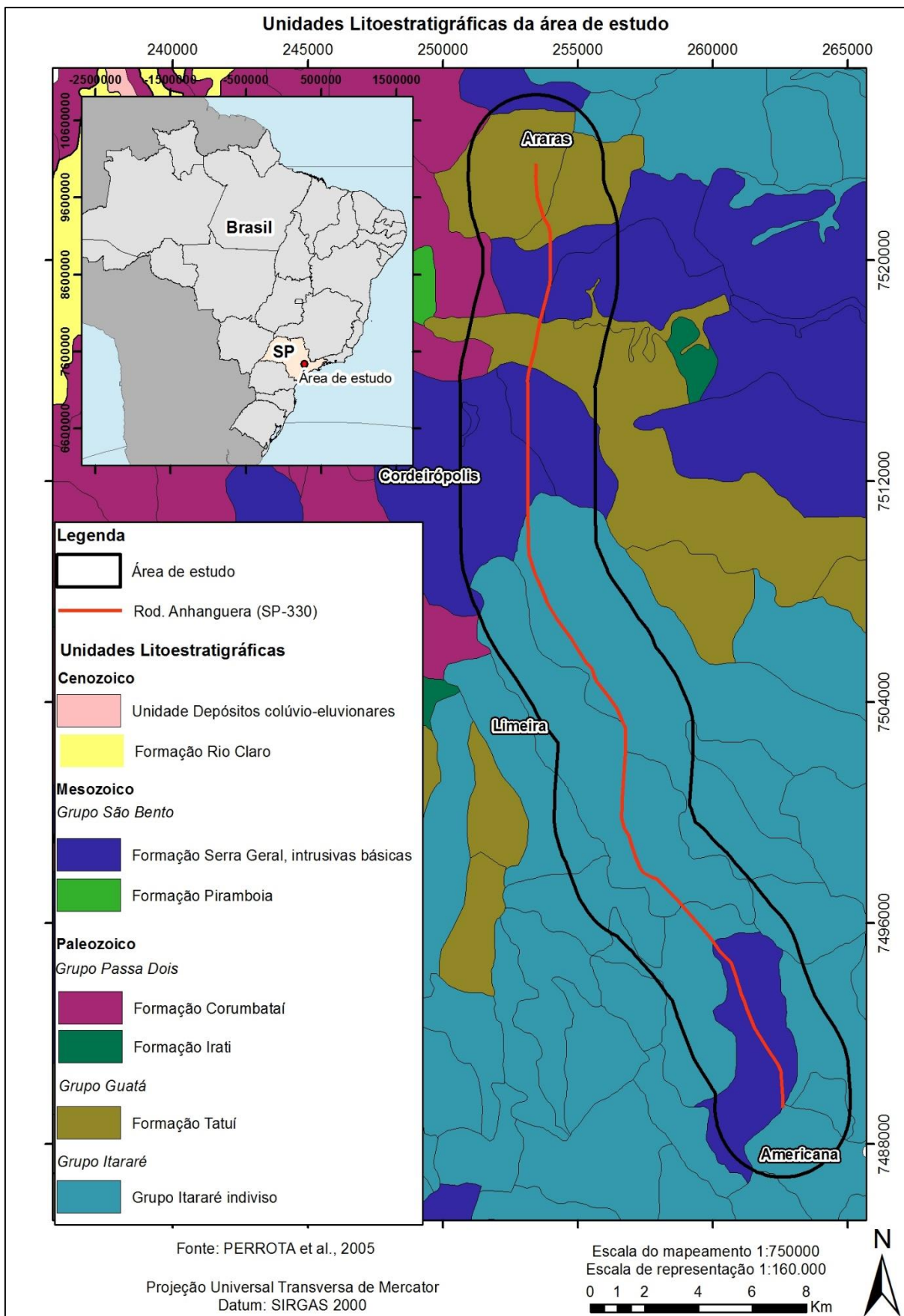
O Grupo São Bento é representado pelas formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral, com registros de uma sedimentação exclusivamente continental, marcada por um clima árido a semiárido e encerrada por um extenso vulcanismo (magmatismo) basáltico; na área de estudos afloram apenas a Formação Serra Geral, onde ocorrem as rochas básicas.

A Formação Serra Geral é composta por uma sequência de rochas vulcânicas predominantemente compostas por lavas basálticas, de composição toleítica, de

coloração cinza a preta, com amígdalas no topo dos derrames (ZAINÉ; PENTEADO-ORELLANA, 1994). Estão incorporadas aqui as rochas intrusivas associadas ao evento do vulcanismo da Bacia do Paraná, constituídas por diques e expressivas soleiras de diabásio. A extrusão das lavas foi dada por intenso vulcanismo de fissura, na primeira fase da Reativação Wealdeniana (ALMEIDA, 1964) ou Sul-Atlântica (SCHOBENHAUS et al., 1984).

De acordo com Zaine e Penteado-Orellana (1994), a Formação Serra Geral tem seus afloramentos na faixa de cuestas, às quais se associa pela relação litologia/erosão/relevo, e também em algumas faixas ao longo dos principais rios. Sua espessura é bastante variável, especialmente junto ao seu limite de ocorrência, podendo até estar ausente, em pleno Planalto Ocidental, como no alto estrutural de Piratininga - SP (SILVA et al., 1990).

Figura 8 - Unidades litoestratigráficas da área de estudo



Fonte: modificado de PERROTA et al., 2005

3.1.2 Geomorfologia

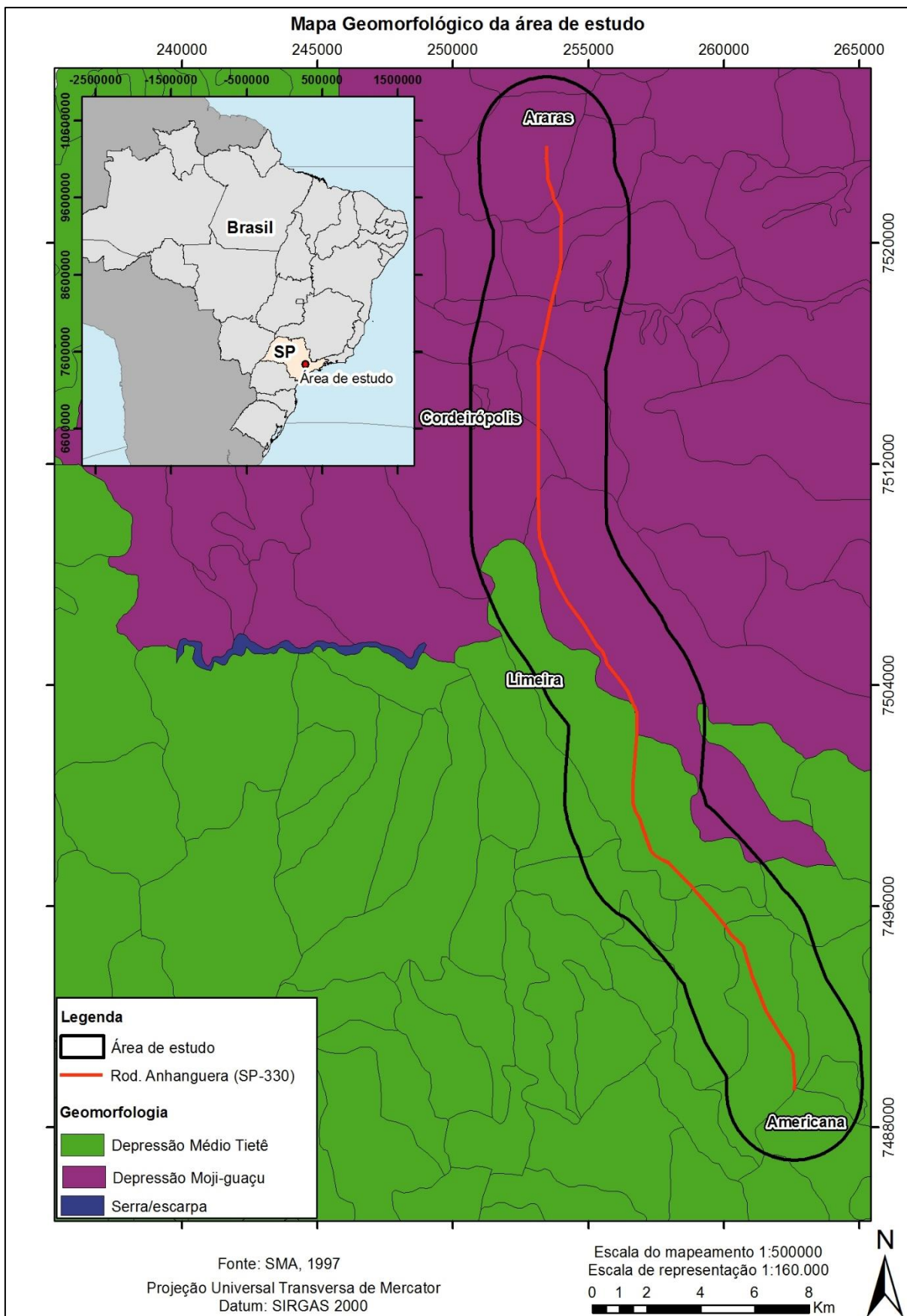
Segundo Ross e Moroz (1996), o estado de São Paulo divide-se geomorfologicamente em três Unidades Morfoestruturais (Cinturão Orogênico do Atlântico, Bacia Sedimentar do Paraná e Bacias Sedimentares Cenozoicas). A área de estudo encontra-se na Unidade Morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, onde ocorre duas Unidades Morfoestruturais a Depressão Periférica Paulista e o Planalto Ocidental Paulista, sendo a área de estudo pertencente a primeira.

Esta região está esculpida quase que totalmente em sedimentos paleozoicos e mesozoicos da Bacia Sedimentar do Paraná, apresentando características de modelado diverso devido à influência tectônica, variação litológica e graus de atuação de processos morfodinâmicos de variados ambientes paleoclimáticos. Apresenta altitudes que oscilam entre 600 a 750 m, sendo que as altitudes maiores margeiam as escarpas da frente de Cuesta sustentadas principalmente por derrames basálticos. É subdividida em três unidades morfológicas: Depressão Moji-Guaçu, Depressão Médio Tietê e Depressão Paranapanema (ROSS; MOROZ, 1996), estando a área de estudo inserida nas duas primeiras, como pode ser observado na figura 9.

A Depressão Moji-Guaçu é descrita como área de colinas com topos amplos e modelado dominante tabular, altitudes entre 500 e 700 m, baixa declividade e densidade de drenagem. A Depressão Médio Tietê também possui colinas com topos amplos com modelado dominante tabular associados a baixa densidade de drenagem e modelado convexo associados a alta densidade de drenagem, com altitudes variando de 500 a 650 m e baixa declividade (ROSS; MOROZ, 1996).

De acordo com o mapa geomorfológico do estado de São Paulo (IPT, 1981), a forma de relevo presente na área de estudo caracteriza-se como: colinas amplas, onde predominam interflúvios com área superior a 4 km², topos extensos e aplainados, vertentes com perfis retilíneos a convexos, drenagem de baixa densidade, padrão subdentrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes.

Figura 9 - Mapa Geomorfológico da área de estudo



3.1.3 Pedologia

Segundo Oliveira et al. (1999), que elaborou o mapa pedológico do estado de São Paulo, ocorrem na área de estudo três tipos de solo: Argissolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelho e Latossolos Vermelho-Amarelos (Figura 10).

Os Argissolos são caracterizados por material mineral, ou seja, formado predominantemente por compostos inorgânicos em vários estágios de intemperismo, apresentando horizonte B textural abaixo do horizonte A ou E. O horizonte B textural caracteriza-se por um horizonte mineral com significativo aumento de argila em relação ao horizonte A ou E, apresenta cerosidade e, em textura argilosa, estrutura em blocos (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992). Possuem argila de atividade baixa ou alta conjugada com saturação por bases baixa, e também podem apresentar caráter alítico na maior parte do horizonte B. O horizonte B textural encontra-se abaixo de qualquer tipo de horizonte superficial, exceto o hístico, entretanto, não apresenta os requisitos para serem classificados como Luvisolos, Planossolos, Plintossolos ou Gleissolos (EMBRAPA, 2006).

Os Argissolos Vermelho-Amarelos são definidos por serem solos com horizonte B textural, não hidromórficos, normalmente com argila de baixa atividade e são de moderadamente a bem drenados. São solos profundos, que apresentam sequência de horizontes do tipo A, B, C e cuja espessura não excede em 200 cm. Solos distróficos, com diversidade textural variando entre média-argilosa a argilosa e ocorrência associada a outros Argissolos Vermelho-Amarelos com diferentes características, além de texturas arenosa/média argilosa, média/argilosa, média e arenosa/média (EMBRAPA, 2006; PCJ, 2007).

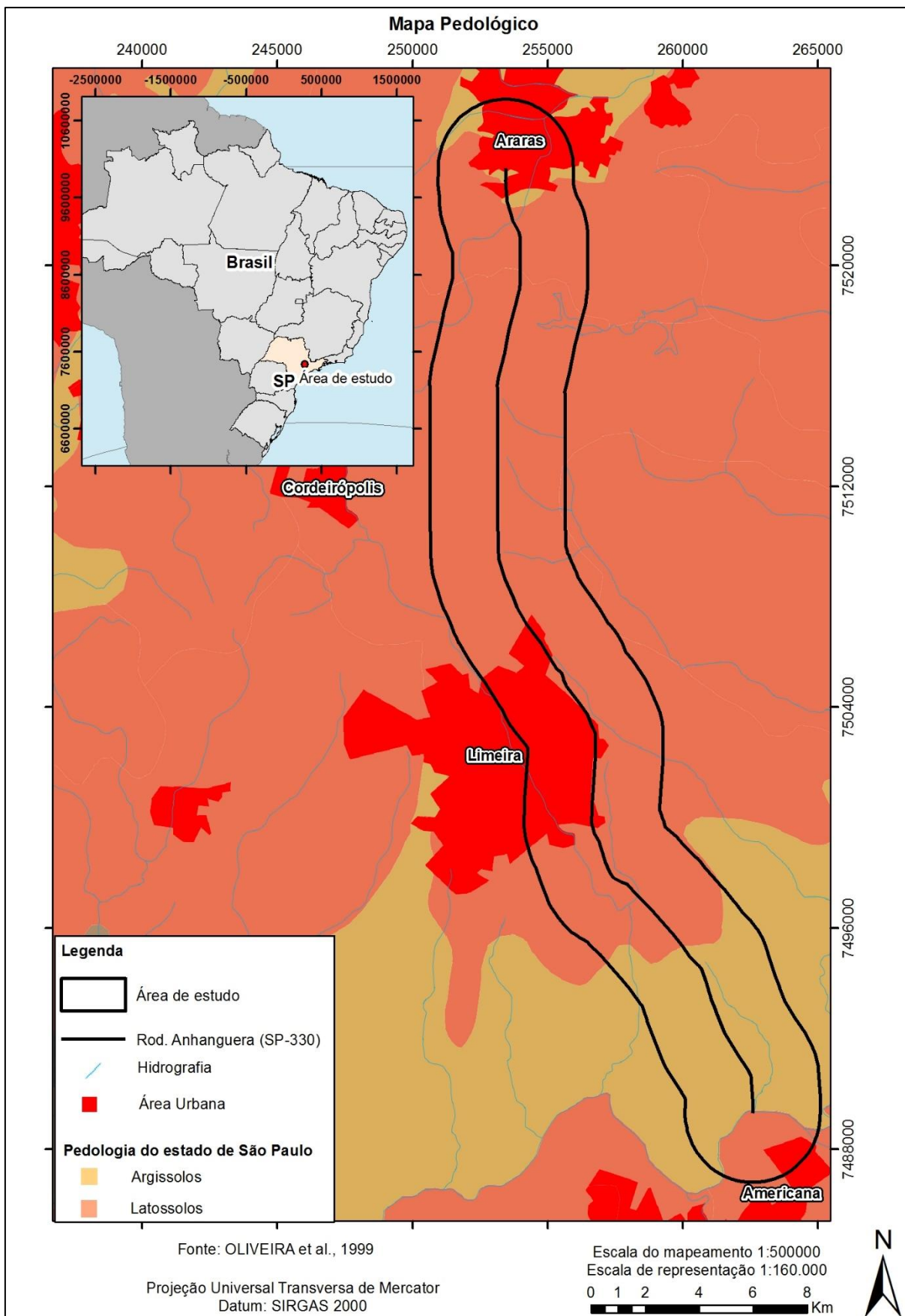
Já os Latossolos, de acordo com a EMBRAPA (2006), correspondem a solos constituídos por material mineral em estágio avançado de intemperismo e pouca argila em proporção ao horizonte A, apresentando horizonte B latossólico, abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte superficial, exceto hístico. Apresentam-se com avançado estágio de intemperização, bastante evoluídos devido as diversas transformações ocasionadas no material constitutivo.

Os Latossolos Vermelho (LV) correspondem aos solos minerais, não hidromórficos, com horizontes B latossólico e teores elevados de Fe_2O_3 , deixando o solo com cores mais avermelhadas, com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B. São solos profundos, acentuadamente

drenados, com pouca diferenciação entre os horizontes, com textura predominantemente argilosa, ocorrendo pequenas áreas de textura média (EMBRAPA, 2006; PCJ 2007).

Os Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) compreendem solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B latossólico e coloração variando do vermelho ao amarelo e gamas intermediárias. São normalmente muito profundos ou profundos, com sequência de horizontes A, B e C com transições difusas e graduais e são bem drenados, apresentam avançado estágio de intemperismo, com predominância de argilominerais do tipo 1:1, baixa quantidade de minerais primários, a relação silte/argila é menor que 0,7 e o grau de flocculação é normalmente igual ou próximo a 100%, refletindo o alto grau de agregação dos colóides, o que torna o solo mais poroso, propiciando maior resistência a erosão (PCJ, 2007). Possui também, propriedades distróficas e textura média, média e argilosa, argilosa e média/argilosa e, argilosa (EMBRAPA, 2006; OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992).

Figura 10 - Mapa Pedológico da área de estudo



Fonte: OLIVEIRA et al., 1999.

3.1.4 *Clima*

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger (1936) a área de estudo abrange dois tipos climáticos: o Aw, nos municípios de Limeira e Americana e Cwa, nos municípios de Araras e Cordeirópolis (CEPAGRI, 2016).

O Aw tem por características um clima tropical chuvoso com inverno seco e mês mais frio com temperatura média superior a 18° C. Apresenta estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco). As precipitações são superiores a 750 mm anuais, atingindo 1800 mm. O mês mais seco tem precipitação inferior a 60 mm e com período chuvoso que se atrasa para o outono (CEPAGRI, 2016; EMBRAPA, [20-?]).

Já o Cwa é descrito como clima subtropical de inverno seco com temperaturas inferiores a 18° C e verão quente com temperaturas superiores a 22° C (CEPAGRI, 2016; EMBRAPA, [20-?]).

Em Americana e Limeira a temperatura média é de 20.4° C e pluviosidade média anual é de 1270 mm. Em Cordeirópolis e Araras a temperatura média é de 20.3° C e a pluviosidade média anual é de 1308 mm (CLIMATE-DATE, 2016).

3.1.5 *Hidrografia*

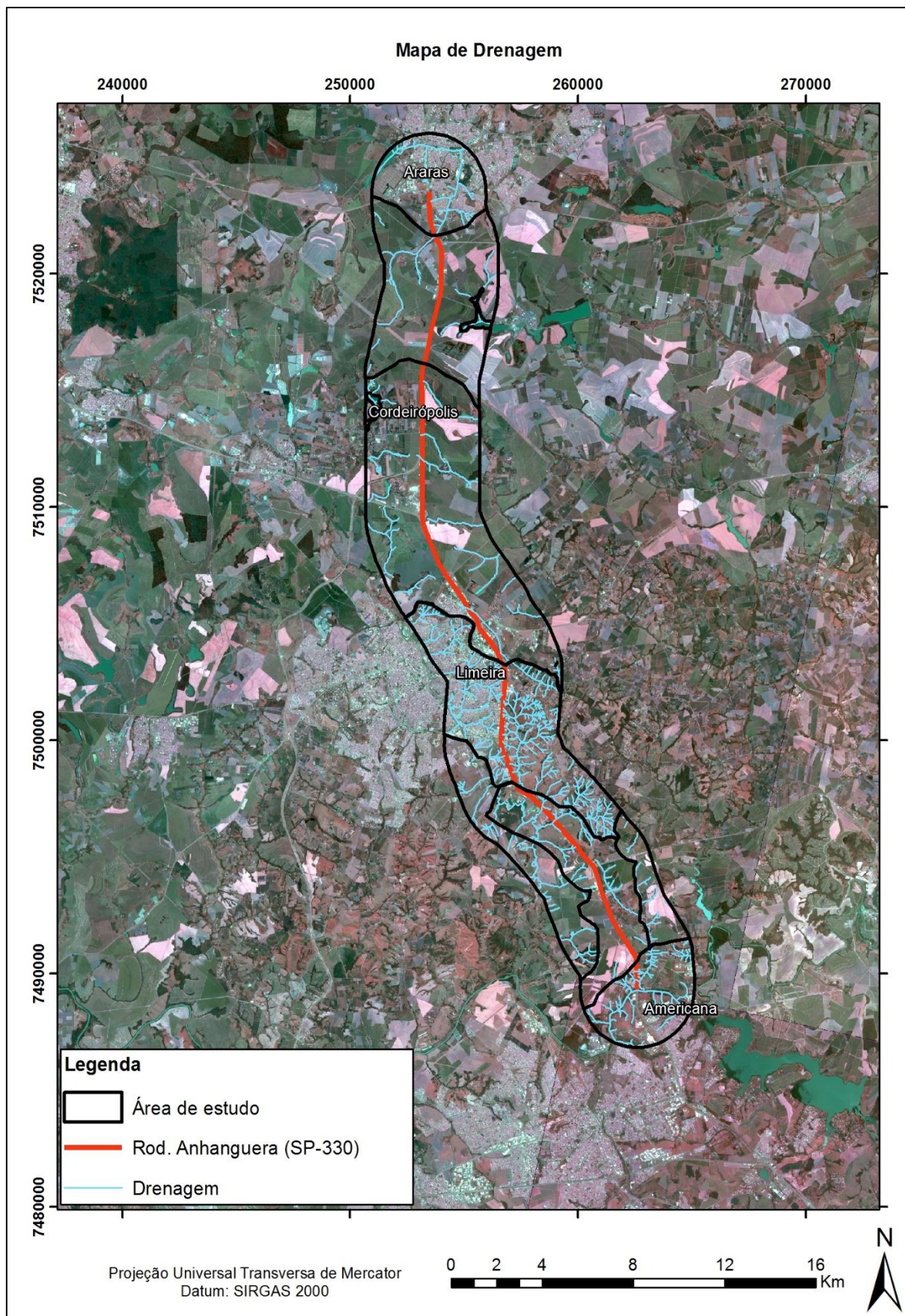
A área de trabalho está inserida em sua maior parte (Americana, Limeira e Cordeirópolis) na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do estado de São Paulo (UGRIH) Piracicaba/Capivari/Jundiaí (PCJ) e apenas o município de Araras se encontra na UGRHI Mogi-Guaçu (IGC, 2014).

A UGRHI PCJ é subdividida em sete sub-bacias das quais as sub-bacias do Piracicaba, Jaguari, Atibaia e Corumbataí fazem parte da área de estudo (PCJ, 2007). Nesta área perpassam o Ribeirão do Quilombo, a represa de Salto Grande, o Ribeirão do Tatu e o Rio Piracicaba (IGC, 2014)

A UGRHI Mogi-Guaçu compreende cinco sub-bacias da qual apenas a sub-bacia do Alto Mogi faz parte da área de estudo (SIGRH, 2015) e perpassa nessa área o Ribeirão das Ferraz e Ribeirão das Araras (IGC, 2014).

A Figura 11 representa a drenagem da área de estudo.

Figura 11 - Mapa de drenagem da área de estudo



Fonte: IGC, 1979.

3.1.6 Hidrogeologia

De acordo com o Instituto Geológico de São Paulo (2007) na área de estudo há a ocorrência de três aquíferos: Aquífero Tubarão, Aquífero Diabásio e Aquiclude Passa Dois.

