

CRISTINA APARECIDA BENEDITTI

**Vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial: estudo de caso rio
Tietê/Reservatório de Barra Bonita-SP**

Rio Claro
2015

CRISTINA APARECIDA BENEDITTI

**Vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial: estudo de caso rio
Tietê/Reservatório de Barra Bonita-SP**

Tese de Doutorado 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 Doutora em Geociências e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Paulina Setti Riedel
Co-orientador: Dr. João Carlos Carvalho Milanelli

Rio Claro -SP

2015

551.4a Beneditti, Cristina Aparecida
B463v Vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial :
estudo de caso rio Tietê/Reservatório de Barra Bonita-SP /
Cristina Aparecida Beneditti. - Rio Claro, 2015
157 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Paulina Setti Riedel
Coorientador: João Carlos Carvalho Milanelli

1. Geomorfologia. 2. Sensibilidade. 3. Modelagem
derramamento de óleo. I. Título.

*Dedico à minha família, papai,
mamãe e Carlinha*

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por me dar saúde para completar mais uma etapa de minha vida e por me sustentar nos momentos mais difíceis.

À minha família que sempre me deu apoio, suporte e muito amor. Deus e minha família que me sustentaram e me sustentam no momento de fraqueza. Apenas os que me amam verdadeiramente não me deixam cair. Obrigada pelo amor incondicional!

À profa. Dra. Paulina Setti Riedel pela confiança, discussões técnicas, ensinamentos científicos e de vida, amizade e orientação neste trabalho.

Ao Dr. João Carlos Carvalho Milanelli pelas orientações e pelos ensinamentos práticos para o campo!

Ao PRH-5 (Convênio UNESP/ANP/Petrobras/MCT/FINEP) pela disponibilidade de infraestrutura necessária para o desenvolvimento do trabalho.

Ao prof. Dr. José Ricardo Sturaro pela paciência e dedicação com o ensino da Geoestatística, pelas inúmeras discussões para deixar o “rio reto”! Obrigada pelos ensinamentos de vida que não estão escritos em nenhum livro!

Aos colegas do programa de pós graduação em geociências e meio ambiente da UNESP Campus de Rio Claro, em especial, ao Guilherme Gallo, Rafael Tiago e Debora que enfrentaram sol, chuva e frio congelante nos trabalhos de campo! Também agradeço, de coração, à Thais, ao Mateus, Mara, Rodrigo e Marcelo pelo acolhimento e discussões!

À Darlene Armbruste e Rosangela Vacello pela disponibilidade em sempre ajudar das mais diversas formas e sempre com alegria!

Aos meus mais recentes colegas do CENSIPAM que hoje fazem parte do meu convívio com discussões muito produtivas e que fazem dos meus dias melhores! Em especial, ao Carlos Querino pelo incentivo, sugestões e discussões!

Enfim, agradeço a todos aqueles que eu amo, pela compreensão nas horas que estive ausente para realizar este trabalho.

Fé, foco, força e felicidade!

RESUMO

Acidentes envolvendo derramamento de óleo são extremamente preocupantes, pois provocam severos danos ao meio ambiente, seja aquático ou terrestre, causando impactos a fauna, flora e também a população que depende dos recursos naturais direta ou indiretamente. Porém, apenas na década de 80, após grave acidente ocorrido no Alasca é que estabeleceu-se medidas mais rigorosas para o transporte, armazenamento de óleo e planos de respostas aos acidentes. No entanto, os eventos de maior magnitude e que envolvem grandes volumes derramados ocorrem na área costeira e por isso, para este ambiente, já possuem regras e metodologia de análise da sensibilidade e vulnerabilidade ambiental ao óleo mais consolidados. O mesmo não ocorre para o ambiente fluvial. Porém há uma previsão do aumento de embarcações nas hidrovias do Brasil transportando grãos, açúcar e etanol, o que eleva a possibilidade de ocorrerem acidentes com derramamento de óleo diesel, tanto diretamente dos comboios quanto nos pontos de abastecimento. Na ocorrência desse tipo acidente, é importante que se saiba qual é o caminho que o óleo percorrerá no canal do rio, bem como quando e em que proporções atingirá áreas ambientalmente mais sensíveis, para que se possa tomar medidas de contenção do óleo. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi elaborar cenário de vulnerabilidade ambiental ao óleo para ambiente fluvial, em especial para trecho do rio Tietê e para o reservatório de Barra Bonita-SP. Para tanto, foi realizado o mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo (ISF) na área de estudo, considerando as características da geomorfologia fluvial. Também foi realizada a simulação de um acidente no porto intermodal, localizado em Anhembi, considerando as características típicas de vento e precipitação para os meses de cheia (maio) e vazante (novembro) do reservatório. Com a utilização do software SisBaHiA, foram elaborados cenários de 12h, 36h, 60h e 72h após o início do derramamento, de modo a acompanhar o deslocamento da mancha de contaminante. Os resultados das simulações foram divididos em três classes, segundo o tempo permanência do óleo na área: sendo a não passagem da mancha; permanência por até 5% do tempo; permanência por mais de 5%. Os índices de sensibilidade foram cruzados com estas classes e foram obtidos os índices de vulnerabilidade ambiental ao óleo. O ISF mais comum na área foi o ISF 5 (margens com vegetação de porte arbustivo), em 26,92% das margens analisadas. Através de técnicas de geoprocessamento, observou-se 15,7 km de alta vulnerabilidade e 13,1 km de média vulnerabilidade no período de cheia. Na vazante, 9,2 km de margem foram classificadas como alta vulnerabilidade e 20,7 km de média vulnerabilidade. Os resultados apresentaram informações importantes para a elaboração dos planos de emergência em caso de derramamento de óleo diesel, pois indicaram regiões que devem ser priorizadas nas ações de contenção. No entanto, recomenda-se que mais trabalhos sejam desenvolvidos para o aprimoramento da metodologia, como incorporação das características biológicas da área.

ABSTRACT

Accidents involving oil spills are extremely worrying, as they cause severe damage to the environment, whether water or land, impacting the fauna, flora and also the population directly or indirectly depends on natural resources. But only in the 80s, after serious accident in Alaska is that it was established more stringent measures for transportation, oil storage and response plans to accidents. However, larger magnitude of events involving large volumes and poured occurs in the coastal area and therefore, for this environment, already have rules and methodology of analysis of the sensitivity and environmental vulnerability to further consolidated oil. Not so for the riverine environment. But there is a forecast increase of vessels in the waterways of Brazil carrying grain, sugar and ethanol, which increases the possibility of accidents with diesel oil spill, either directly train as the supply points. In case this kind of accident occurs, it is important to know which is the oil course on the riverdyke, as well as when and in which magnitude it will reach environmentally sensitivity areas. Thus, the main aim of this thesis was to elaborate a vulnerability environmental scenery to oil in fluvial environment, more specifically on the river Tietê stretch and reservoir of Barra Bonita in São Paulo state. For both, a mapping of the fluvial sensitive environmental index to oil (ISF) to the study areas was carried out, considering the geomorphology of the river. Also was carried out a simulation of an accident in an inter-modal harbor, located in Anhembi, which have considered typical characteristics of wind and rainfall to the flood (May) and ebb (November) period in there reservoir. Using the software SisBaHiA, were elaborated scenery to 12h, 36h, 60h e 72h after the overflow have started, to follow the displacement of the spot contamination. The simulation results were divided in three classes, according to the oil permanency time: no spot passage, spot permanency lower than 5% of the time and spot permanency for more than 5% of the time. The sensitive index were crossed with this index and an environmental vulnerability index to oil were obtained. The most common ISF was ISF 5 (the border with bushes vegetation), in 26,92% of the analyzed margins. Throughout the geoprocessing, was observed 15,7 km with high vulnerability and 13,1 km with medium vulnerability during the flood period. One ebb, 9,2 km of margins were classified with high vulnerability and 20,7 km as medium vulnerability. The results have shown important information to the elaboration of the emergency plans in case of diesel overflow, because they have indicated regions where should be priority on the containment action. In addition, it is recommended that more research should be developed to improve the methodology, as for example, the incorporation of the biological characteristics of the area.

Keywords: vulnerability, sensitivity, modeling oil spill

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção de cana de açúcar no Brasil em 2014.	13
Figura 2 – Localização da área de estudo.	15
Figura 3 – Principais tributários na área de estudo.	16
Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo.....	20
Figura 5- Feições geomorfológicas- detalhe da área.....	22
Figura 6 - Trecho em que o rio Tietê altera seu curso a noroeste	23
Figura 7 - Mapa geomorfológico de trecho do fundo de vale do rio Tietê	24
Figura 8- Precipitação média mensal	25
Figura 9 - Exemplos de cobertura vegetal da área de estudo.	26
Figura 10 - Evaporação para diferentes tipos de óleo.	30
Figura 11 - Fluxograma de trabalho.....	42
Figura 12 – Realizando a medição de vazão em um trecho da área de trabalho	44
Figura 13 – Atividades realizadas durante as companhias de campo para levantamento dos dados.	45
Figura 14 - Parte da equipe durante o trabalho de campo para o mapeamento das feições marginais.....	46
Figura 15 – Atividades socioeconômicas, sendo em (a) e (b) comunidade de pescadores e (c) rampa de acesso a casa de veraneio. Em (d) está uma amostra de aves presentes na área.....	47
Figura 16 – Feições marginais observadas em trabalho de campo. a) Margem erosiva seguida por vertente; b) Margem de paredão rochoso (rocha fraturada ou estratificada); c) Margem deposicional com areia e cascalho (praia fluvial); d) Ilha com fauna local.	48
Figura 17 - Esquema dos transectos realizados para a obtenção de batimetria.	49
Figura 18 - Componentes do semivariograma.	50
Figura 19 - Transectos alinhados	51
Figura 20 - Em destaque, (a) elemento gerado no ArgusOne. (b) elemento gerado no SisBaHiA subdividido em 4.	55
Figura 21 - Pontos de monitoramento.	57
Figura 22 - Ponto considerado potenciais a derramamento de óleo.....	59
Figura 23 – (a) Média mensal do volume útil do reservatório de Barra Bonita entre 1992 e 2012. (b) precipitação média mensal na área do reservatório.	62
Figura 24 - Semivariograma utilizado para a krigagem ordinária.....	64
Figura 25 - Batimetria estimada pelo método da krigagem ordinária.....	65
Figura 26 - Detalhe da batimetria, em região próxima ao porto intermodal	67
Figura 27 - Rosa dos ventos do mês de maio para a estação de Piracicaba	69
Figura 28 - Rosa dos ventos do mês de novembro para a estação de Piracicaba	70
Figura 29 - Rosa dos ventos do mês de maio para a estação de Barra Bonita	70
Figura 30 - Rosa dos ventos do mês de novembro para a estação de Barra Bonita	71
Figura 31 - Precipitação média dos dias de maio e novembro na estação de Piracicaba.	72
Figura 32 - Precipitação média dos dias de maio e novembro na estação de Barra Bonita.	72
Figura 33 - Domínio da modelagem	74
Figura 34- Malha numérica de elementos finitos.	75
Figura 35 - Detalhe da malha de elementos finitos para o mês de novembro.....	76

Figura 36 - Detalhe da malha de elementos finitos para o mês de maio	77
Figura 37 – Curva de decaimento do óleo para os meses da simulação.....	78
Figura 38 – Curva de evaporação do óleo para os meses da simulação.....	78
Figura 39 - Índice de Sensibilidade Fluvial ao óleo no reservatório de Barra Bonita - SP	79
Figura 40 – Área com grande variação de feições geomorfológicas e de ISF	82
Figura 41 – Variação da vazão durante o período de simulação. (a) ponto próximo à barragem e (b) próximo ao porto intermodal.	83
Figura 42 - Vetor velocidade da água para o mês de novembro	85
Figura 43 - Vetor velocidade da água para o mês de maio	87
Figura 44 – Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 12h de simulação no mês de novembro.....	89
Figura 45 - Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF)- Área A	91
Figura 46 – Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área B.....	93
Figura 47 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 36h de simulação no mês de novembro.....	95
Figura 48 - Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área C	96
Figura 49 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 60h de simulação no mês de novembro.....	98
Figura 50 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 72h de simulação no mês de novembro.....	100
Figura 51 - Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área D	102
Figura 52 - Comparação entre as simulações de 12h para maio e novembro	104
Figura 53 - Comparação entre as simulações de 36h para maio e novembro	106
Figura 54 - Comparação entre as simulações de 60h para maio e novembro	108
Figura 55 - Comparação entre as simulações de 72h para maio e novembro	110
Figura 56 - Índice de vulnerabilidade ambiental fluvial ao óleo para o mês de novembro considerando a simulação de derramamento de 36000 L de óleo diesel no porto intermodal de Anhembi.	113
Figura 57 - Índice de vulnerabilidade ambiental fluvial ao óleo para o mês de maio considerando a simulação de derramamento de 36000 L de óleo diesel no porto intermodal de Anhembi.	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Sensibilidade Fluvial ao óleo (ISF)	39
Tabela 2- Exemplo da forma de cálculo da média de precipitação para cada dia.	53
Tabela 3 – Cenários acidentais para simulação.....	60
Tabela 4: Matriz dos índices de vulnerabilidade fluvial ao óleo.....	61
Tabela 5 - Vazão dos principais tributários.	68
Tabela 6 - Quantificação dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial (ISF)	80

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	14
3. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO	14
3.1. Geologia, solos e relevo	18
3.2. Feições geomorfológicas fluviais	21
3.3. Clima	25
3.4. Cobertura vegetal	26
4. INTERAÇÃO ÓLEO-ÁGUA	28
5. MODELAGEM NUMÉRICA	32
5.1. SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL- SisBaHiA	32
6. MAPEAMENTO DA SENSIBILIDADE E VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO	36
7. MATERIAIS E MÉTODOS	41
7.1. Materiais	41
7.2. MÉTODOS	42
7.3. Definição da época da simulação	43
7.4. Obtenção dos parâmetros para a modelagem	43
7.4.1. Trabalhos de campo.....	44
7.4.2. Batimetria.....	48
7.4.3. Descarga Fluvial.....	52
7.4.4. Vento e precipitação.....	53
7.5. Modelagem- implementação do modelo hidrodinâmico	54
7.5.1. Definição do domínio da modelagem.....	54
7.5.2. Geração da malha numérica.....	54
7.5.3. Definição das condições iniciais e de contorno.....	55
7.5.4. Modelo hidrodinâmico.....	56
7.6. Modelagem- implementação do modelo Lagrangeano	58
7.4.1. Fonte do derramamento.....	58
7.4.2. Curva de decaimento do óleo.....	59
7.5. Elaboração dos cenários acidentais	60
7.6. Cenários de vulnerabilidade	60
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62

8.1. Época da simulação	62
8.2. Batimetria	63
8.3. Descarga fluvial	68
8.4. Vento e precipitação	68
8.5. Implementação do modelo hidrodinâmico	73
8.5.1. Domínio da modelagem.....	73
8.5.2. Malha de elementos finitos.....	75
8.6. Curva de decaimento	77
8.7. Índice de sensibilidade fluvial	78
8.8. Simulação dos cenários acidentais	83
8.9. Índices de vulnerabilidade	111
9. CONCLUSÕES	116
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A – Ficha de campo para o mapeamento do índice de sensibilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial.	125
ANEXO A – Tabela de feições	130

1. INTRODUÇÃO

Acidentes envolvendo derramamento de óleo provocam danos severos ao meio ambiente, seja no meio aquático ou terrestre, impactando a fauna, flora e também a população que depende, direta ou indiretamente, dos recursos naturais.

Os desastres envolvendo este tipo de contaminante tornaram-se mais preocupantes e chamaram a atenção dos governantes após um grande derramamento de óleo ocorrido no Alasca, na década de 80. A partir de então, houve a necessidade de se estabelecer, com maior rigor, medidas para o transporte e armazenamento de óleo, assim como para a implementação de ações de resposta aos acidentes.

Os desastres ocorridos no ambiente costeiro são mais estudados devido a sua magnitude, pois envolvem grandes volumes de contaminante e atingem áreas extensas, provocando um impacto de maiores proporções. Porém, os impactos ambientais em água doce podem ser mais graves, pois o movimento da água, neste ambiente, é menor e o óleo pode permanecer por longos períodos de tempo. Nos rios e seus afluentes, o óleo pode se acumular em plantas nas margens e também pode atingir o sedimento de fundo, afetando organismos que se alimentam destes sedimentos (EPA, 1999).

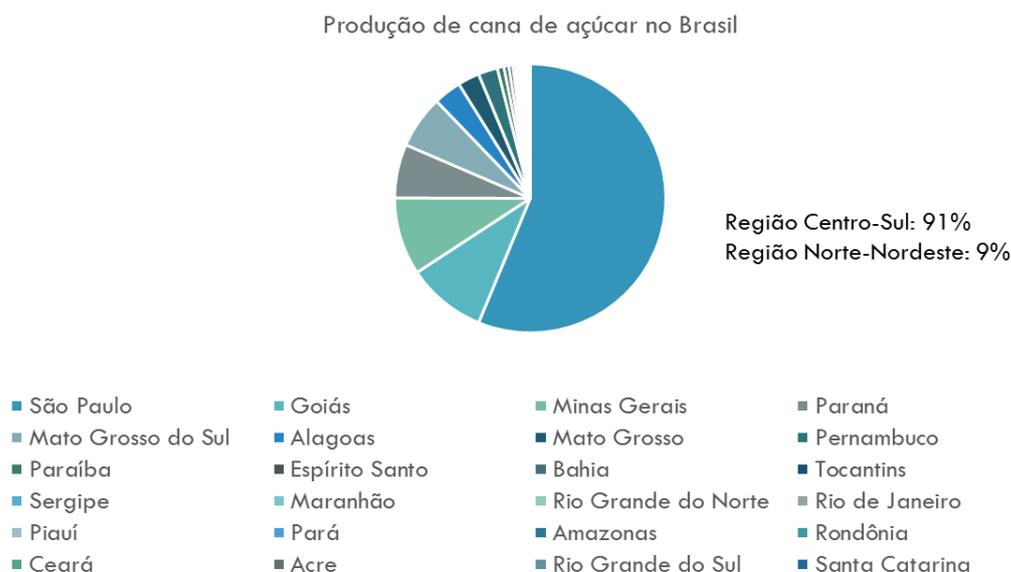
Atualmente existem várias pesquisas e trabalhos realizados voltados para vulnerabilidade e sensibilidade ambiental ao óleo nas zonas costeiras, como Romero et al (2013), Olita et al (2012), Mendoza-Cantú et al (2011), Romero (2009) e Costa et al (2006). Porém, como os acidentes em ambiente fluvial são menos considerados por envolverem um volume menor de óleo, esse tipo de informação é praticamente inexistente.

Apesar da carência de informação sobre sensibilidade e vulnerabilidade ao óleo nos ambientes fluviais, o risco de derramamentos tende a aumentar, pois há a previsão de crescimento do transporte de cargas pelas hidrovias do Brasil, levando os produtos do interior do país para regiões mais próximas aos grandes centros e portos.

Um dos produtos que tem se desenvolvido para o interior do Brasil é a cana de açúcar, levando o Brasil a ser o maior produtor mundial de etanol, com 25 372,7 milhões de litros produzidos na safra de 2013/2014. A maior concentração de produção de etanol ocorre na região centro-sul, responsável por 91% da produção nacional, enquanto somente 9% concentram-se na região Norte-Nordeste, segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA). Na região Centro-Sul, o estado com maior

destaque na produção de etanol é São Paulo, o qual detém 61% da produção, conforme mostra a Figura 1. Grande parte da produção nacional é voltada para o consumo interno, mas também há uma tendência do Brasil se tornar um grande exportador de etanol.

Figura 1 - Produção de cana de açúcar no Brasil em 2014.



No entanto, o crescimento da produção de cana-de-açúcar para o interior se distancia dos grandes centros de consumo e dos portos do país. Isso torna o produto mais custoso, pelo fato de seu escoamento ocorrer em quase sua totalidade por meio de transporte rodoviário.

Com o objetivo de viabilizar a chegada do produto aos grandes centros e ao litoral, tanto para exportação quanto para atender o mercado nas regiões norte, nordeste e sul, reduzir custos com o transporte rodoviário, manutenção de estradas e emissão de poluentes no meio ambiente, foram elaborados projetos para a construção de dutos para o transporte de álcool, como, por exemplo, o projeto que liga Jataí (GO) à Paulínia (SP) e Paulínia (SP) ao litoral. A hidrovía Tietê-Paraná também tem projetos para integrar o sistema dutoviário proposto, transportando o etanol em barcaças e empurradores até a região de Anhembi, a partir do qual segue por dutos até Paulínia. Há a previsão de que 80 barcaças e 20 empurradores naveguem pela hidrovía Tietê - Paraná transportando o combustível.

Com o aumento da quantidade de embarcações na hidrovía, há maior possibilidade de ocorrerem acidentes com derramamento de óleo diesel, tanto diretamente dos comboios quanto nos pontos de abastecimento. Segundo o artigo 54 da Lei 9605/98, esse tipo de acidente configura crime ambiental e é passível de reclusão e multa.

Quando ocorre algum acidente desse tipo é importante que se saiba qual é o caminho que o óleo percorrerá no canal do rio, quando e em que proporções atingirá áreas ambientalmente mais sensíveis, para que se possa tomar medidas de contenção do óleo. Com base nisso, o mapa de vulnerabilidade ambiental ao óleo, obtido a partir do cruzamento das probabilidades de dispersão da mancha de óleo e os índices de sensibilidade ambiental ao óleo presentes na carta SAO (Sensibilidade ao Óleo), torna-se uma informação importante para tomada de decisões, uma vez que esse mapa permite a visualização de áreas mais vulneráveis e que necessitam de proteção prioritária.

Desta forma, com o aumento de investimentos nas hidrovias e, conseqüentemente, o aumento do trânsito de embarcações, é importante estabelecer procedimentos para a elaboração de cartas de vulnerabilidade ambiental ao óleo em ambientes fluviais e assim fornecer subsídios para tomadas de decisões, na tentativa de minimizar os impactos ao meio ambiente e à população que depende dos recursos do rio em um eventual derramamento de óleo.

2. OBJETIVO

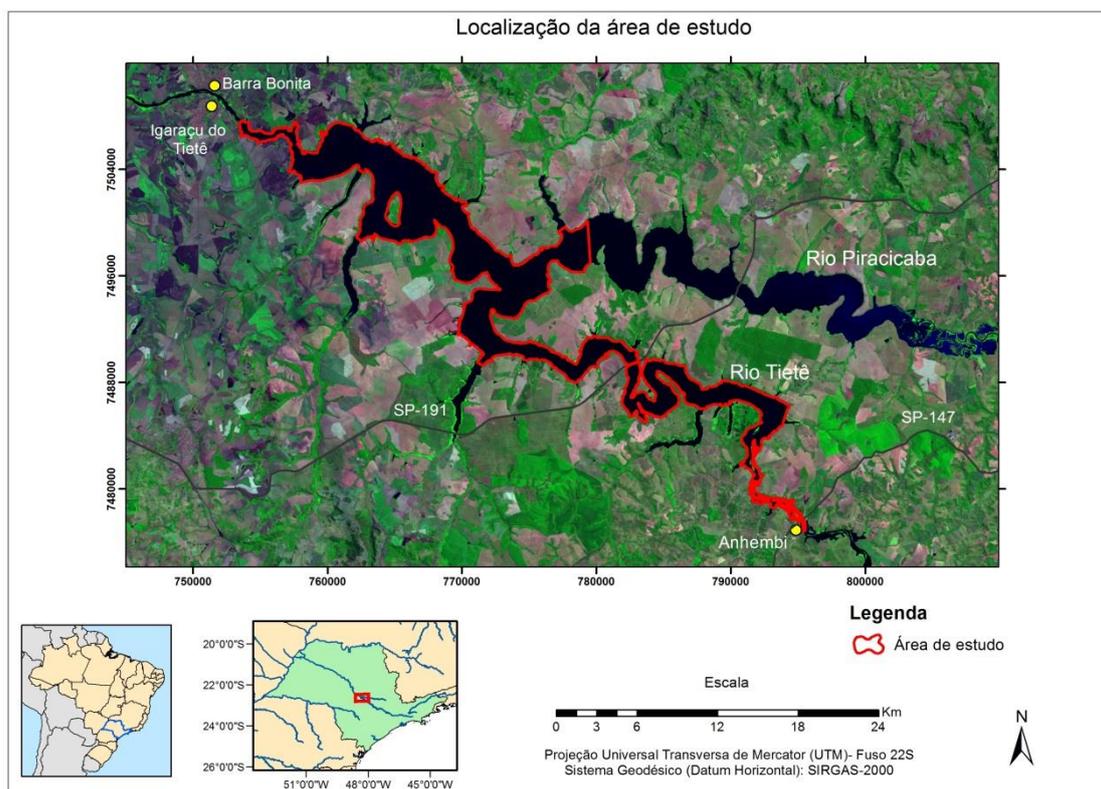
Tendo em vista que, atualmente, não existe uma metodologia nacional para a elaboração de cartas de vulnerabilidade ambiental para rios, o objetivo da pesquisa é produzir tais cartas, a partir da simulação de um evento específico em um trecho do rio Tietê e parte do reservatório de Barra Bonita-SP.

3. JUSTIFICATIVA DA ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho, mostrada na Figura 2, está localizada na região central do estado de São Paulo e abrange o trecho do rio Tietê no reservatório de Barra Bonita, desde o município de Anhembi-SP, até a barragem da usina hidrelétrica. O

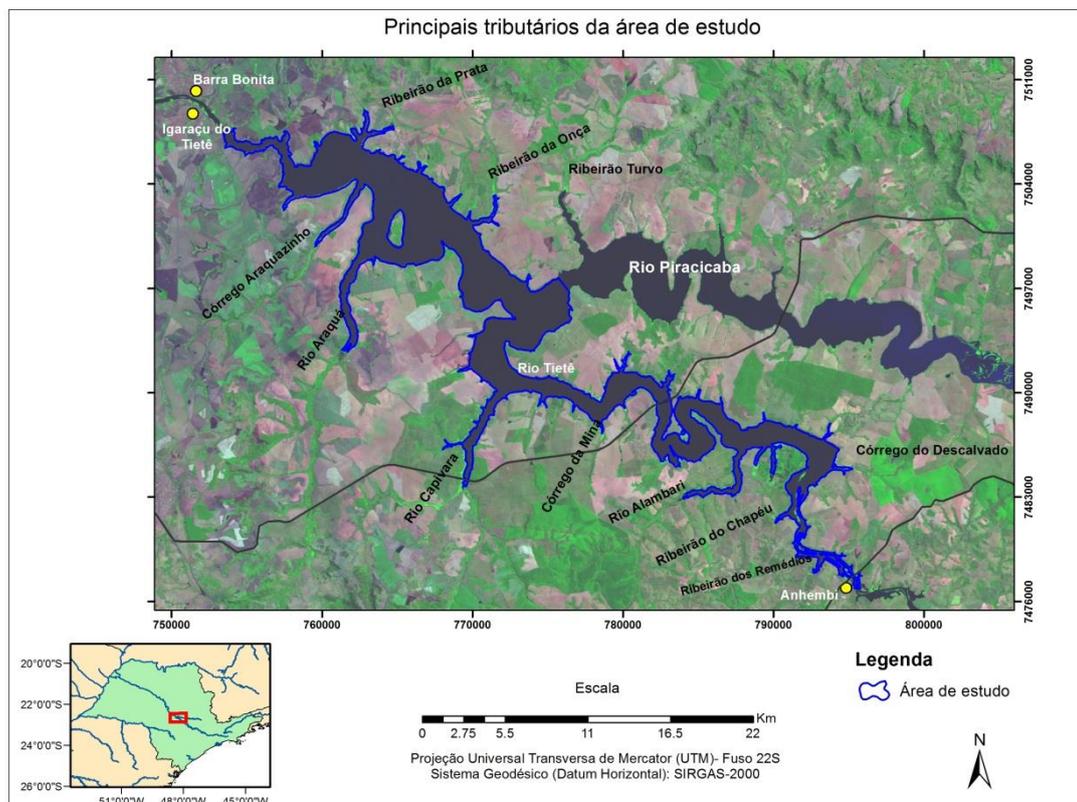
rio Piracicaba também faz parte do reservatório, porém ele não foi considerado parte da área de estudo.