O Aquífero Tubarão é um aquífero sedimentar de extensão regional, descontínuo, em horizontes e corpos localizados semi-confinado ou confinado pelo aquíclude Passa Dois e por outras unidades hidrogeológicas subjacentes. Constitui-se de sedimentos depositados em ambientes glacial, continental e marinho. As litologias encontradas, são siltitos, argilitos, folhelos, diamictitos arenitos muito finos e conglomeráticos e ritmitos que ocorrem como camadas com diferentes espessuras, intercaladas e descontínuas e baixa permeabilidade. Por sua grande variação faciológica, apresenta uma baixa transmissividade e, algumas áreas, como em Araras, são mais produtivas (IRITANI; EZAKI, 2009; ROCHA et al., 2006).

De acordo com Iritani e Ezaki (2009), o Aquíclude Passa Dois é uma unidade hidrogeológica sedimentar de extensão regional que separa os aquíferos Guarani e Tubarão. Formado por sedimentos depositados em ambiente marinho e suas litologias são predominantemente de folhelhos, siltitos, argilitos, calcários e dolomitos que ocorrem como camadas com diferentes espessuras, ocasionalmente, ritmicamente intercaladas. Possui baixa produtividade e não aflora na área de estudo.

Já o Aquífero Diabásio é um aquífero fraturado, com extensão restrita, ocorrendo manchas em meio aos aquíferos Tubarão e Guarani e no Aquíclude Passa Dois. É constituído por rochas ígneas, geradas a partir do resfriamento e solidificação do magma em subsuperfície. A circulação e armazenamento da água subterrânea estão condicionados à ocorrência de fraturas geradas por esforços tectônicos decorrentes da movimentação da crosta terrestre. Sua produtividade é baixa e bastante variável e aflora em Limeira, Cordeirópolis e Araras (IRITANI; EZAKI, 2009).

3.2 Meio Biótico

3.2.1 Flora

De acordo com o Inventário Florestal de 2010 realizado pelo Instituto Florestal (2010) há nos municípios integrantes da área de trabalho raros remanescentes de

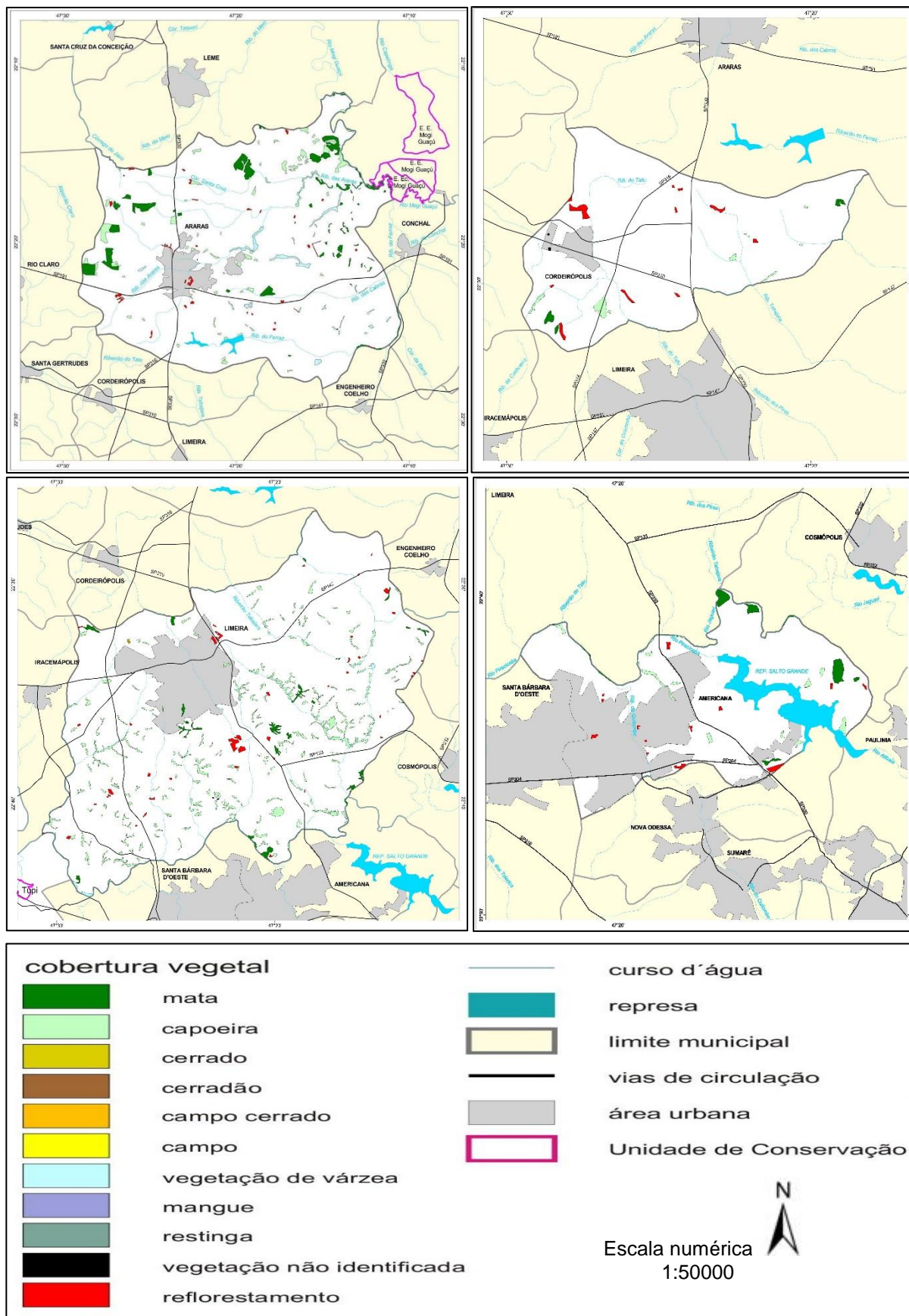
vegetação (3,1%), sendo eles das seguintes fitofisionomias: Floresta Estacional Semidecidual, Savana e Formação arbórea/arbustiva em Região de Várzea (Figura 12).

Segundo Kronka et al. (2005), IF (2010) e IBGE (2012), a Floresta Estacional Semidecidual é um tipo de vegetação caracterizada pela dupla estacionalidade climática, com um clima tropical com intensas chuvas de verão, seguida por estiagens acentuadas (dois a três meses) e queda parcial da folhagem (20% a 50% das árvores).

A vegetação de Savana, de acordo com Kronka et al. (2005), IF (2010) e IBGE (2012) corresponde à vegetação típica de Cerrado, com arbustos e árvores de até 6 metros de altura, com folhas espessas e caules tortuosos recobertos por casca espessa. É característico de regiões planas, com períodos de seca acentuada e solos pobres em nutrientes e ácidos, sendo muito semelhante, fisionomicamente, à Florestas Estacionais, apenas diferindo destas na sua composição florística.

A Formação arbórea/arbustiva em Região de Várzea caracteriza-se por uma formação ribeirinha ou floresta ciliar que ocorre ao longo dos cursos d'água, apresentando um dossel emergente uniforme e estrato dominado e submata (IF, 2010).

Figura 12 - Mapa Florestal dos municípios da área de estudo



Fonte: IF, 2010.

3.3 Meio Socioeconômico

3.3.1 Uso e Ocupação

Segundo PCJ (2013) e SIGRHI (2015), a área é ocupada em sua maior parte pela cultura semi-perene de cana-de-açúcar, seguida por pastagens e/ou campos antrópicos, cultura perene de *Citrus*, áreas urbanas e industriais, pouquíssimas áreas com culturas anuais e como foi supracitado exíguas áreas com vegetação nativa ou reflorestamento.

3.3.2 População e PIB

De acordo com o SEADE (2017), o município mais populoso é o de Limeira, o menos é o de Cordeirópolis. O que possui maior número de habitantes/Km² é o de Americana e o menor é o de Cordeirópolis (Tabela 1).

A média do Índice de Desenvolvimento Humano dos Municípios (IDHM), medida que leva em consideração a riqueza/renda, educação e expectativa média de vida da população, é considerada alta (de 0,700 a 0,799) e muito alta (acima de 0,8) e como se pode observar, apenas o município de Americana está no patamar muito alto comparado aos municípios do estado de São Paulo (Tabela 1) (PNUD, 2010; SEADE, 2017).

Tabela 1 - Dados socioeconômicos gerais

Município	População (2017)	Dens. Demográfica (2017) hab/km ²	IDHM (2010)
Americana	227223	1696,83	0,811
Araras	127501	197,73	0,781
Cordeirópolis	23425	170,26	0,758
Limeira	290613	500,44	0,775

Fonte: Adaptado de SEADE, 2017 e PNUD, 2010.

Além disto, o PIB (Produto Interno Bruto) dos municípios advém em sua maior parte do setor de serviços, seguido da indústria e da agropecuária, com exceção do município de Cordeirópolis, onde a maior parte do seu PIB provem do setor da

indústria, acompanhado do setor de serviços e por último o de agropecuária (IBGE, 2016).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Na confecção deste trabalho foram usados diversos materiais, segue abaixo a sua descrição.

4.1.1 Revisão e Levantamento Bibliográfico e Cartográfico

Para o desenvolvimento desta pesquisa e elaboração do embasamento teórico, primeiramente, foi realizado um levantamento e revisão da bibliografia e cartografia sobre os parâmetros físicos, biológicos e socioeconômicos da área de estudo, comportamento dos hidrocarbonetos em meios porosos e fraturados e em diferentes tipos de solos, índice de sensibilidade ambiental e conceitos relacionados, compartimentação fisiográfica, árvore lógica de decisão, dentre outros.

4.1.2 Base de Dados

Como parte fundamental desta pesquisa, foi montada uma base cartográfica através de recortes do mosaico de imagens ortorretificadas SPOT, chamadas de SPOTMap. Este mosaico foi obtido através da sobreposição de imagens orbitais do satélite SPOT 5, com 2,5m de resolução espacial, escala 1: 25.000, em composição colorida (RGB), no formato *GeoTiff*, datadas dentro do intervalo de anos de 2007 e 2010, compatíveis com a escala de trabalho que será de 1:25.000 e cedidas pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo.

O recorte da área de estudo seguiu a articulação 1:25.000 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) com datum SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) 2000 e sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM).

Do mesmo modo, foram utilizadas 23 folhas topográficas (Quadro 1) na escala 1:10.000 do Plano Cartográfico do estado de São Paulo, (1979). Estas folhas foram georreferenciadas e vetorizadas no *software* ArcGIS versão 10.2.2 (ESRI, 2014), onde foi realizada a mudança de datum de Córrego Alegre para SIRGAS 2000, conforme resolução atual do IBGE.

Quadro 1- Folhas topográficas utilizadas

Código “XY”	Nome da Folha	Código da Folha
63-93	Araras I	SF-23-Y-A-II-3-NO-F
63-94	Araras II	SF-23-Y-A-II-3-NE-E
64-93	Araras III	SF-23-Y-A-II-3-SO-B
64-94	Fazenda Santo Antônio	SF-23-Y-A-II-3-SE-A
65-93	Fazenda Remanso	SF-23-Y-A-II-3-SO-D
65-94	Usina São João	SF-23-Y-A-II-3-SE-C
66-93	Bairro do Cascalho	SF-23-Y-A-II-3-SO-F
66-94	Usina São Jerônimo	SF-23-Y-A-II-3-SE-E
67-93	Limeira I	SF-23-Y-A-V-1-NO-B
67-94	Ribeirão do Pinhal	SF-23-Y-A-V-1-NE-A
68-93	Limeira III	SF-23-Y-A-V-1-NO-D
68-94	Limeira IV	SF-23-Y-A-V-1-NE-C
69-93	Limeira V	SF-23-Y-A-V-1-NO-F
69-94	Limeira VI	SF-23-Y-A-V-1-NE-E
70-94	Bairro do Tatu	SF-23-Y-A-V-1-SE-A
70-95	Represa do Tatu	SF-23-Y-A-V-1-SE-B
71-94	Rayon-Fibra S/A	SF-23-Y-A-V-1-SE-C
71-95	Americana I	SF-23-Y-A-V-1-SE-D
72-94	Americana II	SF-23-Y-A-V-1-SE-E
72-95	Americana III	SF-23-Y-A-V-1-SE-F
72-96	Represa do Salto Grande	SF-23-Y-A-V-2-SO-E
73-95	Nova Odessa	SF-23-Y-A-V-3-NE-B
73-96	São Francisco	SF-23-Y-A-V-4-NO-A

Fonte: Elaborado pela autora.

Também compõem o banco de dados:

- ✓ Carta de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) do estado de São Paulo, adquiridas a partir da fotointerpretação sistemática de elementos texturais e tonais em produtos de sensoriamento remoto, geradas em parceria do IG com a SMA (Secretaria do Meio Ambiente) do

estado de São Paulo. Essas cartas, em formato *shapefile*, apresentam uma escala de 1:50.000;

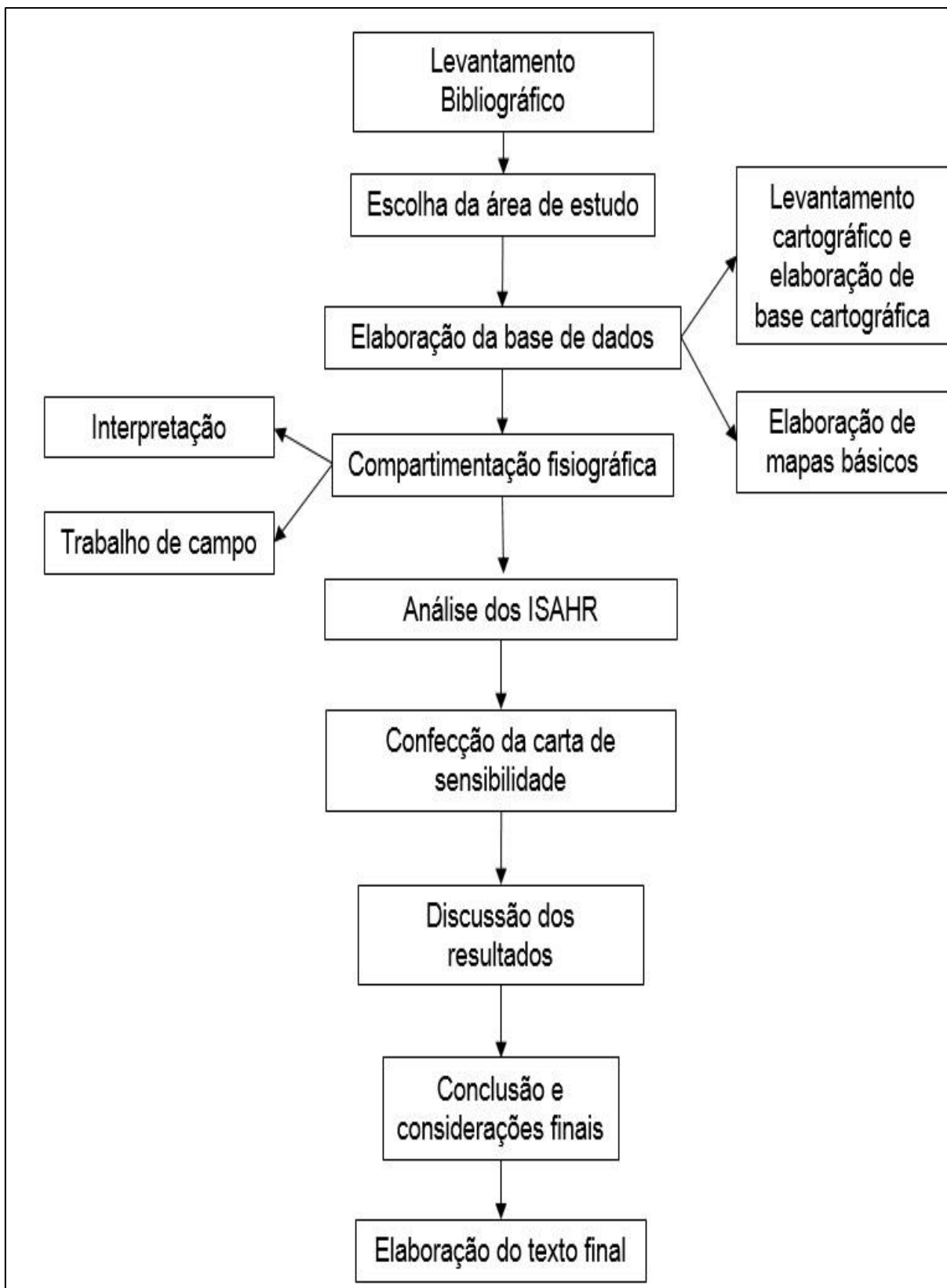
- ✓ Mapa de Rodovias do estado de São Paulo, conseguidos no site do IBGE, em formato *shapefile*, na escala 1:50.000;
- ✓ Mapa de Municípios do estado de São Paulo, também arranjados no site do IBGE, em formato *shapefile*, em uma escala 1:50.000 e,
- ✓ Informações sobre as rodovias e as características físicas, biológicas e socioeconômicas da área de estudo obtidas em formato *shapefile* através de bases virtuais, como a Base Territorial Ambiental Unificada na Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do estado de São Paulo (DataGEO) desenvolvido pela CETESB;

Todas as cartas topográficas foram digitalizadas e seus dados foram vetorizados e tratados no *software* ArcGis 10.2.2 (ESRI, 2014), assim como para a elaboração dos mapas necessárias para o estudo. Os equipamentos de informática usados foram computador, notebook, scanners e impressoras, além de máquina fotográfica, GPS (Global Positioning System) e outros materiais necessários ao trabalho de campo disponíveis no Laboratório de Geoprocessamento, do Departamento de Geologia Aplicada (DGA), na UNESP, campus de Rio Claro.

4.2 Métodos

O estudo foi realizado de acordo com as 10 etapas apresentadas no fluxograma da Figura 13. Deve-se ressaltar que cada etapa deste trabalho utiliza um método diferente para sua realização.

Figura 13 - Etapas de trabalho



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1 Etapa 1: Levantamento bibliográfico

Recorreu-se a uma intensa busca, com o auxílio da internet, às principais bibliotecas nacionais e internacionais, onde pôde ser constatado que a discussão sobre o tema sensibilidade ambiental ao óleo, voltado a ambientes terrestres ainda é muito incipiente. Foram realizados três tipos de busca (simples, avançada e booleana) utilizando o Google e Google *scholar*, Catedra (biblioteca digital de teses e dissertações) e Portal de Periódicos Capes, dentre outros, ambos disponíveis na página da biblioteca da UNESP e também, em acervos digitais internacionais.

4.2.2 Etapa 2: Escolha da área de estudo

A área de estudo teve sua seleção baseada em suas características físicas inerentes à região, além de aspectos relacionados à produção de derivados de petróleo, ampla utilização de rodovias como principal meio de transporte e ocorrências de acidentes envolvendo produtos perigosos.

Como supracitado, a rodovia Anhanguera ocupou a segunda posição no ranking de rodovias com acidentes envolvendo produtos perigosos dos últimos 18 anos (CETESB, 2016). Além disso, o trecho escolhido como área de estudo perpassa regiões com diferentes características físicas, com certa variação litológica, pedológica e geomorfológica, apresentando assim uma área com diversidade em relação aos parâmetros físicos.

Uma vez que não foi encontrado na literatura o alcance horizontal de hidrocarbonetos em ocorrências de derramamentos, foi delimitada uma área de influência (*buffer*) de 2,5 km de raio, para cada lado da margem da rodovia (Figura 6), totalizando 5 km de largura dentro da área de estudo. Este limite foi estabelecido a partir das experiências práticas da CETESB em eventos de emergências químicas em rodovias.

Fazendo uso do *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014) adicionou-se o *shapefile* “*buffer_area*” e determinou-se na Rodovia Anhanguera (SP-330) o início da área de estudo em Araras, e o final da área no município de Americana, totalizando cerca de 45 km de extensão. A partir disso, através da ferramenta *Buffer* criou-se o polígono da área de estudo com 100 m a mais devido a distorções que podem ocorrer.

4.2.3 Etapa 3: Elaboração da Base de Dados

A base de dados foi organizada em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), no caso o ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014), com o intuito de agregar todas as informações, referentes à base cartográfica, às imagens orbitais utilizadas e aos mapas gerados, considerados necessários para a obtenção do índice de sensibilidade.

Para a elaboração da base de dados, diversas atividades foram desenvolvidas, são elas:

4.2.3.1 Seleção da escala adequada

De acordo com Martins (2012), por tratar-se de uma região com dispersão de óleo horizontal, relativamente restrita e com tipologia de descargas de pequeno e médio volume, o mapeamento de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos em rodovias apresenta nível operacional, cuja escala cartográfica exigida é a de detalhe, que pode variar entre 1:10.000 a 1:50.000 (MMA, 2004). Portanto, a escala escolhida para este estudo foi a de 1:25.000. Esta opção de escala também foi determinada devido a não disponibilidade de materiais e dados com escala de maior detalhe.

4.2.3.2 Levantamento cartográfico

Consistiu na aquisição das imagens orbitais, mapas e cartas junto de diversos órgãos como: IBGE, IG, IGC e outros;

Para a elaboração da base topográfica foram utilizadas as folhas topográficas apresentadas no Quadro 1. Estas folhas foram georreferenciadas e articuladas para a vetorização das curvas de nível, que foram digitalizadas equidistantes de 5 em 5 metros, pontos cotados e hidrografia no *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014) com a ferramenta *Creature features*, utilizando-se de linhas e pontos e também da ferramenta *Editor* para editar os mesmos.

4.2.3.3 Elaboração dos mapas básicos

4.2.3.3.1 Modelo Numérico de Terreno (MNT)

A partir da digitalização das curvas de nível, pontos cotados e drenagem foi elaborado uma triangulação através do modelo numérico do terreno (MNT) do tipo TIN com o *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014), através da ferramenta *3D Analyst tools* com os seguintes passos: *data managemant*, *TIN* e *Create TIN*, em seguida foi adicionado o *shapefile* “*curvanivel_area*”, referente à digitalização das curvas de nível nas folhas topográficas da área de estudo e em seguida foi gerado um novo arquivo em formato TIN. A partir deste arquivo foi possível desenvolver os mapas hipsométrico e de declividade.

4.2.3.3.2 Mapa de Declividade

O mapa de declividade está em porcentagem e foi dividido em sete classes de acordo com Lepsch (1983), entretanto na área de estudo ocorrem somente as cinco primeiras: < 2 (plano), 2,01-5 (suave ondulado), 5,01-10 (ondulado), 10,01-15 (moderadamente ondulado) e 15,01-45 (fortemente ondulado), sem filtro.

4.2.3.3.3 Mapa Hipsométrico

Para a confecção do mapa hipsométrico (*elevation*), deve-se estabelecer primeiramente as classes de altimetria que mais se adéquam à área a ser mapeada. A área foi dividida em oito classes hipsométricas com intervalos de 30 metros, definidos a partir da cota mínima da área (500 m).

4.2.3.3.4 Mapa de Fraturas

A extração das fraturas da área de estudo foi realizada, pois em locais com presença de substrato rochoso o deslocamento do contaminante será determinado pela quantidade, orientação e distribuição de fraturas presentes na região (NEWELL et al., 1995). Na área de estudo, com substrato na maior parte sedimentar, o

deslocamento do contaminante pode se dar tanto pelos poros do solo quanto pelas fraturas da rocha.

As fraturas foram identificadas na imagem orbital como feições lineares que no geral, condicionam as drenagens. Também foram identificadas de acordo com sua forma, cor e localização. A extração das feições foi realizada no *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014) e sua representação realizada em *shapefile* no formato linha.

Após a extração das fraturas da área de estudo foi realizado um diagrama de rosáceas no *software* *Spring 5.4* (CAMARA et al., 1996), a fim de determinar as principais direções destas estruturas através da frequência relativa.

4.2.3.3.5 Mapa da profundidade do lençol freático

Para a elaboração deste mapa foi necessário localizar as nascentes da área de estudo para determinar a profundidade do nível d'água da região, característica importante em relação à sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos, devido à capacidade do contaminante atingir as águas subterrâneas. Estes dados foram extraídos da imagem de satélite através de um *shapefile* de pontos junto do mapa de curvas de nível que continham os valores referentes às cotas altimétricas das nascentes presentes na área através do *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014). Além de dados relacionados aos aquíferos correspondentes. Esses dados (coordenadas X e Y e cotas altimétricas) foi passado para uma tabela em formato Excel. Não foram utilizados os dados dos poços do DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica do estado de São Paulo) e sim, somente as nascentes por retratarem mais fielmente o nível do freático já que as mesmas são consideradas como afloramentos do lençol freático, portanto a cota altimétrica pode ser usada para representar sua profundidade e por, de maneira geral, a profundidade dos poços serem modificadas de acordo com a necessidade de cada usuário.

Em posse dessas informações, foi realizada uma interpolação entre os valores das nascentes, utilizando o *software* *Surfer 10* (GOLDEN SOFTWARE, 2011), para a determinação da profundidade do nível do lençol freático na área de trabalho. O método de interpolação utilizado foi o de Curvatura Mínima. Este método consiste em utilizar grades regulares e triangulares, que representam a superfície através das informações de coordenadas X e Y, e a partir disso determinar o valor Z, admitindo-se que dois pontos adjacentes de um levantamento estejam contidos num mesmo

arco, e este fique localizado em um plano, no qual se conhece a inclinação e o ângulo de orientação (SAWARYN; THOROGOOD, 2005). A partir disto, foi confeccionada uma malha regular e subtraída da malha topográfica. A diferença entre as duas malhas resultou em uma malha que representa a profundidade do nível d'água.

4.2.4 Etapa 4: Compartimentação Fisiográfica

A compartimentação fisiográfica foi feita utilizando-se técnicas de fotointerpretação, segundo metodologia proposta por Zaine (2011), com o intuito de determinar os segmentos ambientais, com características homogêneas, para a realização da análise da sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos das feições presentes na área de estudo. Nessa técnica, o produto cartográfico gerado é único, porém seccionado em unidades do terreno que refletem as diferentes características referentes ao relevo, solo, geologia, dentre outros, cujas informações são sintetizadas e apresentadas como uma análise integrada (Zaine, 2011). Estas unidades homogêneas serão aqui denominadas de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs).

A identificação das UBCs foi efetuada manualmente com base nos elementos texturais e estruturais da drenagem e do relevo, a partir das imagens SPOT, SRTM, e mapas auxiliares como de: declividade, hipsométrico, densidade de drenagem, fraturas, pedologia e o mapa de Unidades Básicas de Compartimentação (UBC) confeccionado pela CPLA (Coordenadoria de Planejamento Ambiental) de São Paulo do Instituto Geológico (IG/SMA-SP), baseados nos procedimentos propostos por Vedovello (2000) e que também utilizaram níveis hierárquicos baseados em mapas geomorfológicos elaborados por Ross e Moroz (1997) e mapas geológicos do estado de São Paulo, elaborado por Perrota et al. (2005).

Todavia, devido à escala desse material apresentar-se com um menor detalhe, 1:50.000, realizou-se um detalhamento da compartimentação, utilizando os métodos e classificações propostos por Zaine (2011) (Figuras 4 e 5), além de técnicas de fotointerpretação que se basearam na assimilação dos resultados da fotoanálise, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos, de forma a identificar o significado, função e relação das características das unidades fisiográficas delimitadas e, como último processo desta etapa foi utilizado o trabalho de campo para refinar e corroborar cada divisão dos compartimentos, além de adicionar outros critérios e características

que não foram obtidas por meio da fotoanálise, como propriedades de interesse à percolação e retenção dos hidrocarbonetos (textura, tipo e espessura do perfil de alteração).

Os critérios mais relevantes eleitos para serem aplicados na área de estudo foram: densidade de drenagem, permeabilidade, espessura do manto de alteração, amplitude, declividade, forma da encosta, forma do vale, forma do topo, acrescentados da geomorfologia, pedologia e litologia pela autora deste trabalho.

Para a identificação dos critérios de análise relacionados a densidade dos elementos de drenagem foi utilizada a extração de drenagens realizada nas folhas topográficas 1:10.000 da área apresentadas no Quadro 1. E de acordo com Soares e Fiori (1978) a identificação da rede de drenagem fornece informações importantes sobre a estrutura geológica da área, além de variações no estilo estrutural e nas fácies litológicas. Como critério de delimitação deste parâmetro utilizou-se o proposto por Zaine (2011): baixa densidade de drenagem (0 a 5/10 Km²), média densidade (5 a 30/10 km²) e alta acima de 30/10 Km². E, pode-se inferir com este critério que a permeabilidade intergranular é inversamente proporcional a densidade da drenagem, ou seja, quanto maior a densidade da drenagem mais baixa a permeabilidade intergranular (ZAINÉ, 2011).

A análise da forma do relevo é realizada através da identificação de rupturas de declive, que definem as variações do relevo na superfície, permitindo a identificação de diferentes zonas homólogas e determinando propriedades distintas das rochas (SOARES; FIORI, 1978).

Os critérios de análise amplitude e declividade foram obtidos através da análise dos mapas hipsométrico e de declividade da área de estudo, seguindo a classificação proposta por Zaine (2011). Desta forma, para a determinação das UBCs foram estabelecidos os seguintes intervalos de classes de declividade: baixa (0 - 15%); média (15 - 30%); e alta (acima de 30%). Para a amplitude foram estabelecidos os intervalos de: pequena (0 a 100 m); média (100 a 300 m); e grande (acima de 300 m).

Em relação às formas de encosta/vertente (côncava, convexa ou retilínea), formas de vale (aberto ou fechado) e formas de topo (aplainados, arredondados ou angulosos), estes parâmetros foram identificados com o auxílio dos mapas hipsométrico e de declividade, além de identificação de forma manual, através da imagem SPOT e das curvas de nível.

Os critérios pedologia, geomorfologia e litologia e suas características relevantes ao índice foram inferidos com o uso dos seguintes mapas: levantamento pedológico semidetalhado dos solos do estado de São Paulo em escala 1:50.000 (OLIVEIRA, MENK; ROTTA, 1979), mapa geológico do estado de São Paulo em escala 1:750.000 (PERROTA et al., 2005) e mapa geomorfológico do estado de São Paulo em escala 1:500.000 (SMA, 1997) e acurados com o trabalho de campo.

4.2.4.1 Trabalho de Campo

A fim de corroborar a compartimentação fisiográfica, além de adicionar outros critérios e características que não foram obtidas por meio de materiais bibliográficos e cartográficos, como suas propriedades de interesse à percolação e retenção do óleo (porosidade e permeabilidade do perfil de alteração e tipo dos mesmos), foi realizado trabalho de campo na área de estudo. Segundo Florenzano (2002), o trabalho de campo caracteriza-se como uma atividade indispensável no processo de mapeamento do meio ambiente através de imagens de sensoriamento remoto, pois é parte do processo de interpretação das imagens, auxiliando na identificação de possíveis incoerências interpretativas, além de fornecer novas observações sobre a área.

Em cada ponto foram anotadas as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator), profundidade do perfil de solo, informações sobre o perfil e registro fotográfico dos mesmos. Os pontos foram escolhidos de acordo com a existência de corte para observação do perfil e também pela sua localização em vicinais da rodovia e pela facilidade de acesso e segurança.

De início foram delimitados 14 compartimentos, que foram associados por similaridade de características constatadas na imagem de satélite. No total foram 10 pontos de campo (Tabela 2) e obteve-se como resultado a redução dos iniciais 14 compartimentos para 8 devido à similaridade entre eles observadas em campo.

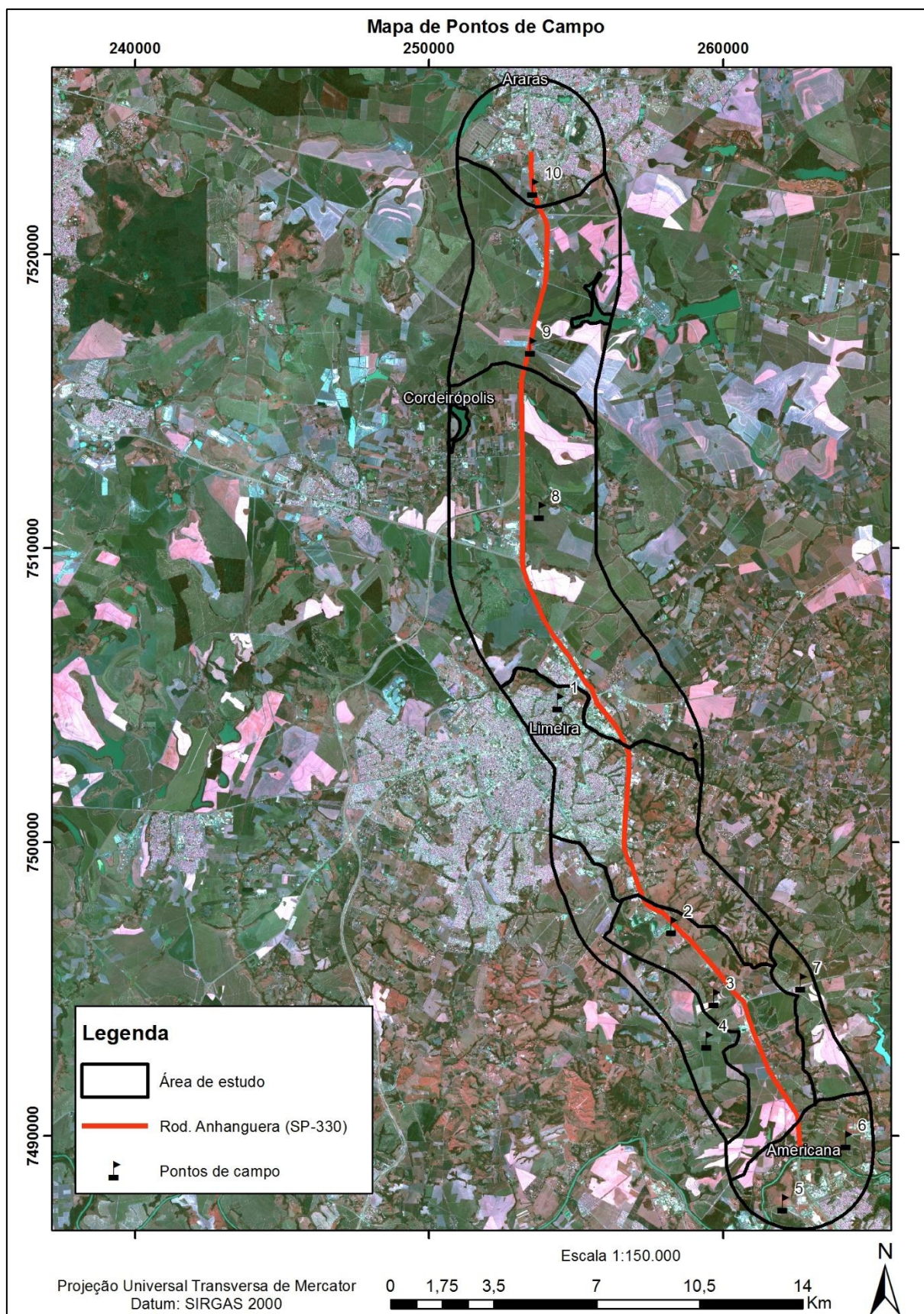
Para esta etapa do trabalho foram confeccionadas: um mapa de pontos de campo (Figura 14), com pelo menos um ponto por compartimento; uma tabela de atributos com as características mais relevantes de cada compartimento; fichas de campo para anotação dos dados coletados no mesmo e mapa dos compartimentos sobrepostos à imagem de satélite.

Tabela 2 - Pontos de campo e suas coordenadas

Pontos	X	Y
1	245721	7352676
2	254406	7504745
3	258277	7497129
4	259725	7494684
5	259474	7493231
6	262055	7487692
7	264208	7489837
8	253773	7511271
9	253467	7516858
10	253543	7522270

Fonte: Elaborada pela autora

Figura 14 - Mapa de Pontos de campo



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.5 Etapa 5: Análise e elaboração do índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias

Após a realização do trabalho de campo e das adequações necessárias ao mapa de compartimentação fisiográfica da área de estudo, foram realizadas as análises dos parâmetros físicos relevantes à formulação do índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos com aplicação nas rodovias.

Segundo Martins (2012), o sistema de índices para o modal rodoviário deve ser adaptado seguindo parâmetros condizentes com a constituição ambiental terrestre e a respectiva dinâmica do óleo nesse meio.

Observando os primeiros Índices de Sensibilidade Ambiental (ISA) aos derrames de óleo, criados pelos pesquisadores da USC (Universidade da Carolina do Sul - EUA), e os atualmente utilizados (NOAA e MMA) no âmbito internacional e nacional respectivamente, verifica-se que a solução encontrada foi definir os índices baseado nos processos físicos que controlam a deposição dos hidrocarbonetos, como persistência ou longevidade no ambiente e extensão do dano biológico (GUNDLACH & HAYES, 1978).

De forma mais simplificada, o ISA é definido de acordo com as características geomorfológicas dos habitats, levando em consideração a persistência natural do óleo e sua limpeza (MMA, 2004).

Os índices utilizados para o litoral e o fluvial usam a caracterização geomorfológica dos mesmos para fins de classificação, em termos de sensibilidade ambiental ao óleo, é realizada a partir da identificação de segmentos de interesse, ou seja, de trechos da área de estudo com características homogêneas (MMA, 2004), representadas linearmente.

Martins (2012) e Ribeiro (2017) buscaram seguir a mesma lógica, identificando segmentos a partir da delimitação de zonas homólogas do terreno, uma vez que esta parte do princípio de que, no interior de uma zona, as propriedades dos elementos do meio físico são similares. Os compartimentos estabelecidos são representados como polígonos, correspondentes a áreas do terreno, o que é condizente com os ambientes terrestres, que não são lineares, como ocorre na análise da sensibilidade costeira.

Para a delimitação destas zonas, empregou-se a técnica de compartimentação fisiográfica baseada no trabalho de Zaine (2011) como já descrito anteriormente.

E para esta pesquisa e construção do índice foram determinados os seguintes parâmetros: declividade, textura do solo do perfil de alteração (permeabilidade), espessura do perfil de alteração, densidade da drenagem e a profundidade do lençol freático. Abaixo segue a explicação e justificativa da escolha de cada parâmetro.

4.2.5.1 Declividade

Segundo Martins (2012), a dinâmica do óleo no meio ambiente é governada, em primeiro momento, pela declividade. Dependendo do ângulo de declive, o deslocamento pode tender à verticalidade ou à horizontalidade. O autor ainda complementa dizendo que apesar da evidente contribuição da declividade no deslocamento do óleo, o fato de não se encontrar na literatura estudos para esse fim dificulta uma discussão mais minuciosa, levando à adoção de abordagens e definições lógicas ao desenvolvimento das classes desta variável.

A declividade foi reutilizada como parâmetro por já ter sido gerada e classificada como propriedade do relevo para fins de compartimentação fisiográfica, porém para facilitar a elaboração do índice ela foi dividida em três intervalos de classe (baixa, média e alta), reduzindo as possibilidades de combinações entre as variáveis, além de representar um espectro em que estivessem presentes os extremos máximos, mínimos e intermediários.

Onde a baixa declividade (0 - 15%) apresenta alta sensibilidade ambiental; média declividade (15 – 30%) apresenta sensibilidade intermediária e declividade alta (acima de 30%) caracterizou-se por baixa sensibilidade. Para a determinação deste componente do índice de sensibilidade ambiental das UBCs foi feito um mapa onde se pode inferir a declividade dominante em cada compartimento.

4.2.5.2 Textura do perfil de alteração

Além da declividade, a extensão horizontal e vertical que o hidrocarboneto derramado pode atingir depende, simultaneamente, do tipo do solo (BTC, 2011). O perfil de solo, ou perfil de alteração, é o produto do intemperismo e da pedogênese e

é estruturado verticalmente, a partir da rocha matriz, na base, sobre a qual são formados o saprólito e o *solum* (TOLEDO; OLIVEIRA; MELFI, 2001).

Martins (2012) buscou agrupar o tamanho dos grãos da forma que estes fossem condizentes com as nomenclaturas das classes tipicamente utilizadas (fina, média e grossa) para a definição dos intervalos das classes consistentes com a sensibilidade ambiental atribuída.

Tomando como referência duas características da textura do perfil de alteração, a capacidade de retenção e condutividade hidráulica, as quais influenciam a dinâmica do hidrocarboneto no subsolo, é possível correlacionar o tamanho do grão que compõe o material com respectivo impacto inerente.

De acordo com USDA (1993), a permeabilidade do perfil aumenta com o aumento do tamanho dos grãos que compõe o solo, ou seja, solos com textura mais grossa (arenosa) são mais permeáveis do que solos com textura mais fina (argilosa).

Desta forma, é possível entender, que quanto maior o grau de permeabilidade, maior o impacto ambiental e, por extensão, mais sensível é o meio e quanto menor forem os grãos que compõem o material, menor é a permeabilidade e a tendência é que a condutividade hidráulica seja menor na direção vertical e maior na direção horizontal (HULING; WEAVER, 1991; NEWELL et al., 1995). Esta condição diminui a possibilidade de a zona saturada ser atingida, contaminando o lençol freático, e reduz as chances de os hidrocarbonetos alcançarem rochas fraturadas.

De acordo com Martins (2012) e EMBRAPA (2006), este parâmetro foi dividido em três classes de textura: grossa (perfil predominantemente arenoso, mais de 70% de areia e menos de 15% de argila), alta permeabilidade e, portanto, alta sensibilidade ambiental; textura média (equilíbrio entre os teores de areia, silte e argila), média permeabilidade e, assim sendo média sensibilidade; e, textura fina (solos predominantemente argilosos com teores de argila superiores a 35%), baixa permeabilidade e, conseqüentemente baixa sensibilidade ambiental.

A textura do material do perfil de alteração foi aferida com a ajuda do levantamento feito por Oliveira, Menk e Rotta (1979) e corroborada em trabalho de campo, através da análise de cada perfil de alteração.

4.2.5.3 Espessura do perfil de alteração

De acordo com Martins (2012), as classes para este parâmetro foram determinadas de acordo com técnicas de combate e dinâmica de percolação de óleo no substrato.

O principal problema em se tratando de derramamento de hidrocarbonetos em ambiente com perfil de alteração pouco espesso é que o contaminante alcance a rocha e ela esteja fraturada (SCHMELLING; ROSS, 1991). Outro problema em perfis pouco espessos é o fato do método de escavação, apesar de poder ser o método mais econômico de recuperação, não ser indicado para áreas onde haja afloramentos rochosos (BEYNON et al., 1983).

Esta condição denota a alta sensibilidade inerente aos perfis pouco espessos, uma vez que a remediação deste ambiente é mais complexa quanto mais raso for o solo. E solos profundos são mais suscetíveis à aplicação de diferentes métodos de limpeza e recuperação, além de manter distante a possibilidade de uma rocha fraturada ser atingida.

Além da dificuldade técnica de limpeza e remediação, em uma área fraturada o hidrocarboneto pode alcançar regiões profundas de forma muito rápida, pois sua capacidade de retenção tende a ser muito baixa (MACKAY; CHERRY, 1989), facilitando a contaminação do lençol freático.

Diante do exposto foram determinados os seguintes intervalos para este parâmetro: pouco espesso (<1 m) e alta sensibilidade ambiental; espessura intermediária (1 a 2 m) e média sensibilidade e muito espesso (>2 m) baixa sensibilidade. A obtenção dessas classes ocorreu através de medições da espessura do perfil de alteração localizados em perfis expostos em cortes da rodovia e em estradas próximas para cada compartimento.

4.2.5.4 Densidade de Drenagem

A densidade de drenagem é uma variável que possui estreita correlação com a permeabilidade. A permeabilidade é uma propriedade dos materiais que é caracterizada pela maior ou menor facilidade de percolação de um fluido em um meio poroso e é resultado da comunicação entre os espaços intergranulares das rochas ou

materiais inconsolidados ou, ainda, entre os espaços produzidos por fraturamento (SOARES; FIORI, 1976).

Para áreas sedimentares, caso da área de estudo, a permeabilidade é aferida como sendo inversamente proporcional à densidade de drenagem, ou seja, quanto maior a densidade de drenagem, menor a permeabilidade, uma vez que a permeabilidade é função da capacidade de infiltração (ZAINÉ, 2011). Com isso, como já explicado anteriormente, áreas com alta permeabilidade são mais sensíveis ambientalmente do que aquelas com baixa permeabilidade.

Na área de estudo utilizou-se da rede de drenagem digitalizada através das folhas topográficas 1:10.000 para definir as classes de densidade de drenagem. De acordo com Martins (2012) por tratar-se de um parâmetro relativo que não possui valor padrão que correlacione diretamente com a permeabilidade, optou-se por utilizar da classificação realizada para a compartimentação fisiográfica da área, proposta por Zaine (2011). Desta forma, foi realizado um cálculo do número de drenagens que ocorrem dentro de cada compartimento. As classes foram divididas de acordo com os mesmos intervalos apresentados na seção 4.2.4 deste capítulo: baixa densidade de drenagem (0 a 5/10 Km²) e alta sensibilidade ambiental, média densidade (5 a 30/10 Km²) e média sensibilidade e alta acima de 30/10 Km² e baixa sensibilidade ambiental.

4.2.5.5 Profundidade do lençol freático

O nível d'água (N.A.) é, provavelmente, a variável mais estudada quanto à sensibilidade ambiental ao derrame de óleo. A maioria dos guias de técnicas de limpeza do óleo no subsolo tem como foco o NA, seja como bem a ser protegido ou como alvo vetor de caminho do óleo.

Segundo Martins (2012), entender a correlação da profundidade do N.A. com a sensibilidade ambiental do ambiente é trivial. A sensibilidade é maior quanto mais rasa estiver a zona saturada, já que, nesta condição, o lençol freático será mais rapidamente atingido.

Caso o óleo derramado infiltre no perfil do solo, e não fique retido na camada menos permeável, fatalmente irá alcançar o lençol freático. Alcançando as águas subterrâneas, o óleo poderá ser carreado a outras regiões, por meio do fluxo das águas (VIANA, 2009).

Dependendo do tipo de hidrocarboneto, poderá, no primeiro momento, flutuar próximo ao nível d'água, seguindo o fluxo hidráulico (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998), ou em outras direções, caso sejam formados montículos de óleo (NEWELL et al., 1995), aumentando consideravelmente a sensibilidade do meio. A área que o óleo impactará, neste caso, será ampliada devido à migração do óleo também horizontalmente. Outro fator agravante que aumenta a sensibilidade ambiental relacionada ao N.A. é quando ocorre a lixiviação de componentes solúveis, devido à percolação de água ou pela flutuação do lençol freático (HULING; WEAVER, 1991).

Para a determinação do nível do lençol, fez-se uso do mapa hipsométrico e do mapa do nível do lençol freático descrito anteriormente no item 4.2.3.5 do presente capítulo, subtraindo o nível do freático da altimetria e obtendo como resultado a profundidade do lençol freático para cada ponto escolhido dentro do compartimento, foi escolhido no mínimo três pontos aleatoriamente dentro de cada compartimento e posteriormente realizado uma média aritmética simples (soma total dos termos dividida pelo número total de termos), já que dentro de um mesmo compartimento há muitas variações do nível do lençol freático.

As classes para este parâmetro seguiram a proposta de Martins (2012) e foram definidas de acordo com o quartil do número de classes dos dados aferidos. E foram divididas em três classes: raso para profundidade até 15 m e, portanto, alta sensibilidade ambiental; intermediário entre 15 e 45 m de profundidade e, conseqüentemente média sensibilidade; e profundo com mais de 45 m de profundidade e, por conseguinte baixa sensibilidade.

Em posse dos dados referentes às classes de cada parâmetro, foi elaborado o índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias (ISAHR) dos compartimentos.

Inicialmente foram determinados pesos para cada classe dos cinco parâmetros analisados. Cada classe, de cada parâmetro, foi analisada levando em consideração seu possível comportamento frente aos hidrocarbonetos. Os maiores pesos estão sempre relacionados ao fato da classe ser mais sensível aos contaminantes. Deste modo, as classes com baixa sensibilidade ambiental receberam peso 1 (cor verde), as classes de sensibilidade ambiental média receberam peso 2

(cor amarela), e as que apresentam alta sensibilidade ambiental apresentam peso 3 (cor vermelha), como pode ser observado no quadro 2 abaixo.