Figura 2 – Localização da área de estudo.



O rio Tietê nasce na Serra do Mar, em Salesópolis (SP) e tem extensão de 1.150 km. Existem seis barragens, todas com eclusas, possibilitando a navegação em seu curso, sendo a primeira delas Barra Bonita e também a primeira à jusante da cidade de São Paulo. O reservatório de Barra Bonita é formado principalmente pelo barramento dos rios Tietê e Piracicaba e conta com a contribuição de vários tributários. Na área de estudo, os principais tributários são: Ribeirão dos Remédios, Ribeirão do Chapéu, Córrego do Descalvado, Córrego da Mina, Rio Capivara, Rio Araquá, Rio Araquazinho, Ribeirão da Prata, Ribeirão da Onça e Ribeirão Turvo (Figura 3).

Figura 3 – Principais tributários na área de estudo.



No reservatório funciona, desde 1963, a Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, atualmente administrada pela AES Tietê, com potência nominal de 140MW e área de 312 km². A barragem tem uma eclusa com largura de 11 m com um desnível de 25m e é usada por embarcações de turismo e cargas.

O trecho do rio Tietê do município de Conchas (SP) até o encontro com as águas do Rio Paraná é navegável e faz parte de uma das mais importantes hidrovias do país, a hidrovia Tietê-Paraná. Isto motivou a escolha desta região para o estudo.

A hidrovia Tietê-Paraná possui 2400 km de extensão e é composta pelos rios Paraná, Paranaíba, Paranapanema, Piracicaba, Tietê, Grande e o canal Pereira Barreto. No trecho paulista, no qual está inserida a área de estudo, a navegabilidade no rio Tietê é de 554 km e vai desde a cidade de Conchas-SP até o encontro do rio Tietê com o rio Paraná e, no rio Piracicaba, vai desde o encontro com o rio Tietê até 22 km à montante.

A hidrovia Tietê-Paraná é geograficamente privilegiada, pois está inserida em uma região bastante rica, com economia diversificada, próxima aos principais centros consumidores. Além disso, forma um sistema multimodal, pois está integrada a ferrovias,

rodovias e dutos regionais e federais, que pode ser utilizado para escoamento da produção local tanto para exportação, quanto para abastecimento interno (AHRANA, 2012).

De acordo com o “Relatório das Estatísticas da Navegação Interior”, da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2013), em 2012, a hidrovia movimentou cerca de 6 milhões de toneladas, o equivalente a 24% do total movimentado pelas hidrovias brasileiras utilizando navegação interior, praticamente toda relativa a graneis sólidos. Ainda segundo a Administração da Hidrovia do Paraná (AHRANA, 2011), o Tramo Norte da Hidrovia Tietê- Paraná, as cargas com origem nos rios Paraná, Paranaíba e Rio Grande, tendo o Rio Tietê como ponto de divisa apresentaram uma movimentação de 1.984.576 toneladas, tendo origem em São Simão, no estado de Goiás. Através desse terminal, escoam toda a movimentação desse tramo, que se divide em três destinos, caracterizados pelo transporte de grãos (soja e milho) e açúcar:

- Pederneiras (SP) (655 quilômetros): soja (678.444 toneladas), milho (324.046 toneladas) e farelo de soja (277.988 toneladas).

- Anhembi (SP) (760 quilômetros): soja (330.999 toneladas), açúcar (87.705 toneladas), farelo de soja (68.612 toneladas) e milho (44.197 toneladas).

- Santa Maria da Serra (SP)(738 quilômetros): soja (117.637 toneladas), milho (48.157 toneladas), farelo de soja (3.748 toneladas) e açúcar (3.033 toneladas).

Segundo o que aponta ANTAQ (2013) espera-se um crescimento da demanda de 122 milhões de toneladas, em 2010, para 236 milhões em 2030, o que significa um crescimento de 92%. As importações devem crescer, no mesmo período, 89%, saindo de mais de 50 milhões de toneladas em 2010 para quase 95 milhões em 2030, enquanto as exportações devem crescer aproximadamente 95%, saindo de quase 73 milhões de toneladas em 2010, para 141 milhões em 2030.

Além das cargas historicamente movimentadas na hidrovia, há um projeto de movimentação de etanol, levando produto de São Simão, Presidente Epitácio e Araçatuba pela Hidrovia Paraná-Tietê até a Anhembi. Porém ainda não há previsão de início da operação.

Somando ao fato de a área de estudo estar inserida no contexto de uma hidrovia importante do estado de São Paulo, que tem uma projeção de aumento de transporte em seu curso, o que justifica a preocupação com as consequências de possíveis acidentes que provoquem danos ambientais, a área também contempla uma região de interesse turístico, por conter praias artificiais, naturais e paisagens ecológicas, que

propiciam o turismo de lazer e cultural, além de uma eclusa, que contribui para o turismo fluvial e o agroturismo. Outro aspecto a ser considerado em um possível acidente é o impacto que este pode causar na atividade pesqueira, seja ela profissional ou de subsistência, que ocorre em todo o reservatório.

Além da importância do rio Tietê e da hidrovia Tietê-Paraná para o estado e para a economia brasileira, esta área de estudo possibilita avaliar a sensibilidade ambiental ao óleo de um curso fluvial de porte médio, associado a um ambiente lântico, representado pelo reservatório. Isto é extremamente importante para replicar a metodologia em outros reservatórios susceptíveis a este tipo de acidente.

Outro fator que contribuiu para a escolha desta área de estudo foi uma questão de logística, uma vez que a região é próxima ao campus de Rio Claro (UNESP), o que facilitou a realização das campanhas de campo.

Ademais ao entendimento do contexto em que a área de estudo está inserida é necessário conhecer as características físicas da área, pois elas determinam os índices de sensibilidade ambiental que são utilizados para a obtenção dos índices de vulnerabilidade ambiental ao óleo.

3.1. Geologia, solos e relevo

A geologia de uma região está extremamente relacionada à formação dos solos, os quais se encontram diretamente em contato com a água do reservatório. Sendo assim, é importante conhecer as formações geológicas predominantes na região, principalmente as que estão nas margens do rio e do reservatório, sendo estas as descritas a seguir.

A área de estudo faz parte, de forma integral, da Bacia Sedimentar do Paraná, que abrange a parte centro-ocidental do Estado de São Paulo. Trata-se de uma bacia com material acumulado de gênese distinta, abrangendo litologias sedimentares de origem marinha, flúvio-lacustre e desértica, datadas do Paleozóico e do Mesozóico (ALMEIDA, 1956; IPT, 1981a).

Derrames basálticos ocorridos no Jurássico deram origem a rochas resistentes da Formação Serra Geral que, junto com as Formações Pirambóia e Botucatu, constituem o Grupo São Bento e ocorrem na área em estudo.

A Formação Piramboia compreende a sucessão de camadas arenosas e avermelhadas do Mesozóico, de granulação fina e maior fração de argila nas camadas inferiores, chegando a areno-conglomerados nas porções superiores (IPT, 1981a). Estende-se de maneira contínua por todo o Estado de São Paulo, aflorando na Depressão Periférica Paulista e possui espessuras superficiais máximas registradas de 270 metros nas adjacências de São Pedro e Anhembi (CAETANO-CHANG; WU, 2003). Esta formação ocorre na maior parte da área de estudo.

A Formação Botucatu é constituída por arenitos de boa seleção granular e pouca matriz, datados do Jurocretáceo (IPT, 1981a, PETRI; FÚLFARO, 1983; RADAMBRASIL, 1983; FACINCANI, 2000). Raramente ultrapassa os 100 metros de profundidade e possui estratificação cruzada de médio a grande porte. Estas características elementares sugerem que tal formação tenha origem eólica em ambiente desértico predominantemente, com depósitos por acreção de areia na frente de dunas (PETRI; FÚLFARO, 1983; RADAMBRASIL, 1983). Ocorre na porção oeste da área de estudo.

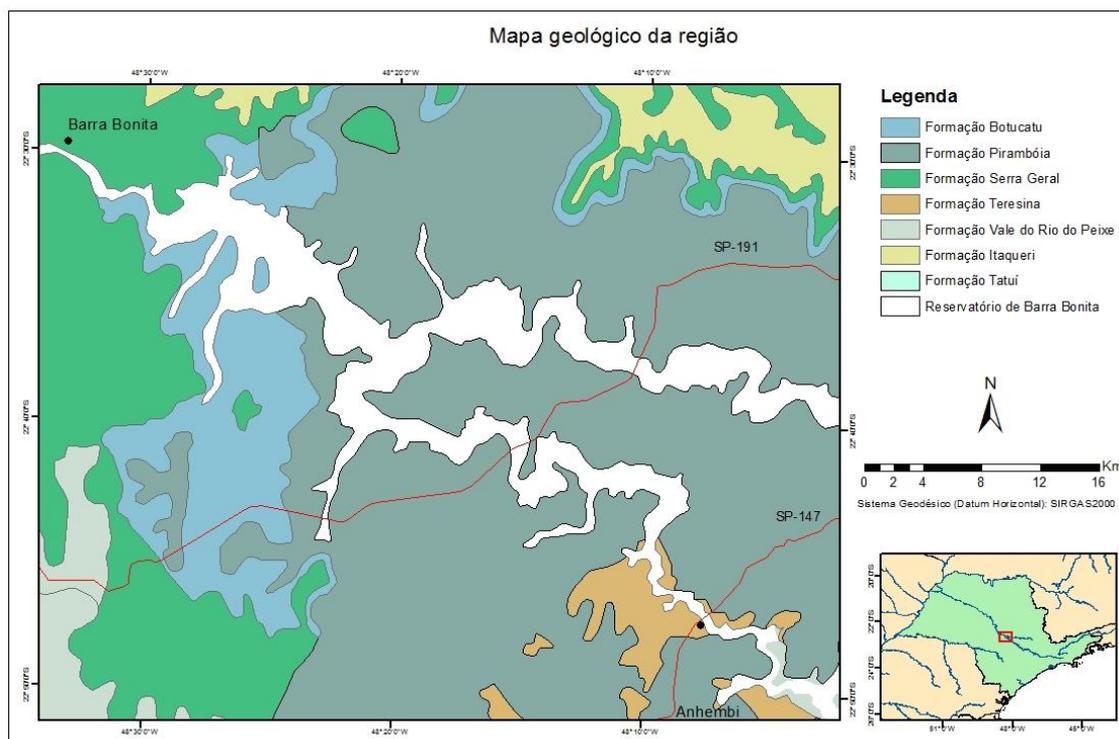
Com pequena expressão na área de estudo, a Formação Serra Geral abrange o conjunto de rochas efusivas e intrusivas (diques e soleiras), com gênese no vulcanismo de fissura ocorrido a partir do Jurássico Superior (IPT, 1981a; RADAMBRASIL, 1983). Constitui-se predominantemente por basaltos e basalto-andesito de filiação toleítica (FACINCANI, 2000) que atuam na manutenção do front cuestasiforme (CUNHA, 2001). Corpos intrusivos também são frequentes na Depressão Periférica, na forma de *sills* ou diques de variadas espessuras e extensões (IPT, 1981a, PETRI; FÚLFARO, 1983; RADAMBRASIL, 1983). Estes últimos atuam na resistência das estruturas litológicas sedimentares à erosão, causando escalonamento no relevo, desenvolvimento de morros testemunhos e soleiras em canais fluviais de distintas ordens.

A Formação Teresina ocorre na área de estudo próxima a Anhembi-SP e é constituída por argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuros e esverdeados, ritmicamente intercalados com arenitos muito finos, cinza-claros. Quando alterada, esta unidade mostra cores diversificadas em tons creme, violáceos, bordôs e avermelhados. Comumente apresenta lentes e concreções carbonáticas, com formas elípticas e dimensões que podem atingir 2 m de comprimento por 80 cm de largura. As principais estruturas sedimentares encontradas nesta seqüência são a laminação "flaser", plano-paralela, ondulada e convoluta, estratificação "hummocky", marcas onduladas e gretas de contração. (KREBS,

2002). As características litológicas e estruturas sedimentares exibidas por esta formação indicam uma deposição em ambiente marinho de águas rasas e agitadas, dominado por ondas e pela ação de marés (inframaré a supra-maré).

A distribuição das formações geológicas da área está ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: CPRM, 2006.

A partir de uma litologia predominantemente argilosa a arenosa e tendo em vista uma superfície suficientemente bem drenada e pouco movimentada, predominam na região sudeste da área de estudo os argissolos sobre a formação Piramboia, com concentração de argila na camada inferior, de fácil revolvimento. São solos que possuem alta suscetibilidade à erosão pluvial, alta capacidade de lixiviação e percolação lateral e baixa capacidade de adsorção catiônica e os Latossolos sobre a Formação Botucatu, presente na região a oeste da área de estudo, que são solos muito profundos, com alta capacidade de lixiviação e muito baixa capacidade de adsorção catiônica (IPT, 1981a).

As formas de relevo presentes no trecho estudado inserem-se nos grupos definidos pelo IPT (1981) como *Relevos de Agradação* e *Relevos de Degradação, em Planaltos Dissecados*. No primeiro grupo incluem-se os depósitos aluviais, adjacentes ao

rio Tietê e ao baixo curso de seus tributários. No segundo grupo incluem-se trechos de *Colinas Amplas*, definidas por interflúvios com área superior a 4 km², topos extensos e aplainados e vertentes com perfis retilíneos a convexos; faixa de *Morrotes Alongados e Espigões*, definidos por interflúvios sem orientação bem marcada, topos achatados a angulosos e vertentes ravinadas com perfis preferencialmente retilíneos; colinas Amplas gradualmente convertem-se em *Colinas Médias*. Estas diferem das primeiras por apresentarem interflúvios com superfície entre 1 a 4 km. As altimetrias predominantes estão entre 500 e 650m, enquanto as declividades predominantes variam entre 5 e 10% (IPT, 1981).

3.2. Feições geomorfológicas fluviais

O mapeamento das feições geomorfológicas fluviais é importante, pois são elas que regem o mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo nesses ambientes, uma vez que o acesso e a permanência do material derramado no meio dependem da energia cinética da água, a qual é regida pelos elementos físicos do terreno.

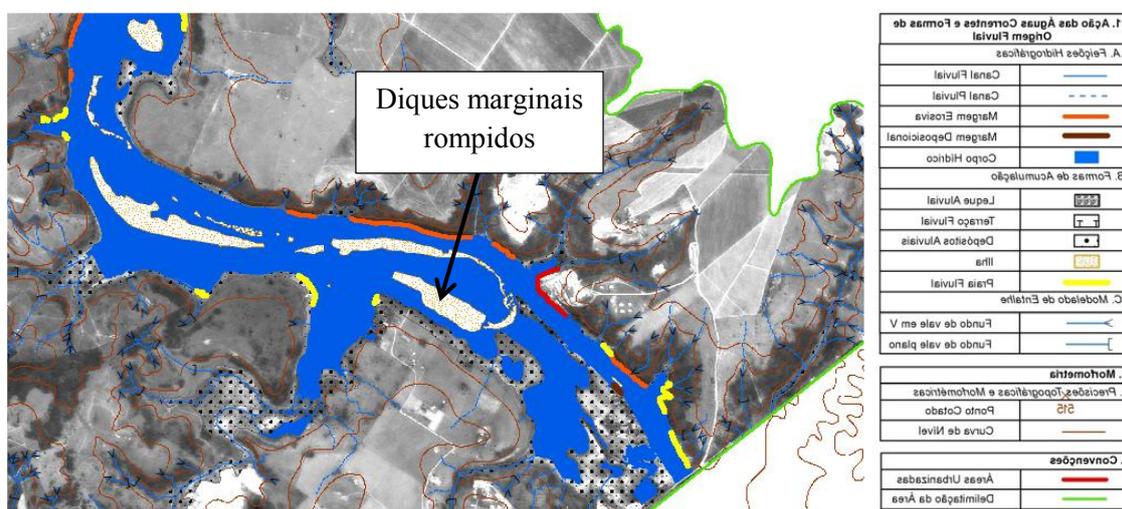
A área apresenta variabilidade de feições geomorfológicas vinculadas à dinâmica fluvial, principalmente no trecho inicial da área de estudo, de Anhembi até a confluência do rio Tietê com o rio Piracicaba. Este trecho consiste em um canal meândrico, alternando margens abruptas, sujeitas a intensas atividades erosivas com margens de topografia mais suave e formação de praias e extensos depósitos aluviais.

Conforme Perez Filho, Espíndola e Soares (2001), Perez Filho et al. (2006) e Rodrigues (2007), a construção de usinas hidrelétricas na década de 1960, no Planalto Ocidental Paulista, reativou os processos geomorfológicos principalmente mudanças do nível de base dos cursos d'água associados à grande área ocupada pelas represas. Isto contribuiu para o espraiamento das águas e extensão das áreas de deposição, o que pode ser visto, principalmente, na margem esquerda do rio Tietê, devido ao menor gradiente vertical.

A contínua recarga de sedimentos arenosos nas margens deposicionais com vastas áreas de depósitos aluviais impossibilita, em alguns trechos, junto ao rio, a estabilização de uma flora permanente, conformando as praias fluviais (em amarelo) (Figura 5).

Uma feição que mostra a alteração nos mecanismos fluviais após a elevação do nível de base é representada pela formação de um alinhamento insular em posição mediana ao leito, que são os antigos diques fluviais rompidos pelo extravasamento permanente das águas de seu antigo leito (Figura 5). Segundo Suguiú; Bigarella (1990) os diques marginais são formados durante os processos de transbordamento do rio, que ao ter sua velocidade bruscamente diminuída, provoca a deposição da fração mais grosseira de sua carga suspensa imediatamente às margens do canal, formando os depósitos que flanqueiam os canais. Estas ilhas são interrompidas nas regiões em que houve a ruptura destes diques.

Figura 5- Feições geomorfológicas- detalhe da área.



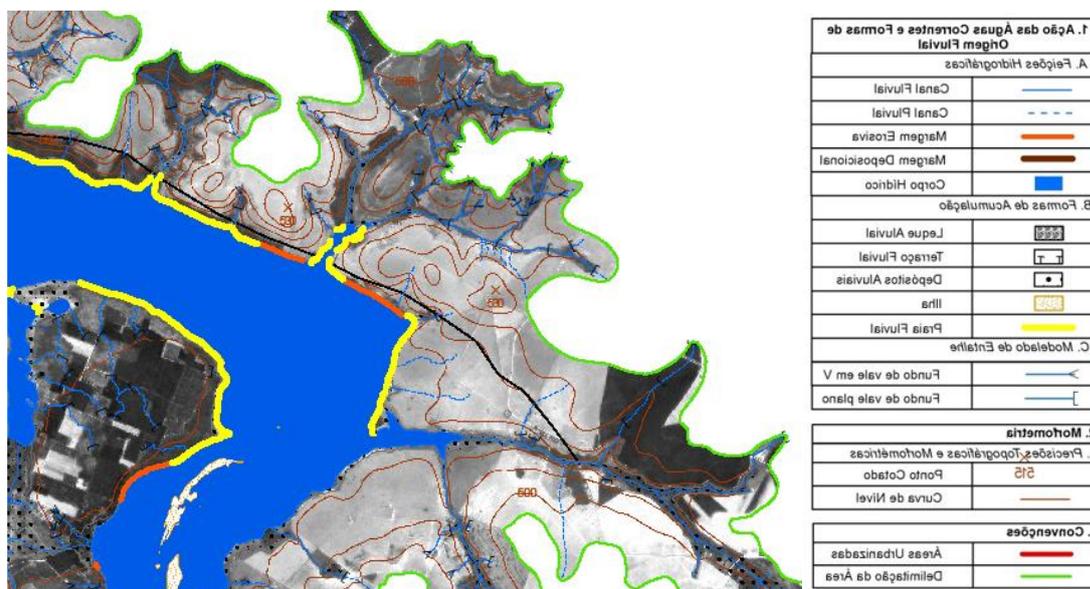
Fonte: Aguilar (2013)

Essas ilhas são feições frequentes no perfil do rio Tietê, mais próximas a Anhembi, e vão diminuindo à medida que se aproxima da Represa de Barra Bonita devido ao aprofundamento do rio, com submersão dos antigos diques.

Aguilar (2013) observou que, pela diferenciação relativa na resistência do material do substrato, a margem direita do rio Tietê, no trecho mostrado na Figura 6, apresenta um gradiente vertical consideravelmente mais acentuado que a sua margem esquerda. Assim, se na esquerda visualiza-se uma considerável extensão da lâmina d'água sobre a superfície, com evidente extensão deposicional às suas adjacências, na direita

observa-se uma extensa dissecação do terreno, que rapidamente eleva-se em algumas dezenas de metros, alcançando as cabeceiras das drenagens tributárias ao curso principal.

Figura 6 - Trecho em que o rio Tietê altera seu curso a noroeste

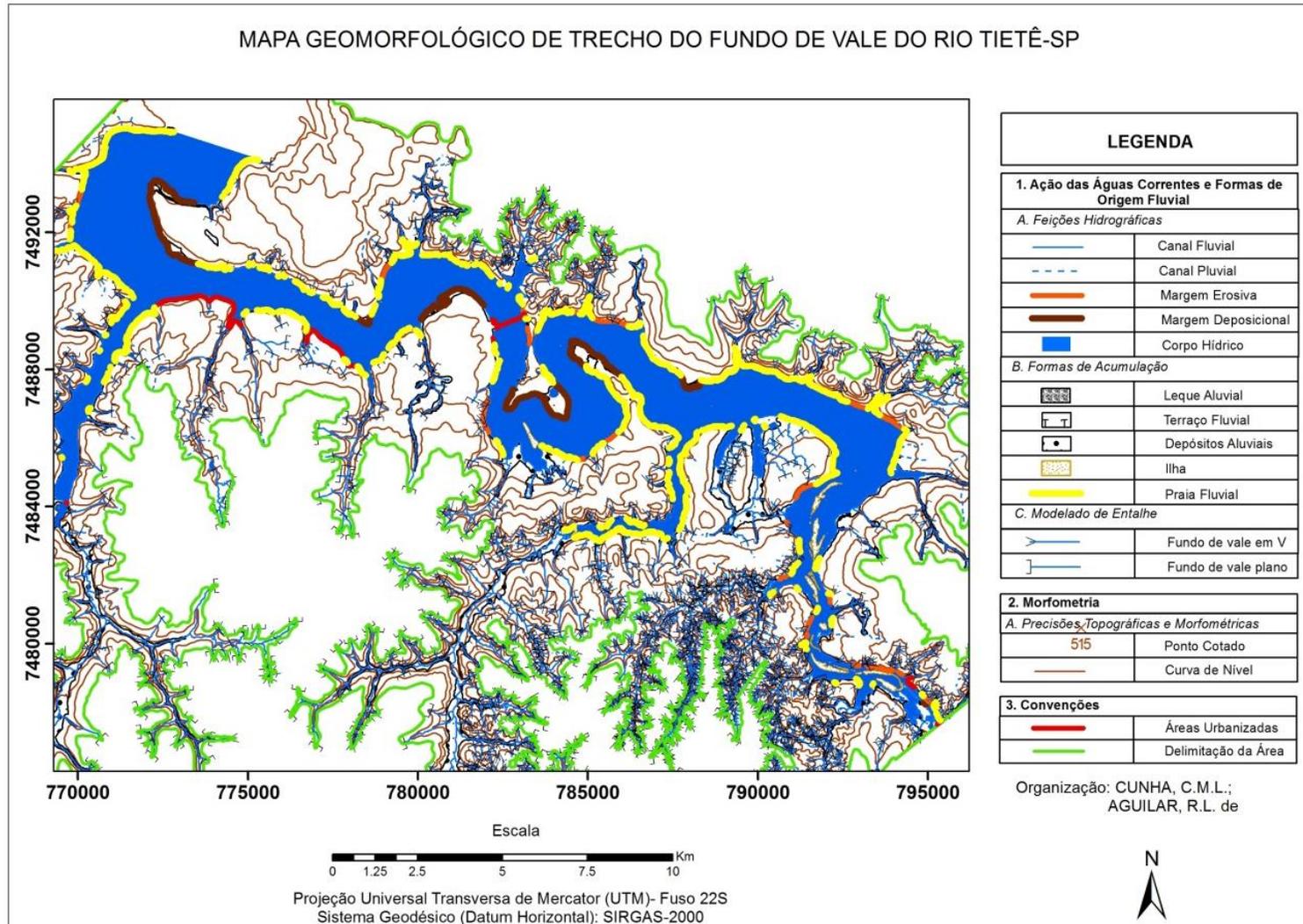


Fonte: Aguilar (2013)

O mesmo autor observou a interrupção na continuidade entre os depósitos que margeiam o canal do Tietê e os interiores, circundantes aos limites das drenagens tributárias, na sua margem direita. Este fato decorre do afogamento dos depósitos de baixo curso após a subida do nível de base local.

O mapeamento geomorfológico completo desta área está sendo realizado pelo grupo de pesquisa “Sensibilidade Ambiental a Derrames de Petróleo – UNESP/RC” para posterior publicação. No entanto, a Figura 7 apresenta o mapeamento já realizado na parte da área de bastante variabilidade de feições geomorfológicas vinculadas à dinâmica fluvial.

Figura 7 - Mapa geomorfológico de trecho do fundo de vale do rio Tietê

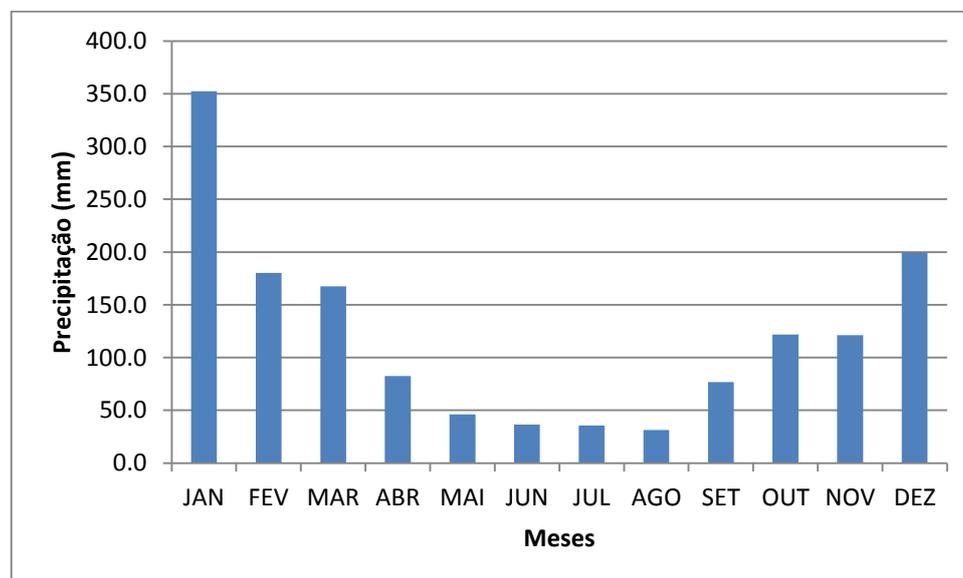


3.3. Clima

Conhecer o clima da região e o comportamento dos parâmetros de vento e precipitação são importantes no caso de um eventual acidente com óleo, pois influenciam as interações e o deslocamento do óleo na água.

Desta forma, o clima é considerado de transição entre os climas tropical e subtropical e as estações anuais não são bem definidas. Segundo a classificação de Köpen, é do tipo CWA (clima mesotérmico), com inverno seco e verão quente. De forma mais específica, segundo MONTEIRO (1973), a maior parte da área de estudo pode ser classificada, quanto aos climas zonais, como climas controlados por massas equatoriais e tropicais; e quanto aos climas regionais, como climas tropicais alternadamente secos e úmidos (A2). Na Figura 8 nota-se que para a região existem dois períodos bem distintos quanto à pluviometria, tendo um período bastante chuvoso, de outubro a março, e um período seco, de maio a agosto. Abril e setembro são considerados meses de transição entre esses períodos.

Figura 8- Precipitação média mensal



Fonte : INMET.

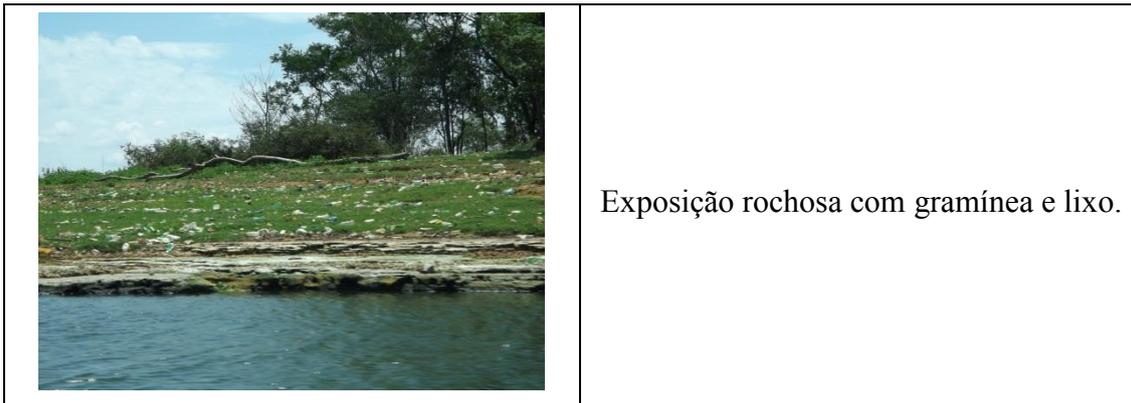
3.4. Cobertura vegetal

A vegetação natural na região era o cerrado, porém essas áreas foram substituídas pela agricultura, principalmente pela cana de açúcar. Também há a presença de plantações de eucaliptos, pois na região existem indústrias de papel e celulose. Em margens da área de estudo há mata ciliar, porém em muitas outras ocorrem apenas gramíneas. É notável também na área de estudo a presença de macrófitas aquáticas, principalmente nas enseadas. Segundo o levantamento realizado por Carvalho et al. (2003), foram encontradas 17 espécies de macrófitas no reservatório, sendo as mais importantes a *Brachiaria mutica*, *Brachiaria subquadripara* e *Eichhornia crassipes*, responsável pela maior ocupação. A Figura 9 mostra exemplos da cobertura vegetal presente nas margens da área de estudo, uma vez que é esta vegetação que poderá ser atingida por um eventual derramamento de óleo.

Figura 9 - Exemplos de cobertura vegetal da área de estudo.

Fotos de margens	Descrição
	<p>Barranco com vegetação herbácea e banco de macrófitas aquáticas.</p>
	<p>Barranco com rochas estratificadas/fraturadas e vegetação arbórea densa acima.</p>

	<p>Gramínea</p>
	<p>Areia e gramínea</p>
	<p>Barranco de solo ao fundo e cascalhos à frente, parcialmente cobertos por gramínea.</p>
	<p>Vegetação arbórea ciliar</p>



4. INTERAÇÃO ÓLEO-ÁGUA

O óleo é um termo geral que descreve uma ampla variedade de substâncias naturais de origem vegetal, animal, ou de origem mineral, bem como uma gama de compostos sintéticos.

O óleo bruto é composto por diversos componentes principais e por milhares de outros componentes menores. Cada tipo de produto de óleo tem certas características e propriedades únicas. Estas propriedades influenciam a forma como o óleo se comporta quando ele é derramado e determina o destino e os efeitos do óleo no ambiente. Além disso, também influenciam a eficácia das operações de limpeza.

O transporte e o intemperismo do óleo derramado são governados por propriedades do óleo e pelas condições hidrodinâmicas, meteorológicas e do ambiente. Desta forma, é importante entender quais são os fenômenos que ocorrem quando o óleo é derramado num corpo d'água. São eles:

(a) Advecção

É o processo físico que envolve o carregamento da mancha de óleo em superfície e subsuperfície. É o principal mecanismo que determina a localização do óleo a partir do ponto de derramamento, sendo o processo de transporte governante após o espalhamento inicial, devido à ação combinada do vento, ondas, marés e fluxos induzidos por gradiente de densidade (ASCE, 1996).

(b) Difusão turbulenta

A turbulência superficial da água e dos ventos faz com que a mancha se espalhe mais rapidamente provocada por tensões horizontal e vertical. As tensões induzidas horizontais aumentam o espalhamento horizontal da mancha, enquanto que as tensões induzidas verticais causam a dispersão vertical da mancha através do desprendimento de pequenas bolhas (fenômeno de dispersão) que logo serão afetadas por outros processos de degradação, como diluição e emulsificação (PALADINO, 2000).

(c) Espalhamento

O espalhamento da mancha de óleo consiste na expansão horizontal devido às forças de gravidade, inércia e viscosidade e tensão superficial no estágio inicial do derramamento. Segundo Fay (1969;1971), a modelagem do espalhamento pode ser dividida em três regimes: gravitacional-inercial, gravitacional-viscoso e viscoso-tensão superficial.

Imediatamente após o vazamento, a espessura da mancha é importante e influencia no processo de espalhamento, onde as forças dominantes são a de inércia (como força resistiva) e a de gravidade, atuando como força ativa. Logo, nesta fase tem-se o espalhamento Gravitacional – Inercial.

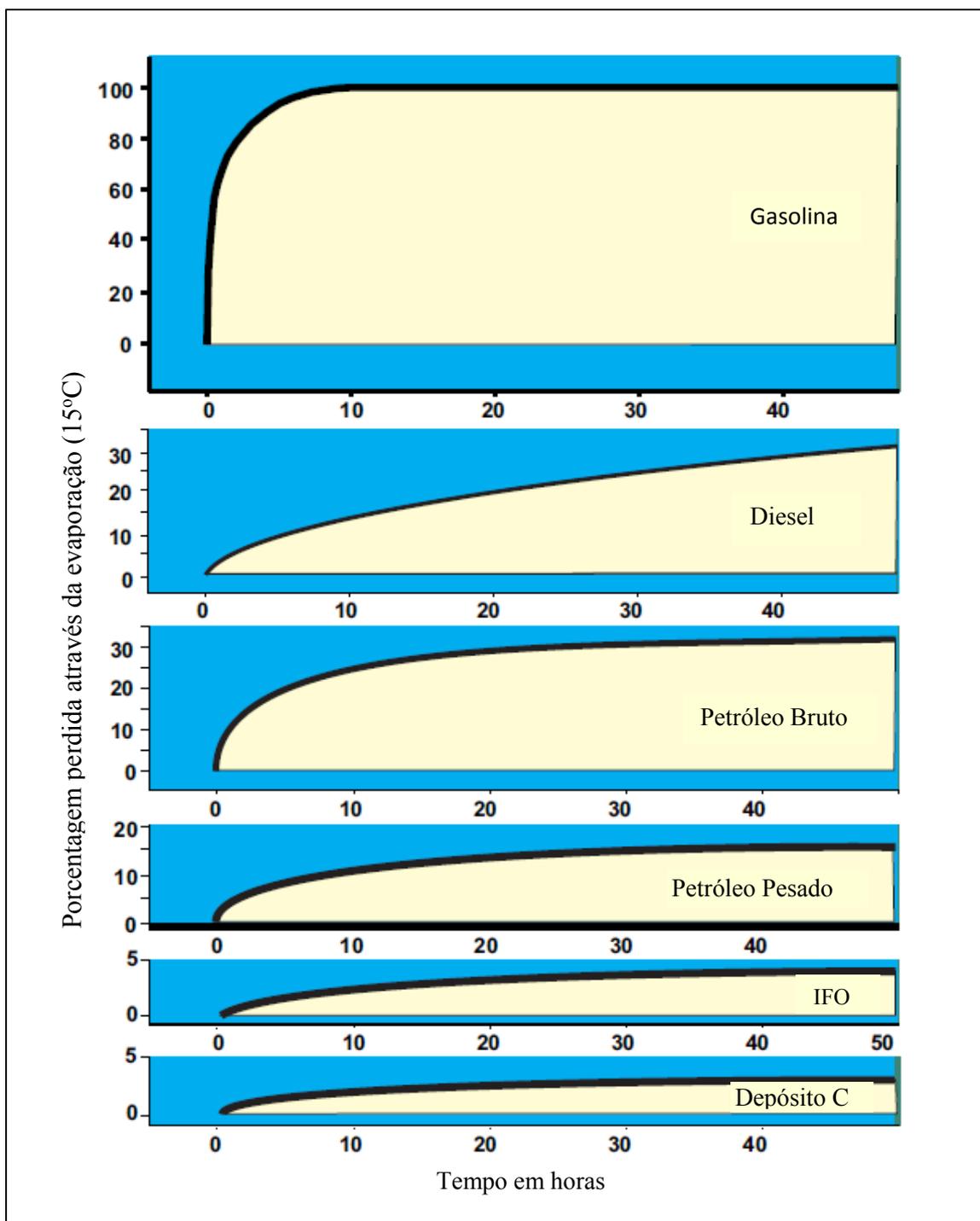
Na segunda fase, a espessura da mancha diminui e as forças viscosas começam dominar sobre as de inércia, sendo que a gravidade permanece como força ativa. Esta fase denominada espalhamento gravitacional–viscoso, tem seu início após algumas horas e pode durar até alguns dias, dependendo da quantidade de óleo derramado.

Na última fase do espalhamento, quando a espessura da mancha é muito pequena, a força gravitacional deixa de ser importante, sendo o espalhamento dominado pelas forças de tensão superficial, e contrariado pela viscosidade interfacial – esta é a fase de espalhamento tensão superficial-viscosa (FAY,1969;1971).

(d) Evaporação

A evaporação é um dos processos mais importantes (FINGAS, 2010), pois é o que tem mais efeito sobre a quantidade remanescente de óleo na água ou no solo após um derrame. Em alguns dias, um combustível leve como a gasolina, evapora completamente em temperatura ambiente, enquanto que apenas uma pequena porcentagem de um óleo pesado evapora. A Figura 10 mostra a evaporação para diferentes tipos de óleo.

Figura 10 - Evaporação para diferentes tipos de óleo.



Fonte: Adaptado de FINGAS (2010).

Em geral, cerca de 80% da evaporação ocorre nos dois primeiros dias após um derrame. A taxa de evaporação é muito rápida imediatamente após o derramamento,

diminuindo consideravelmente em seguida. A maior parte dos óleos segue uma curva logarítmica com o tempo, no entanto, alguns óleos, como o diesel, seguem uma curva como a raiz quadrada com o tempo, pelo menos nos primeiros dias. Isto significa que a velocidade de evaporação diminui muito rapidamente, em ambos os casos, depois de alguns dias (FINGAS, 2010).

(e) Dispersão

A dispersão do óleo é definida como a quebra da coesão da mancha de óleo em pequenas partículas e o espalhamento e difusão na coluna d'água. Essa quebra é resultado de ação de ondas e de turbulência na superfície do corpo d'água, além de ser dependente da natureza do óleo (REED et al., 1999; ITOPI, 2002), ocorrendo mais facilmente com óleos de baixa viscosidade. A dispersão em relação ao estado da água é um fator decisivo na modelagem do espalhamento, pois se a agitação for muito grande, devido a tempestades, por exemplo, isto faz com que esse processo seja mais importante do que a evaporação (processo importante em condições meteorológicas normais) como forma de remoção de óleo da superfície (FERNANDES, 2001).

(f) Emulsificação

É o processo de formação de emulsões, conhecido como *mousse*, a partir da dispersão de gotículas de água dentro do óleo. A quantidade de água e sua distribuição afetam a viscosidade e a estabilidade da emulsão em função do tempo (LEHR et al., 2002; STEELE et al., 1985). As emulsões são estáveis e podem conter de 50% a 80% de água, representando uma expansão de volume de material derramado em cerca de 3 a 4 vezes.

Depois que ocorre um derramamento de óleo sobre a água, o óleo tende a se espalhar em uma mancha sobre a superfície da água. Isto é especialmente verdadeiro para os produtos mais leves, tais como gasolina, diesel e óleos de petróleo bruto leve, que formam manchas muito finas.

A composição do óleo se altera desde o início do derramamento, enquanto a mancha se espalha sobre a superfície da água. Os componentes solúveis em água são dissolvidos e componentes imiscíveis tornam-se emulsionados e as frações leves evaporam (Wang et al., 2005).

O óleo se espalha horizontalmente sobre a superfície da água, mesmo na ausência total de correntes de ar e água. Esta difusão é causada pela força de gravidade e

a tensão interfacial entre óleo e água. A viscosidade do óleo se opõe a essas forças. À medida que o tempo passa, o efeito da gravidade sobre o óleo diminui, mas a força da tensão interfacial continua a espalhar o óleo. A transição entre estas forças ocorre nas primeiras horas após o derrame (FINGAS 2010).

O sistema de transporte da substância contaminante é dividido em duas categorias, a advecção e a difusão. A advecção move o contaminante devido ao fluxo do fluido, enquanto a difusão é dada pela mistura do contaminante por movimento aleatório do fluido. Em geral, a variação da concentração dos contaminantes depende, na maior parte dos casos, mais da advecção do que da dispersão, desta forma, é mais importante dispor de modelos hidrodinâmicos mais realísticos do que modelos de dispersão muito sofisticados (LEITÃO, 1996).

5. MODELAGEM NUMÉRICA

Existem duas abordagens distintas nos modelos numéricos relacionados ao transporte de substâncias em corpos de água naturais, a Euleriana e a Lagrangeana. A abordagem Euleriana descreve o que acontece em um ponto fixo ou em uma determinada região do espaço ao longo do tempo, enquanto que a abordagem Lagrangeana descreve o comportamento de partículas discretas que se movem no espaço.

Nos modelos Lagrangeanos, a evolução temporal e espacial do poluente é obtida por meio da determinação da trajetória das partículas. Assim, a trajetória das partículas em um escoamento é considerada individualmente, sendo advectada e espalhada (SANTIAGO, 2007).

5.1. SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL- SisBaHiA

Os modelos utilizados no desenvolvimento dos trabalhos fazem parte do SisBaHiA® -Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental, que é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppetec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa do COPPE/UFRJ - Instituto Aberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Este programa foi escolhido por possuir módulos capazes de implementar a circulação hidrodinâmica, assim como o transporte lagrangeano de partículas. Também foram consideradas as constantes pesquisas realizadas na COPPE/UFRJ para seu aprimoramento e os resultados alcançados ao longo dos anos em diversos os projetos que envolveram a compreensão da dinâmica do meio físico, tais como:

1. Aplicações dos modelos de circulação hidrodinâmica acoplado a transporte de salinidade para avaliação de intrusão salina no contexto do projeto “Análises de hidrodinâmica e de intrusão salina no canal de São Francisco, Baía de Sepetiba-RJ, com cenários de restrição hídrica”. Contratado por Thyssenkrupp CSA - Companhia Siderúrgica do Atlântico Ltda., em desenvolvimento desde março de 2015.

2. Aplicações de modelagem hidrodinâmica acoplada à geração de ondas, com transporte de sedimentos e qualidade de água no contexto do projeto “Análises de circulação hidrodinâmica, transporte de sedimentos e renovação de águas no recinto da marina Cabo Frio, RJ, com modelagem computacional”. Contratado por Viverde Urbanismo., em desenvolvimento desde outubro de 2014.

3. Aplicações de modelagem de propagação de ondas, modelagem hidrodinâmica 2DH e 3D acoplado a modelos de geração de ondas e de transporte de sedimentos e evolução morfodinâmica, no contexto do projeto “Análises e levantamentos hidro-sedimentológicos visando ao projeto da ponte entre Salvador e a ilha de Itaparica, BA”. Contratado pelo DERBA – Departamento de Infraestrutura da Bahia, em desenvolvimento desde maio de 2014.

4. Aplicações de modelagem hidrodinâmica 2DH e 3D e de transporte de sedimentos e evolução morfodinâmica, para previsão de taxas de assoreamento e de erosão em zonas portuárias brasileiras no âmbito do projeto “Desenvolvimento de produtos técnicos compostos por estudos e pesquisas acadêmicas destinadas a apoiar e assessorar a secretaria de portos da Presidência da República (SEP/PR) na elaboração de projetos de engenharia e serviços de dragagem, incluídos no Programa Nacional de Dragagem (PND) e no Programa de Aceleração do Crescimento (PAC)”. , desde julho de 2013.

5. Aplicações de modelagem hidrodinâmica 2DH e 3D, modelos de qualidade de água e de transporte de sedimentos e evolução morfodinâmica, no âmbito do projeto “Modelagem de hidrodinâmica ambiental, qualidade de água e processos sedimentológicos em rios conexos ao aproveitamento hidroelétrico de Jirau-ilha do Padre

no rio Madeira - RO”, para a empresa Energia Sustentável do Brasil S.A, em andamento desde maio de 2009.

Como o objetivo do trabalho não é desenvolver e discutir o modelo propriamente dito, não serão descritas as equações utilizadas e suas aproximações, o esquema numérico utilizado no SisBaHiA, suas vantagens e limitações. Para tais informações e mais detalhamentos consultar Rosman (2013).

De uma maneira geral, o SisBaHiA é um sistema para modelagem da circulação hidrodinâmica e do transporte de escalares passivos em corpos de água naturais. Estes corpos de água podem ser rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras.

Dentre os diversos módulos que o SisBaHiA possui estão o modelo hidrodinâmico, o modelo de transporte Euleriano e o modelo de transporte Lagrangeano.

Em qualquer sistema de modelo usado para analisar a circulação hidrodinâmica e a qualidade de água em corpos de água naturais, a base fundamental é o modelo hidrodinâmico. O SisBaHiA® permite a utilização do modelo 2DH acoplado ao modelo 3D. O sistema é capaz de calcular campos de velocidade promediados na vertical, 2DH, e campos de velocidades tridimensionais, 3D, gerando assim os perfis de velocidade ao longo da profundidade (ao longo do eixo vertical). O modelo hidrodinâmico do SisBaHiA é de linhagem FIST (*Filtered in Space and Time* ou Filtrado no Espaço e no Tempo), otimizado para corpos de água naturais utilizando elementos finitos para a discretização espacial e diferenças finitas na discretização temporal. A linhagem FIST representa um sistema de modelagem de corpos de água com superfície livre composta por uma série de modelos hidrodinâmicos, nos quais a modelagem da turbulência é baseada em técnicas de filtragem, semelhantes àquelas empregadas na Simulação de Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*), sendo que a LES é considerada estado da arte para modelagem de turbulência em escoamentos geofísicos. A versão 3D do FIST resolve as equações completas de *Navier-Stokes* com aproximação de águas rasas, isto é, considerando a aproximação de pressão hidrostática (ROSMAN, 2013). Vale lembrar que a equação de Navier-Stokes representa o princípio da conservação da quantidade de movimento (Segunda lei de Newton) em um referencial Euleriano. A técnica de modelagem de turbulência presente no SisBaHiA foi desenvolvida por Rosman & Gobbi (1990) e testada por Gobbi (1991).

O FIST3D calcula, primeiramente, os valores da elevação da superfície livre através de um modelamento bidimensional integrado na vertical (2DH) e, em seguida, o campo de velocidades. Dependendo dos dados de entrada, o campo de velocidades pode ser computado de forma tridimensional (3D) ou apenas bidimensional (2DH). Pode-se simular a circulação hidrodinâmica em corpos de água naturais sob diferentes cenários meteorológicos, oceanográficos, fluviais ou lacustres.

O modelo de transporte Euleriano é um modelo de uso geral para simulação de transporte advectivo-difusivo com reações cinéticas (MTEADR). Este modelo é mais útil para problemas de grande escala e é mais adequado para simular o transporte de escalares que se encontram dissolvidos na coluna de água, tais como substâncias genéricas, contaminantes, ou parâmetros de qualidade da água.

O sistema também possui um modelo de transporte Lagrangeano advectivo-difusivo com reações cinéticas (MTLADR), o qual é uma das melhores formas de resolver os conflitos entre as escalas de discretização do modelo hidrodinâmico e as escalas de plumas ou manchas contaminantes. O modelo também é da linhagem FIST, pois faz uso da modelagem de turbulência via simulação de grandes vórtices para a difusão e dispersão de partículas. O MTLADR é ideal para simular o transporte de escalares que possam estar flutuando, misturados ou ocupando apenas uma camada na coluna de água. Esse tipo de modelo é mais adequado para simular o transporte de manchas ou plumas contaminantes que sejam pequenas em relação ao domínio do modelo hidrodinâmico ou que apresentem fortes gradientes, como por exemplo, manchas de óleo oriundas de eventuais derrames e plumas de emissários.

Neste modelo, o lançamento de um contaminante pode ser de qualquer forma, instantâneo, por intervalo especificado ou contínuo, inclusive com vazão variável. O número de regiões fonte a serem simuladas simultaneamente é praticamente ilimitado. Além disso, para simulações de manchas de óleo, o modelo pode receber qualquer curva de perda de massa, por exemplo, as provenientes do reconhecido modelo ADIOS2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*) da NOAA (*Nacional Oceanic and Atmospheric Administration*).

Com relação ao problema de compatibilidade entre escalas espaciais dos modelos, Rosman (2013) destaca que isto é um aspecto prático de grande relevância. Na prática, para o modelo ser razoavelmente resolvido em uma malha ou grade numérica, o fenômeno precisa ter uma escala pelo menos 4 vezes maior que a escala de discretização.

E, para ser bem resolvido de fato, o fenômeno deve ser pelo menos 8 vezes maior que a escala de discretização.

Normalmente manchas de óleo ou plumas contaminantes têm dimensões horizontais de centenas de metros a poucos quilômetros. No caso de plumas é ainda mais comum que sua largura seja muito menor que seu comprimento. Portanto, para utilizar a discretização do modelo hidrodinâmico para modelar o transporte de manchas ou plumas contaminantes, haverá necessidade de uma grade muito refinada, o que resulta em um processo de modelagem extremamente custoso e ineficiente.

O mesmo autor sugere, para casos de manchas e plumas contaminantes pequenas em relação ao domínio modelado, a adoção de metodologias de modelos de transporte Lagrangeanos, pois, neste caso, a mancha ou pluma é representada por uma nuvem com inúmeras partículas, e o problema principal passa a ser o de computar a posição no espaço contínuo de cada partícula. Somente nos instantes que se deseja computar a concentração, é gerada uma malha dedicada e suficientemente refinada no entorno da nuvem de partículas, permitindo o cálculo com grande acurácia. Como o espaço de deposição das partículas é contínuo, o conflito de escalas desaparece, porque a discretização do modelo hidrodinâmico é usada apenas para interpolações do campo de velocidades, o que é perfeitamente adequado.

6. MAPEAMENTO DA SENSIBILIDADE E VULNERABILIDADE AMBIENTAL AO ÓLEO

Quando ocorre algum acidente de derramamento de óleo, é importante que haja informações suficientes que indiquem quais áreas são prioritárias de proteção, para que as ações de contenção ou limpeza sejam direcionadas para estes locais, buscando diminuir os impactos que este meio pode sofrer. Estas áreas são determinadas pela sua sensibilidade, que indica o grau de dificuldade que o meio tem para responder a uma alteração ocorrida, como a presença de óleo oriunda de um derramamento. Ela pode ser medida utilizando alguns indicadores relacionados às características físicas, biológicas e socioeconômicas da área.

Atualmente, as informações das áreas que são mais sensíveis ao óleo estão disponíveis nas cartas de sensibilidade ao óleo, conhecidas como Cartas SAO. Estas

cartas têm como objetivo caracterizar as áreas costeiras marinhas e terrestres, sob jurisdição nacional, para auxiliar a reduzir as consequências ambientais de vazamento de óleo e orientar os trabalhos de contenção e limpeza da área.

As Cartas SAO surgiram na década de 70 e foram primeiramente utilizadas para planejamento e gestão de áreas costeiras, sendo que os primeiros métodos para sua classificação foram desenvolvidos por Michel et al (1978) e Gundlach e Hayes (1978).

Em março de 1989 ocorreu um dos maiores acidentes ambientais da história, quando o petroleiro Exxon Valdez derramou cerca de 53 milhões de galões de óleo durante um encalhe na rota do Alasca (EUA) para a Califórnia (EUA) (NOAA, 1992). Este acidente ocasionou a morte de milhares de animais e prejudicou a população ao redor que se sustentava da pesca. (LEACOCK, 2005)

A partir deste acidente, a elaboração das Cartas SAO começou a ser difundida e, de modo a padronizar o seu uso nos Estados Unidos, a agência federal americana NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), estabeleceu um manual de elaboração do mapeamento de sensibilidade a derrames de óleo na zona litorânea (NOAA, 2002).

No Brasil, a primeira tentativa de adaptar e elaborar Cartas SAO foi realizada por Araújo et al. (2002). Posteriormente, o Ministério do Meio Ambiente, baseando-se nas propostas da NOAA (2002), elaborou um documento oficial visando padronizar a elaboração das Cartas de Sensibilidade Ambiental, Cartas SAO (MMA, 2004), adaptando à realidade do Brasil.

O próprio Ministério do Meio Ambiente, utilizando suas diretrizes, realizou o mapeamento das Bacias Ceará e Potiguar (BRASIL, 2004), Bacia de Santos (BRASIL, 2007) e das Bacias dos Estados do Espírito Santo (BRASIL, 2010) e Bahia (BRASIL, 2012).

Utilizando também as recomendações do Ministério do Meio Ambiente, foi realizado o mapeamento da sensibilidade ambiental ao óleo de todo o litoral paulista, em escala operacional, variando de 1:50.000 a 1:10.000, que teve como produto final um atlas com todas as Cartas são, intitulado “Sensibilidade do Litoral Paulista a derramamento de petróleo: um atlas em escala de detalhe” o qual pode ser acessado em <http://bibdig.biblioteca.unesp.br/handle/10/112>. O documento oficial, assim como os demais trabalhos citados, estabelece que as Cartas SAO devem incluir três tipos de informações principais: sensibilidade ambiental do litoral ao óleo, definida por um Índice

de Sensibilidade do Litoral (ISL); recursos biológicos sensíveis ao óleo existentes na área da carta; atividades socioeconômicas que poder ser prejudicadas por derramamentos de óleo, sendo estes dois últimos representados por ícones específicos.

Os índices de sensibilidade do litoral (ISL) classificam a linha de costa hierarquizando o contorno em uma escala de 1 a 10, sendo que quanto maior o índice mais sensível o ambiente. Este índice é baseado nas características geomorfológicas da costa, considerando o grau de exposição à energia de ondas e mares, a declividade do litoral e o tipo do substrato, o que determina o alcance e o tempo de permanência do óleo.

As normas e nomenclaturas estabelecidas pelo Ministério do Meio Ambiente são voltadas para o ambiente costeiro, onde o número e a magnitude dos acidentes são maiores. Porém, estes eventos não são exclusivos de áreas litorâneas. Têm acontecido também nas águas interiores e, portanto, é necessário o estabelecimento de normatização para a elaboração de cartas SAO para estes ambientes. Costa (2013) elencou uma relação dos trabalhos desenvolvidos com este objetivo.

O grupo de pesquisa “Sensibilidade Ambiental a Derrames de Petróleo – UNESP/RC”, também tem buscado desenvolver uma metodologia para ambientes fluviais a partir dos trabalhos de HAYES, MICHEL e DAHLIN (1995), HAYES, MICHEL e MONTELLO (1997) e MICHEL, HAYES, DAHLIN e BARTON (1994) ARAUJO, et al (2006) e FERREIRA e BEAUMORD (2008). Um dos itens desta metodologia é a proposição de um sistema de classificação das margens dos ambientes fluviais quanto à sensibilidade a possíveis derramamentos de óleo, denominado Índice de Sensibilidade ao Óleo em ambiente fluvial (ISF).

O ISF foi construído a partir de uma adaptação do índice de sensibilidade ao óleo para o litoral (ISL), baseando-se também nas características geomorfológicas, porém das feições fluviais e não do litoral. Os ISFs, juntamente com as informações do meio biótico e sócio econômico, constituem os elementos das Cartas SAO ou Cartas de Sensibilidade ao Óleo dos ambientes fluviais.