Quadro 2 - Parâmetros, classes e pesos que compõem o Índice de Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias (ISAHR)

Parâmetros	Classes	Peso para cada classe
Declividade	Alta > 30%	1
	Média 15-30%	2
	Baixa < 15%	3
Textura do perfil de alteração	Argilosa	1
	Média	2
	Arenosa	3
Espessura do perfil de alteração	Muito espesso > 2 m	1
	Intermediária 1 – 2 m	2
	Pouco espesso < 1 m	3
Densidade de drenagem	Baixa (0 a 5/10 Km ²)	3
	Média (5 a 30/10 Km ²)	2
	Alta (> 30/10 Km ²)	1
Profundidade do lençol freático	Profundo > 45 m	1
	Intermediária 15 – 45 m	2
	Raso < 15 m	3

Fonte: Elaborado pela autora.

Posteriormente a este processo, realizou-se uma análise integrada dos dados, a fim de se obter um resultado ponderado dos mesmos e assim determinar a sensibilidade de cada compartimento da área de estudo e elaborar o mapa final.

Primeiramente, fazendo uso do *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014), foi feita uma *shapefile* para cada parâmetro com suas classes e pesos respectivamente. Estas *shapefiles* foram transformadas de polígono para *raster*, utilizando-se da ferramenta *Polygon to Raster*. Essa transformação de formato é necessária para que se possa usar a ferramenta *Weighted Sum*, pois a mesma só admite o formato *raster*.

Em seguida, no mesmo software, fez-se o uso da ferramenta *Weighted Sum*. Esta ferramenta permite a atribuição de pesos e importância relativa a diferentes classes e a combinação de múltiplos fatores, possibilitando uma análise integrada. Ela multiplica o valor das classes determinadas pelo peso específico atribuído a elas. Após a multiplicação, ocorre a soma conjunta do valor de cada parâmetro adicionado












para a formação de um valor final. Então, foram colocados os cinco parâmetros escolhidos e transformados em formato *raster* nesta ferramenta.

Após o processamento dos dados foram obtidos os valores mínimo e máximo para a sensibilidade ambiental das rodovias: 5 para áreas de menor sensibilidade ambiental, ou seja, os compartimentos em que todos os pesos apresentarem valor 1 (baixa sensibilidade) e, 15 para as áreas de maior sensibilidade, compartimentos em que todos os pesos apresentarem valor 3 (alta sensibilidade).

Assim, com a adaptação dos valores e cores correspondentes ao Índice de Sensibilidade Ambiental proposto pela NOAA/MMA para ambientes costeiros e fluviais para o ambiente terrestre proposto por Riberio (2017) (Quadro 3). Onde, o menor valor, equivalente a 5, no Índice de Sensibilidade Ambiental aos Hidrocarbonetos para Rodovias (ISAHR) foi associado ao valor 1 no Índice de Sensibilidade Ambiental (ISA) da NOAA/MMA e o maior valor, equivalente a 15, no ISAHR, associado ao valor 10 A no ISA. Essa compatibilização possibilitou a integração entre ambientes costeiros, fluviais e terrestres. Para fazer essa adequação de valores utilizou-se da ferramenta *Reclassify* do ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014).

Posteriormente, ainda no *software* ArcGIS 10.2.2 (ESRI, 2014), foi realizada a transformação da *shapefile* do formato *raster* para polígono novamente (ferramenta *Raster to Polygon*), para a elaboração final do mapa de sensibilidade ambiental a hidrocarbonetos para rodovias, produto final da presente dissertação, e as análises necessárias do mesmo.

Quadro 3 - Adaptação do ISA (NOAA/MMA, 2004) para o Índice de Sensibilidade Ambiental aos Hidrocarbonetos para Rodovias

Índice de Sensibilidade Ambiental NOAA/MMA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 B	10 A
Cor											
Índice de Sensibilidade Ambiental obtido pela metodologia utilizada para Rodovias	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Fonte: RIBEIRO, 2017.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados os resultados obtidos nessa dissertação e a discussão dos mesmos.

5.1 Base de dados

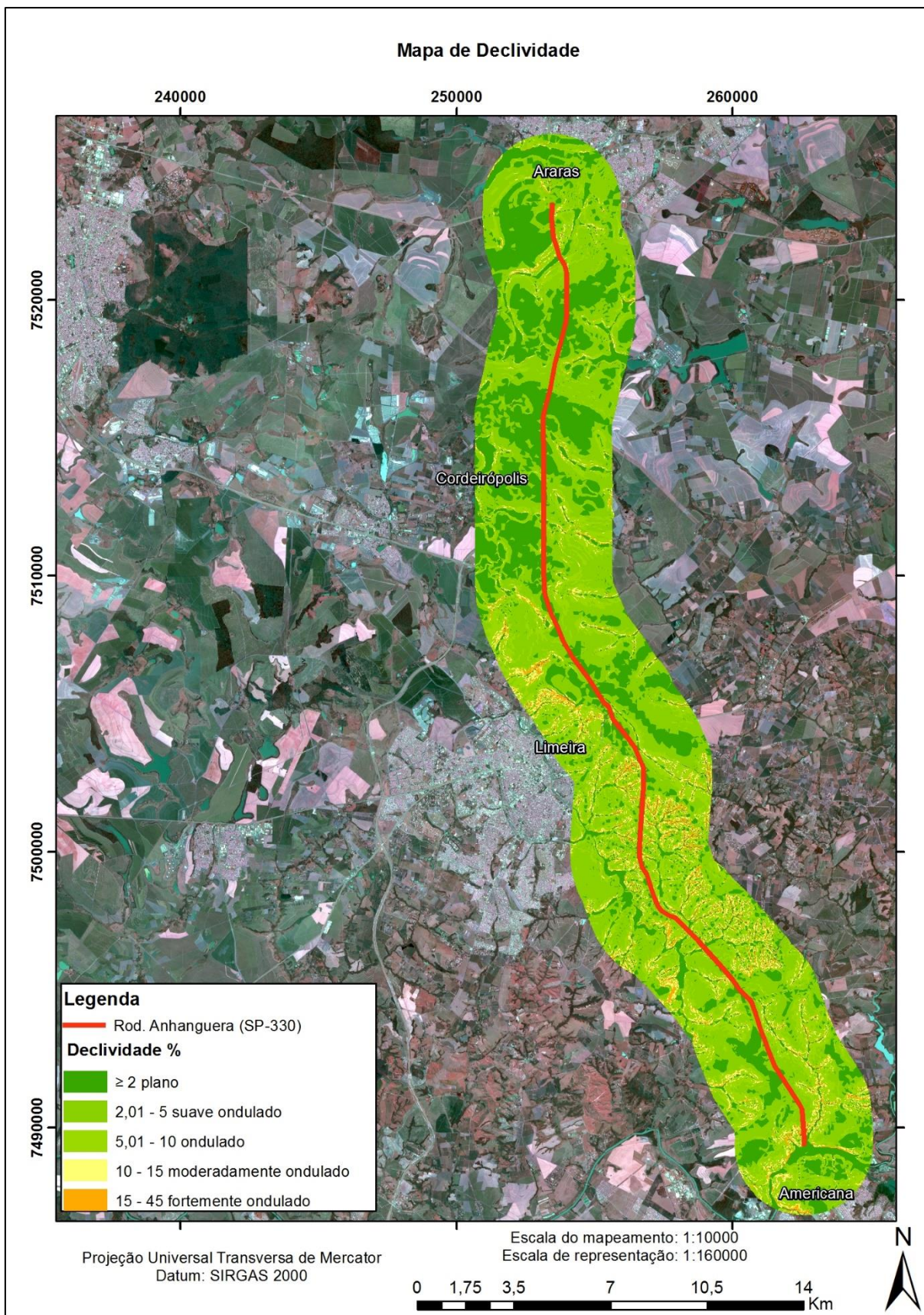
A base de dados elaborada possibilitou a confecção dos mapas básicos e outros dados necessários à elaboração do Índice de Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias e seu mapa, bem como da carta de sensibilidade.

5.2 Mapas de declividade e hipsométrico

No presente estudo foram elaborados os mapas de declividade e hipsométrico para auxiliar na definição das feições fisiográficas do terreno e posteriormente na análise da sensibilidade ambiental da área. De acordo com Martins (2012), a dinâmica do óleo no meio ambiente é amplamente influenciada pela declividade, pois dependendo do ângulo de declive, o deslocamento pode ser vertical ou horizontal.

Como pode ser verificado na Figura 15, a área de estudo apresenta, de uma forma geral, baixas declividades, com um valor médio de declividade de 4,5% e sua maior declividade com valor de 38%, sendo em sua maior parte suavemente ondulado, corroborando com o estudo de Ross e Moroz (1996).

Figura 15 - Mapa de Declividade



Fonte: Elaborado pela autora

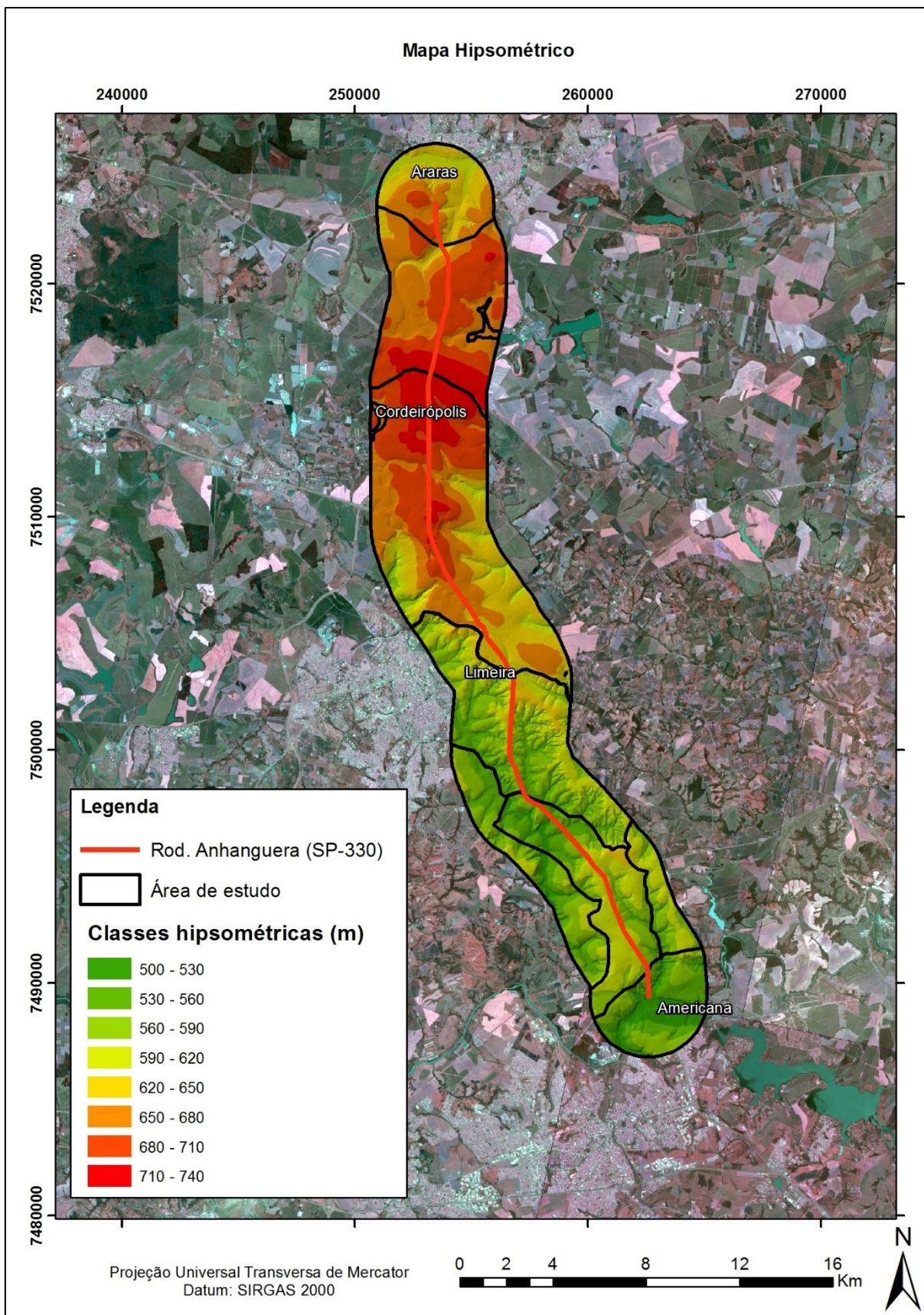
Na Figura 16, pode-se observar que a área de trabalho apresenta de forma geral baixas altitudes (500 m a 740 m), com máximo de 740 metros, correspondendo à descrição geomorfológica de Ross e Moroz (1996). Nota-se também, que as maiores altitudes se localizam na região Norte do mapa e ao Sul as menores.

Assim, em uma análise que relaciona a hipsometria e a declividade com o comportamento dos hidrocarbonetos, a área de estudo apresenta alta sensibilidade ambiental, pois em áreas que apresentam baixos valores de declividade, e dependendo das características de permeabilidade e condutividade hidráulica do solo, o contaminante tende a direcionar-se ao subsolo (FUSSEL et al., 1981) e se o mesmo for raso poderá chegar facilmente ao lençol freático.

Em áreas que apresentam alta declividade, o óleo tende a espalhar-se horizontalmente, mesmo em casos em que esteja sujeito à permeabilidade superficial. Entretanto, Martins (2012) ressalva que essas regiões podem apresentar alta sensibilidade ambiental devido às características locais de substrato e organismos biológicos, portanto é necessária uma análise mais detalhada dessas regiões para a determinação adequada dos índices de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos nestas regiões.

Porém, para o parâmetro declividade que compõe o índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias, o mapa de declividade teve que ser feito de acordo com as classes estabelecidas, baixa (0 a 15%), média (15 a 30%) e alta (> 30%), para facilitar a classificação de cada compartimento de acordo com sua declividade.

Figura 16 - Mapa Hipsométrico



Fonte: Elaborado pela autora.

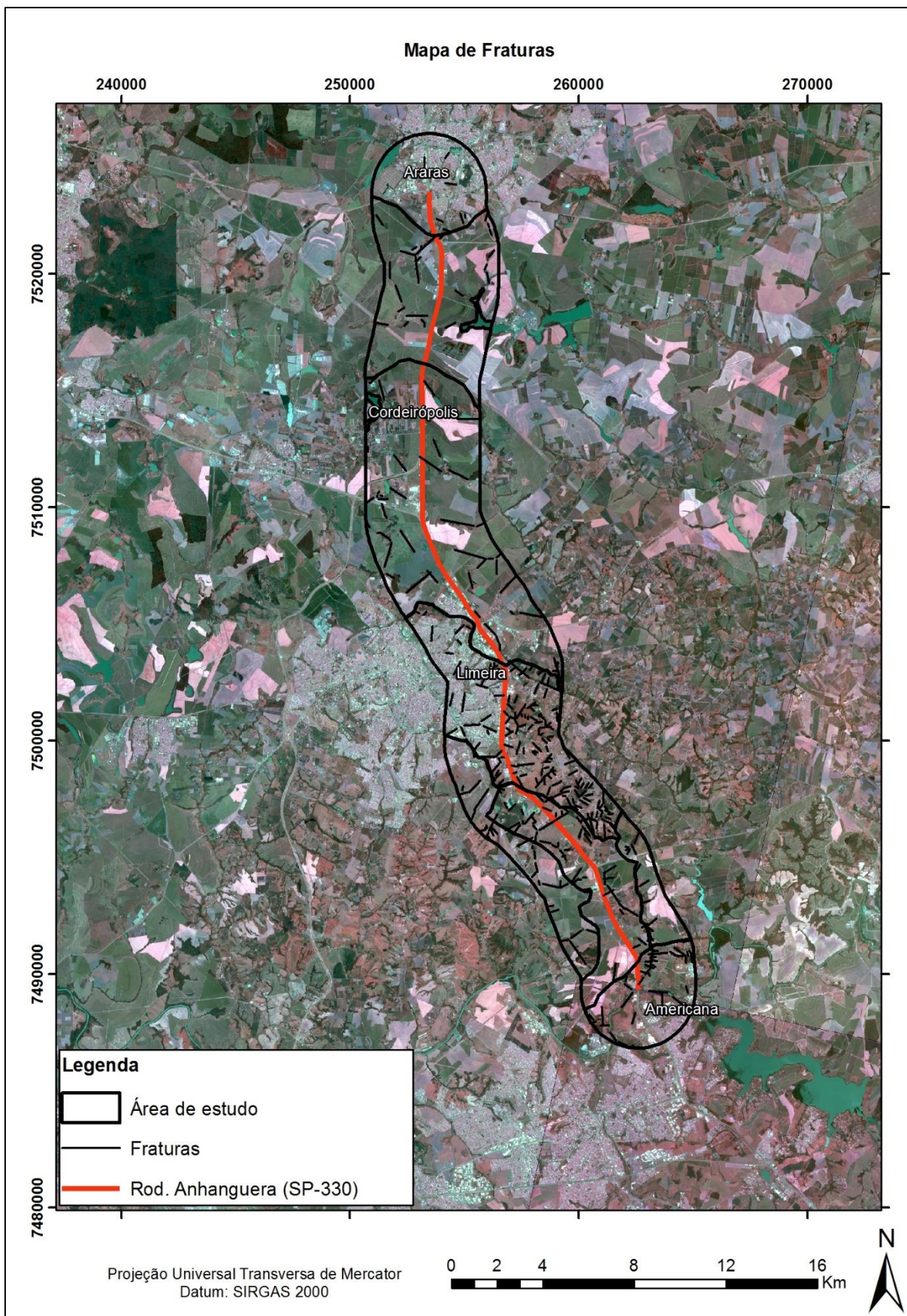
5.3 Mapa de Fraturas

As fraturas também influenciam diretamente os valores de sensibilidade ambiental ao óleo. Os esforços de compressão e distensão que ocorrem na superfície, devido aos processos endógenos, acabam por gerar rupturas nos terrenos que facilitam a percolação de óleo em subsuperfície.

Em locais de maciços rochosos com fraturamentos, o contaminante pode direcionar-se para estes espaços, podendo alcançar diversas direções e maiores profundidades. Em locais de rochas sedimentares, com poucas fraturas, como é o caso da área de estudo, a maior percolação será condicionada pela espessura e textura do solo da região. Informações sobre a orientação das fraturas são essenciais para determinar o possível direcionamento do contaminante em regiões fraturadas.

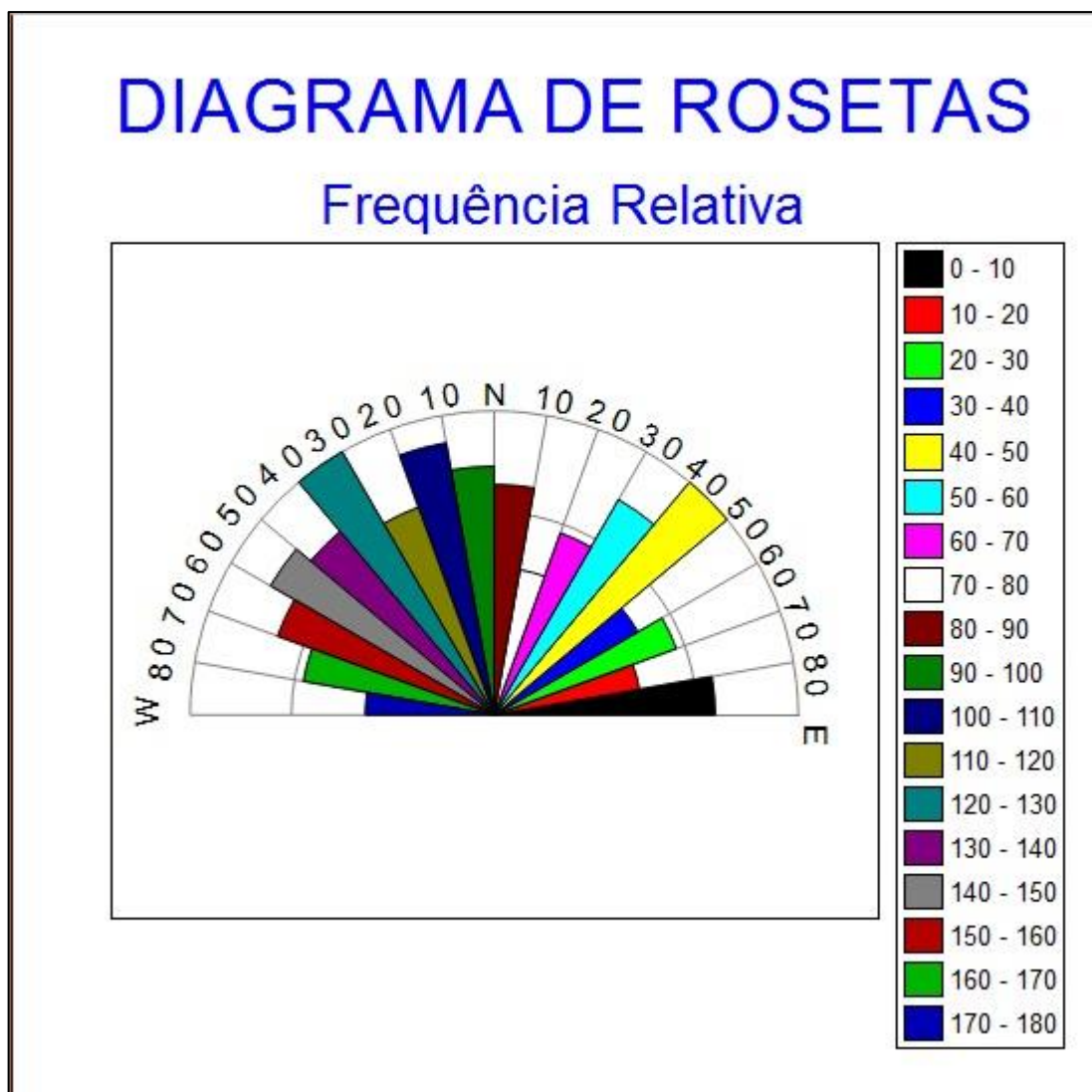
A Figura 17 apresenta o mapa com as fraturas extraídas da área de estudo em escala de representação 1:160.000 e de mapeamento 1:10.000 e a Figura 18 mostra o diagrama de rosetas com a frequência relativa das fraturas mapeadas. A direção predominante é NE-SW entre 40 e 50 graus e NW-SE entre 30 e 40 graus, segundo Sousa e Morales (1999) e Sousa (2002), esse sistema de fraturas (NW-SE e SW-NE) controla, claramente, as drenagens e paisagens locais. A área mais fraturada é aquela onde há maior densidade de drenagem.

Figura 17 - Mapa de fraturas da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 18 - Diagrama de rosetas das fraturas em frequência relativa



Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo assim, pode-se afirmar que, ao se tratar de derrames de óleo na região, as fraturas vão condicionar uma absorção na direção NW-SE, principalmente entre N40W e N50W.

Portanto, associando-se essas informações, em uma análise da sensibilidade ambiental preliminar da área, pode-se afirmar que as áreas com maior quantidade de fraturas apresentam alta sensibilidade ambiental ao óleo, pois o contaminante em contato com essas feições poderá atingir rapidamente os cursos d'água e/ou a água subterrânea se o solo for pouco espesso. Ressalva-se, que nesta pesquisa, não foi considerada a sensibilidade fluvial, pois neste caso deve ser utilizada uma metodologia específica de sensibilidade para este ambiente.

5.4 Mapa de profundidade do lençol freático

Segundo Martins (2012), o nível d'água (N.A.) é, provavelmente, a variável mais estudada quanto à sensibilidade ambiental ao derrame de óleo. A maioria dos guias de técnicas de limpeza do óleo no subsolo tem como foco o NA, seja como bem a ser protegido ou como alvo vetor de caminho do óleo.

Entender a correlação da profundidade do lençol freático com a sensibilidade ambiental do ambiente é de extrema importância. A sensibilidade é maior quanto mais rasa estiver a zona saturada, já que, nesta condição, o lençol freático será mais rapidamente atingido.

Caso o óleo derramado infiltre no perfil do solo, e não fique retido na camada menos permeável, fatalmente irá alcançar as águas subterrâneas. Alcançando o nível d'água, o contaminante poderá ser carregado a outras regiões, por meio do fluxo das águas (VIANA, 2009).