O ISF, da mesma forma que o ISL, pode variar de 1 a 10, sendo que o índice 1 indica ambiente com baixa sensibilidade e o 10 com alta sensibilidade. A Tabela 1 apresenta os ISFs resultantes do trabalho desenvolvido pelo citado grupo e que foram utilizados na presente pesquisa. Segundo a proposta do grupo, os índices 9 e 10 foram subdivididos, de modo a representar melhor os ambientes de alta sensibilidade. A ilustração de cada índice e o modo de representá-los no mapeamento está exposta no

Anexo A. Maiores informações sobre a representação dos ícones socioeconômicos e bióticos necessários para a elaboração das cartas SAO podem ser encontradas em Martins (2012), Araujo et al (2006), Wiczorek (2005) e MMA (2004).

Tabela 1 - Índices de Sensibilidade Fluvial ao óleo (ISF)

ÍNDICE	R	G	B	DESCRIÇÃO DO AMBIENTE	
1	119	38	105	Margens com paredões rochosos Margens Construídas (paredões concretados) Pontes	
2	174	153	191	Margens com paredões rochosos (rocha fraturada ou estratificada) Soleiras fluviais com cachoeiras	
3	0	151	212	Margens erosivas seguidas de terraços (com meandros ou lagos) Soleiras fluviais com rápidos	
4	146	209	241	Margens erosivas seguidas por vertentes	
5	152	206	201	Margens deposicionais com areia (praias fluviais) Margens com cobertura agrícola	
6	0	149	32	Margens deposicionais com cascalho (praias fluviais) Enrocamentos	
7	214	186	0	Ilhas fluviais Margens com vegetação de porte herbáceo	
8	225	232	0	Margens com vegetação de porte arbustivo	
9	a	245	202	122	Dique fluvial seguido por terraços fluviais ou vertentes
	b	222	145	36	Dique fluvial seguido por planícies aluviais
	c	235	143	23	Barras de meandro
	d	245	129	30	Barras de meandro alagadas
	e	235	112	0	Confluências com coalescência de planícies fluviais
10	a	225	0	0	Banco de macrófitas Depósitos aluviais com meandro abandonado - vegetação rasteira Depósitos aluviais (leque aluvial) - vegetação rasteira

	b	176	6	14	Depósitos aluviais com meandro abandonado (mata) Depósitos aluviais (leque aluvial) - mata Substrato lamoso
	c	117	6	12	Depósitos aluviais com lagos

Apesar de a carta SAO indicar quais áreas são sensíveis, apenas esta informação não é o suficiente para orientar as ações de emergência no momento de um acidente. Para atuar de maneira mais efetiva é necessário saber as áreas que o óleo pode atingir e se elas são consideradas sensíveis. A mobilidade do óleo derramado depende de vários fatores que, no mar, são direção e velocidade dos ventos, das correntes atuantes, tipo de óleo, as propriedades da água, o tipo de derramamento e o volume derramado. No caso dos ambientes fluviais o deslocamento do óleo também depende praticamente destes mesmos fatores, mas também está fortemente condicionado às feições geomorfológicas fluviais, uma vez que elas determinam o caminho por onde o fluxo de água segue e, conseqüentemente, o óleo pode ir. Além disso, as feições fluviais podem funcionar como barreiras ou até mesmo armadilhas em que o óleo pode ficar aprisionado.

A combinação da sensibilidade intrínseca ao meio com as áreas que podem ser potencialmente atingidas no caso de um acidente é que determina se o local é vulnerável e necessita de atenção prioritária. Uma área pode ser altamente sensível, porém ser de baixa vulnerabilidade, pois a probabilidade de ela ser atingida pelo óleo é praticamente nula.

Neste sentido, a definição de vulnerabilidade adotada neste trabalho é baseada na resolução CONAMA 398 de 2008, a qual dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual (PEI) para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, para instalações que ofereçam riscos de acidentes com derramamento de óleo.

Uma das informações referenciais para a elaboração do PEI é a análise de vulnerabilidade, no qual se deve levar em consideração a probabilidade do óleo atingir determinadas áreas e a sensibilidade destas áreas ao óleo. Segundo esta mesma resolução, a determinação das áreas passíveis de serem atingidas deve ser por meio da comparação com incidentes anteriores, se aplicável; ou da utilização de modelos de transporte e

dispersão de óleo, como é o caso dos resultados provenientes do SisBaHiA. Vale ressaltar que a simulação deve levar em consideração o pior volume de derramamento possível.

A resolução CONAMA 398/2008 ainda recomenda que, sempre que possível, a análise de vulnerabilidade deve ter como base as informações disponíveis nas cartas SAO elaboradas de acordo com as especificações e normas técnicas aplicáveis.

Sendo assim, o conceito de vulnerabilidade adotado é a resultante do cruzamento do contorno de probabilidade da mancha de óleo, obtido da simulação no SisBaHiA para um determinado evento, com os índices de sensibilidade (ISF) encontradas na Carta de Sensibilidade Ambiental ao Óleo (SAO).

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa incluem imagens de satélite, equipamentos e programas computacionais listados a seguir:

- Imagem satélite: 3 cenas SPOT-5, com resolução de 2,5m cedidas pela Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo, referentes ao mês de junho de 2010. Estas imagens foram utilizadas como base para o trabalho.

- Equipamentos:

- ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*): para obtenção de dados de vazão.

- Ecobatímetro: aquisição de dados de profundidade do curso d'água.

- Programas:

- ArcGis 10.1: para preparação dos dados e elaboração dos mapas.

- Variowin: obtenção dos parâmetros do semivariograma para a krigagem.

- ADIOS: geração da curva de decaimento do óleo utilizado

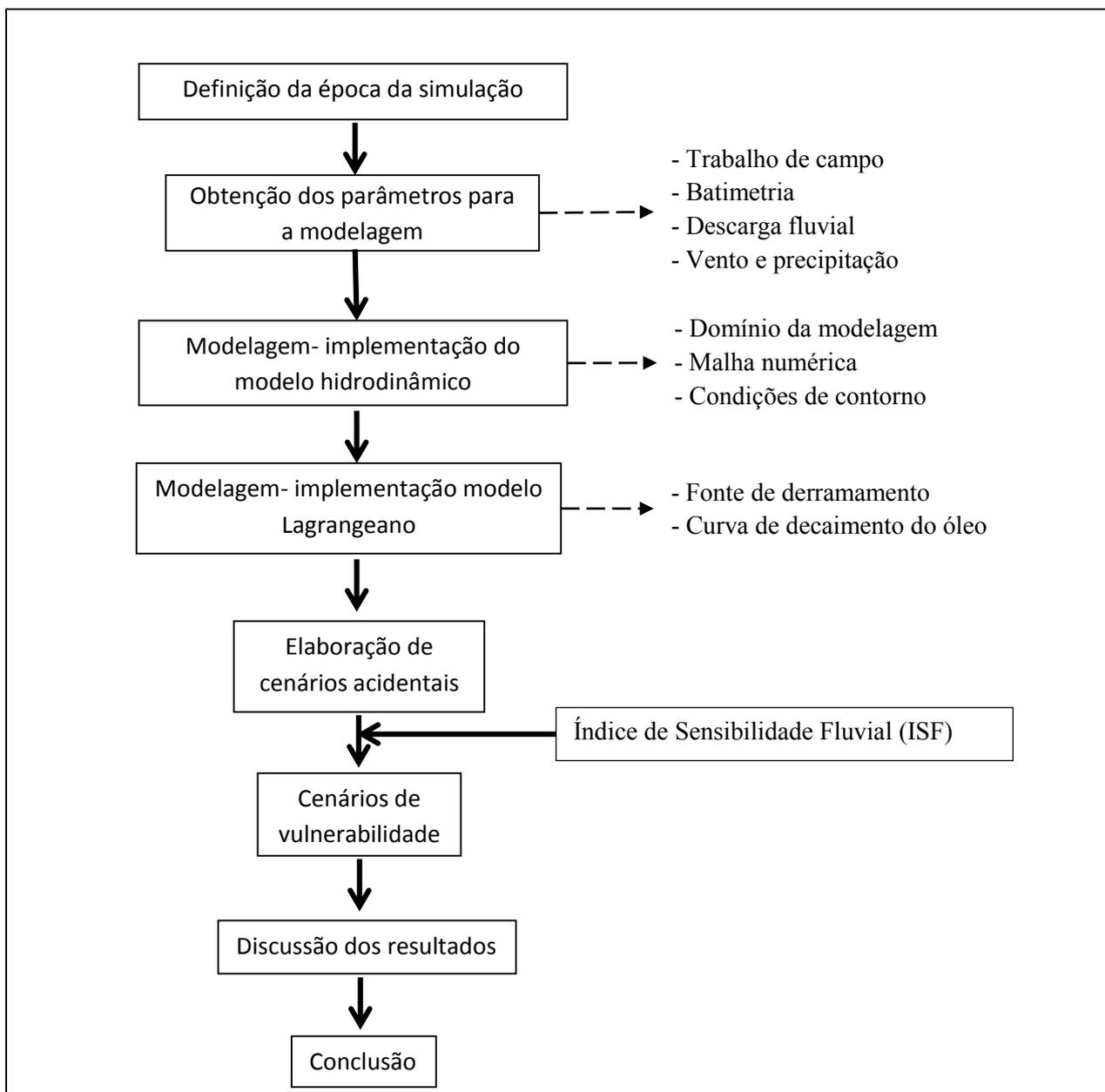
- Surfer 10® (*Golden Software Inc.*): preparação dos dados para serem importados no SisBaHiA e para execução da krigagem.

- SisBaHiA: execução da modelagem hidrodinâmica e simulação do derramamento de óleo.

7.2. MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram realizadas diferentes etapas, cada uma delas com seus métodos específicos. A Figura 11 apresenta o fluxograma de trabalho.

Figura 11 - Fluxograma de trabalho



7.3. Definição da época da simulação

Antes da seleção dos dados de entrada do modelo é necessário definir os cenários da modelagem baseado em critérios. Sendo assim, o critério adotado neste trabalho foi baseado no regime de vazões do reservatório de Barra Bonita. Por se tratar de um reservatório de acumulação de água, seu funcionamento permite estocar água para períodos de estiagem, regulando a vazão que flui por sua usina hidrelétrica. Desta forma, este fato determina quando as áreas mais sensíveis a um derramamento de óleo ficam expostas.

O período mais crítico para o ambiente quanto à sensibilidade ambiental ao óleo ocorre quando o reservatório tem seu nível mais baixo, pois áreas mais sensíveis como barras de meandro, diques fluviais seguidos por terraços fluviais e planícies aluviais, depósitos aluviais e substrato lamoso, dentre outros, ficam expostas e mais vulneráveis à presença de contaminantes como o óleo. Por este motivo, tal período foi escolhido para a modelagem.

Outro período também escolhido para a simulação foi quando o reservatório está próximo da sua capacidade máxima. Uma extensão maior de terreno está alagada, porém com baixa lâmina de água, o que também configura uma área sensível. É o caso, por exemplo, de pequenas ilhas, barras de meandro, que ficam cobertas por pequenas lâminas de água, mesmo em épocas de cheia.

Desta forma, para a escolha do período para a realização da simulação, foi calculada a média mensal do volume útil do reservatório de Barra Bonita durante o período de 1992 a 2012, utilizando dados cedidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Os dados foram analisados de modo a identificar quais meses correspondem aos níveis de maior e de menor volume útil do reservatório.

7.4. Obtenção dos parâmetros para a modelagem

Os dados descritos neste item, bem como a sua forma de obtenção, são aqueles necessários para a implementação dos modelos, tanto hidrodinâmico quanto o Lagrangeano.

7.4.1. Trabalhos de campo

Os trabalhos de campo foram efetuados nos períodos de 08/10/2012, de 22 a-24/10-de 2012 e de 18 a 22/07 de 2013 e consistiram no levantamento das características marginais e dos dados de vazão e batimetria, utilizados na implementação do modelo hidrodinâmico.

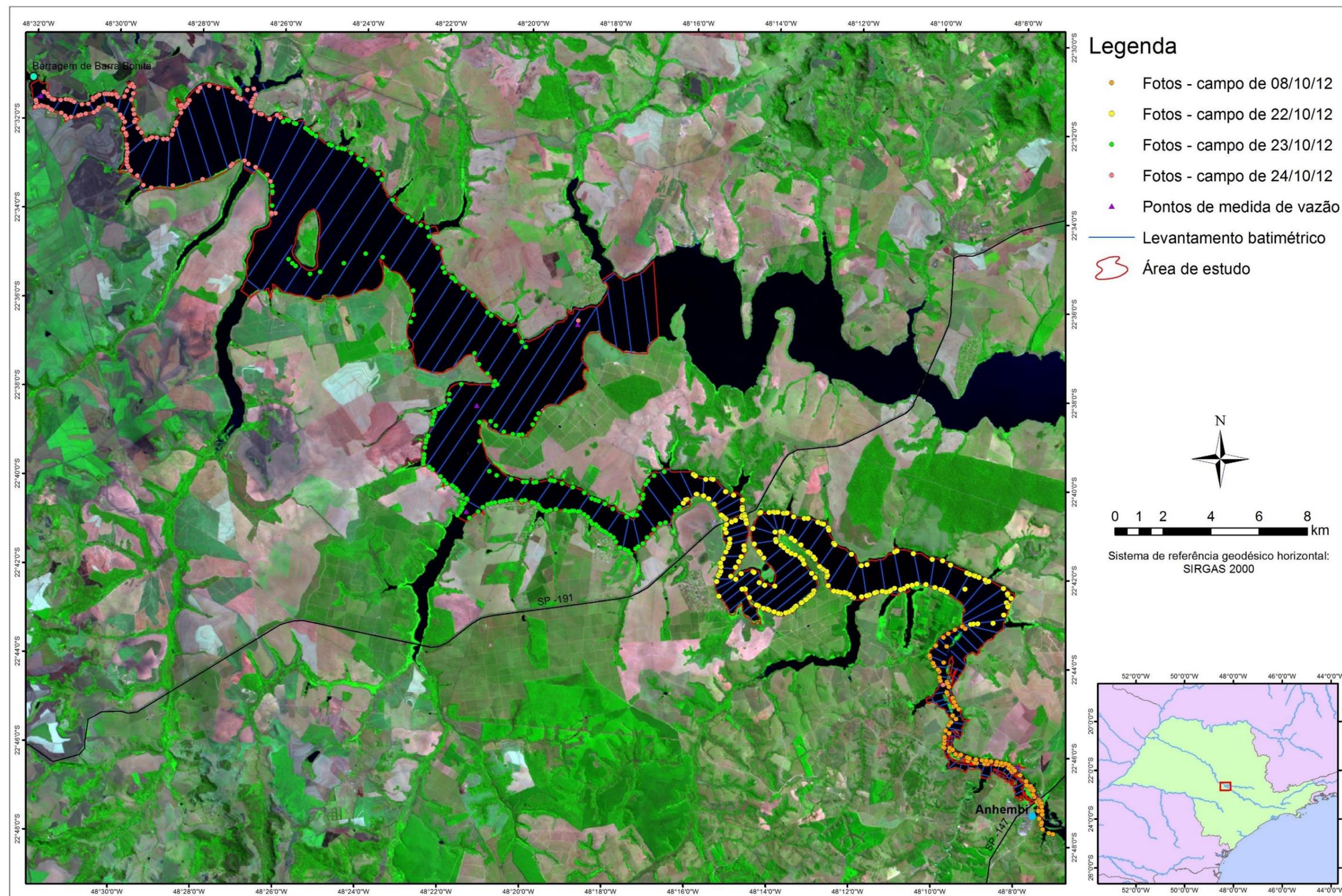
A Figura 13 mostra todas as atividades que foram realizadas durante o campo. Os pontos representam os locais onde foram tiradas as fotos das feições marginais da área de estudo utilizadas para a classificação dos ambientes, segundo os índices de sensibilidade fluvial (ISF). Os triângulos indicam onde foram realizadas as medidas de vazão, conforme ilustra a Figura 12. As linhas representam os locais indicados para o levantamento batimétrico necessário para a implementação dos modelos.

Figura 12 – Realizando a medição de vazão em um trecho da área de trabalho



Todas as fotos tiradas em campo estão disponíveis em um arquivo .kmz, denominado “Fotos do campo.kmz”, disponibilizado na mídia digital junto ao volume desta tese. Este arquivo pode ser aberto no Google Earth, no qual as fotos estão georeferenciadas e podem ser visualizadas na posição que foram registradas.

Figura 13 – Atividades realizadas durante as companhias de campo para levantamento dos dados.



Para o mapeamento dos ambientes, a equipe de campo (Figura 14), foi formada por 3 pessoas sendo uma responsável por operar o GPS, uma para tirar fotos e identificá-las e outra para preencher a ficha de campo, conforme as observações requeridas na ficha de campo (Apêndice A)

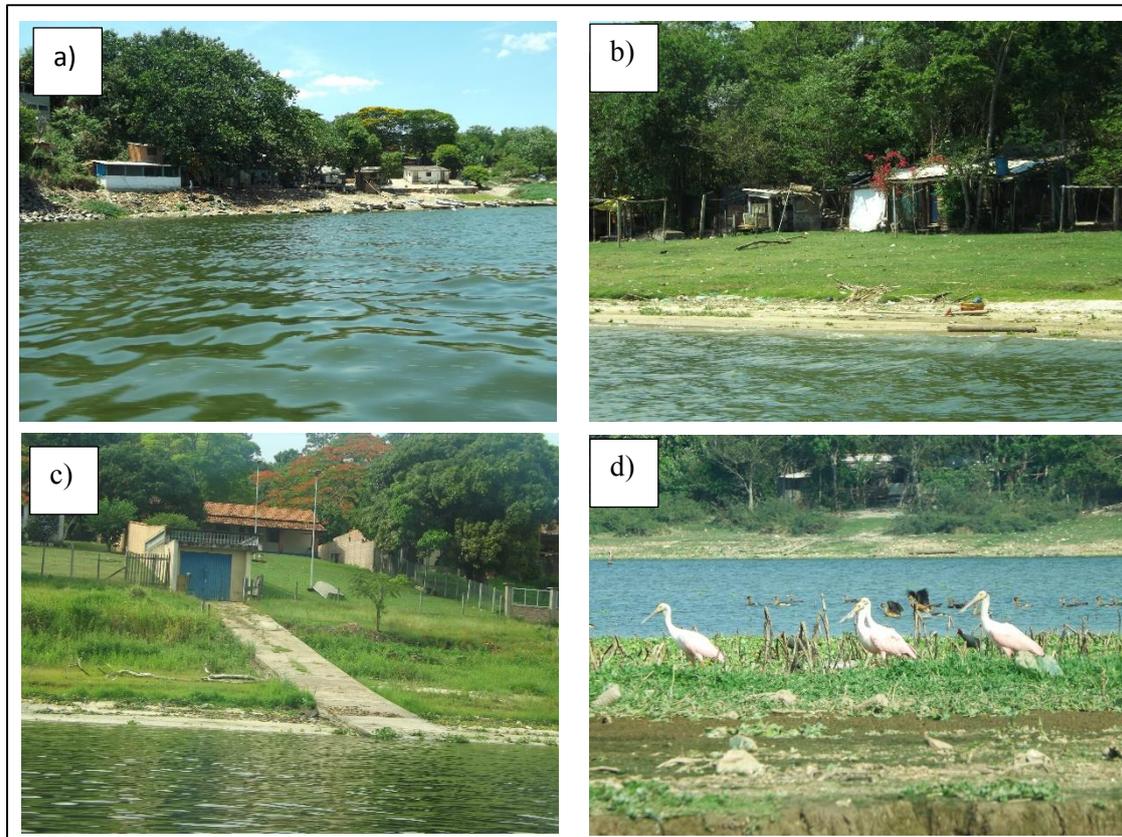
Figura 14 - Parte da equipe durante o trabalho de campo para o mapeamento das feições marginais



A sistemática do campo foi percorrer por barco as margens do rio Tietê desde Anhembi até a barragem de Barra Bonita. A distância total percorrida foi de 360,3 km considerando as duas margens e teve duração de quatro dias intensos. O início e o final de cada feição geomorfológica identificada foram marcados com o GPS. Estas feições foram registradas com fotos e preenchida a ficha de campo para cada uma.

Além das características físicas, esta ficha também é composta por campos relacionados aos recursos biológicos e atividades socioeconômicas, que também foram preenchidos, para que no futuro possam ser inseridos na Carta SAO da região (Figura 15).

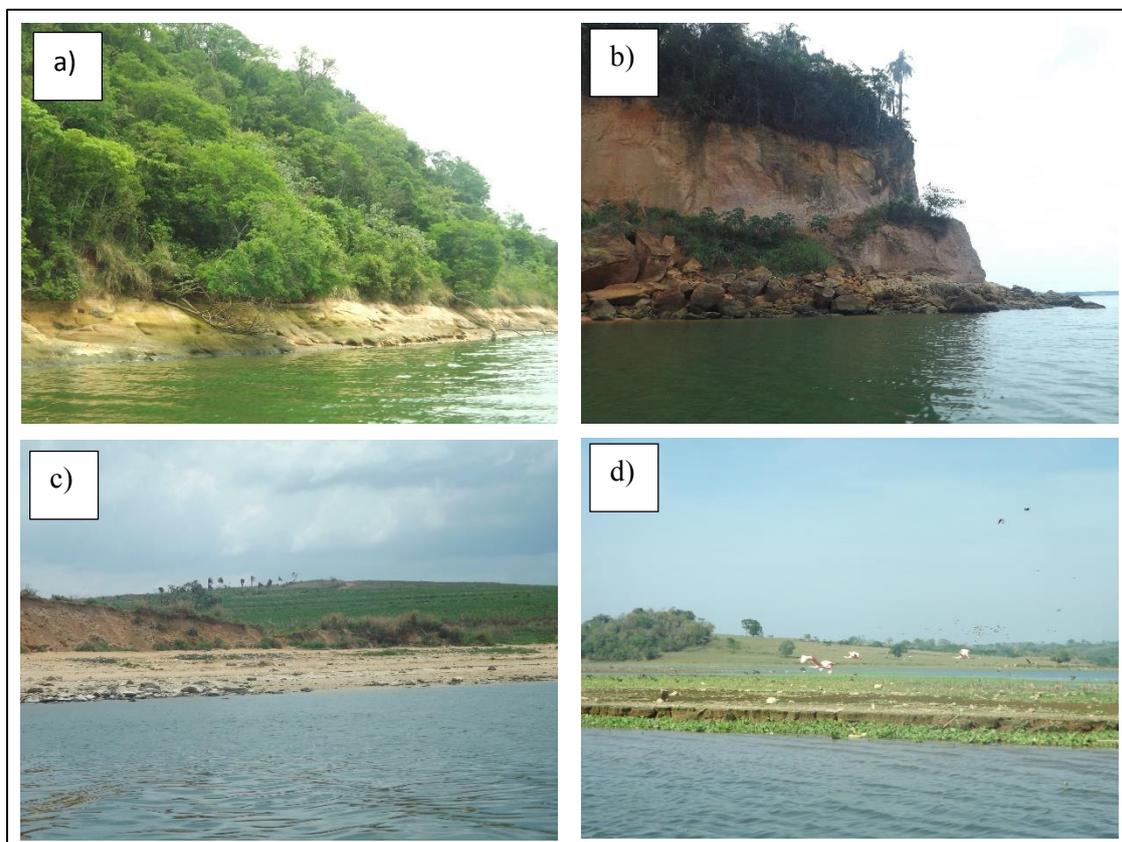
Figura 15 – Atividades socioeconômicas, sendo em (a) e (b) comunidade de pescadores e (c) rampa de acesso a casa de veraneio. Em (d) está uma amostra de aves presentes na área.



É importante salientar que, embora dados faunísticos e socioeconômicos, façam parte das Cartas SAO, neste trabalho a maior ênfase foi dada às feições geomorfológicas fluviais e suas coberturas vegetais, pois são elas que interferem na permanência ou não do óleo no ambiente e subsidiam o mapeamento do índice de sensibilidade ambiental. As atividades socioeconômicas só foram consideradas se interferem nesta permanência, como no caso da construção de piers, pilares de ponte, enrocamentos, muros construídos diretamente sobre as margens, etc...

Em escritório, todos os dados foram passados para um sistema de informações geográficas (SIG), finalizando o mapeamento dos índices de sensibilidade fluvial. Na Figura 16 estão algumas fotos, que mostram a diversidade de feições marginais encontradas no campo.

Figura 16 – Feições marginais observadas em trabalho de campo. a) Margem erosiva seguida por vertente; b) Margem de paredão rochoso (rocha fraturada ou estratificada); c) Margem deposicional com areia e cascalho (praia fluvial); d) Ilha com fauna local.

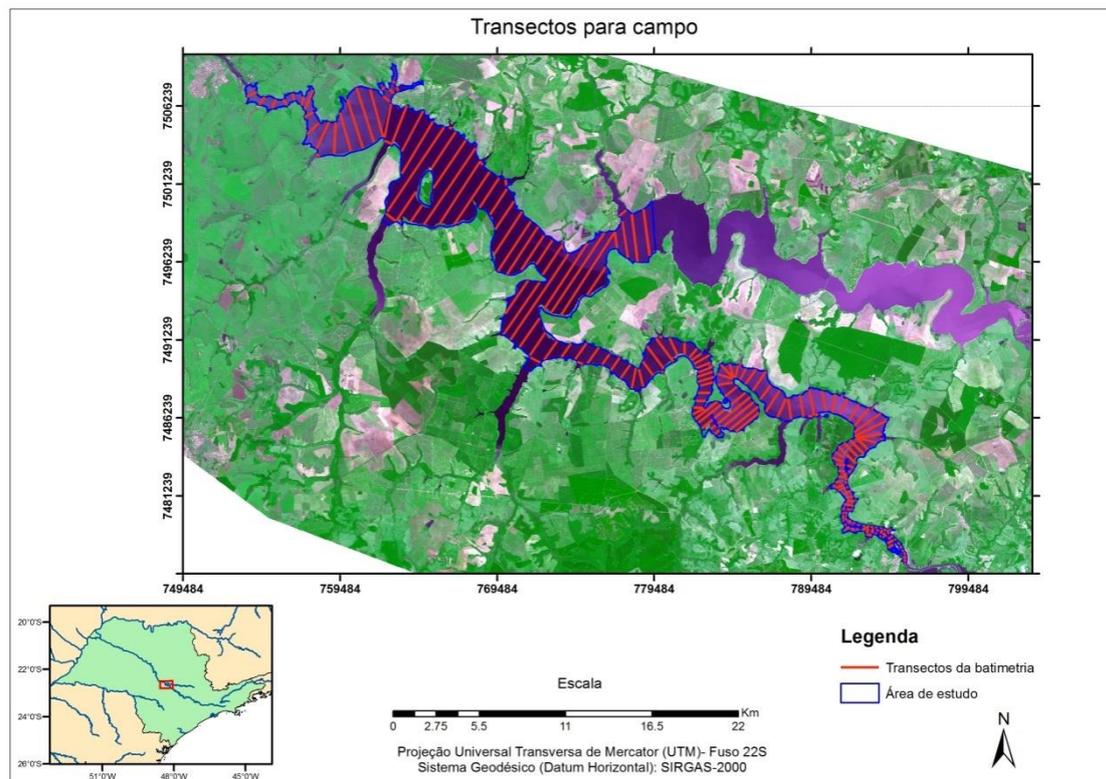


7.4.2. Batimetria

Durante o campo também foi realizada a coleta das profundidades de trecho do rio Tietê, a partir de Anhembi e do reservatório, por meio de transectos. A batimetria é importante para a implementação do modelo numérico, para que a circulação hidrodinâmica local seja representada e o campo de velocidade seja coerente com o esperado para o curso d'água.

Desta forma, foi utilizado um ecobatímetro acoplado a um barco. Os transectos foram realizados de acordo com a Figura 17, com intervalo médio de 800 m, e o espaçamento médio entre cada ponto ao longo do transecto de 7m.

Figura 17 - Esquema dos transectos realizados para a obtenção de batimetria.



Após a coleta dos pontos de profundidade em campo, os dados foram interpolados para a obtenção da batimetria. O método de interpolação utilizado foi a krigagem ordinária.

7.4.2.1. Krigagem ordinária

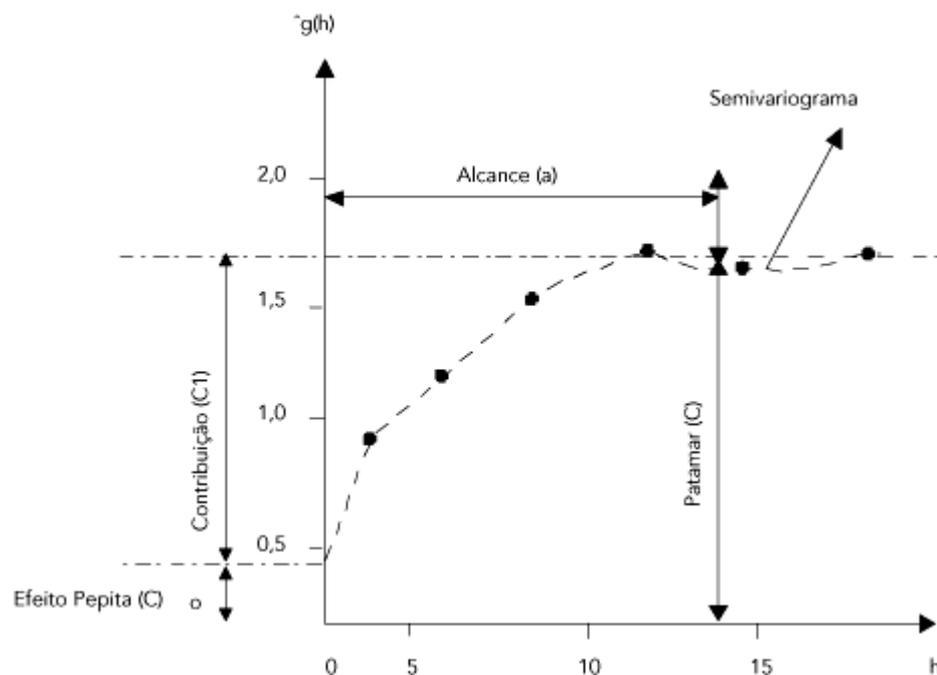
É um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, com base em valores adjacentes, quando considerados interdependentes pela análise variográfica. Segundo Sturaro & Landim (1988), a krigagem ordinária é um método geoestatístico baseado em funções aleatórias com o objetivo principal de minimizar a variância dos valores estimados.

Além do relacionamento entre pontos estimadores e o ponto a ser estimado, há também informações sobre o agrupamento dos pontos. Desta forma, a krigagem leva em consideração tanto a distância entre amostras como o seu agrupamento. Os valores obtidos nos pontos amostrais são usados na estimativa geoestatística, para fornecer uma

grade regular 2D ou 3D, dependendo da dimensionalidade do fenômeno espacial (YAMAMOTO, 2013). Essa grade regular com dados estimados de profundidade foi utilizada no SisBaHiA.

Para a determinação dos pesos que cada amostra exerce para estimar um ponto, é necessária a modelagem da continuidade espacial, obtida via variograma, que mede a variância entre pontos, separados por uma distância h . Deste modo, para pontos próximos, a diferença é pequena e, portanto, a variância é também pequena. Na medida em que aumenta a distância entre os pontos, é mais provável que diminua a correlação espacial entre eles, o que aumenta a variância dos dados. Segundo Landim (2004), na prática, aplica-se o semivariograma (Figura 18). Este é composto por: alcance (a), que indica a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória; o patamar ($C_1 + C_0$), que indica o valor segundo o qual a função estabiliza-se no campo da variabilidade espacial, correspondente à distância "a"; efeito pepita (C_0), valor da função na origem, representando a variância aleatória.

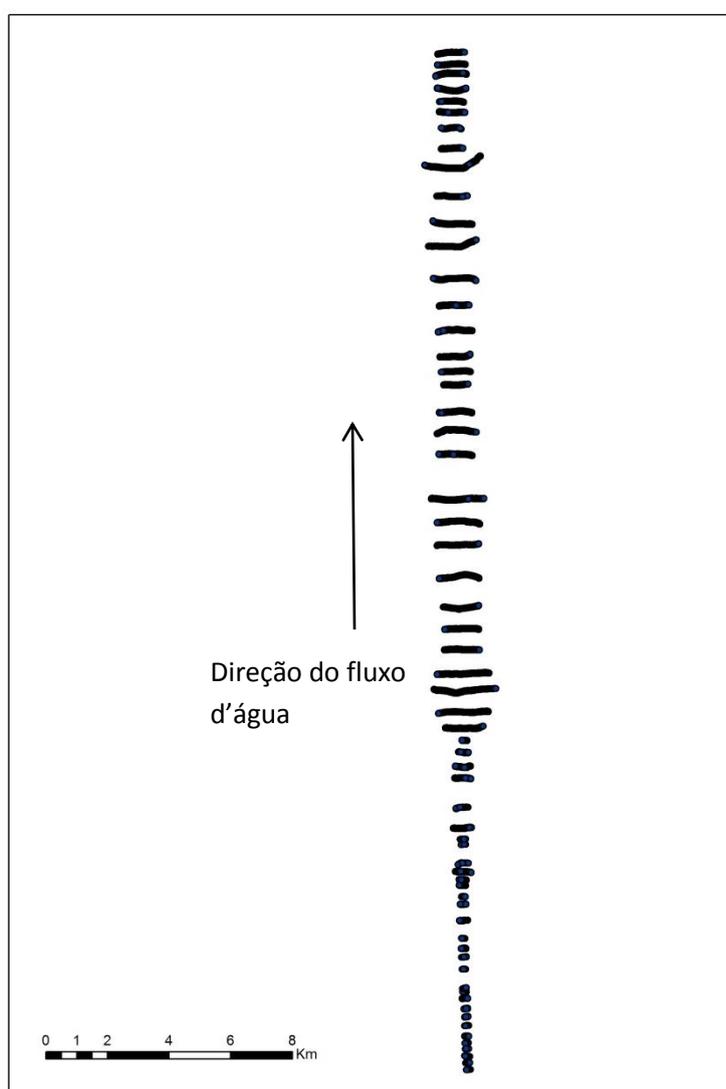
Figura 18 - Componentes do semivariograma.



Fonte: Lourenço; Landim (2005).

Porém, para se obter o variograma experimental dos dados coletados, foi preciso realizar um procedimento prévio para que a batimetria do rio fosse realmente estimada de maneira correta pela krigagem. Isso foi necessário porque o rio Tietê, na área de estudo, apresenta-se sinuoso, o que faz com que a direção do fluxo d'água varie bastante, dificultando a obtenção do variograma. Desta maneira, foi efetuado um processo para a diminuição da sinuosidade do rio, de modo que os transectos ficassem todos alinhados, mas mantendo a mesma distância entre eles, conforme Figura 19.

Figura 19 - Transectos alinhados



Desta maneira, foi possível modelar a anisotropia que o fenômeno apresenta. A anisotropia representa a relação entre os alcances determinados nas direções de maior

e de menor continuidade espacial, sendo que na batimetria do rio a direção de maior continuidade espacial é a direção do fluxo d'água e a de menor continuidade é a direção de uma margem a outra, onde a profundidade tem uma maior variação. Desta forma, a partir deste procedimento adotado, a direção de maior continuidade é de 90°, neste caso, na direção norte, e a de menor continuidade é de 0° (leste).

Após este processo, os dados foram importados para o VARIOWIN® 2.21, programa desenvolvido por PANATIER (1996), para que fosse obtido o variograma experimental e ajustada a função que representasse a tendência da variância em relação à distância. Este procedimento ocorreu de maneira interativa até que fosse obtido um modelo satisfatório.

Após o modelo ser ajustado, os dados foram importados para o Surfer 10® (*Golden Software Inc.*), onde foi inserido o modelo obtido previamente e, em seguida, realizada a krigagem para a geração da grade de pontos estimados, com espaçamento de 100 x 100 metros, utilizada como dado de entrada para o SisBaHiA.

7.4.3. Descarga Fluvial

As descargas fluviais dos rios principais foram medidas utilizando o ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Este aparelho mede a vazão dos cursos d'água através do efeito Doppler. O ADCP emite ondas de som a uma frequência fixa e recebe de retorno o eco emitido pelas partículas em suspensão. A diferença entre a frequência emitida e recebida é proporcional à velocidade relativa entre o ADCP e as partículas em suspensão.

As medidas foram realizadas no trabalho de campo em julho de 2013 e as seções em que foram obtidas as vazões foram no rio Tietê na ponte da rodovia SP-147, no município de Anhembi, local mais a montante na área de estudo, e próximo à confluência com o rio Piracicaba. Também próximo à confluência foi realizada uma medição no rio Piracicaba. O rio Capivara e um córrego ao lado do porto intermodal em Anhembi também tiveram suas vazões medidas. Para finalizar, foi feita uma medição próxima à barragem de Barra Bonita.

Os valores medidos serviram de base à extrapolação para os demais rios e córregos da área, uma vez que houve bastante dificuldade em se realizar as medições em

todos os locais. Desta forma, a todos os afluentes considerados como entrada do sistema, com tamanhos semelhantes medidos, foram atribuídas as vazões aferidas.

7.4.4. Vento e precipitação

Os dados de vento (velocidade e direção) e precipitação da região foram obtidos de duas estações do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), uma localizada em Barra Bonita e outra em Piracicaba. A série obtida é de setembro de 2006 a junho de 2013, com dados registrados de hora em hora. No modelo não foi utilizada toda a série temporal e sim os dados relativos aos dois meses escolhidos para a simulação. Para esses dois meses foram obtidos o valor máximo, médio e a mediana da velocidade e também foram feitos os diagramas da rosa dos ventos, de modo que se pudesse determinar a direção predominante do vento nas duas estações.

Os dados diários de precipitação foram obtidos pela soma dos valores de chuva em cada hora, uma vez que os dados são fornecidos desta forma. Após a soma, foi realizada a média dos dias de cada mês considerando todos os anos da série temporal fornecida. Um exemplo pode ser visualizado na Tabela 2. Foi necessário realizar este procedimento, pois o modo entrada de dados, adotado para o SISBAHIA, foi a precipitação média diária durante o período de simulação.

Tabela 2- Exemplo da forma de cálculo da média de precipitação para cada dia.

Data	Total diário(mm)	Média(mm)
01-MAI-2007	0.2	2.4
01-MAI-2008	1.2	
01-MAI-2009	0.0	
01-MAI-2010	0.2	
01-MAI-2011	15.0	
01-MAI-2012	0.0	
01-MAI-2013	0.2	
02-MAI-2007	0.0	3.7
02-MAI-2008	25.2	
02-MAI-2009	0.0	
02-MAI-2010	0.0	
02-MAI-2011	0.4	
02-MAI-2012	0.0	
02-MAI-2013	0.0	

7.5. Modelagem- implementação do modelo hidrodinâmico

Nesta seção serão descritas as principais etapas para a implementação do modelo hidrodinâmico no SisBaHiA.

7.5.1. Definição do domínio da modelagem

O domínio da modelagem consiste na definição de onde vai ocorrer a discretização espacial e a definição das condições de contorno. Para isso, foi efetuada a vetorização das margens do reservatório de Barra Bonita utilizando uma imagem SPOT 5, com resolução de 2,5m cedida pela Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo, referente ao mês de junho de 2010 e o programa ArcGis 10.1 (ESRI, 2012).

A definição do domínio foi realizada apenas no período de menor volume do reservatório, pois foi quando mais feições da geomorfologia fluvial não estavam submersas e puderam ser mapeadas. A posição da malha numérica é que determina se a água passa ou não sobre as feições, como ilhas, indicando estar ou não submersas para a modelagem. Portanto, para o período de cheia, o domínio foi o mesmo, porém a malha que foi alterada.

Os afluentes não foram considerados no domínio, sendo considerados apenas como pontos de entrada de vazão, portanto não foram vetorizados.

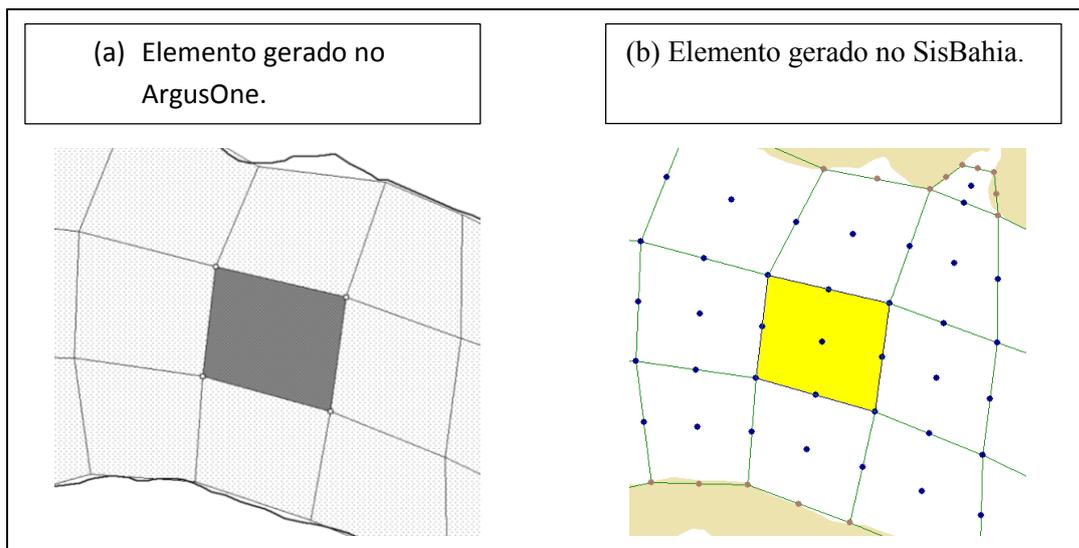
7.5.2. Geração da malha numérica

Após a definição do domínio da modelagem é necessário se efetuar a discretização (subdivisão) do domínio espacial, pois o SisBaHiA é um modelo numérico baseado em elementos finitos. Esta discretização é realizada gerando-se uma malha numérica de elementos quadrangulares, dividindo o domínio em sub-regiões de geometria simples. Os elementos finitos utilizados são conectados entre si através de pontos, denominados nós ou pontos nodais. Ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se o nome de malha de elementos finitos.

Para a geração da malha, utilizou-se o software ArgusOne 4.2 (*Argus Holdind Ltda.*) no qual é possível gerar, editar e importar a malha de elementos finitos diretamente

para o SisBahia. A malha gerada neste programa contém apenas os nós dos vértices, mas quando é importada para o SisBaHiA, o sistema gera nós no meio dos lados, bem como no meio do elemento. Assim, a resolução espacial do elemento é aumentada, passando o elemento a ser dividido em quatro, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20 - Em destaque, (a) elemento gerado no ArgusOne. (b) elemento gerado no SisBaHiA subdividido em 4.



O mapa base com o domínio da modelagem foi importado para o programa ArgusOne. Em seguida, foi realizada a confecção da malha de maneira manual, procurando gerar elementos mais quadrangulares possíveis, respeitando o contorno. Posteriormente, a malha pronta foi exportada para o SisBaHiA.

Este mesmo processo foi realizado duas vezes, uma para cada mês da simulação. Quando o reservatório está com o menor volume, as feições geomorfológicas do rio não ficam submersas, portanto a malha deve contornar essas feições. Já com o volume próximo do máximo, a água pode passar por cima dessas áreas e a nova malha deve também estar aonde a água estaria.

7.5.3. Definição das condições iniciais e de contorno

A condição inicial consiste em especificar a elevação da superfície livre e as componentes da velocidade em todos os nós do domínio, no instante inicial da simulação.

É importante impor as condições iniciais, para que o sistema resolva as equações diferenciais que governam o modelo FIST3D. Este modelo gera automaticamente as condições iniciais para o modulo 3D a partir desses valores 2DH, da velocidade do vento e rugosidade equivalente do fundo (ROSMAN, 2013). Qualquer resultado prévio adequado da simulação pode ser usado como condição inicial para o mesmo domínio de modelagem. Neste caso, pode-se dizer que a simulação está sendo realizada com uma “partida a quente”, uma vez que a condição inicial corresponde a um padrão de circulação realista. Caso contrário, a condição é chamada de “partida a frio”.

Para a simulação dos cenários, foi realizada uma simulação prévia de 5 dias com partida fria e velocidades nulas. Os resultados desta simulação foram utilizados como condições iniciais para uma partida a quente da simulação de 25 dias do mês.

Para um modelo 3D como o FIST3D, presente no SisBaHiA, consideram-se contornos horizontais e verticais. As condições de contorno vertical são a velocidade zero no fundo e a tensão de atrito do vento na superfície livre, calculada a partir das velocidades de vento. Com relação aos contornos horizontais, existem dois tipos: contornos de terra e contornos abertos. No caso em estudo foi considerado apenas o contorno de terra representado pelas margens do corpo d’água do reservatório. No contorno de terra também estão presentes os pontos de afluxo, representados pelos principais tributários e ponto de efluxo, representado pelo vertedouro da barragem de Barra Bonita.

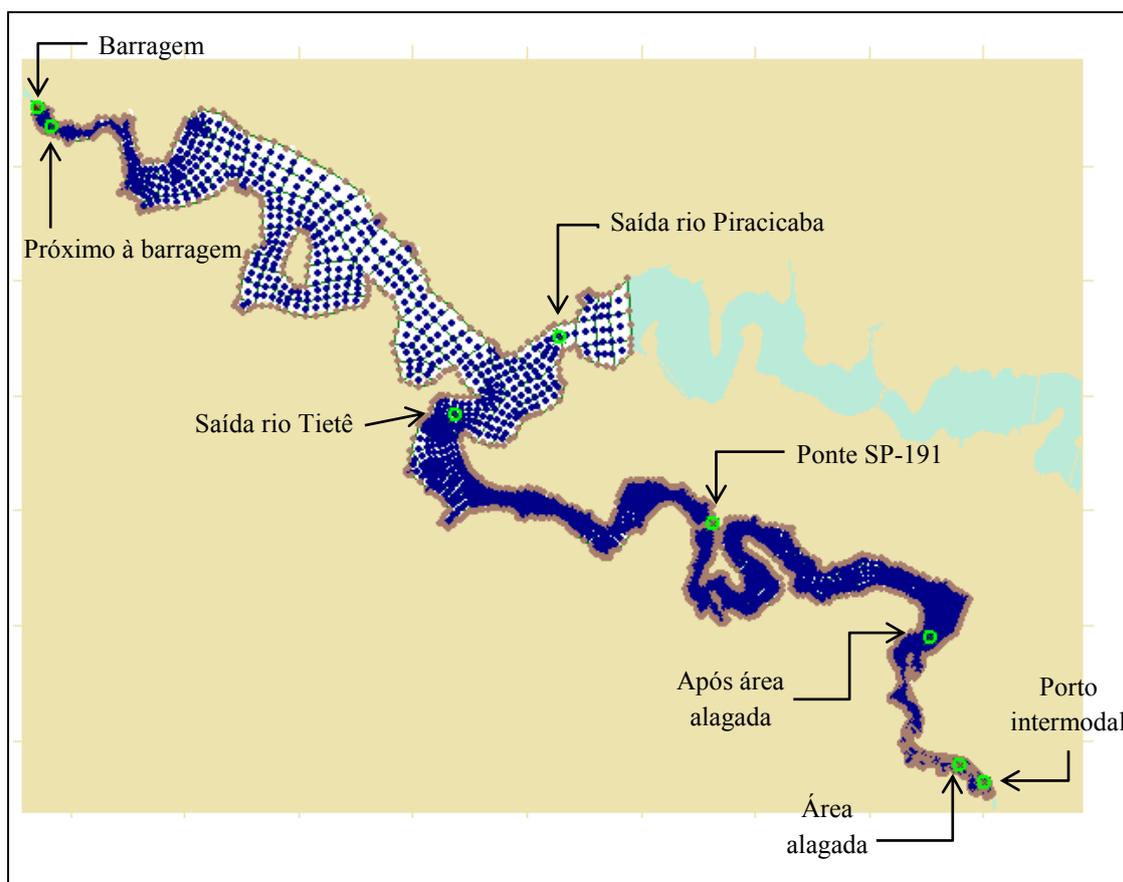
Para cada nó do contorno de terra é necessário impor um valor de vazão, para que o modelo entenda onde há entrada e saída de água no sistema e também se há infiltração nas margens. Assim sendo, neste trabalho, a margem foi considerada como impermeável, portanto impõe-se valor zero de vazão a todos os nós que representam a fronteira fechada, exceto na embocadura dos rios e na saída do vertedouro. Nos nós de fronteira fechada, correspondentes aos rios que desaguam no reservatório, são prescritas as vazões normais, lembrando que no SisBaHiA, a prescrição das vazões é feita por metro linear.

7.5.4. Modelo hidrodinâmico

Após a inserção dos dados no modelo, foi realizada a simulação da circulação hidrodinâmica da área de estudo, considerando o passo de tempo de 20 segundos.

Foram estabelecidos alguns pontos estratégicos no domínio da modelagem, de modo a monitorar a evolução da simulação e detectar erros ou incoerências ao longo do processo. Estes pontos também foram utilizados para realizar as análises dos resultados obtidos. Eles estão representados na Figura 21 e correspondem a um ponto próximo ao porto intermodal, ponto considerado como possível local de derramamento de óleo; um na área alagada próximo ao porto intermodal, por ser uma região com variabilidade de feições geomorfológicas vinculadas à dinâmica fluvial; um na ponte da rodovia SP-191, por ser um local de estrangulamento do rio e ponto para barrar o deslocamento de óleo; um após a confluência do rio Tietê com o rio Piracicaba e um ponto na barragem, local de saída do sistema.

Figura 21 - Pontos de monitoramento.



Sempre quando foram detectadas inconsistências nos pontos de monitoramento ou o colapso do modelo, os dados de entrada foram revistos para solucionar os problemas, principalmente a batimetria e a prescrição das vazões, tanto de entrada quanto de saída. Foram realizadas inúmeras análises e correções para que o modelo hidrodinâmico não apresentasse erros, pois este é a base fundamental para a implementação do modelo Lagrangeano.

7.6. Modelagem- implementação do modelo Lagrangeano

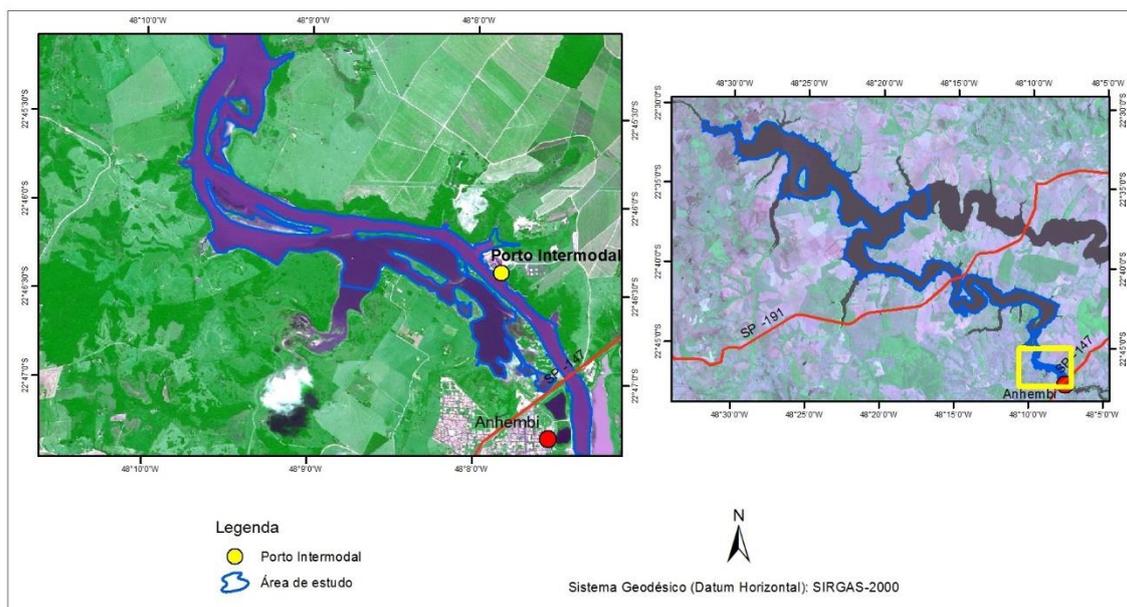
7.4.1. Fonte do derramamento

O critério para a escolha da localização da fonte poluidora foi baseado na potencialidade de algum alvo ou empreendimento com relação à ocorrência de acidentes com derramamento de óleo no corpo d'água.

Desta forma, foi considerado como fonte potencial o porto intermodal após a ponte da rodovia SP-147, no município de Anhembi, próximo à área urbana. Este é o local mais a montante da hidrovía Tietê-Paraná, onde as barcaças são carregadas/descarregadas e os produtos são passados para caminhões para que o transporte prossiga via terrestre.

Neste ponto, localizado na margem direita do rio Tietê no reservatório de Barra Bonita, é onde ocorrem os abastecimentos dos empurradores e são nestes momentos que há maior probabilidade de ocorrer algum acidente envolvendo o derramamento de óleo diesel, utilizado como combustível. A Figura 22 mostra a localização deste ponto selecionado como potencial para a simulação.

Figura 22 - Ponto considerado potenciais a derramamento de óleo.



7.4.2. Curva de decaimento do óleo.

Para a análise da curva de decaimento do óleo, foi utilizado o modelo ADIOS 2 (*Automated Data Inquiry for Oil Spills*), desenvolvido pela NOAA (*Nacional Oceanic and Atmospheric Administration*). O modelo avalia a quantidade de óleo remanescente, a densidade, viscosidade, conteúdo de água devido à emulsificação, óleo evaporado e benzenos. Este modelo é bastante utilizado devido a sua simplicidade de descrição e aceitação comprovada.

Para a simulação da perda de massa, os dados de entrada do ADIOS são o tipo de óleo, a velocidade e direção do vento, as propriedades da água, o tipo de derramamento, a quantidade e o tempo que isso ocorre.

As informações sobre o volume máximo que um empurrador utiliza, bem como o tipo de óleo foram obtidas junto a uma empresa que transporta produtos na hidrovia. Sendo assim, o óleo utilizado é o óleo Diesel B S500 e o volume máximo é de 36000 litros. Porém, uma vez que este óleo não consta na lista que o modelo ADIOS utiliza para a simulação, foi utilizado um óleo diesel que mais se aproxima das características do Diesel B S500, o “*Automotive Diesel Fuel*” da Sheel Refinaria.

Para a velocidade e direção do vento foi empregado o valor de média e direção predominante em cada mês escolhido para a simulação, conforme a análise da rosa dos ventos de cada mês, para as duas estações da região próxima à área de estudo.

O último dado a ser introduzido no programa para simular a curva de decaimento é a quantidade de óleo derramado, o período e como isto ocorrerá. Para os dois meses da simulação foi considerado, para o intervalo de uma hora, o derramamento de 36 m³, sendo esta a pior situação que pode ocorrer.

7.5. Elaboração dos cenários acidentais

Foram realizadas duas simulações para a fonte potencial de derramamento, uma para o mês de maio e outra para novembro, considerando, nos dois os casos, o derramamento de 36000 litros de óleo diesel. As condições de vento foram consideradas as mesmas utilizadas para a determinação da curva de decaimento do óleo. Desta forma, tem-se dois cenários acidentais, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Cenários acidentais para simulação.

Cenário	Fonte	Mês	Quantidade (L)	Velocidade do Vento	Direção do vento
1	Porto Intermodal	Novembro (vazante)	36000	3 (m/s)	135°
2	Porto Intermodal	Maio (cheia)	36000	2 (m/s)	135°

7.6. Cenários de vulnerabilidade

A elaboração dos cenários de vulnerabilidade foi realizada utilizando os dados obtidos na simulação descrita anteriormente e o mapeamento dos índices de sensibilidade fluvial (ISF) realizado com o apoio do trabalho de campo, conforme descrito no item 7.2.1, em que foram percorridas as margens do reservatório desde Anhembi-SP até a barragem de Barra Bonita. O cruzamento destas informações foi realizado conforme apresentado a seguir.