Dependendo do tipo de óleo, poderá, no primeiro momento, flutuar próximo ao lençol freático, seguindo o fluxo hidráulico (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998), ou em outras direções, caso sejam formados montículos de óleo (NEWELL et al., 1995), aumentando consideravelmente a sensibilidade do meio. A área que o óleo impactará, neste caso, será ampliada devido à migração do mesmo também horizontalmente.

Outra situação que aumenta a sensibilidade ambiental relacionada ao N.A. é quando ocorre a lixiviação de componentes solúveis, devido à percolação de água ou pela flutuação do lençol freático (HULING; WEAVER, 1991).

Na área de estudo a profundidade do lençol freático varia bastante (Figura 19), o mais raso encontrado a 2 metros de profundidade e o mais profundo em 40 metros de profundidade. E avaliando esse parâmetro em cada compartimento, pode-se observar que a área de estudo tem de média a alta sensibilidade ambiental, pois o nível d'água é encontrado em profundidade média a baixa. Estes ambientes estão localizados, sobretudo, nas áreas de planície fluvial e próximo a áreas com alta densidade de afloramento de NA, como represas e cursos d'água.

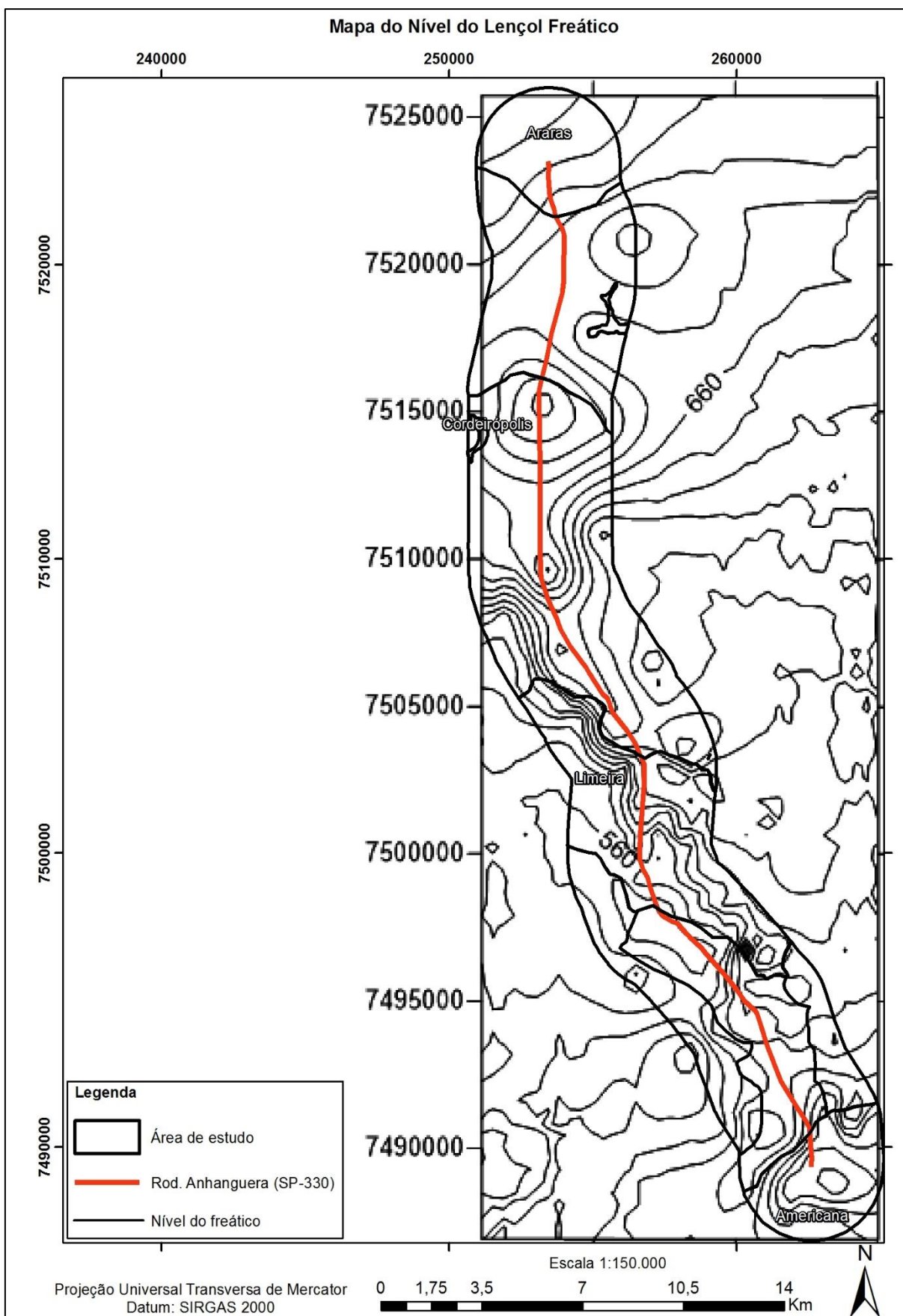
A importância da profundidade do lençol freático na sensibilidade ambiental do meio aos hidrocarbonetos faz com que seja indispensável a presença desta variável em qualquer tipo de análise ambiental. Alguns aspectos, entretanto, devem ser considerados.

As técnicas de levantamento deste tipo de dados são caras, tanto por meios diretos, como perfurações de poços, como por meios indiretos, como aplicações de técnicas geofísicas, de acordo com a área considerada para este tipo de estudo (BRAGA, 2006) e os dados de poços do DAEE não retratam com fidelidade a realidade do NA, o que justifica a técnica utilizada no presente estudo.

Segundo Guiguer (1996) e Gundlash et al. (2005), o nível do lençol freático está condicionado às variações climáticas anuais e isso pode interferir na sensibilidade ambiental. Esta particularidade não foi levada em consideração na definição desta variável. Ainda que seja conhecido o quão importante é esta informação, é necessário o monitoramento desta flutuação em vários pontos ao longo da área a ser estudada, o que dificilmente poderá ser executado, devido, sobretudo, à inviabilidade econômica.

A técnica de estimativa utilizada para a medição da profundidade do lençol freático demonstrou ser satisfatória à metodologia. A aplicação desta estimativa é um recurso aos empecilhos inerentes à obtenção e mapeamento desta variável, especialmente o custo e o ferramental.

Figura 19 - Mapa do nível do lençol freático da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

5.5 Compartimentação fisiográfica

Foram identificadas oito Unidades Básicas de Compartimentação (Figura 20), nomeadas de acordo com a litologia e tipo de solo predominante. Esta diversidade se reflete nos elementos que compõe o ambiente e, portanto, dita a dinâmica dos hidrocarbonetos no meio. As características dessas unidades, bem como informações relevantes relacionadas à sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos das rodovias serão descritas nas próximas seções, além da tabela de atributos com a interpretação fotogeológica (Quadro 4).

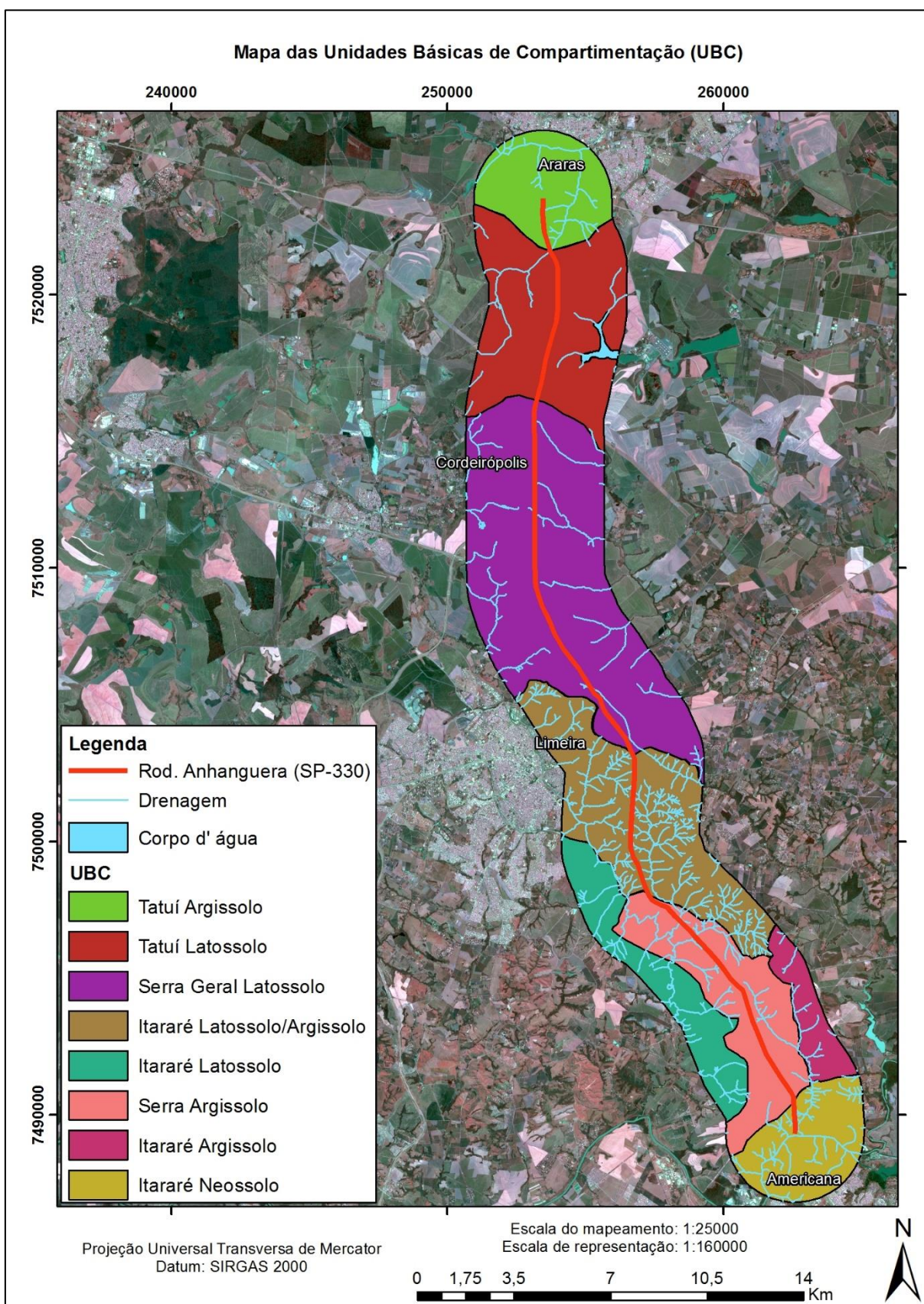
Quadro 4 – Características e interpretação fotogeológica das UBCs

UBC	Área (Km ²)	Litologia	Geomorfologia	Pedologia	Densidade de Drenagem	Forma do Topo	Forma do Vale	Forma da Encosta	Amplitude	Declividade
Tatuí/Argissolo	16	Tatuí	Colinas amplas	Argissolo Vermelho Amarelo	Média	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena	Baixa
Tatuí/Latossolo	33	Tatuí	Colinas amplas	Latossolo Vermelho Escuro e Roxo	Baixa	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena	Baixa
Serra Geral/Latossolo	62	Serra Geral	Colinas amplas	Latossolo Vermelho Escuro, Vermelho Amarelo e Roxo	Média	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena-média	Baixa
Itararé Latossolo/Argissolo	35	Itararé	Colinas amplas	Latossolo e Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolos	Alta	Aplainados-arredondados	Aberto	Convexa	Média	Média
Itararé/Latossolo	16	Itararé	Colinas amplas	Latossolo Roxo e Argissolo Vermelho Amarelo	Alta	Aplainados-arredondados	Aberto	Convexa	Pequena-média	Baixa
Serra Geral/Argissolo	23	Serra Geral	Colinas amplas	Argissolo Vermelho Amarelo e Latossolo vermelho Escuro	Média	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena-média	Baixa
Itararé/Argissolo	7	Itararé	Colinas amplas	Argissolo Vermelho Escuro	Média	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena-média	Baixa
Itararé/Neossolos	15	Itararé	Colinas amplas	Neossolos e	Alta	Aplainados	Aberto	Convexa	Pequena-média	Baixa

				Latossolo Vermelho Escuro						
--	--	--	--	---------------------------------	--	--	--	--	--	--

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 - Mapa das Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) da área de estudo



Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.6 Caracterização dos compartimentos

5.5.6.1 UBC 1: Tatuí Argissolo

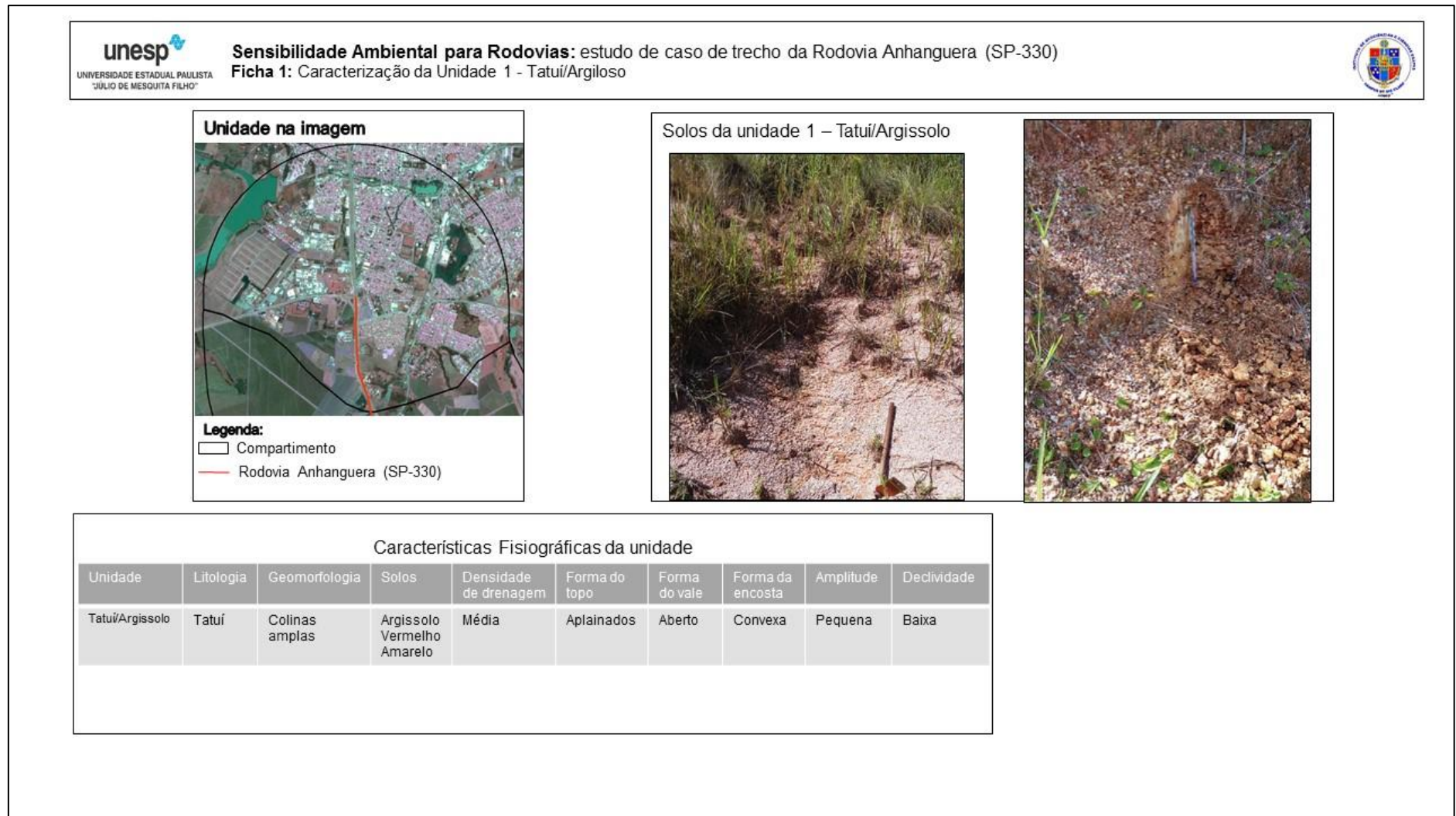
Esta unidade possui uma área de 16 Km² e como atributos mais relevantes à pesquisa apresenta média densidade de drenagem e baixa declividade (Figura 21).

Ocorre sobre a Formação Tatuí, que é formada por sucessões de siltitos, siltitos arenosos e arenitos finos bem selecionados (STEVAUX, SOUZA-FILHO, FÚLFARO, 1986; ASSINE, ZACHARIAS, PERINOTTO, 2003; CPRM, 2006). Os solos caracterizam-se como Argissolo Vermelho Amarelo, descrito por Oliveira, Menk e Rotta (1979), como solos profundos e textura média e comprovado em trabalho de campo; o nível do freático é em média de 25 metros de profundidade, sendo o mais raso com 14 metros e o mais profundo com aproximadamente 40 metros.

Além disso, há uma ocupação densa, pois nela se situa parte da área urbana do município de Araras-SP e algumas áreas de APPs (Área de Preservação Permanente).

De acordo com as características supracitadas, a área possui média permeabilidade decorrente da densidade de drenagem e também devido ao solo ser de textura argilosa e ter alta capacidade de retenção e escoamento superficial (EMBRAPA, 2006; PEIXOTO, 2010).

Figura 21 - Características da Unidade Tatuí/Argissolo



Fonte: Elaborado pela autora.

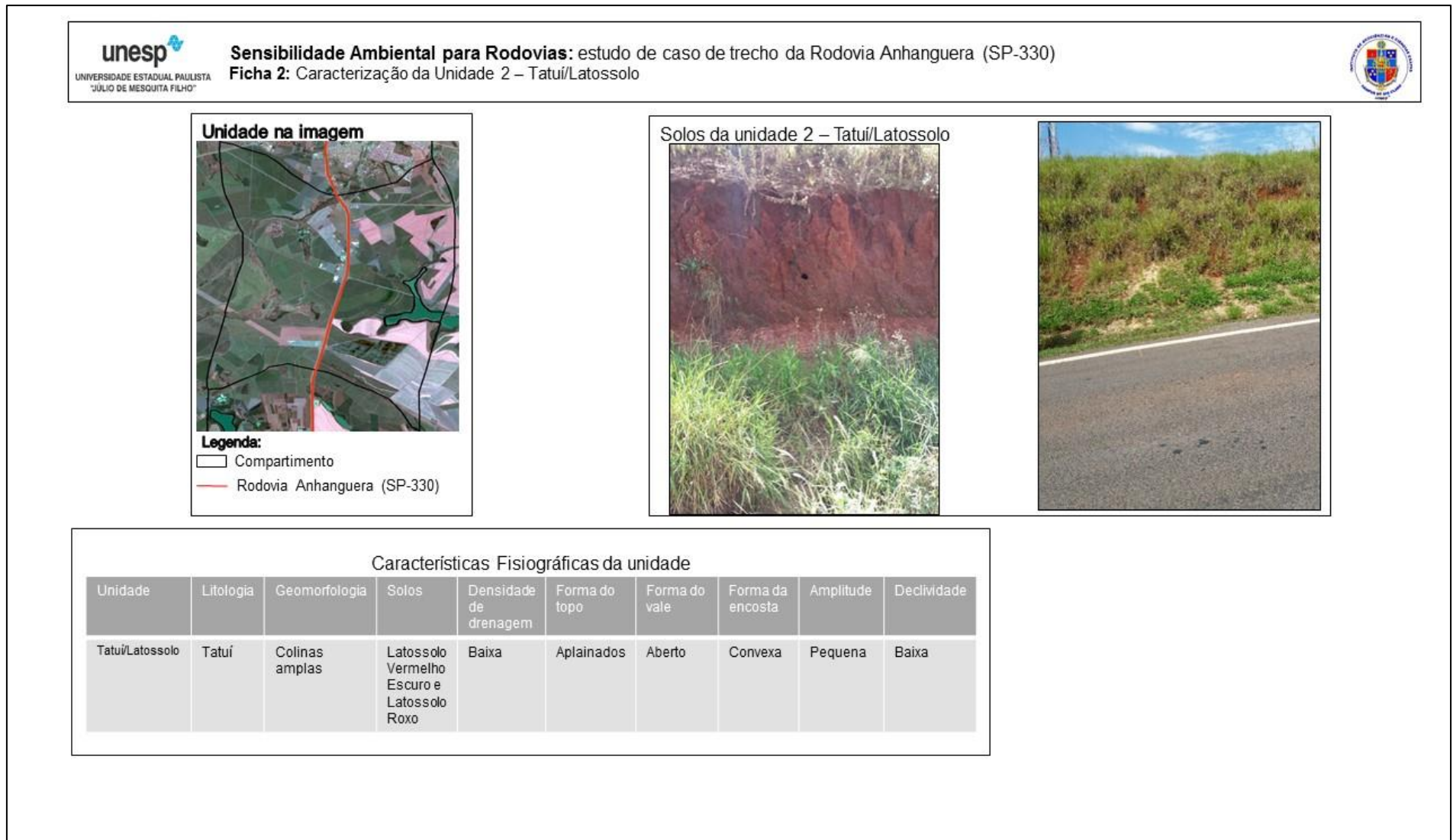
5.5.6.2 UBC 2: Tatuí Latossolo

O compartimento possui uma área de 33 Km², baixa densidade de drenagem e declividade, entretanto está situada sobre um Latossolo Vermelho Escuro e Latossolo Roxo, profundos, bem drenados, com textura argilosa (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979) (Figura 22). O nível do freático está em média a 19 metros de profundidade, o mais raso com 5 metros e o mais profundo a 40 metros.

Ocorre sobre a Formação Tatuí já descrita na unidade anterior. O uso e ocupação da terra, quase que em sua totalidade, é de cultivo de cana-de-açúcar e algumas áreas de APPs (Área de Preservação Permanente).

Esta unidade possui alta permeabilidade por sua baixa densidade de drenagem, porém a mesma é diminuída devido a textura argilosa desse Latossolo, que segundo Reatto et al. (2009) são argilas de baixa atividade com estrutura micro granular forte e com micro agregados bem desenvolvidos, que levam a solos permeáveis, porém mal drenados.

Figura 22 - Características da Unidade Tatuí/Latossolo



Fonte: Elaborada pela autora.

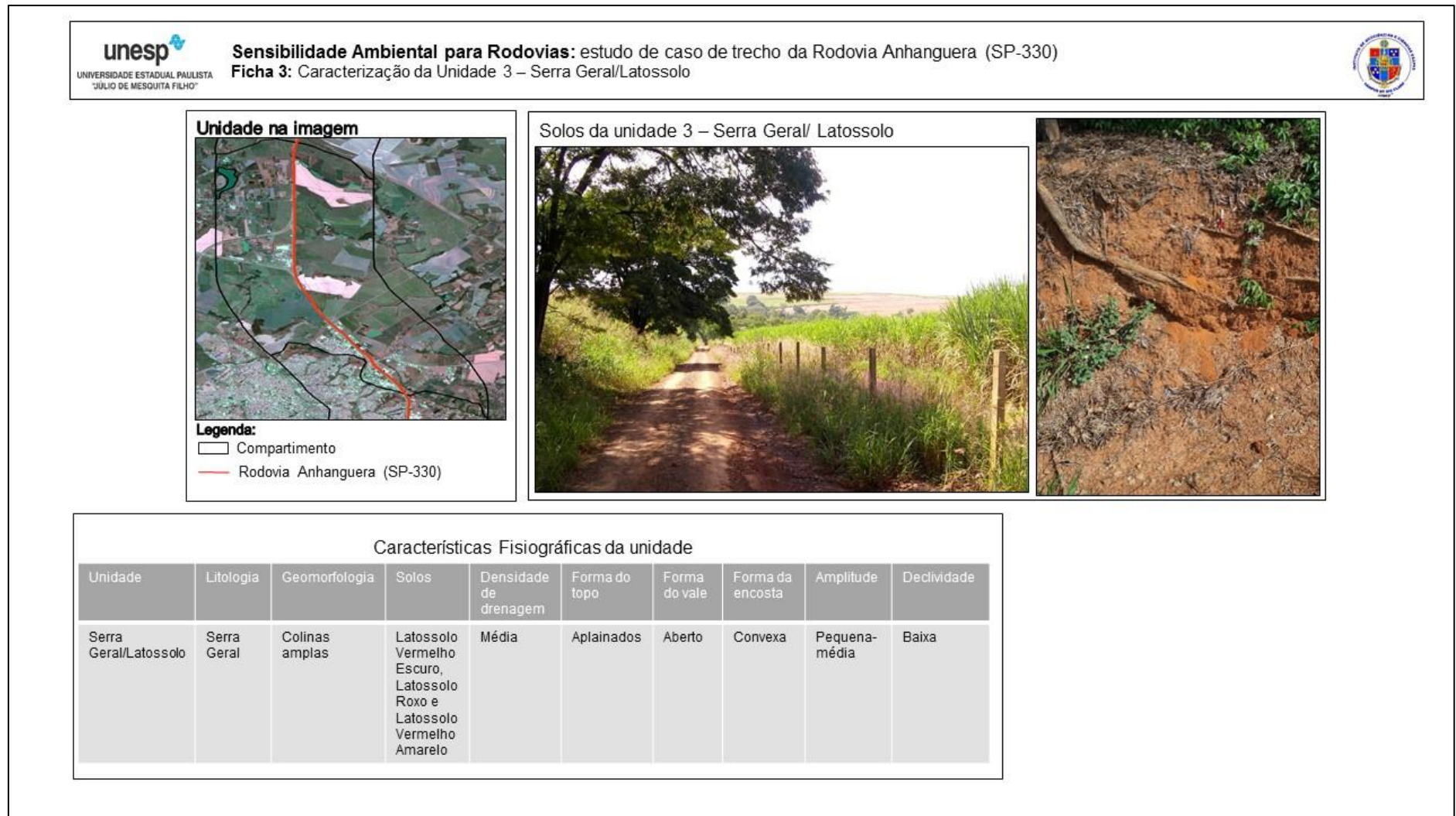
5.5.6.3 UBC 3: Serra Geral Latossolo

Caracterizado por média densidade de drenagem e baixa declividade (Figura 23), é o maior compartimento com uma área de 62 Km². A Formação é constituída principalmente por rochas vulcânicas magmáticas básicas, extrusivas e intrusivas, estas, geralmente representadas por soleiras e diques de diabásio, de granulação fina (argilosa) e muitas vezes encontram-se alteradas originando o Latossolo Roxo ou solos com texturas mais finas (IG, 1987; CPRM, 2006).