Propôs-se que a vulnerabilidade fosse expressa em classes qualitativas, de baixa, média e alta, a partir de uma forma de obtenção inicialmente quantitativa. Para tanto foi elaborada uma matriz em que as colunas representam os índices de sensibilidade, sendo que as subdivisões 9a, 9b, 9c, 9d, 9e e 10a, 10b, 10c foram agrupadas em apenas dois índices, 9 e 10 respectivamente. As linhas foram formadas por três classes referentes ao tempo de permanência do óleo, considerando a média dos quatro tempos de simulação (12h, 36h, 60h e 72h). As classes foram definidas como sendo classe 1 de tempo 0, indicando onde o óleo não passa, classe 2 de tempo de permanência até 5%, o que significa que contaminante apenas passa pelo local e não permanece e classe 3, de 5% a 100%, representando onde o óleo pode parar por um determinado tempo ou estagnar.

Para realizar o cruzamento de linhas e colunas da matriz, foram atribuídos os valores de 0, 0,5 e 1 para as classes 1, 2 e 3 respectivamente. Assim, o índice de vulnerabilidade expresso em cada célula da matriz foi dado pelo produto do ISF x classe do tempo de permanência. O resultado foi classificado em baixa, média e alta vulnerabilidade. A classe de baixa vulnerabilidade compreende às seguintes situações: margens que não são tocadas pelo óleo, independente de seus respectivos ISFs; margens com ISF até 6 que recebem o contaminante por menos de 5 % das 72 horas de simulação; e margens com ISF até 3 em que o óleo pode permanecer por tempo superior a 5%. As margens classificadas como média vulnerabilidade são as que possuem ISF na classe de 7 a 10 e recebem o óleo por um tempo menor que 5%. Também estão nesta classe as margens com ISF de 4 a 6 em que o óleo permanece em contato por um tempo superior a 5%. Por último, a classe de alta vulnerabilidade compreende às margens classificadas com um ISF de 7 a 10, ou seja, as mais sensíveis e que recebem o contato do óleo por mais de 5% do tempo de simulação. Desta forma, tem-se a Tabela 4.

Tabela 4: Matriz dos índices de vulnerabilidade fluvial ao óleo.

	% T permanência	Ponderador	Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF)										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Classe 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Classe 2	0.1 - 5%	0.5	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	
Classe 3	> 5%	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Vulnerabilidade			Baixa			Media			Alta				

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

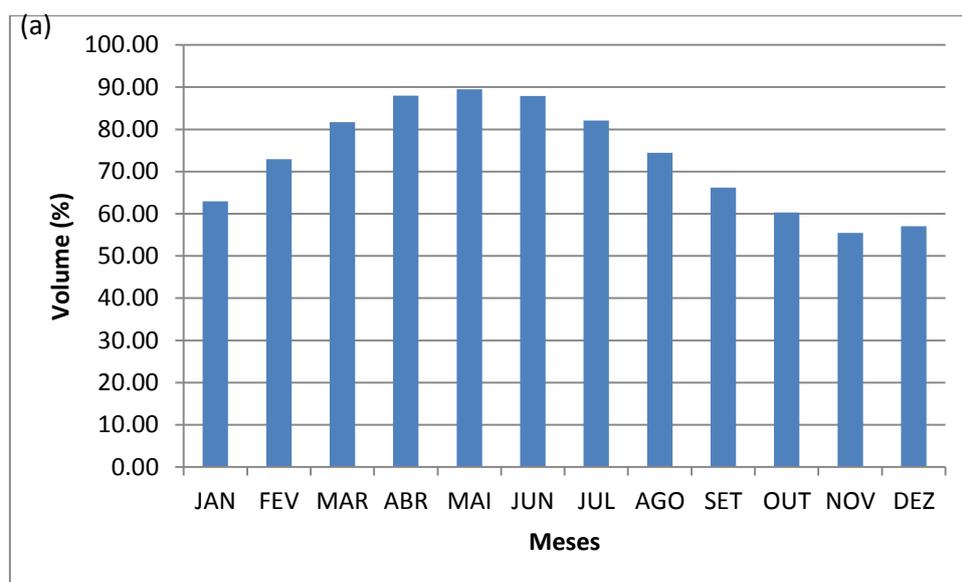
8.1. Época da simulação

Segundo o critério adotado para determinar quais meses seriam escolhidos para a simulação, tem-se, pela análise da Figura 23, que o mês de menor volume de água no reservatório de Barra Bonita, no período analisado, foi o de novembro com um volume de 55,5% da capacidade total e o mês com maior volume é o de maio com 89,6% da capacidade total.

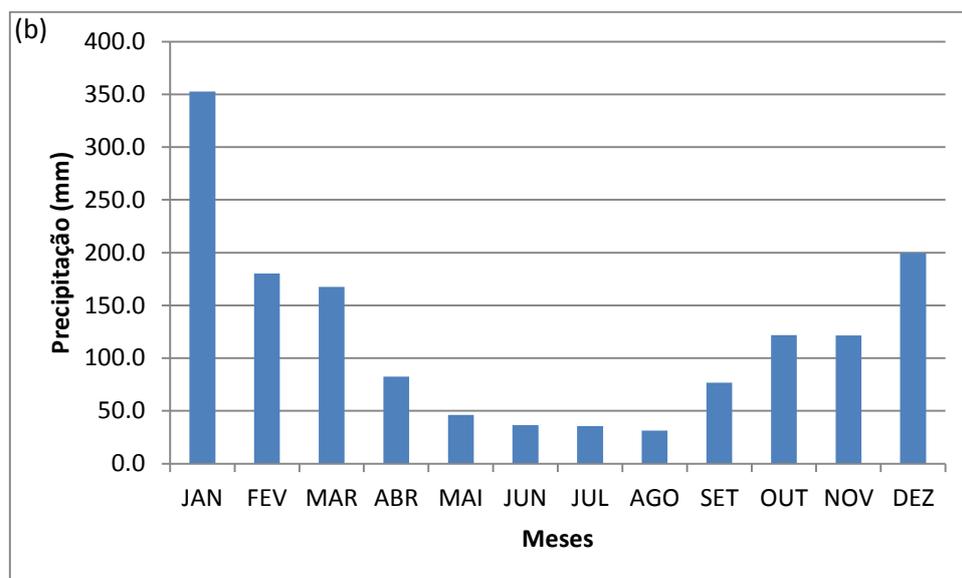
O reservatório de Barra Bonita é um reservatório de acumulação de água da usina de geração de energia elétrica, ou seja, a água represada é utilizada de acordo com a necessidade da usina e está diretamente relacionada com precipitação. Quando há disponibilidade hídrica, a água é acumulada para ser usada pela usina hidrelétrica quando a quantidade de chuva for baixa. Por isso o volume máximo do reservatório não é observado exatamente nos meses em que há bastante precipitação e o volume mínimo não corresponde ao período seco. Esta comparação pode ser observada na Figura 23.

Desta forma, a seleção e o tratamento dos dados para serem utilizados no modelo foram referentes aos meses de maio e novembro.

Figura 23 – (a) Média mensal do volume útil do reservatório de Barra Bonita entre 1992 e 2012. (b) precipitação média mensal na área do reservatório.



Fonte: ONS (2013)

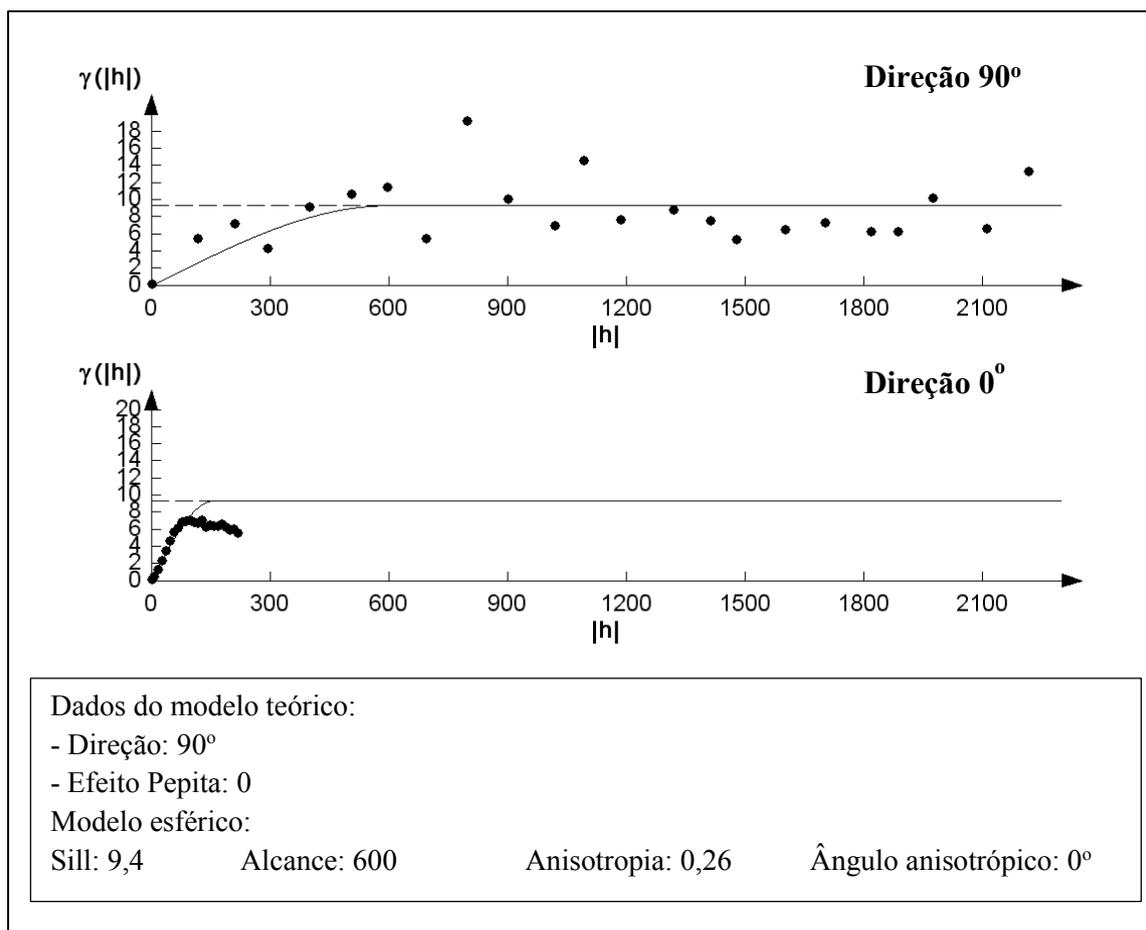


Fonte : INMET (2013)

8.2. Batimetria

As funções que representam a tendência da variância em relação à distância, de modo a ajustar o semivariograma experimental nas direções 0° e 90° , estão apresentadas na Figura 24.

Figura 24 - Semivariograma utilizado para a krigagem ordinária.

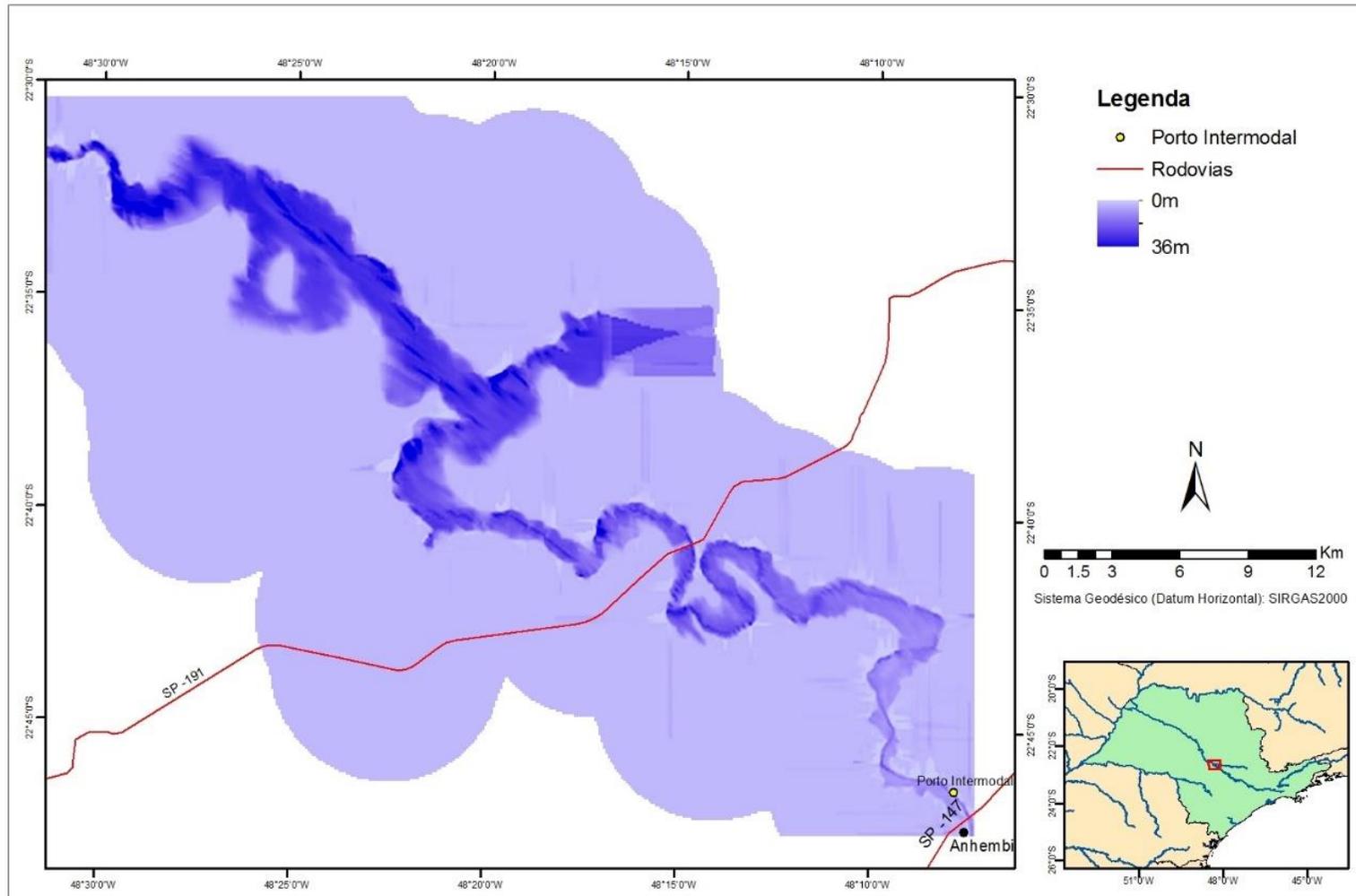


A aplicação da krigagem ordinária gerou um mapa da estimativa da batimetria do reservatório de Barra Bonita, representado na Figura 25.

Corroborando com Cigagna et al (2014), esta técnica contribuiu de maneira significativa para a estimativa da batimetria, por considerar a anisotropia do sistema aquático, uma vez as maiores profundidades possuem maior continuidade ao longo do fluxo de água e menor continuidade de margem a margem.

Desta forma, as profundidades observadas na área de estudo variaram, no talvegue do rio, de em torno de 7 metros a montante e 30 metros próximo à barragem da usina hidrelétrica. Este comportamento era esperado, uma vez que o maior volume de água está próximo à barragem.

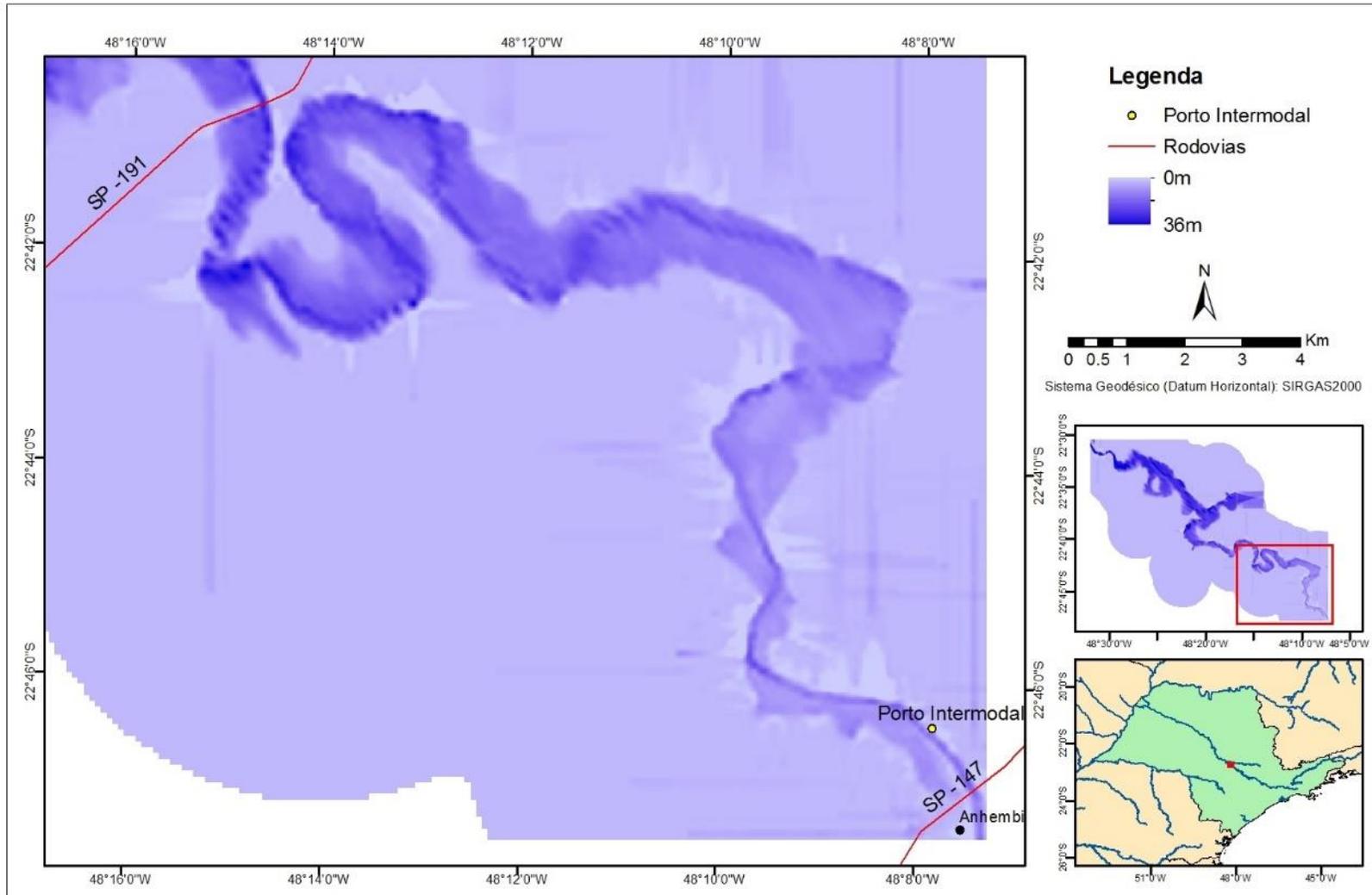
Figura 25 - Batimetria estimada pelo método da krigagem ordinária



Ao observar a área em destaque Figura 26, local que possui uma maior variabilidade na dinâmica fluvial, foi possível notar por onde segue o talvegue do rio Tietê, identificada através das maiores profundidades que, neste recorte, estão em torno de 10m. Já os locais com menores profundidades, com aproximadamente 3,5m, indicam as áreas que provavelmente foram alagadas com a formação do reservatório e se tornaram áreas importantes para a fauna local.

É importante ter o conhecimento da morfometria do corpo d'água, pois, assim, entende-se o comportamento dos vetores de velocidade do fluxo e, conseqüentemente, o provável comportamento da mancha de óleo, uma vez que na calha do rio a velocidade é maior que nas regiões onde houve o transbordamento. Assim, a mancha tende a se deslocar pela calha mais rápida e permanecer por um tempo maior nas áreas de remanso.

Figura 26 - Detalhe da batimetria, em região próxima ao porto intermodal



8.3. Descarga fluvial

As medidas realizadas no trabalho de campo, em julho de 2013, e as seções em que foram obtidas as vazões, bem como seus valores, são expostos na Tabela 5. Os dados aferidos são coerentes, uma vez que a vazão de 250,6 m³/s, no ponto mais a montante da área de estudo, próximo a Anhembi (rio Tietê-rodovia SP- 147), é menor do que em ponto localizado na confluência com o rio Piracicaba (274,4 m³/s). Também se nota que o valor da vazão do rio Piracicaba, próximo à confluência, é maior do que a vazão do rio Tietê, o que corrobora os resultados de Mortatti et al (2004) que também mostraram que a vazão do rio Piracicaba é maior que a do rio Tietê.

Tabela 5 - Vazão dos principais tributários.

Ponto	Local	Vazão (m ³ /s)
1	Rio Tietê –rodovia SP-147	250,6
2	Rio Tietê- próximo à confluência	274,4
3	Rio Piracicaba	359,4
4	Rio Capivara	37,0
5	Córrego- porto intermodal	3,6
6	Barragem Barra Bonita	694,2

8.4. Vento e precipitação

As rosas dos ventos de maio e novembro, das estações de Barra Bonita e Piracicaba, são mostradas nas Figura 27 a Figura 30.

Pela análise da rosa dos ventos do mês de maio da estação de Piracicaba (Figura 27), observa-se que ocorre a predominância de vento de até 3m/s na direção leste-sudeste (67,5°). Para o mês de novembro, nesta mesma estação, a direção predominante é a sudeste (135°) com vento de até 8m/s nesta direção. Porém, pode-se observar que há uma segunda direção predominante a leste-nordeste (67,5°) quando há ventos de até 4 m/s. Isto é observado pela frequência acumulada dos ventos de até 4 m/s nesta direção.

Na estação de Barra Bonita, o vento tem um comportamento bastante parecido nos meses de maio e novembro, sendo que a direção predominante em ambos os meses é a leste-sudeste (135°), independente da intensidade do vento.

Os valores médio, máximo e a mediana de cada estação estão representados em cada diagrama da rosa dos ventos. O que se pode notar é que na estação de Barra Bonita a intensidade do vento é levemente superior em relação à estação de Piracicaba.

Figura 27 - Rosa dos ventos do mês de maio para a estação de Piracicaba

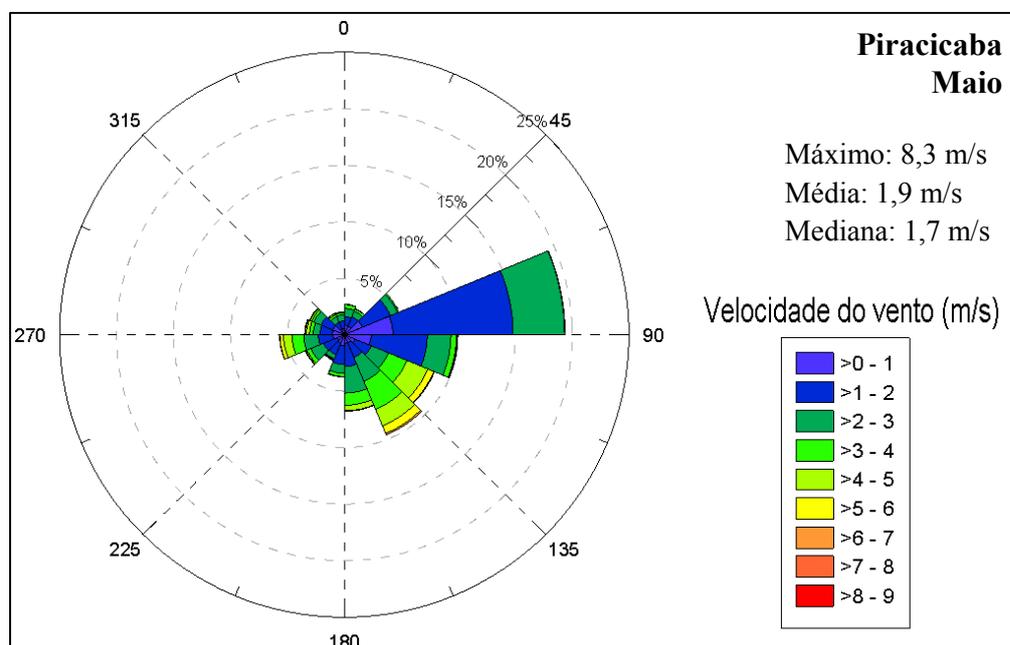


Figura 28 - Rosa dos ventos do mês de novembro para a estação de Piracicaba

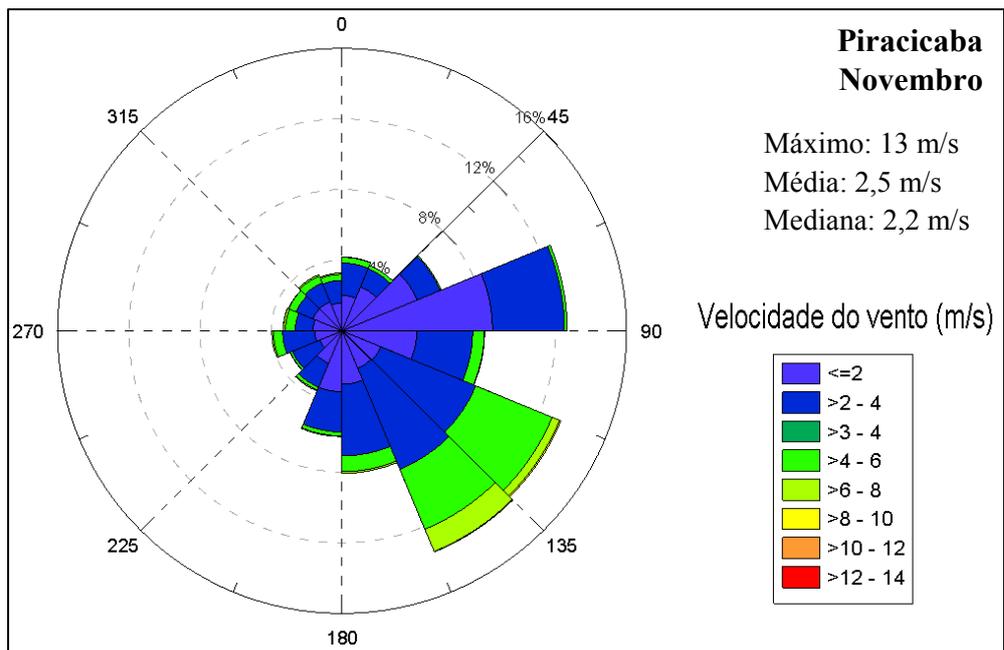


Figura 29 - Rosa dos ventos do mês de maio para a estação de Barra Bonita

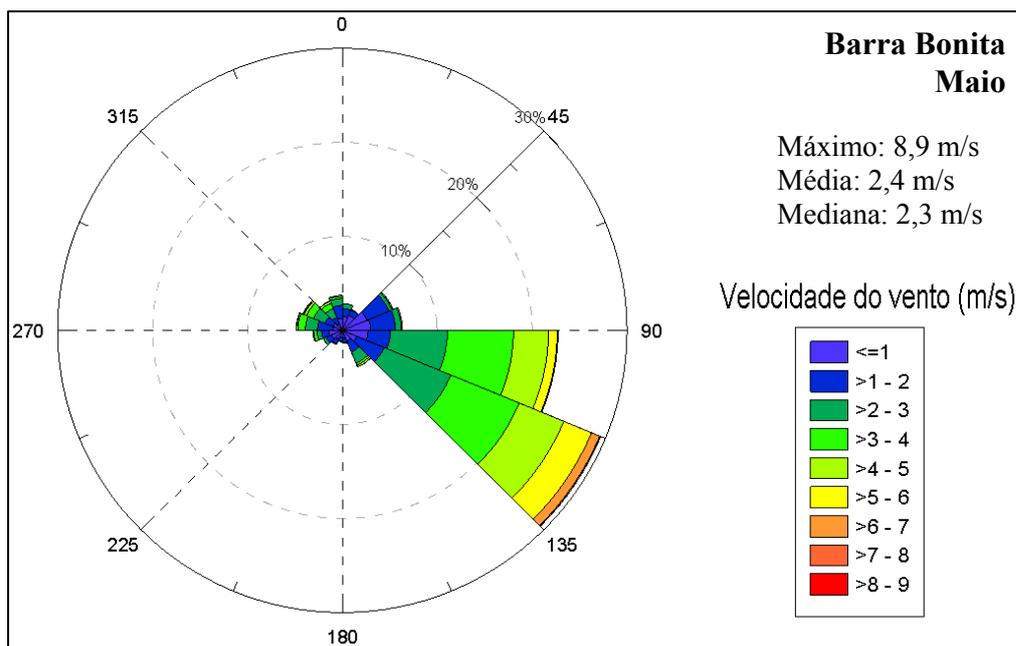
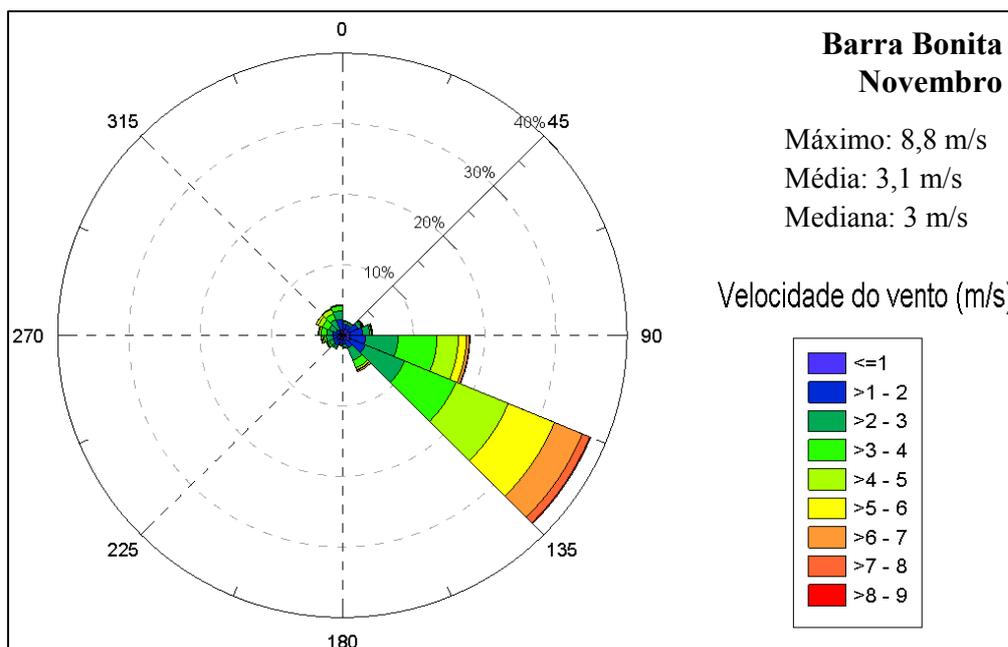


Figura 30 - Rosa dos ventos do mês de novembro para a estação de Barra Bonita



Os valores médios diários da precipitação estão apresentados na Figura 31 para a estação de Piracicaba e na Figura 32, para a estação de Barra Bonita. Pela análise dos dados, observa-se que o comportamento da precipitação do mês de maio na estação de Piracicaba foi bem parecido com o de Barra Bonita, com volumes mais acentuados no início e no final do mês. Em novembro também houve essa relação entre as estações, com precipitações entre os dias 5 e 15 e depois entre 22 e 30.

Esta análise permitiu utilizar apenas os dados de uma estação como entrada para o SISBAHIA, pois a precipitação a jusante (Barra Bonita) é análoga à precipitação a montante (Piracicaba).

Figura 31 - Precipitação média dos dias de maio e novembro na estação de Piracicaba.

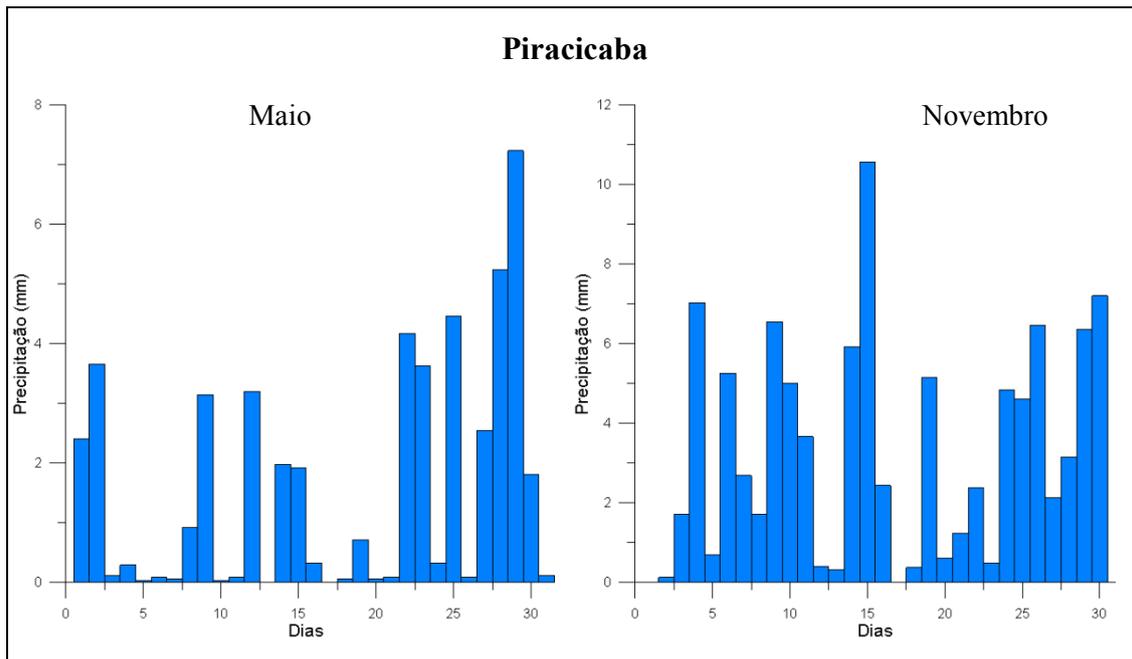
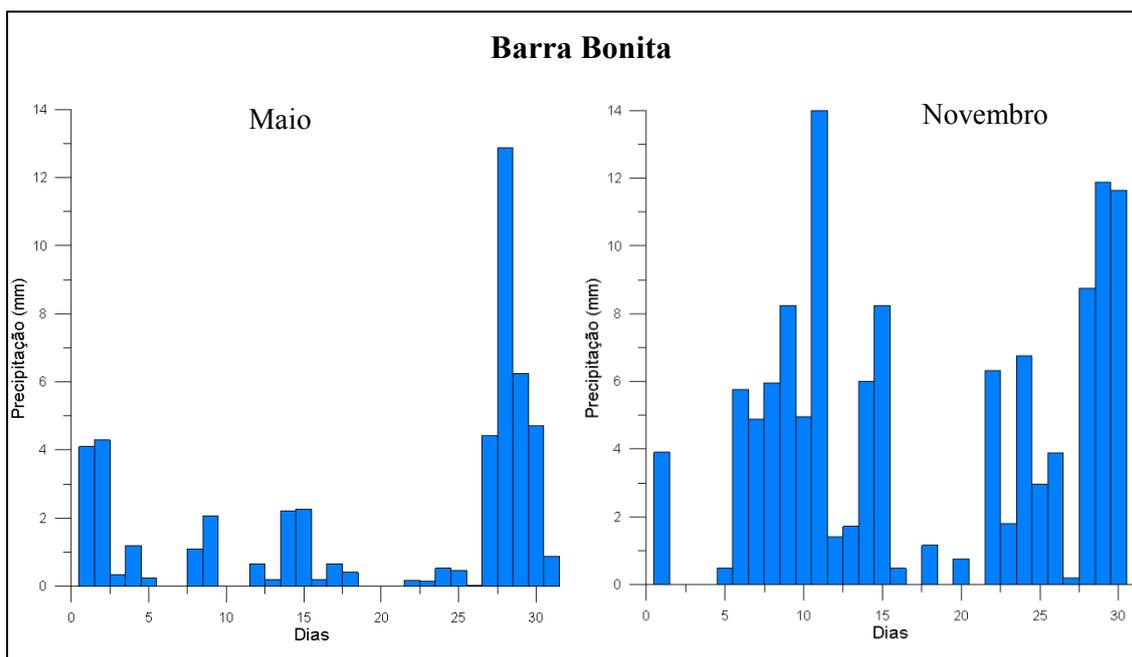


Figura 32 - Precipitação média dos dias de maio e novembro na estação de Barra Bonita.



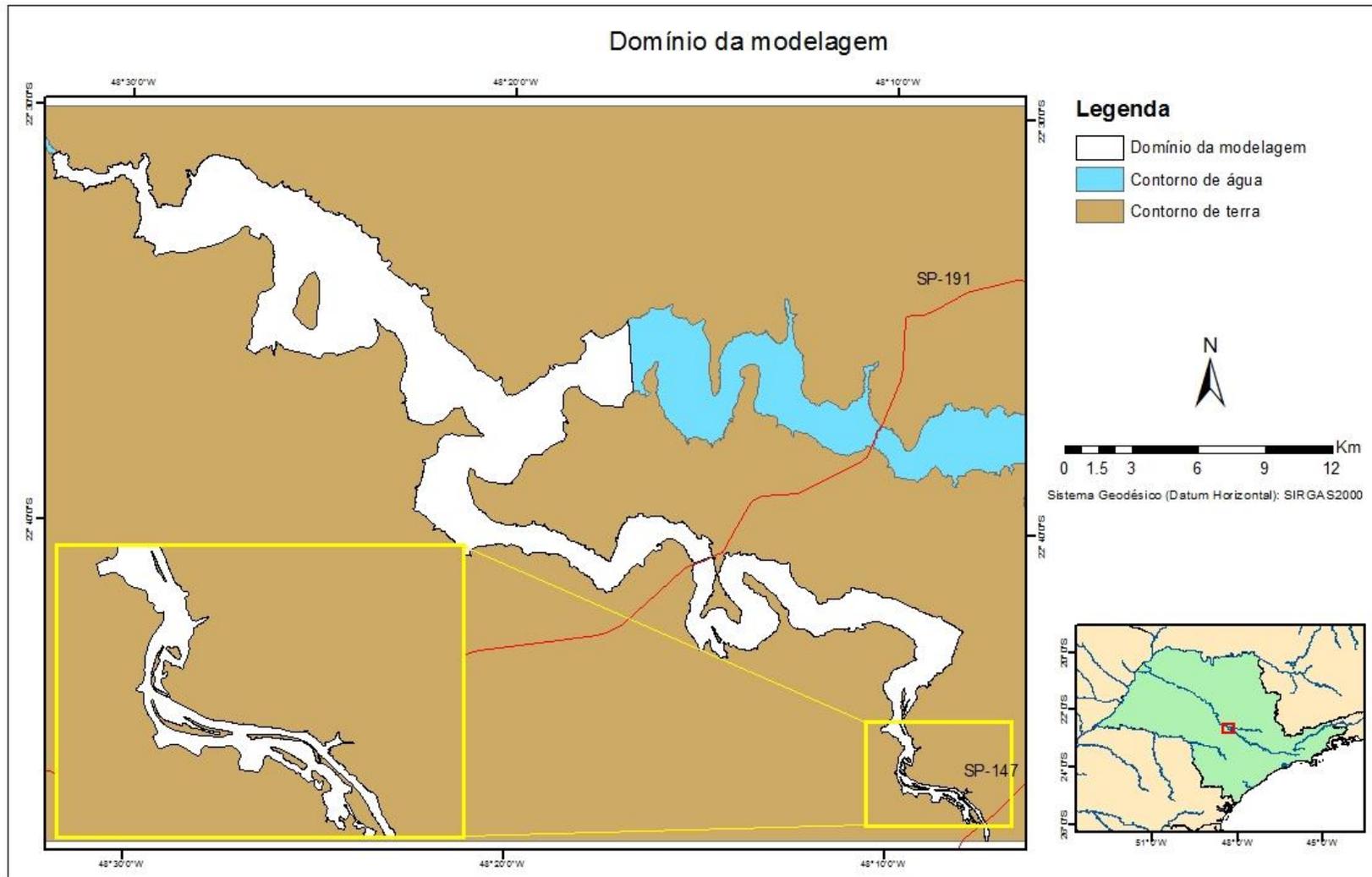
8.5. Implementação do modelo hidrodinâmico

8.5.1. Domínio da modelagem

O domínio da modelagem, onde ocorre a discretização espacial, está exposto na Figura 33. As feições da geomorfologia fluvial foram mapeadas e incluídas no domínio da modelagem, uma vez que a construção da malha de elementos finitos deve considerá-las como limites.

Estas feições estão mais presentes na região próxima a Anhembi, na área mais a montante na área de estudo, conforme detalhe da Figura 33.

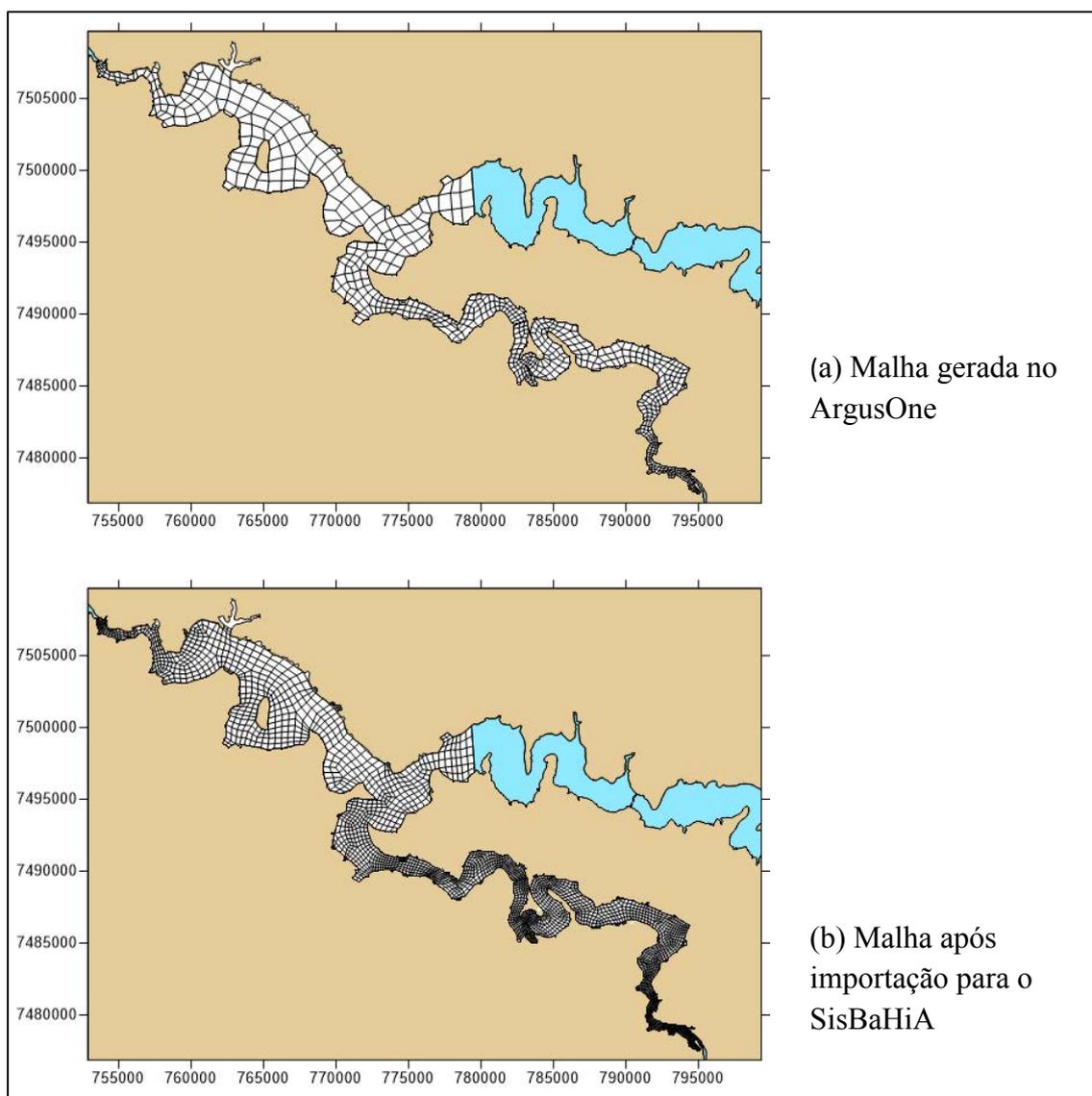
Figura 33 - Domínio da modelagem



8.5.2. Malha de elementos finitos

A malha, confeccionada no ArgusOne, possui 742 elementos finitos, representando 1042 nós. Após ser importada para o SisBaHiA, o número de nós totais foi de 3569, sendo 2365 internos e 1204 pertencentes ao contorno de terra. A Figura 34 mostra esta diferença.

Figura 34- Malha numérica de elementos finitos.

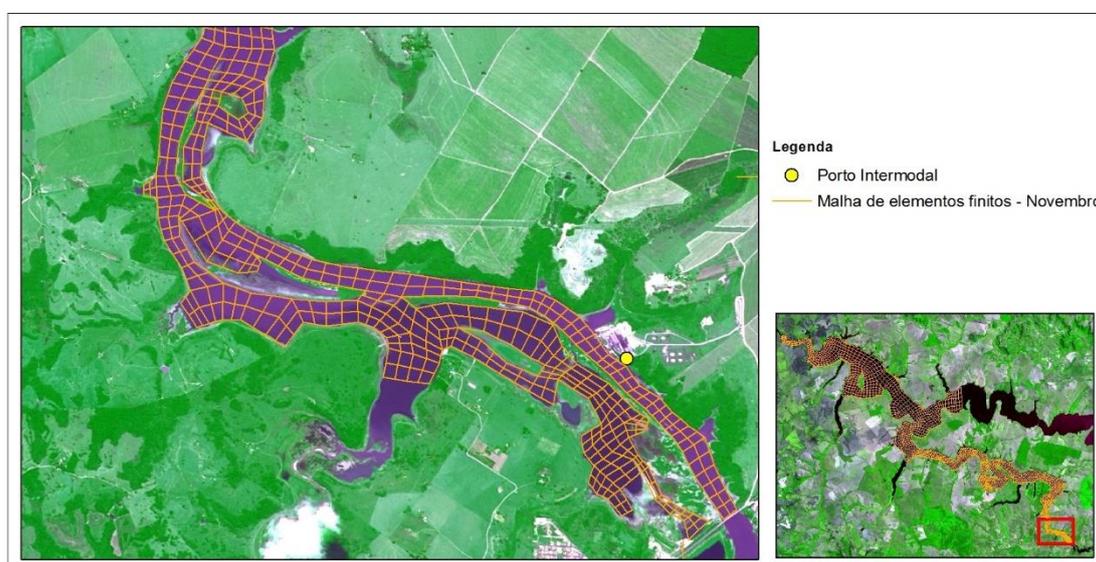


O refinamento da malha ocorreu na área a montante, onde o trecho do rio é mais meandrante e correspondente à área de maior interesse, por ser próxima ao porto intermodal em Anhembi.

Procurou-se preservar ao máximo os contornos das margens e as ilhas existentes, porém locais onde a margem era muito irregular não houve detalhamento, pois isto aumentaria consideravelmente o número de nós e também poderiam ocorrer distorções geométricas, o que prejudicaria a estabilidade numérica do modelo.

A Figura 35 mostra a malha obtida para o mês de novembro, quando o reservatório apresenta seu volume mais baixo. Observa-se que a malha foi mais refinada e contornou as feições geomorfológicas do rio, que não estão submersas devido ao baixo nível da água.

Figura 35 - Detalhe da malha de elementos finitos para o mês de novembro



Quando o nível da água do reservatório sobe, encobre diferentes feições fluviais, como barras de meandros, ilhas e substrato lamoso. A Figura 36 mostra a malha obtida para esta situação, que ocorre no mês de maio. Nota-se que há elementos em áreas antes não existentes, de modo a simular a água sobre as feições.

Figura 36 - Detalhe da malha de elementos finitos para o mês de maio



8.6. Curva de decaimento

Os dados utilizados para a gerar a curva de decaimento para o mês de maio foram velocidade de 2 m/s e direção de 135° e para o mês de novembro velocidade de 3 m/s e direção de 135°. A temperatura da água adotada foi de 22°C e salinidade 0. Não foi realizada a análise de sedimentos do rio, sendo adotado o valor sugerido pelo próprio ADIOS para rios e estuários, de 50ml/l.

Desta forma, a curva utilizada na simulação (*Automotive Diesel Fuel*), nas condições mencionadas, está representada na Figura 37. A diferença de um mês para o outro é bastante pequena e é mais notável no remanescente final, sendo que para as condições de novembro é de 39,25% e para maio é de 42,06% do volume total derramado, ou seja, 14,13 e 15,14 litros, respectivamente. Isto se deve pela diferença da velocidade do vento, uma vez que para novembro foi considerado de 3 m/s e maio 2 m/s. Quando a velocidade do vento é maior, há um maior espalhamento do óleo, o que proporciona maior evaporação de seus constituintes, diminuindo a quantidade de óleo remanescente. A Figura 38 mostra a curva de evaporação para novembro e maio, onde é possível observar esta diferença, de maneira mais clara, no final da curva.

Figura 37 – Curva de decaimento do óleo para os meses da simulação.

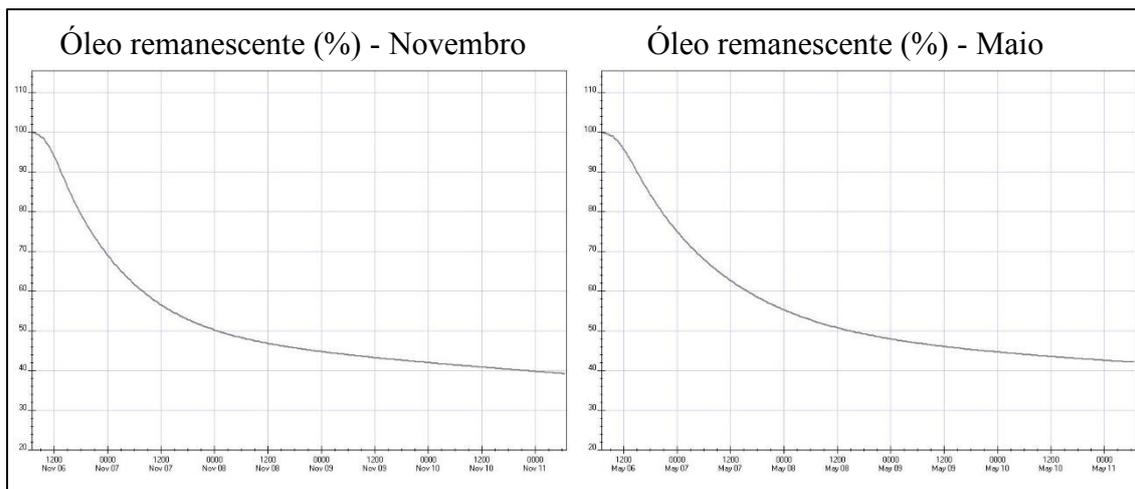
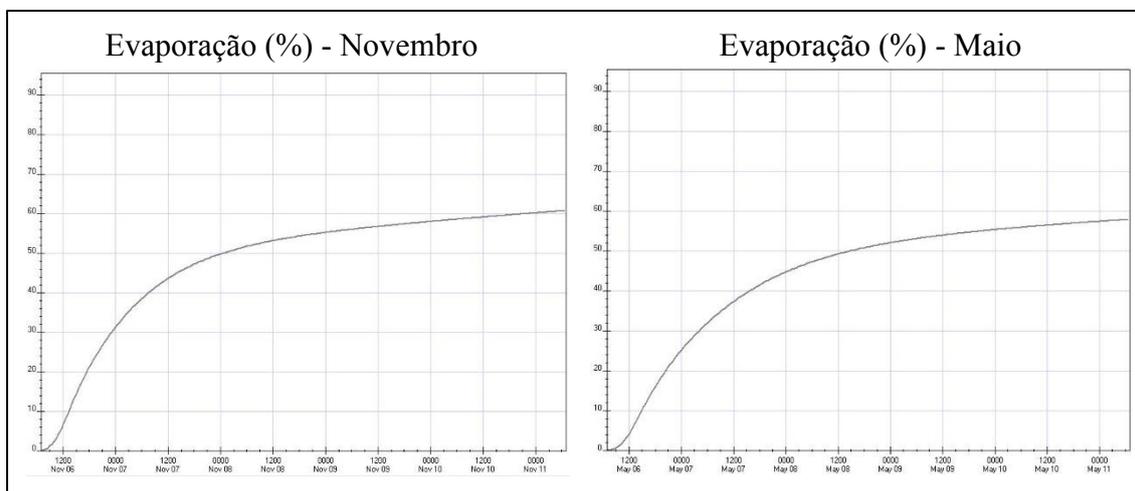


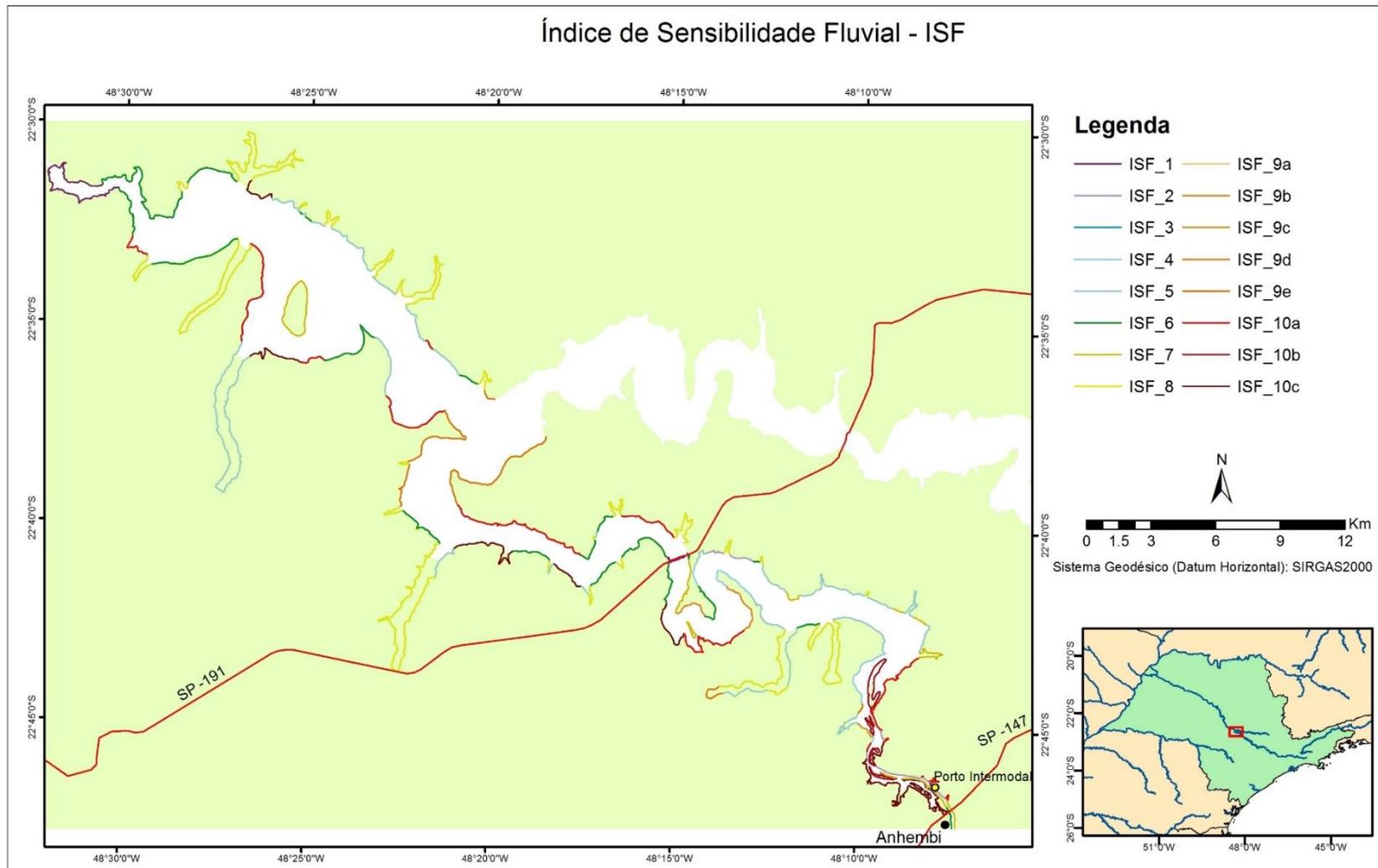
Figura 38 – Curva de evaporação do óleo para os meses da simulação



8.7. Índice de sensibilidade fluvial

O mapeamento dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial na área de estudo está apresentado na Figura 39.