A área encontra-se sobre Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Amarelo, profundos, bem drenados, com textura média (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979). O freático está em média a 20 metros de profundidade, não se obtendo valores maiores ou menores que este. O uso e ocupação neste compartimento em quase sua totalidade é de cultura de cana-de-açúcar, com alguns trechos urbanos dos municípios de Cordeirópolis e Limeira e algumas áreas de APPs (Área de Preservação Permanente).

Possui média permeabilidade (média densidade de drenagem e textura média dos solos), onde há possibilidade de o contaminante alcançar as camadas mais profundas do solo por causa da porosidade característica dos latossolos, com a formação de micro agregados (REATTO et al., 2009), porém neste compartimento os solos são profundos e segundo Peixoto (2010) esta região possui alta capacidade de reter, fixar e eliminar poluentes, devido às características pedogenéticas, reduzindo assim o risco de contaminação das águas subterrâneas.

Figura 23 - Características da Unidade Serra Geral/Latossolo



Fonte: Elaborada pela autora.

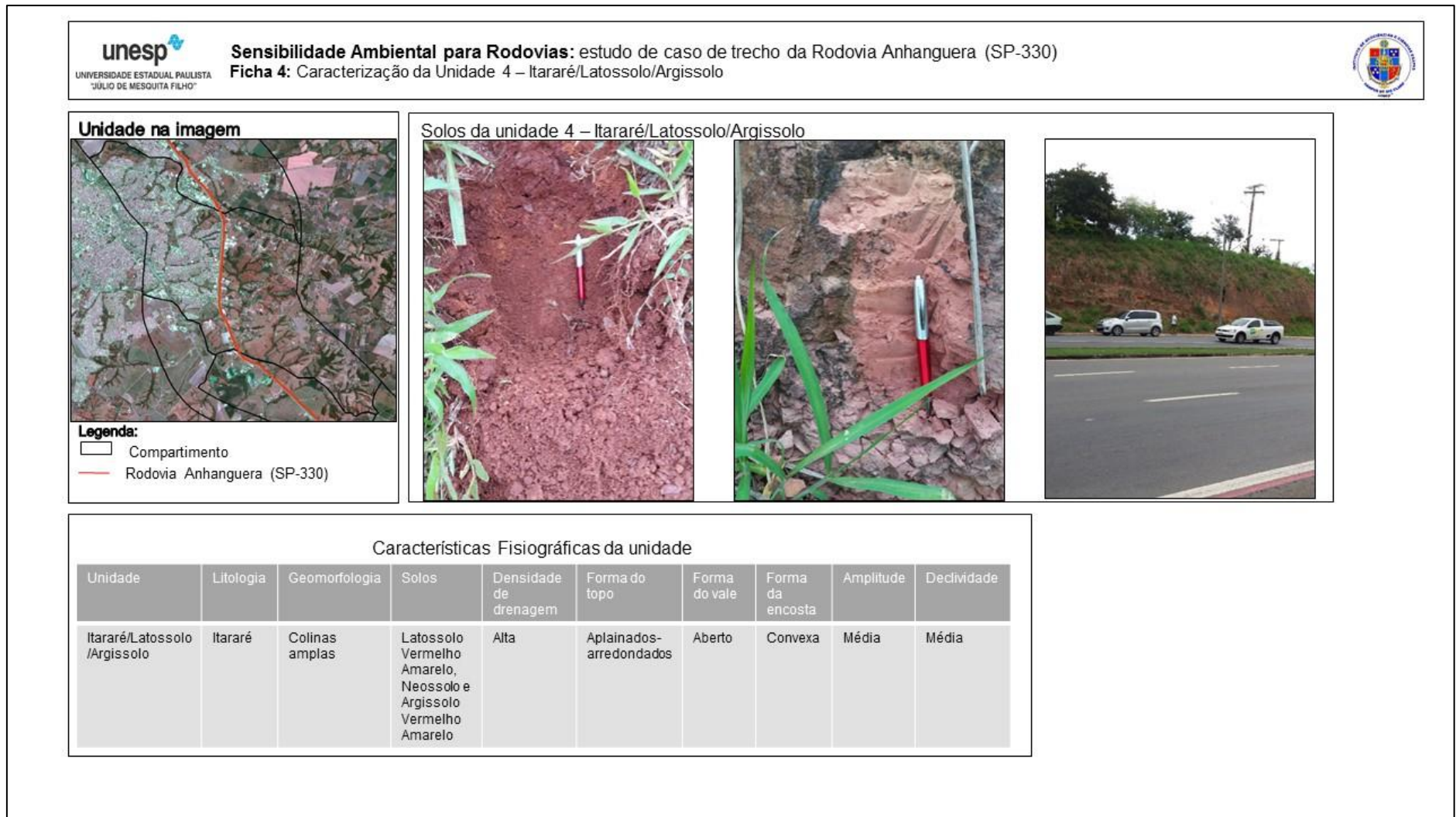
5.5.6.4 UBC 4: Itararé Latossolo/Argissolo

Este compartimento possui uma densidade de drenagem alta, sendo a maior densidade de drenagem da área de estudo, declividade média, região de maior declividade encontrada na área de estudo (Figura 24), e tem uma área de 35 Km².

O compartimento está sobre o Grupo Itararé que tem como características ser formado por diversas litologias: arenitos, diamictitos e siltitos (IG, 1987; CPRM, 2006) e originando diferentes tipos de solos. Na área foram encontrados Latossolo Vermelho Amarelo (profundos, bem drenados, porosos, com textura areia fina), Neossolos (solos rasos, arenosos ou fino-areno-barrentos) e Argissolos Vermelho Amarelo (solos profundos e textura areia fina) (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979). O nível do freático é raso, em média 12 metros, com maior profundidade em 20 metros e menor em 8 metros. Em sua maior parte, se situa na área urbana de Limeira, além de APPs e cultivo de cana.

Esta área, de uma forma geral, tem uma permeabilidade média a baixa (alta densidade de drenagem e textura média dos solos), porém os solos dessa região têm espessura média e devido ao freático ser raso e ter um alto número de fraturas (Figura 17) pode ser contaminado com certa facilidade o que é corroborado por Peixoto (2010) ao dizer que esta região tem alta vulnerabilidade a contaminantes pontuais e difusas, pois os aquíferos são intensamente fraturados podendo atingir o freático rapidamente.

Figura 24 - Características da Unidade Itararé/Latossolo/Argissolo



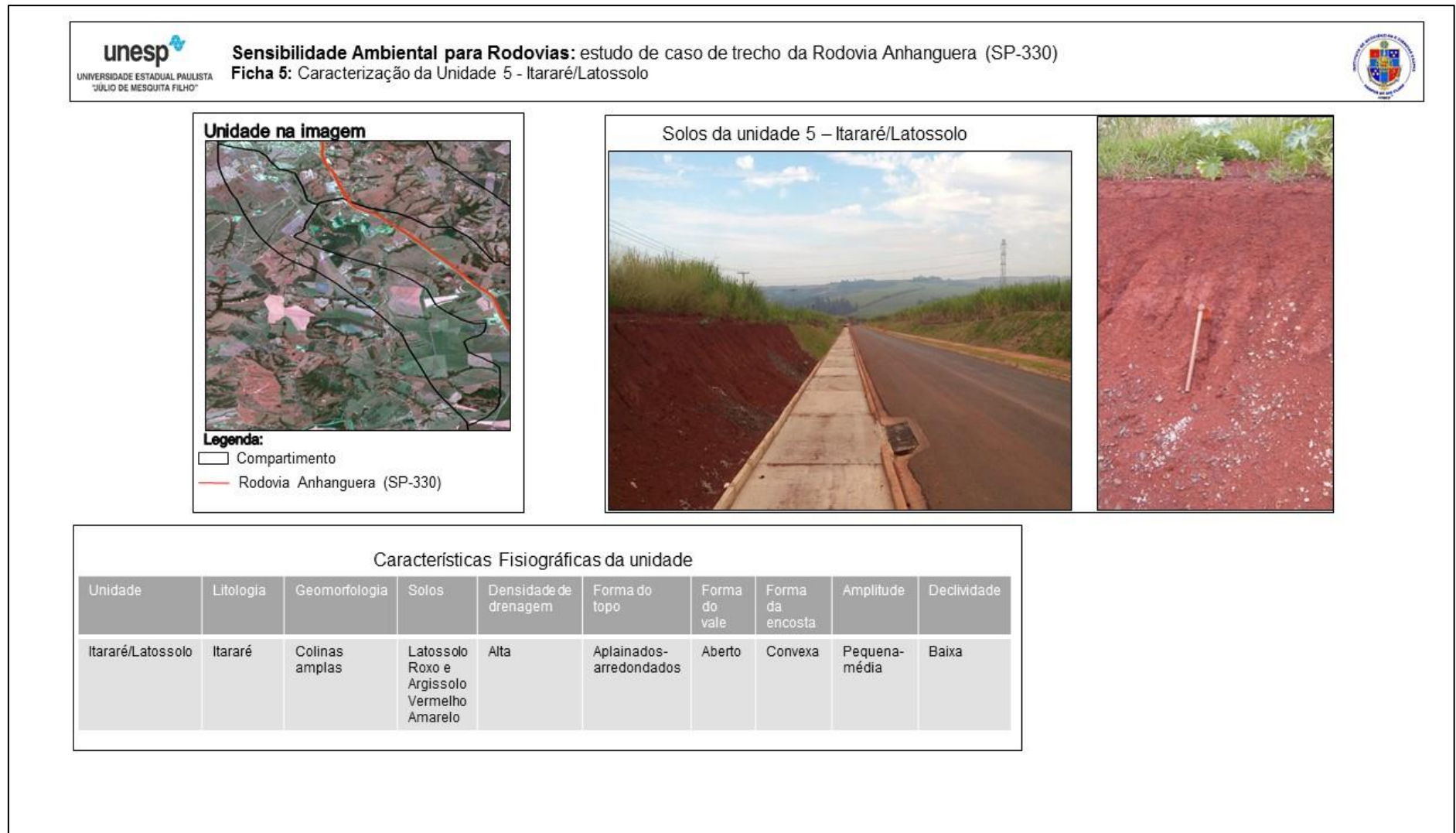
Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.6.5 UBC 5: Itararé Latossolo

Caracteriza-se por uma densidade de drenagem alta, baixa declividade e área de 16 Km² (Figura 25). Os solos presentes são Latossolos Roxo e uma pequena parte com Argissolos Vermelho Amarelo, sendo definidos como solos profundos, de textura argilosa a areia fina (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979). A ocorrência de Latossolo Roxo neste compartimento deve-se as soleiras, geralmente de diabásio, intrudidas nos sedimentos paleozoicos, especialmente nas formações Irati (P2i) e Itararé (C2P1i) (IG, 1987; CPRM, 2006). A profundidade média do freático é de 21 metros, o mais raso com 2 metros e mais profundo com 40. O uso e ocupação é em sua maior parte cultivo de cana-de-açúcar e poucas APPs.

De acordo com as características, infere-se que a área tem permeabilidade média a baixa, devido à alta densidade de drenagem e a textura média dos seus solos e mesmo com o lençol freático em nível médio os solos desse compartimento são profundos, dificultando a contaminação das águas subterrâneas pelos hidrocarbonetos.

Figura 25 - Características da Unidade Itararé/Latossolo



Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.6.6 UBC 6: Serra Geral Argissolo

Unidade com média densidade de drenagem, baixa declividade e área de 23 Km² (Figura 26). Está sobre Argissolo Vermelho Amarelo e algumas áreas com Latossolo Vermelho Escuro, sendo caracterizados por serem solos profundos e de textura média-fina (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979), por se originarem da Formação Serra Geral de granulação fina (argilosa) (IG, 1987; CPRM, 2006).

O nível do lençol freático é em média de 17 metros, com o valor mais alto em 30 metros e o mais baixo de 6 metros. O uso e ocupação tem áreas de mineração, cultivo de cana-de-açúcar e APPs.

Deduz-se que a permeabilidade desta área seja média (média densidade de drenagem e textura média do solo) e com possibilidade de os hidrocarbonetos atingirem o nível do freático já que ele está em nível médio de profundidade.

Figura 26 - Características da Unidade Serra Geral/Argissolo



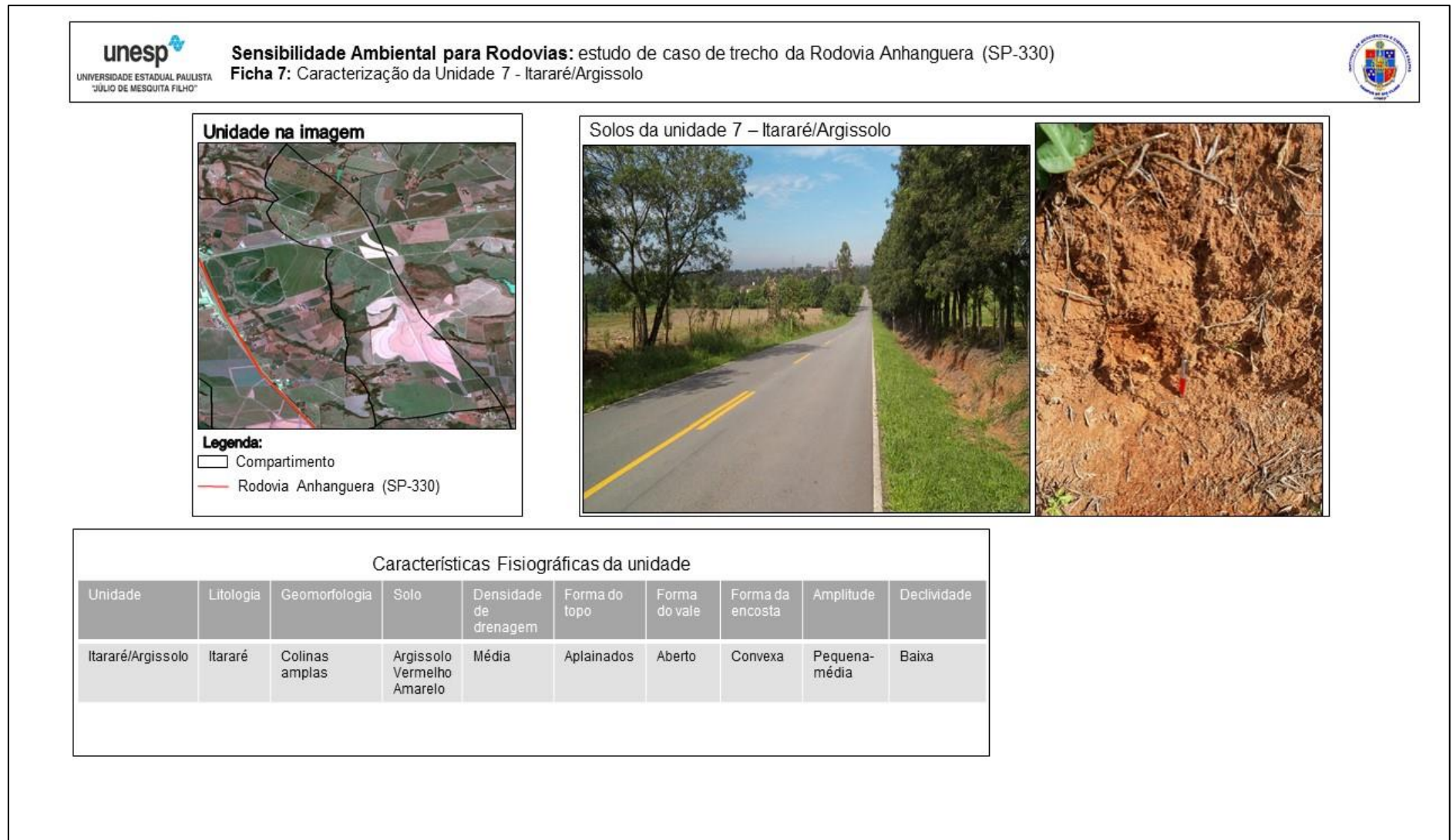
Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.6.7 UBC 7: Itararé Argissolo

Observa-se (Figura 27) que há nesta unidade baixa declividade e média densidade de drenagem, além de estar situada sobre Argissolos Vermelho Amarelo, marcados por terem solos profundos e de textura média-fina (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979), característico da diversidade de texturas do Grupo Itararé (CPRM, 2006). Ela possui uma área de 7 Km², o menor compartimento da área de estudo, e o freático está em média a 15 metros de profundidade, o mais raso a 2 metros e o mais profundo a 30 metros. Cultura de cana, solo exposto e APPs assinalam o uso e ocupação da área.

A área possui uma permeabilidade média devido as características encontradas na mesma (média densidade de drenagem e textura do solo), entretanto, o nível do lençol freático é considerado baixo e como dito anteriormente por Peixoto (2010), essa região tem alta vulnerabilidade para contaminações, portanto considera-se a mesma com probabilidade de os hidrocarbonetos atingir o lençol freático.

Figura 27 - Características da Unidade Itararé/Argissolo



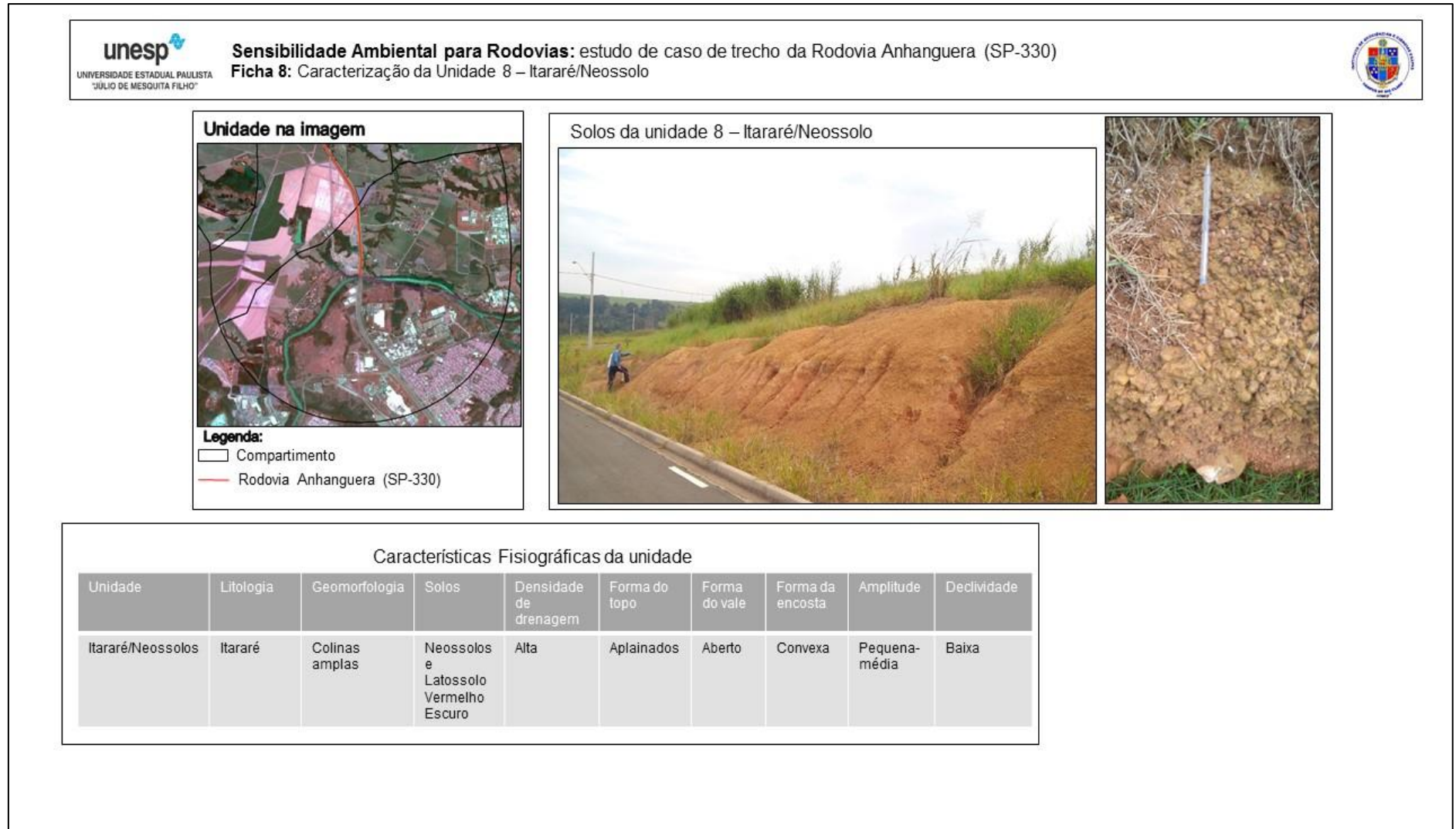
Fonte: Elaborado pela autora.

5.5.6.8 UBC 8: Itararé Neossolo

Nota-se, nesta unidade (Figura 28), alta densidade drenagem e baixa declividade, ocorrência de Neossolos e Latossolos Vermelho Escuro, sendo o primeiro descrito por ser um solo raso, com textura arenosa ou fino-areno-barrentas e, o segundo com textura argilosa e profundos (OLIVEIRA; MENK; ROTTA, 1979), também característico da diversidade de texturas do Grupo Itararé (IG, 1987; CPRM, 2006). Sua área é de 15 Km² e a profundidade média do freático é de 15 metros, com o mais profundo em 24 metros e o mais raso em 9 metros. Já o uso e ocupação da área é caracterizado por APPs, área urbana do município de Americana, solos expostos e culturas semi-perene.

A permeabilidade da área é média-baixa (alta densidade de drenagem e textura média do solo), porém a baixa espessura do solo, baixa profundidade do lençol freático, alto número de fraturas, e estar situada em uma área de alta vulnerabilidade (PEIXOTO, 2010), faz com que este compartimento tenha grandes possibilidades dos contaminantes atingirem o nível do freático em casos de acidentes nesse trecho da rodovia.

Figura 28 - Características da Unidade Itararé/Neossolo

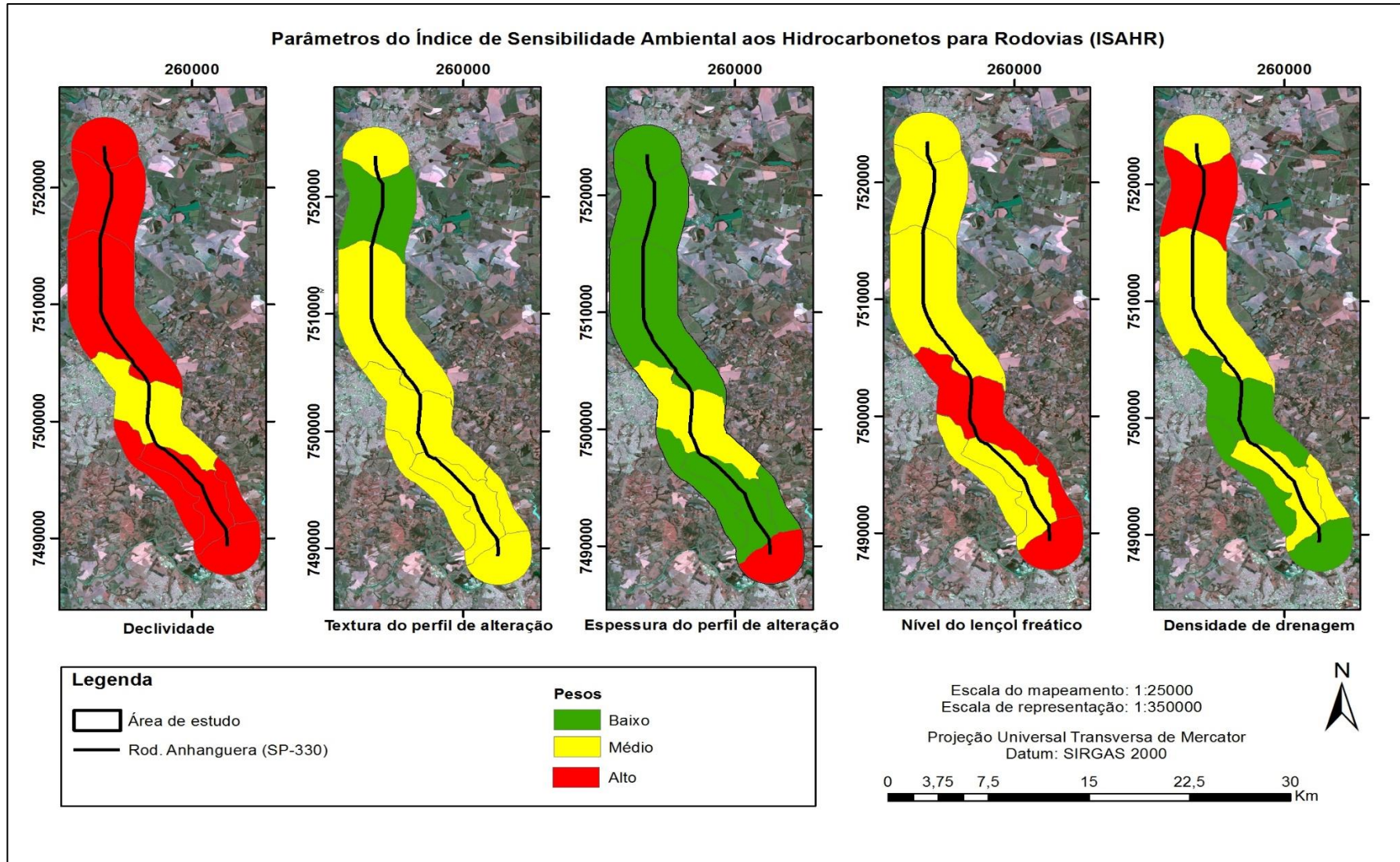


Fonte: Elaborado pela autora.

5.6 Índice de Sensibilidade Ambiental aos Hidrocarbonetos para Rodovias (ISAHR)

Conforme explicitado na seção 4.2.6, o ISAHR foi composto por 5 parâmetros (declividade, textura e espessura do perfil de alteração, densidade de drenagem e profundidade do lençol freático) e cada unidade fisiográfica foi avaliada e classificada de acordo com esses parâmetros e seus respectivos pesos, como cada unidade se comportou perante cada parâmetro pode ser observado na Figura 29 a seguir e posteriormente a discussão e análise de cada parâmetro.

Figura 29 – Sensibilidades parciais e Parâmetros do Índice de Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias



Fonte: Elaborado pela autora.

5.6.1 Declividade

Como foi citado na seção 4.2.6.1, apesar da evidente contribuição da declividade no deslocamento dos hidrocarbonetos, o fato de não se encontrar na literatura estudos para esse fim dificulta uma discussão mais minuciosa.

Na área de estudo predominou a baixa declividade, característica dominante na Depressão Moji-Guaçu e Médio Tietê (Ross; Moroz, 1996), onde sete dos oito compartimentos possuem baixa declividade e, somente o compartimento 4 (Itararé Latossolo) tem uma declividade média, demonstrando a alta sensibilidade da área de estudo nesse parâmetro (Figura 29).

Uma vez que o deslocamento vertical dos hidrocarbonetos para o subsolo é resultado da gravidade (FUSSELL et al., 1981; GUIGUER, 1996), tomando como referência a classe de baixa declividade (<15%), a tendência de movimento dos mesmos, dependendo da permeabilidade condutividade hidráulica do solo, é mover-se ao subsolo.

A declividade pode auxiliar no plano de combate aos hidrocarbonetos, na medida em que se pode estimar a direção do mesmo ao ser derramado. A direção da declividade pode indicar a direção do fluxo do contaminante em áreas de declive, enquanto que em áreas planas a direção do movimento pode ser considerada na direção de rios ou cursos de água próximos (FUSSELL et al., 1981).

A predominância de baixa declividade, faz com que o deslocamento vertical dos hidrocarbonetos seja acentuado, podendo alcançar a zona saturada, ampliando o potencial poluidor, dificultando a limpeza e recuperação dessas áreas.

5.6.2 Textura do perfil de alteração

Para exemplificar a ação da capacidade de retenção dos hidrocarbonetos no solo, tem-se que caso 1 m³ (1000 litros) de gasolina, que possui viscosidade menor que outros derivados, como o querosene e o óleo diesel, seja derramado sobre uma área de 20 m², a profundidade final de penetração será de, no máximo, 20 m para um solo composto de pedra e cascalho grosso, de 6,7 m para solos com areia grossa e média, reduzindo para apenas 2,5m para solos constituídos de areia fina e silte (FUSSELL et al. 1981).

De acordo com Martins (2012), a relação da capacidade de retenção do solo com o dano ambiental segue o mesmo encadeamento lógico da permeabilidade, ou seja, quanto maior o tamanho do grão, mais extenso será o espalhamento vertical, maior é a área atingida e mais sensível é o ambiente.

Portanto, é plausível que a correlação da textura do material do perfil de alteração com a sensibilidade ambiental ao derramamento de hidrocarbonetos seja direta, sendo menos sensível quanto menores forem os tamanhos dos grãos do material que compõe o perfil.

No que se refere ao parâmetro textura do perfil de alteração houve pouca variabilidade dentro da área de estudo, mostrando que a textura média é predominante na mesma (média sensibilidade) e somente a UBC 2, das oito UBCs, tem uma textura mais argilosa e assim, menor sensibilidade ambiental (Figura 29).

A partir da combinação das classes de sensibilidade das duas variáveis até aqui explanadas é possível entender a dinâmica e impacto dos hidrocarbonetos no meio e sua respectiva sensibilidade ambiental.

Apesar da baixa declividade denotar alta sensibilidade ambiental a área de estudo, essa sensibilidade é diminuída devido a predominância de texturas média a fina dos solos nos compartimentos.

5.6.3 Espessura do perfil de alteração

A espessura do perfil de alteração é uma das mais complexas variáveis em relação à sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos, pois a mesma depende diretamente tanto da característica de outras variáveis, como o tipo de textura do material do perfil ou da profundidade do nível d'água, quanto do tempo de ação da equipe de contingência e das técnicas disponíveis por esta (MARTINS, 2012).

Das oito UBCs, seis tem solos profundos (baixa sensibilidade), um tem profundidade entre 1 e 2 m e um outro tem alta sensibilidade por ter seu solo raso (Figura 29), pois nessa UBC (UBC 8 - Itararé Neossolos) predomina Neossolos.

Da mesma forma que aconteceu com as variáveis anteriormente discutidas, o enquadramento dos intervalos de classe foi realizado de acordo com critérios práticos. Estas classes se assemelham a intervalos de classes típicos utilizados em morfologia de solos, como os designados por Vieira e Vieira (1983).

O intervalo de classe delimitado para essa variável tem como fator positivo o fato de ser de fácil aquisição. Mesmo a classe de maior espessura é passível de ser identificada apenas avaliando cortes de estrada. A análise de compartimentos é outra técnica facilitadora.

5.6.4 Profundidade do lençol freático

Na área de estudos há predominância (cinco UBCs) de segmentos com média profundidade do lençol freático (Figura 29), formando, portanto, ambientes com média sensibilidade parcial e três com o nível d'água raso (alta sensibilidade ambiental). Esses ambientes estão localizados, sobretudo, nas áreas de planície fluvial e próximo a áreas com alta densidade de afloramento do nível d'água, como represas e cursos d'água.

A importância da profundidade do lençol freático na sensibilidade ambiental do meio aos hidrocarbonetos faz com que seja indispensável a presença desta variável em qualquer tipo de análise ambiental. Alguns aspectos, entretanto, devem ser considerados.

As técnicas de levantamento deste tipo de dados são onerosas, tanto por meios diretos, como perfurações de poços, como por meios indiretos, como aplicações de técnicas geofísicas, de acordo com a área considerada para este tipo de estudo (BRAGA, 2006), o que justifica a técnica utilizada no presente estudo.

Da mesma forma que na área costeira, ocorrem variações ambientais sazonais que podem interferir na sensibilidade ambiental, com a nível do lençol freático também podem ocorrer flutuações durante o ano (GUIGUER, 1996; GUNDLASH et al., 2005), principalmente a variação da pluviosidade com épocas de chuva e de seca bem marcadas nesta área e a alta exploração das águas subterrâneas na região.

Esta particularidade não foi levada em consideração na definição desta variável. Ainda que seja conhecido o quão importante é esta informação, é necessário o monitoramento desta flutuação em vários pontos ao longo da área a ser estudada e em várias épocas do ano, o que dificilmente poderá ser executado, devido, sobretudo, à inviabilidade econômica.

A técnica de estimativa da profundidade do lençol freático demonstrou ser satisfatória. A aplicação desta estimativa é um recurso aos empecilhos inerentes à obtenção e mapeamento desta variável, especialmente o custo e o ferramental.

5.6.5 Densidade de drenagem

A densidade de drenagem é a variável que completa o conjunto de variáveis propostas à composição do ISHR para elaboração da Carta SAO. Como já apresentado, a densidade de drenagem possui estreita relação com a permeabilidade relativa. Assim, para fins didáticos, a discussão referente à densidade de drenagem será realizada a partir da correlação entre esta e a permeabilidade relativa.

A área de estudo apresentou uma grande variação neste parâmetro (Figura 29), sendo três compartimentos com alta densidade de drenagem e assim baixa permeabilidade relativa (baixa sensibilidade ambiental), quatro unidades com média densidade de drenagem e subsequentemente média permeabilidade relativa (média sensibilidade ambiental) e uma UBC com baixa densidade de drenagem e deste modo alta permeabilidade relativa (alta sensibilidade ambiental).

Esta breve explanação justifica a relação entre permeabilidade relativa e o enquadramento à sensibilidade ambiental proposta, sendo tanto maior a sensibilidade parcial aos hidrocarbonetos quanto maior for a permeabilidade.

Apesar de ser de fácil interpretação (SOARES; FIORI, 1976; ZAINÉ, 2011), a permeabilidade relativa aferida a partir da densidade de drenagem tem peculiaridades importantes. Por ser de natureza relativa, a primeira particularidade diz respeito à definição das classes, que neste trabalho preferiu-se utilizar as classes empregadas no trabalho de Zaine (2011), já explicitado anteriormente no item 4.2.6.4 desta dissertação.

Outra observação importante é que para se ter uma permeabilidade mais fiel seria necessários ensaios com várias amostras de solos de cada compartimento, porém isso geraria custos, portanto, preferiu-se usar a permeabilidade relativa inferida através da densidade de drenagem. E essa mostrou-se satisfatória e facilitadora já que para medi-la foi necessário somente a carta topográfica da área de estudo.

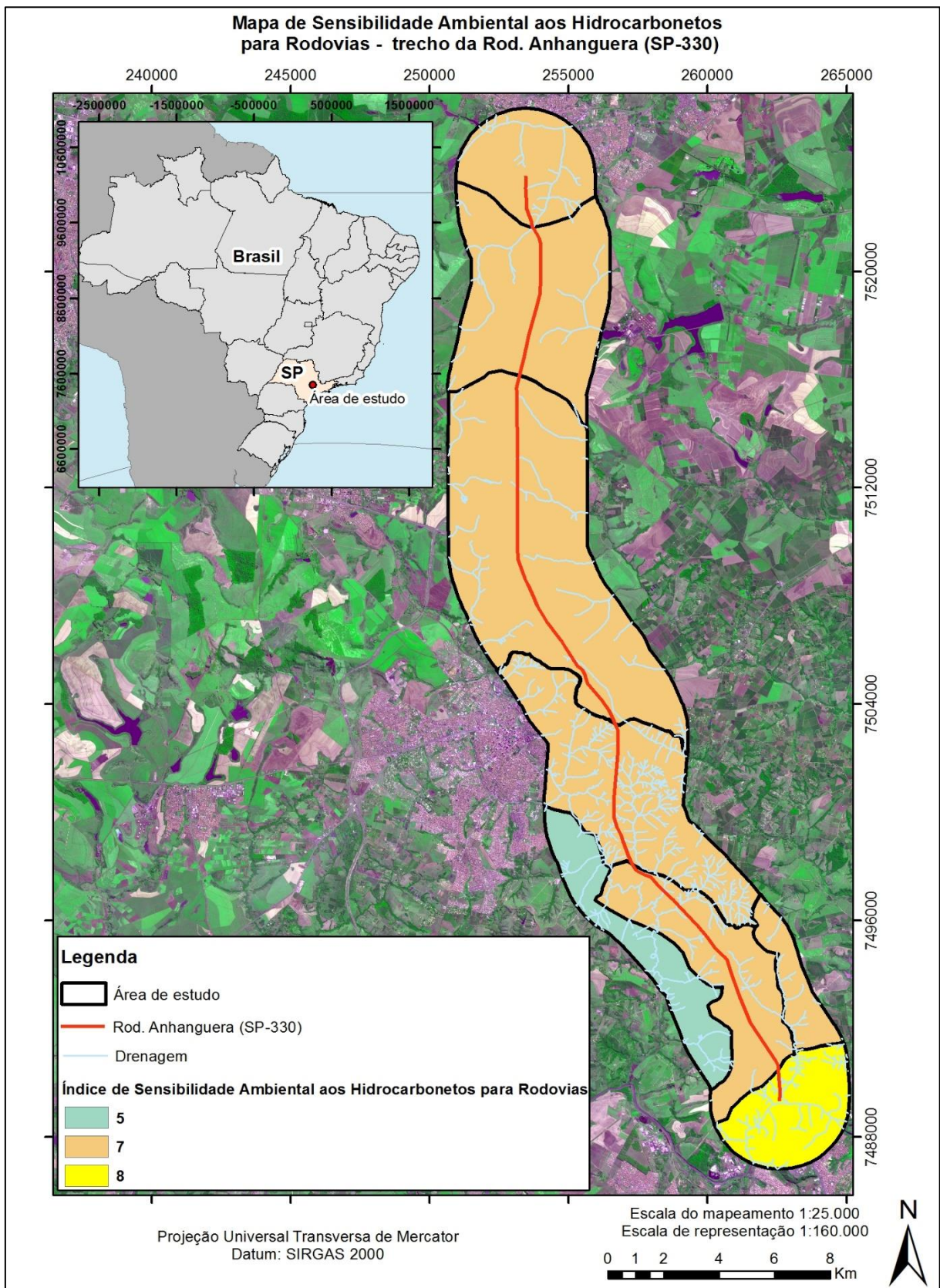
5.7 Carta de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias

Das 11 classes (Quadro 3) de sensibilidade ambiental presentes no índice de sensibilidade ambiental para rodovias, apenas 3 ocorrem na área de estudo, e são elas: classe 5, 7 e 8. A classe 7 é a mais recorrente, presente em seis das oito UBCs. A classe 5 e 8 ocorrem em apenas uma UBC cada (Figura 30).

Esse resultado mostra a média-alta sensibilidade ambiental da área de estudo, visto que dos oito compartimentos nenhum deles apresentou um índice menor ou igual a 4, seis estão na classe 7, considerado de média-alta sensibilidade e um na classe 8, considerada de alta sensibilidade, já que o índice vai de 1 a 10 A e B.

E também mostra a alta homogeneidade nas características físicas da área de estudo, que de uma forma geral apresenta baixa declividade, solos profundos, textura média e níveis médio de profundidade do freático, o parâmetro densidade de drenagem é o que mais varia nos compartimentos.

Figura 30 - Carta de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para Rodovias - trecho da Rod. Anhanguera (SP-330)



Fonte: Elaborado pela autora.

5.7.1 *Índice 5*

Esse índice foi o mais baixo encontrado na área de estudo e como pode ser observado no mapa, apenas uma UBC faz parte dessa classe, a UBC 5 Itararé Latossolo. E como pode ser observado no Quadro 3, possui um nível de sensibilidade média no sistema NOAA/MMA (2004).

A classificação obtida por essa unidade deve-se ao fato de que apesar da baixa declividade, a área possui solos profundos (Latossolo Roxo e Argissolos Vermelho-Amarelo) e alta densidade de drenagem (baixa permeabilidade relativa), fatores que diminuem sua sensibilidade, além de uma textura do solo e nível do freático médio.

5.7.2 *Índice 7*

Essa classe foi a mais dominante na área de estudo, abarcando seis dos oito compartimentos e em comparação com o índice NOAA/MMA (2004) para ambientes costeiros (Quadro 3) mostra uma sensibilidade média-alta.

Essas áreas são, de forma geral, caracterizadas por estarem em baixa declividade, que dá a elas alta sensibilidade parcial neste parâmetro, a profundidade do freático está em nível médio, a permeabilidade relativa (densidade de drenagem) varia bastante de um compartimento a outro, os solos desses compartimentos são profundos (Latosolos e Argissolos) e a textura do perfil de alteração são médias, fatores que levam essas unidades a obter este índice.

5.7.3 *Índice 8*

Também presente em somente uma das UBCs (UBC 8 – Itararé Neossolo), é o índice mais alto obtido na área de estudo e confrontado com a classificação NOAA/MMA (2004), indica uma alta sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos.

Esse índice deve-se a este compartimento ter como características uma permeabilidade média-baixa (alta densidade de drenagem e textura média do solo), porém sua sensibilidade é aumentada devido à baixa espessura do solo, baixa profundidade do lençol freático, alto número de fraturas, além de estar situada em

uma área de alta vulnerabilidade (PEIXOTO, 2010), fazendo com que este compartimento tenha grandes possibilidades dos contaminantes atingirem o nível do freático em casos de acidentes nesse trecho da rodovia.

6 CONCLUSÕES

O mapeamento da sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos de trecho da Rodovia Anhanguera (SP-330), levando em consideração parâmetros físicos, demonstrou a variedade de ambientes que podem ser contemplados com a elaboração de Cartas SAO e provou colaborar com o desenvolvimento de metodologias para a adaptação das mesmas aos ambientes terrestres através do desenvolvimento de um índice de sensibilidade ambiental a hidrocarbonetos para rodovias.

A busca à adequação de um índice de sensibilidade para ambientes terrestres possibilitou a sistematização de um índice que se mostrou executável, de produção rápida e simples e que permite a aplicação em ambientes similares, embora ainda haja necessidade de consolidação do mesmo.

É passível de reflexão a aplicação desta metodologia como parte de ações de emergência em acidentes que envolvam derrames de produtos perigosos, que não sejam hidrocarbonetos, como é o caso dos ácidos, já que a tipologia do impacto e o meio a ser impactado são semelhantes.

A efetivação destas recomendações permitirá ações de combate mais precisas e eficientes, mesmo em áreas de alta complexidade ambiental.

O trecho estudado da Rodovia Anhanguera (SP-330), possui sensibilidade intermediária a alta, uma vez que não há presença de ISAGR 9 e 10 A e B, os mais altos, porém apresentou valores altos de sensibilidade ambiental (7 e 8).

É importante ressaltar que as áreas de sensibilidade ambiental a hidrocarbonetos recomendadas neste trabalho são indicações que devem ser levadas em conta durante uma emergência química. Por constituir um mapa, estas sugestões devem ser estudadas e interpretadas por profissionais capacitados para lidar com este tipo de documento e com competência à aplicação.

As atividades socioeconômicas e a sensibilidade fluvial são dois elementos que necessitam de mais atenção no tocante à sensibilidade ambiental de ambientes terrestres. No primeiro caso, por ser um elemento bem distribuído por toda a rodovia e por poder atingir vidas humanas diretamente. No segundo caso, pelo fato de constituir um ambiente fluido de alta sensibilidade.

Bem como, o uso e ocupação do solo como anexo ou mesmo como índice auxiliar seria uma possibilidade metodológica que merece ser considerada. Esta deve ser entendida, em Cartas SAO para ambientes terrestres, como mais um componente do índice de sensibilidade ambiental aos hidrocarbonetos para rodovias.

Por se tratar de uma proposta ainda em fase inicial de estudo, é esperado que ocorram refinamentos após tentativas de aplicações da adequação proposta no presente estudo, sobretudo em ambientes com características não contempladas na Rodovia Anhanguera (SP-330). Esta condição faz parte da evolução metodológica e deve ser enquadrada como tal.

Recomenda-se, que em áreas sedimentares, onde a percolação do contaminante está diretamente relacionada com as características de textura e permeabilidade dos solos, haja uma análise mais criteriosa desses aspectos, pois a infiltração e o escoamento superficial dos hidrocarbonetos dependem diretamente desses fatores.

As soluções baseadas em ferramentas geotecnológicas corroboraram ser de extrema importância à elaboração do mapa de sensibilidade ambiental, sendo vital a todas as etapas do processo.

A partir do exposto, a análise realizada no presente estudo necessitaria de uma maior atenção por parte dos órgãos ambientais, visto que no Brasil, o modal rodoviário é o principal transporte de derivados de petróleo, e a possibilidade de ocorrência de acidentes envolvendo esses produtos apresenta-se alta.

Da mesma forma que as Cartas SAO para ambientes costeiros são usualmente utilizadas, o mesmo pode ser feito com a proposta aqui apresentada, para os ambientes terrestres. Uma condição que facilitaria a implementação deste tipo de documento às rodovias, seria exigir que nos Estudos de Impactos Ambientais (EIAs) de novos empreendimentos rodoviários fossem realizados levantamentos, ou maior quantidade de amostras, de dados essenciais à elaboração da Carta, tais como a profundidade do lençol freático, topografia e levantamentos mais detalhados de fauna e flora e uso e ocupação de solo. Além da aplicação da mesma em Programas de Gerenciamento de Riscos a Transporte de Produtos Perigosos (PGR) em rodovias, e em ações de emergência em acidentes que envolvam derrames desses produtos.

Por tratar-se de uma rodovia com recorrência de acidentes, a segunda em número de acidentes no estado de São Paulo envolvendo esse tipo de poluente, é

fundamental o desenvolvimento desses estudos, além disso as áreas urbanas dos municípios de Araras, Cordeirópolis, Limeira e Americana são diretamente perpassadas pelo trecho analisado, e caracterizam-se por apresentar diversos postos de gasolina, indústrias, áreas residenciais e cursos d'água que representam um maior risco a esse tipo de acidente, podendo ocasionar prejuízos socioeconômicos, ambientais e humano imensuráveis.

Por fim, conclui-se que o mapeamento de sensibilidade ambiental a hidrocarbonetos para o modal rodoviário apresenta-se viável a partir da aplicação de um método adequado ao ambiente em que está inserido e o método da compartimentação fisiográfica foi extremamente apropriado e eficaz para os ambientes terrestres.

7 REFERÊNCIAS

- ADLER, E.; INBAR, M. Shoreline sensitivity to oil spills, the Mediterranean coast of Israel: Assessment and analysis. **Ocean & Coastal Management**, Amsterdam, v. 50, n. 1-2, p. 24-34, 2007.
- ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology**. Minnesota: Wiley, 1977.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, p. 167-263, 1964.
- ARAUJO, S. I.; SILVA, G. H.; MUEHE, D. C. E. H. **Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema petrobras: ambientes costeiros e estuarinos**. Rio de Janeiro: Cenpes/Petrobras, 2002.
- ARAUJO, S. I.; SILVA, G. H.; MUEHE, D. C. E. H.; 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, 2006.
- ARTESP (AGÊNCIA DE TRANSPORTE DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Mapa das rodovias sob concessão no estado de São Paulo**. [201-]. Disponível em: <<http://www.artesp.sp.gov.br/rodovias-mapa-das-concessoes-rodoviarias.html>>. Acesso em: 25 jul. 2016.
- ASSINE, M. L.; ZACHARIAS, A. A.; PERINOTTO, J. A. J. Paleocorrentes, paleogeografia e sequência deposicionais da Formação Tatuí, centro-leste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 33-40, 2003.
- 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**. São Paulo: Cetesb, 1986.
- BEISL, C. H.; MIRANDA, F. P.; PEDROSO, E. C.; LANDAU, L. Generation of oil sensitivity index information in western Amazonia, Brazil, using dual season SAR image mosaics of the Global Rain Forest Mapping Project. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003, p. 823-830.
- BEYNON, L. R.; GÖDJEN, H.; LILIE, R. H.; ASTON, G. H. R.; SIBRA, P.; STAPLEFORD, J. K. **A field guide to inland oil spill clean-up techniques**. Den Haag: CONCAWE, 1983.
- BOTELHO, A. C. O. P. **Modelo híbrido fuzzy-genético para previsão de séries temporais de derivados de petróleo**. 2012. Monografia (Especialização em Sistemas inteligentes de apoio à decisão em negócios) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.** 2006. 121 f. Tese (Livre-docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BTC. **Potential impacts of oil spillage to an onshore environment.** BTC General Oil Spill Response Plan. Appendix F. 2011. Disponível em: <http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/bp_caspian/bp_caspian_en/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/xyz/BTC_English_General_OSRP_Content_Appendix_F.pdf> Acesso em 08 de ago. 2016.

CABRAL, JR., M. **Avaliação do potencial metalogenético da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo para depósitos sedimentares fosfáticos, evaporíticos e de metais-base.** 1991. 252 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 1991.

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

CARDOSO, D. **Análise da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Peruíbe – SP com apoio de um sistema integrador de informações georeferenciadas.** 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2005.

CARVALHO, M. **Mapeamento da sensibilidade ao impacto por óleo de um segmento da costa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará utilizando imagens ETM+/Landsat 7 e geoprocessamento.** 2003. 253 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – INPE, São José dos Campos, 2003.

CEPAGRI (CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA). **Clima dos municípios paulistas.** 2016. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 29 out. 2016.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Relatório de emergências químicas atendidas pela CETESB em 2009.** 2010. Disponível em: <<http://emergenciasquimicas.cetesb.sp.gov.br/apresentacao/relatorios-de-atendimento/>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

CETESB (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB)). **Sistema de informações sobre emergências químicas da CETESB.** 2016. Disponível em: <<http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/emergencia/relatorio.php>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

CLIMATE-DATE. **Clima:** São Paulo. 2016. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/region/200/>>. Acesso em: 29 out. 2016.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Pesquisa CNT de rodovias 2015:** relatório gerencial. 2015. Disponível em: <

http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/PESQUISA_CNT2015_BAI_XA.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2016.

CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE). **Boletim estatístico**. 2016. Disponível em: <<http://cms.cnt.org.br/Imagens%20CNT/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO/BOLETIM%20ESTAT%20C3%8DSTICO%202016/Boletim%20Estat%20C3%ADstico%20-%2005%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

CODUTO, D. P. **Geotechnical Engineering: principles and practices**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

COSTA, D. M. **Estabelecimento de um índice de sensibilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais, com o suporte da ferramenta MORPH**. 2013. 139 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2014.

CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). **Mapa Geológico e de recursos Minerais do estado de São Paulo Sistema de Informações Geográfica - SIG: integração, atualização e difusão dos dados da Geologia do Brasil**. Brasília: CPRM, 2006.

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica). **Relatório de outorgas do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.aplicacoes.dae.sp.gov.br/usuarios/fchweb.html>>. Acesso em: 30 nov. 2016.

DEARO, G. **As 20 maiores malhas rodoviárias do mundo**. 2013. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/mundo/album-de-fotos/as-20-maiores-malhas-rodoviaras-do-mundo>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

DER (DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM). **Malha rodoviária do estado de São Paulo: extensão**. 2015. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/MALHARODOVIARIA/PlanilhaMalha.pdf>>. Acesso em: 09 abr. 2016.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Clima**. [20-?]. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pesquisa/efb/clima.htm>>. Acesso em: 29 out. 2016.

EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006.

EPSTEIN, P. R.; SELBER, J. **Oil: a life cycle analysis of its health and environmental impacts**. Boston: Harvard Medical School, 2002.

ESRI. **ArcGIS Desktop: Release 10**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2014.

FERREIRA, J.; ZUQUETTE, L. V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os compostos do meio físico. **Geociências**, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 527-557, 1998.

FERREIRA, M. F.; BEAUMORD, A. C. Mapeamento da sensibilidade ambiental à derrames de óleo nos cursos de água da bacia do rio Canhanduba, Itajaí, SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, Itajaí, v. 12, n. 2, p. 61-72, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FULFARO, V. J.; GAMA JR, E.; SOARES, P. C. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná**. São Paulo: PAULIPETRO, 1980.

FUSSEL, D. R.; GODJEN, H.; HAYWARD, P.; LILIE, R. H.; MARCO, A. PANISI, C. **Revised inland oil spill clean-up manual**. Den Haag: Concawe, 1981.

GALVÃO, N. D.; MARIN, H. F. Técnica de mineração de dados: uma revisão da literatura. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 22, n. 5, p. 686-690, 2009.

GARCIA, N. Venezuela National Oil Spill Contingency Plan. In: **Oil Spills Research in Tropical Environments and Contingency Planning in the Wider Caribbean**. London: International Petroleum Industry Environmental Conservation Association, 1986.

GHERARDI, D. F. M.; BRAGA, C. Z. F.; EICHENBERGER, C. Utilização de imagens TM Landsat para o mapeamento do Índice de Vulnerabilidade Ambiental ao impacto por óleo da zona costeira entre Rio Grande do Norte e Ceará, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2001, p. 596-597.

GHERARDI, D. F. M.; CABRAL, A. P (Coord). **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Santos**. Brasília: MMA, 2007.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer 10**. Colorado: Golden software, 2011.

GRANT, K. Terrain evaluation: a logical extension of Engineering Geology. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGISTS, 1., 1970, Paris. **Proceedings ...** Paris, 1970, v. 2, p. 971-980.

GUIGUER, N. **Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento**. Ontário: Waterloo Hydrogeologic, 1996.

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**, Washington, v. 2005, n. 1, p. 333-337, 2005.

GUNDLACH, E. R.; HAYES, M. O. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. **Marine Technology Society Journal**, Washington, v. 2, n. 4, p. 18-27, 1978.

GUY, M. Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL DE PHOTOINTERPRETATION, 2., 1966. Paris. **Anais ...** Paris: Symposium internacional de photointerpretation, 1966, v. 1, p. 21-41.

HANNA, R. G. M. An approach to evaluate the applation of vulnerability index for oil spills in tropical Red Sea environments. **Spill Science & Technology Bulletin**, United Kingdom, v. 2, n. 2/3, p. 181-186, 1995.

HAYES, M. O.; MICHEL, J.; DAHLIN, J. A.; BARTON, K. Identifying and mapping sensitive resources for inland area planning. **International Oil Spill Conference Proceedings**, Washington, v. 1995, n.1, p. 365-371,1995.

HAYES, M. O.; MICHEL, J.; MONTELLO, T. M. The reach sensitivity index (RSI) for mapping river and streams. **International Oil Spill Conference Proceedings**, Washington, v. 1997, n. 1, p. 343-350, 1997.

HULING, S. G.; WEAVER, J. W. **Ground Water Issue: Dense Nonaqueous Phase Liquids**. Oklahoma: Environmental Protection Agency (EPA), 1991.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Cidades**. 2016. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/home-cidades>>. Acesso em: 20 set. 2016.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). **Manuais técnicos em geociências: manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IF (INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Inventário florestal da vegetação nativa do Estado de São Paulo**. 2010. Disponível em: <<http://iflorestal.sp.gov.br/2013/03/07/inventario-florestal-da-suporte-as-prefeituras/>>. Acesso em: 10 set. 2016.

IG (INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Estado de São Paulo: formações geológicas de superfície**. 1987. Escala 1:50000.

IG (INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Unidades aquíferas**. 2007. Escala 1: 1000000. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO#>>. Acesso em: 05 set. 2016.

IGC (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO). **Plano cartográfico do estado de São Paulo**. São Paulo: IGC, 1979. preto e branco. Escala1:10.000.

IGC (INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO). **Mapa de Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo**

– **UGRHI**. 2014. Escala 1:1000000. Disponível em:
<<http://www.igc.sp.gov.br/produtos/ugrhi.html>>. Acesso em: 30 out. 2016.

IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981. 1 mapa. preto e branco. Escala 1:1.000.000. (IPT. Séries Monografias).

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: SMA, 2009.

JENSEN, J. R.; HALLS, N. J.; MICHEL, J. A system approach to environmental sensitivity index (ESI) mapping for oil spill contingency planning and response. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 10, p. 1003-1014, 1998.

JENSEN, J. R.; NARUMALANI, S.; WEATHERBEE, O.; MURDAY, M.; SEXTON, W. J.; GREEN, C. J. Coastal environmental sensitivity mapping for oil spills in the United Arab Emirates using remote sensing and GIS technology. **Geocarto International**, Hong Kong, v. 2, p. 5-13, 1993.

KÖPPEN, G. W.; GEIGER, M. R. **Handbuch der klimatologie**. v. 1. Part C. Berlin: Gerbrüder Borntraeger, 1936.

KRONKA, F. J. N. et al. **Inventário florestal da vegetação natural do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Instituto Florestal. Imprensa Oficial. 2005.

LEPSCH, I. F. **Manual Para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação de Terras no Sistema de Capacidade de Uso**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1983.

LOLLO, J. A. **Mapeamento Geotécnico da Folha Leme - SP**: utilização da geomorfologia para a caracterização preliminar de unidades geotécnicas. 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1991.

LOLLO, J. A. **O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração do mapeamento geotécnico**: sistematização e aplicação na quadrícula Campinas. 1995. 268 F. 2 v. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1995.

LOTFY, I. N. **GIS-based Environmental Sensitivity Index (ESI) mapping for oil spills**: Case study in Sharm El-Sheikh, Egypt. 2004. 104 f. Dissertação (Mestrado em Physical Land Resources) - Universiteit Gent, Brussel, 2004.

MACKAY, D. M.; CHERRY, J. A. Ground-Water Contamination: Pump and Treat Remediation. **Environmental Science & Technology**, Easton, v. 23, n. 6, p. 630-636, 1989.

- MARETTI, C. C. **Exemplos de geologia aplicada a um processo de planejamento costeiro: cartas geológico-geotécnicas da região estuarino-lagunar de Iguape e Cananéia e da Ilha Comprida**. 1989. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1989.
- MARTINS, P. T. A. **Carta de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo em rodovias: proposta aplicada a estrada dos Tamoios (SP-099)**. 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.
- MATTOS, M. B. C. Application of oil spill environmental sensitivity analyses to Brazilian road networks. **International Oil Spill Conference**, Washington, v. 2008, n. 1, p. 169-175, 2008.
- 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, 1., 2005, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005.
- 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.; HAYES, M. O.; DAHLIN, J. A.; BARTON, K. **Sensitivity mapping of inland areas: technical support to the inland area planning committee working group USEPA region 5**. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1994.
- MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.
- MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. Rio de Janeiro: MMA, 2002.
- MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE). **Especificações e normas técnicas para a elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. Brasília: MMA, 2004.
- MOE, K. A.; SKEIE, G. M.; BRUDE, O. W.; LØVÅS, S. M.; NEDREBØ, M.; WESLAWSKI, J. M. The Svalbart intertidal zone: a concept for the use of GIS in applied oil sensitivity, vulnerability and impact analyses. **Spill Science & Technology Bulletin**, United Kingdom, v. 6, n. 2, p.187-206, 2000.
- NANSINGH, P.; JURAWAN, S. Environmental sensitivity of a tropical coastline (Trinidad, West Indies) to oil spills. **Spill Science & Technology Bulletin**, United Kingdom, v. 5, n. 2, p.161-172, 1999.

NEWELL, C. J.; ACREE, S. D.; ROSS, R. R.; HULLING, S. G. **Light Nonaqueous Phase Liquids**. Oklahoma: Environmental Protection Agency (EPA), Oklahoma, 1995.

OLIVEIRA, J. B. et al. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: IAC/Embrapa, 1999. Mapa, escala 1:500000.

OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P. K. T.; CAMARGO, M. N. **Classes gerais de solos do Brasil**: guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal: FUNEP, 1992.

OLIVEIRA, J. B.; MENK, J. R. F.; ROTTA, C. L. **Levantamento pedológico semidetalhado dos solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

OLIVEIRA, T. A. **Compartimentação fisiográfica aplicada à avaliação de terrenos** – subsídio ao planejamento territorial do município de Cananéia – SP. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2004.

OLIVEIRA, W. J. **Estudo dos aspectos geológicos da região sudeste do estado de Rondônia através do emprego de uma nova abordagem metodológica usando dados de satélite**. 1989. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989.

PCJ (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ). **Relatório de situação 2004-2006**. 2007. Disponível em: <<http://www.agenciapcj.org.br/novo/instrumentos-de-gestao/relatorios-de-situacoes>>. Acesso em: 29 out 2016.

PCJ (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ). **Uso e Cobertura da Terra da UGRHI 05 (PCJ) – 2013**. 2013. Disponível em: <<http://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/?ctx=DATAGEO#>>. Acesso em: 17 set. 2016.

PEIXOTO, C. A. B. **Geodiversidade do estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM, 2010.

PERINOTTO, J. A. J.; ZAINÉ, J. E. **Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná na região de Rio Claro**, com base em Soares & Landim (1975). 2008. Não publicado.

PERROTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; LOPES, R. C.; D'AGOSTINO, L. Z.; PERUFFO, N.; GOMES, S. D.; SACHS, L. L. B.; MEIRA, V. T.; GARCIA, M. G. M.; LACERDA FILHO, J. V. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: CPRM, 2005. Escala 1:750.000.

PETERSEN, J.; MICHEL, J.; ZENGEL, S.; WHITE, M.; LORD, C.; PLANK, C. **Environmental Sensitivity Index Guidelines**. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2002.

PICARELLI, S. **Avaliação da contaminação de solos por hidrocarbonetos e metais pesados em diques de contenção**. 2003. 107 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

PINCINATO, F. L. **Mapeamento da sensibilidade ambiental a derramamentos de óleo para a região costeira de São Sebastião e Caraguatatuba, litoral Norte de São Paulo (SP), com uso de modelagem em SIG de sistema especialista baseado em conhecimento e árvore de decisão.** 2007. 63 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2007.

PNUD (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO). **Ranking IDHM municípios 2010.** 2010. Disponível em: <<http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/idh0/rankings/idhm-municipios-2010.html>>. Acesso em: 20 set. 2016.

REATTO, A. et al. Development and origin of the microgranular structure in latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, Amsterdam, v. 76, p. 122-134, 2009.

RIBEIRO, D. F. **Sensibilidade ambiental ao óleo para rodovias:** estudo de caso de trecho da Rodovia Washington Luís (SP-310). 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

RIEDEL, P. S. **Estudo das coberturas de alteração de parte do centro leste paulista através de dados de sensoriamento remoto.** 1988. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1988.

RIVERAU, J. C. Curso de fotointerpretação. In: SEMANA DE ESTUDOS, 11., 1972, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SICEG, 1972. p. 75-121. Notas de aula.

ROCHA, G et al. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba. **Anais...** São Paulo : Águas Subterrâneas, 2006, p. 1-20.

RODOVIA ANHANGUERA. **Tudo sobre a rodovia Anhanguera – SP-330.** [200-?]. Disponível em: <<http://www.rodoviaanhanguera.com.br/tudo-sobre-a-rodovia-anhanguera.php>>. Acesso em: 20 out. 2016.

ROSA, R. Geotecnologias na Geografia Aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROSS, J. L. S. MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia USP**, São Paulo, v. 10, p. 41-58, 1996.

ROSS, J. L. S. MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.** 1:500.000 - Vol. I - Mapa - Vol II - Livro. São Paulo: FAPESP, 1997.

SAAD, A. R. **Estratigrafia do Subgrupo Itararé no centro e sul do estado de São Paulo**. 1977. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977.

SALVADOR, S. M. F. **Contaminação de águas subterrâneas**. 2015. Slides da aula de Hidrogeologia de Contaminantes.

SANTOS, S. M. **Proposta de elaboração de carta de sensibilidade ambiental aplicada a postos de combustíveis em Rio Claro -SP**. 2008. 50 f. Trabalhos de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2008.

SAWARYN, S. J; THOROGOOD, J. L. A compendium of directional calculations base don the minimum curvature method. **Society of Petroleum Engineers journal**, Dallas, v. 20, n.1, p. 1-13, 2005.

SCHMELLING, S. G.; ROSS, R. R. **Contaminant Transport in Fractured Media: Models for Decision Makers**. Washington: EPA, 1988.

SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. **Anais ...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974, v. 1, p. 41-65.

SCHOBENHAUS, C. et al. **Geologia do Brasil**: texto explicativo do mapa Geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Brasília: DNPM-MME, 1984. Escala 1:2.500.000.

SEADE (FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS). **Informações dos Municípios Paulistas**. 2017. Disponível em: <<http://www.imp.seade.gov.br/frontend/#/perfil>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SIGRH (SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Plano da bacia hidrográfica do rio Mogi-Guaçu**: diagnóstico final. 2015. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/9069/diagnostico_sintese_cbh-mogi.pdf>. Acesso em: 30 out. 2016.

SILVA, R. B. et al. O Alto Estrutural de Vera Cruz - Garça, estado de São Paulo. **Revista Geociências**, Rio Claro, v. 9. n. extra 1, p. 279-298, 1990.

SOARES, P. C. O limite glacial – pós-glacial do Grupo Tubarão do Estado de São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 44, p. 161-172, 1972.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 71–104, 1976.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P.; MATTOS, J. T. A lógica de interpretação de fotografias aéreas convencionais aplicada a imagens de satélite. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., 1978, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1978. p. 616-617.

SOUSA, M. O. L. **Evolução tectônica dos altos estruturais de Pitanga, Artemis, Pau d'Alho e Jiboia** - centro do estado de São Paulo. 2002. 206 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002;

SOUSA, M. O. L.; MORALES, N. Evolução Tectônica do Alto Estrutural de Pitanga-SP. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 7., 1999, Lençóis. **Anais...** Lençóis: SBG, 1999. Sessão 4, p. 40-42.

SOUZA, N. C. D. C. de. **Mapeamento geotécnico regional da Folha de Aguaí com base na compartimentação por formas de relevo e perfis típicos de alteração.** 1992. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

STEVANUX, J. C.; SOUZA-FILHO, E. E.; FÚLFARO, V. J. Trato deposicional da Formação Tatuí (P) na área aflorante do NE da bacia do Paraná, Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., 1986, Goiânia. **Anais...**Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia, 1986. p. 219-229.

TEDESCO, M.; ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S. J.; MIELNICZUK, J.; BOHNEN, H.; GIANELLO, C.; STANNL, J. G.; BISSANI, C. A.; MEURES, E. **Apostila da disciplina de princípios de fertilidade de solos.** Porto Alegre: Faculdade de Agronomia, 1992.

TEIXEIRA, M. S. **Relatório de atendimento a acidentes ambientais no transporte rodoviário de produtos perigosos 1983 a 2004.** 2005. Disponível em: <<http://emergenciasquimicas.cetesb.sp.gov.br/apresentacao/relatorios-de-atendimento/>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

THOMPSON, G. B.; Mc ENALLY, J. M. **Coastal Resource Atlas for Oil Spills in Trial bay.** New South Wales: Australian State Pollution Control Commission, 1984.

TOLEDO, M. C. M.; OLIVEIRA, S. M. B.; MELFI, A. J. Intemperismo e formação do solo. In: TEIXEIRA, W. et al. (Org.). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de Textos, 2001.

UFRJ (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO). **História do Petróleo.** 2014. Disponível em: <<http://www.petroleo.coppe.ufrj.br/historia-do-petroleo/>>. Acesso em: 24 jul. 2016.

USDA (UNITED STATE DEPARTMENT OF AGRICULTURE). **Design Guide for Oil Spill Prevention and Control at Substations.** 1993. Disponível em: <http://www.rurdev.usda.gov/SupportDocuments/UEP_Bulletin_1724E-302.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2016.

VEDOVELLO, R. **Zoneamentos geotécnicos por sensoriamento remoto, para estudos de planejamento do meio físico** - aplicação em expansão urbana. 1993.

88 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

VEDOVELLO, R. **Zoneamentos geotécnicos aplicados à gestão ambiental, a partir de unidades básicas de compartimentação – UBCs**. 2000. 154 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

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

VENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. **Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia**. São José dos Campos: INPE, 1982.

VERSTAPPEN, H. T. **Remote sensing in geomorphology**. Amsterdam: Elsevier Science, 1977

VIANA, J. A. P. Comportamento do hidrocarboneto no solo: uma revisão bibliográfica. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA, 4., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SEPEGE, 2009.

VIEIRA, L. S.; VIEIRA, M. N. F. **Manual de morfologia e classificação de solos**. 2. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda. 1983.

WALKER, D. A., WEBBER, P. J., EVERETT, K. R.; BROWN, J. Effects of crude and diesel oil spills on plant communities at Prudhoe Bay, Alaska, and the derivation of oil spill sensitivity maps. **Arctic Institute of North America**, Canadá, v. 31, n. 3, p. 242-259, 1978.

WENNINK, C. J.; NELSON-SMITH, A. **Coastal Oil Pollution Evaluation Study for the Gulf of Suez and the Red Sea Coast of the Republic of Egypt**. London: IMO. 1979.

WIECZOREK, A.; DIAS-BRITO, D.; MILANELLI, J. C. C. Mapping oil spill environmental sensitivity in Cardoso Island State Park and surroundings areas, São Paulo, Brazil. **Ocean & Coastal Management**, Amsterdam, v. 50, n. 11-12, p. 872-886, 2007.

ZACHARIAS, M. A.; GREGR, E. J. Sensitivity and Vulnerability in Marine Environments: an Approach to Identifying Vulnerable Marine areas. **Conservation Biology**, Boston, v. 19, n. 1, p. 86-97, 2005.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP)**. 1994. 90 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1994.

ZAINE J. E. **Método de fotogeologia aplicado a estudos geológico-geotécnicos: ensaio em Poços de Caldas, MG.** 2011. 104 f. Tese (Livre-docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

ZAINE, J. E.; PENTEADO-ORELLANA, M. M. APA Piracicaba no Município de Rio Claro, SP: proposta de mudança com base em critérios geomorfológicos e políticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38., 1994, Balneário Camboriú. **Anais...** Balneário Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, 1994, v. 1, p. 488.

ZENGEL, S.; HAYES, M. O.; MICHEL, J.; WHITE, M.; BENGGIO, B.; LOPEZ, F.; MOSHER, E.; TOUW, S. Integrated planning front the mountains to the sea: environmental sensitivity mapping in the Caribbean. **International Oil Spill Conference Proceedings**, Washington, v. 2001, n. 2, p. 1113-1117, 2001a.

ZENGEL, S.; HAYES, M. O.; MICHEL, J.; ROBERTSON, A; FRANCENDESE, L.; BENGGIO, B. Sensitive areas planning for inland South Florida: web and GIS tools. **International Oil Spill Conference Proceedings**, Washington, v. 2001, n. 2, p. 789-796, 2001b.

ZUQUETTE, L. V. **Análise crítica da Cartografia Geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.** 1987. 673 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1987.

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