Figura 39 - Índice de Sensibilidade Fluvial ao óleo no reservatório de Barra Bonita - SP



Foram mapeados um total de 360,3 km, considerando-se as duas margens do reservatório. A Tabela 6 mostra os ISFs encontrados, a quantidade correspondente em km e o quanto isto representa, em termos percentuais, da região de estudo.

Tabela 6 - Quantificação dos índices de sensibilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial (ISF)

ISF	Quantidade (km)	% do total
1	11,83	3.28
2	6,16	1.71
3	0	0.00
4	7,55	2.10
5	61,97	17.20
6	43,12	11.97
7	21,27	5.90
8	96,97	26.92
9a	0	0.00
9b	1,13	0.31
9c	0	0.00
9d	4,78	1.33
9e	18,21	5.06
10a	37,59	10.43
10b	15,69	4.36
10c	33,96	9.43

Observando esta tabela, tem-se que o ISF 8 foi o índice mais representativo na área de estudo, sendo identificado em 26,92% da área, o que equivale a 96,97 km de extensão. Este índice, caracterizado por margens com vegetação de porte arbustivo, foi encontrado em alguns afluentes do reservatório, pois estes ainda preservam uma certa quantidade de mata ciliar. No corpo do reservatório a vegetação arbustiva não está presente exatamente na margem em contato com a água e sim a alguns metros desta,

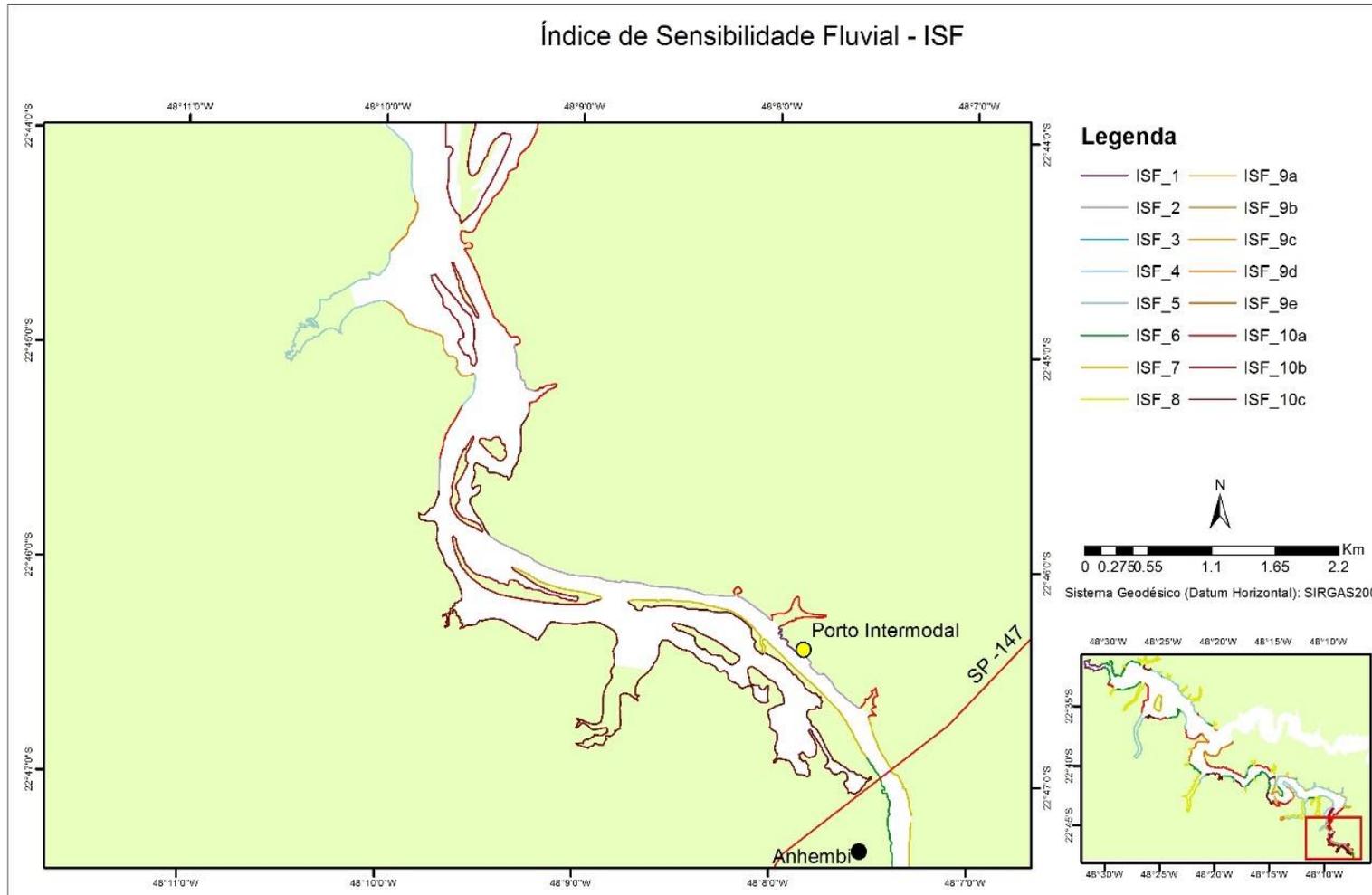
sendo que nesta área intermediária há a ocorrência de praias fluviais com areia ou cascalhos e banco de macrófitas, o que altera a classificação do índice de sensibilidade.

Outro índice que também teve boa representatividade foi o ISF 5, mapeado em 61,97 km da área, o que representa 17,20% do total. As feições que se enquadram nesta classificação são as margens deposicionais com areia (praias fluviais) e margens com cobertura agrícola, sendo que a primeira é a mais recorrente, principalmente no rio principal do reservatório.

Dentre os índices que indicam alta sensibilidade ao óleo, os que foram mais mapeados no reservatório correspondem ao grupo do ISF 10, em 24,22% do reservatório, o que equivale a 87,24 km. Estas áreas estão localizadas principalmente a montante do reservatório, na transição das áreas alagadas com o curso natural do rio Tietê, onde ficam mais aparentes os diques marginais rompidos e a formação das áreas de remanso que proporcionam o abrigo da fauna fluvial. Este é o local onde há maior variabilidade de feições geomorfológicas vinculadas à dinâmica fluvial na área de estudo e merece atenção em caso de acidentes (Figura 40).

Análises pontuais dos índices foram realizadas em conjunto com os cenários de simulação e os índices de vulnerabilidade.

Figura 40 – Área com grande variação de feições geomorfológicas e de ISF



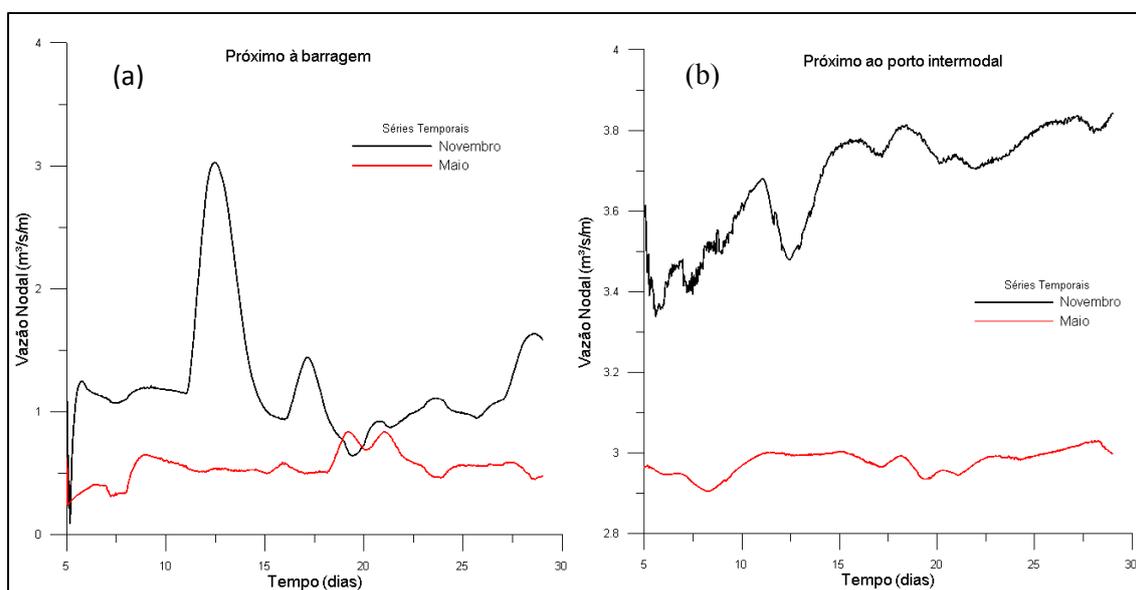
8.8. Simulação dos cenários acidentais

8.8.1. Modelos hidrodinâmicos

Os cenários acidentais de derramamento de óleo ocorrem com base no modelo hidrodinâmico de cada época da simulação. Portanto, é necessária uma análise destes modelos, de forma a verificar sua coerência em relação à dinâmica fluvial.

Novembro é o mês em que o reservatório está com o volume de água mais baixo do que maio, portanto espera-se que a vazão seja maior neste mês do que quando a água está sendo acumulada em maio. A Figura 41 mostra a variação da vazão em um ponto próximo à barragem (a) e próximo ao porto intermodal (b) durante o tempo total da simulação. Para os dois meses em análise, pode-se confirmar que novembro apresentou vazão, em média, superior a maio, conforme o esperado.

Figura 41 – Variação da vazão durante o período de simulação. (a) ponto próximo à barragem e (b) próximo ao porto intermodal.

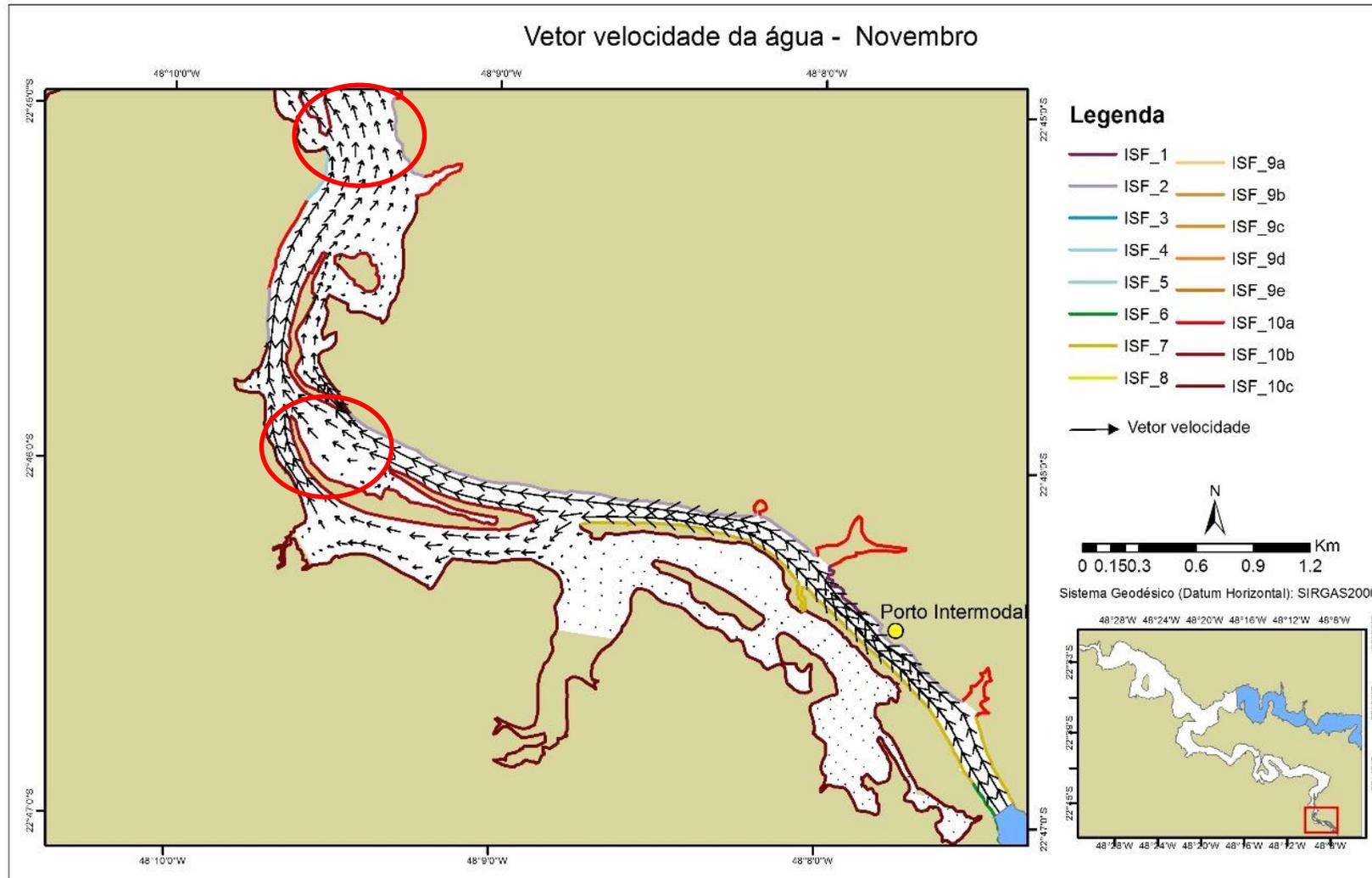


Outro parâmetro analisado foi a espacialização do vetor velocidade da água, pois é ele que indica a magnitude e o possível caminho do óleo em caso de derramamento. Os maiores vetores indicam locais onde ocorrem processos de erosão realizados pelo fluxo da água e, normalmente, após estas áreas estão os locais de deposição de

sedimentos, onde a velocidade do fluxo é baixa e onde provavelmente o óleo também vai permanecer por um tempo maior ou se acumular.

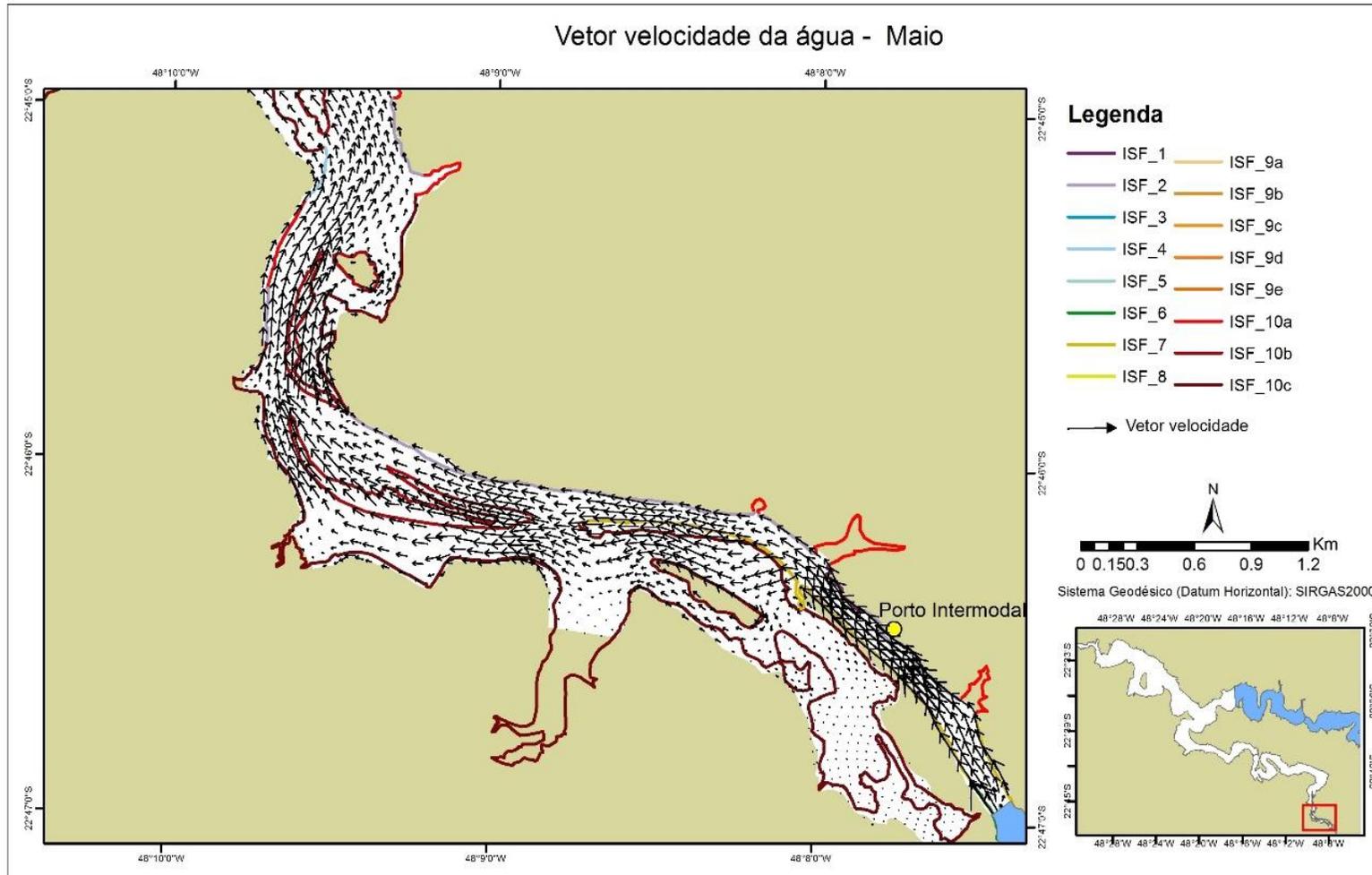
Sendo assim, o vetor velocidade está representado, para o mês de novembro, na Figura 42. Nele, observa-se que a água contornou as ilhas (antigos diques marginais rompidos) e seguiu também pelo leito natural, sendo neste com velocidade superior, confirmando a formação de um remanso do lado oposto, cujo o ISF é alto, conforme já explicado anteriormente. Observa-se, nas áreas em destaque, vetores maiores indicando locais de erosão e, logo em seguida, vetores menores que indicam velocidades mais baixas, onde ocorre deposição.

Figura 42 - Vetor velocidade da água para o mês de novembro



Para o mês de maio os vetores de velocidade são apresentados na Figura 43, região próxima ao porto intermodal considerada de maior atenção, devido a maior ocorrência de áreas com elevado ISF. Neste mês o reservatório está com nível de água mais alto, fazendo com que a água encubra algumas ilhas. Na simulação do modelo hidrodinâmico, este processo é notado pela presença dos vetores de velocidade nestes locais, ou seja, há água fluindo e, portanto, o óleo também pode fluir. Também podem ser observadas, neste caso, as diferenças de magnitude do vetor velocidade, indicando áreas em que o rio provoca erosão das margens e locais em são depositados os sedimentos, conforme explicado.

Figura 43 - Vetor velocidade da água para o mês de maio



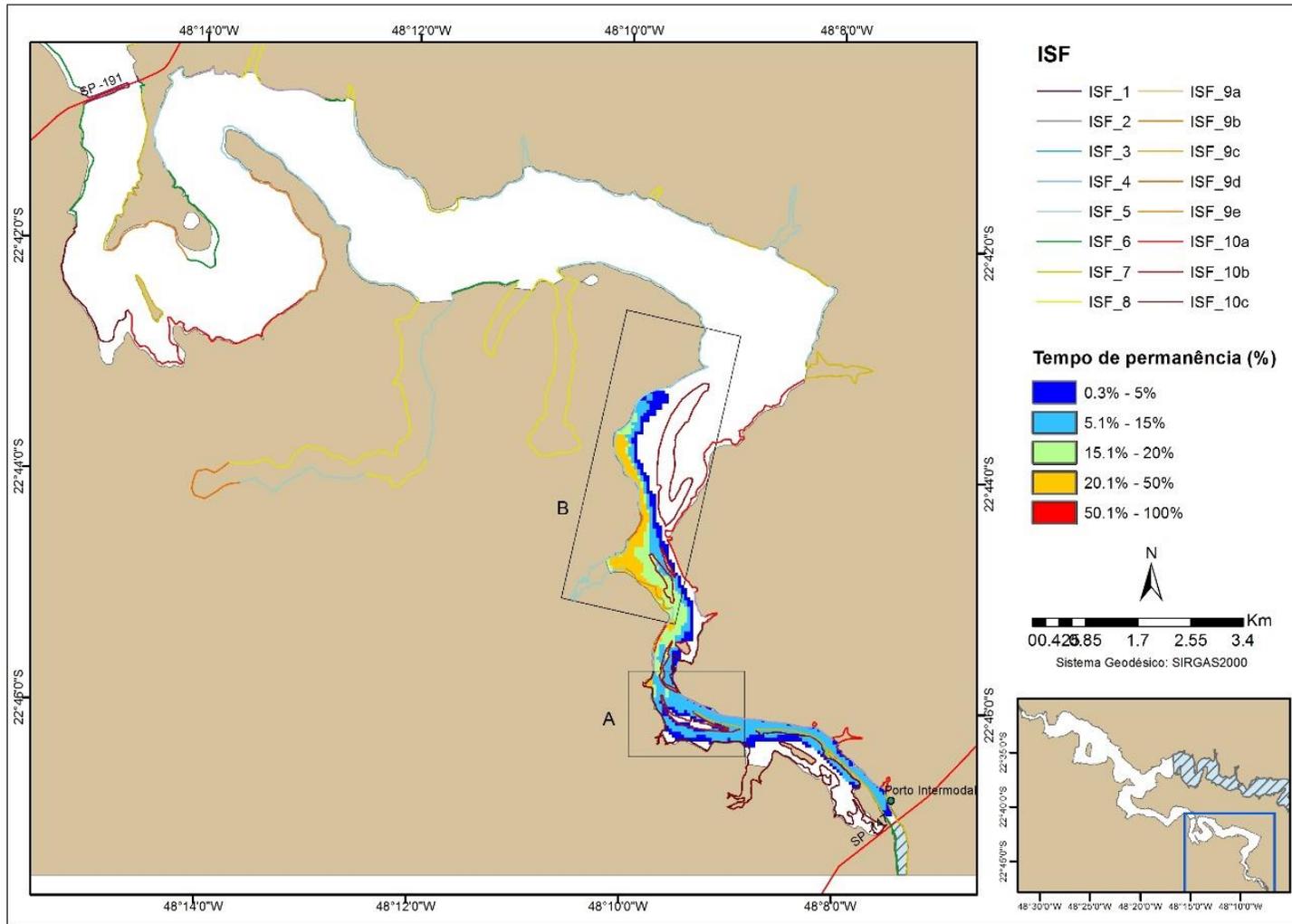
As duas situações apresentadas ratificam a coerência do modelo hidrodinâmico para ambos os meses. Desta forma, a simulação do derramamento de óleo, considerando os cenários propostos pôde ser executada.

A análise de cada cenário foi realizada considerando os tempos de 12h, 36h e 60h e 72h, segundo a resolução CONAMA 398/2008.

8.8.2. Cenário acidental 1

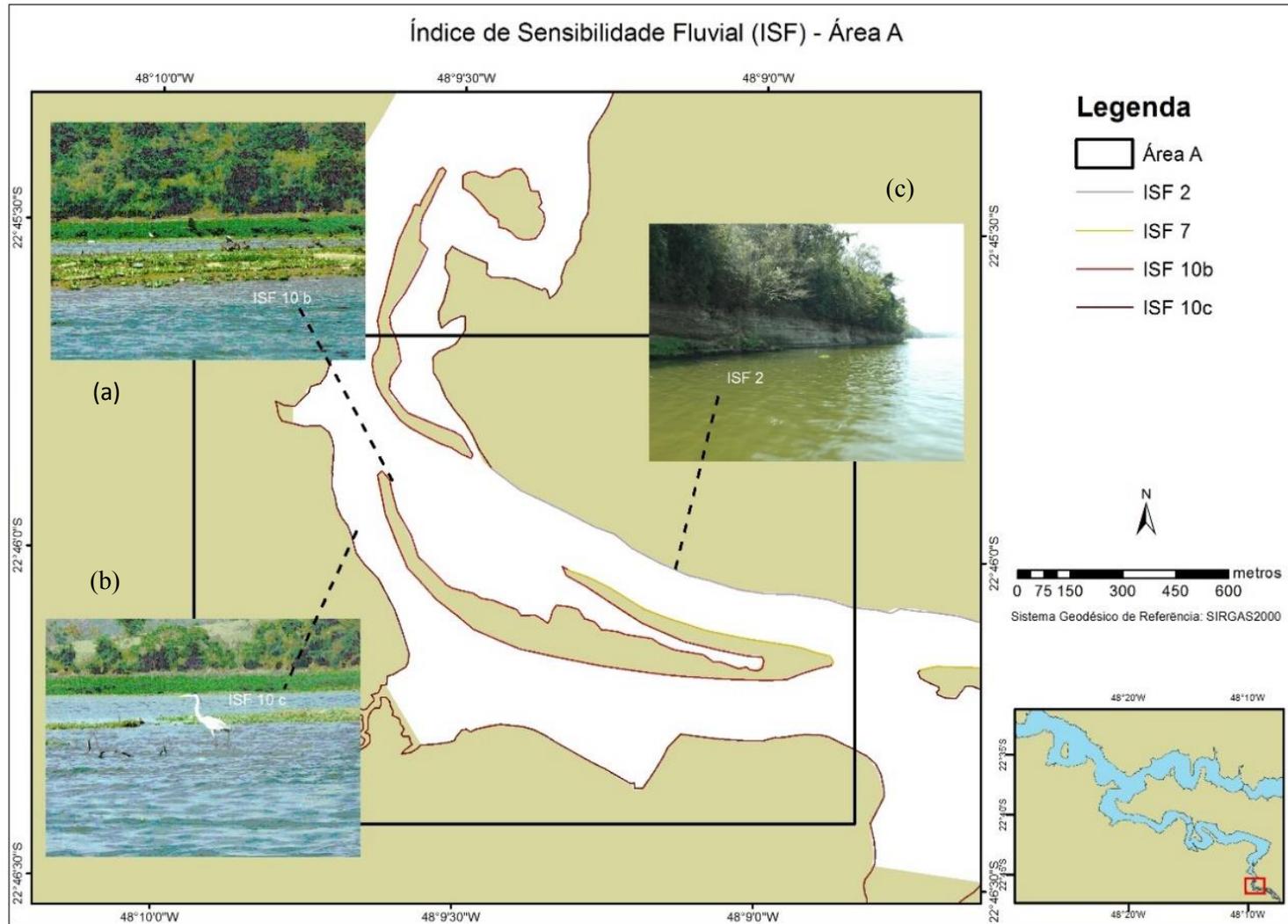
Neste cenário foi simulado o derramamento de 36.000 litros de óleo na fonte porto intermodal, considerando a velocidade do vento de 3m/s e direção de 135° no mês de novembro. A Figura 44 mostra a porcentagem do tempo de 12h que o óleo permaneceu em cada lugar durante sua trajetória e até onde ele atingiu neste mesmo período. Nota-se que nas 12 horas iniciais o óleo passou pela área A, permanecendo menos de 15% do tempo, o que indica que não parou, apenas passou. Em seguida o óleo atingiu a área B, onde permaneceu maior tempo das 12h de simulação.

Figura 44 – Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 12h de simulação no mês de novembro



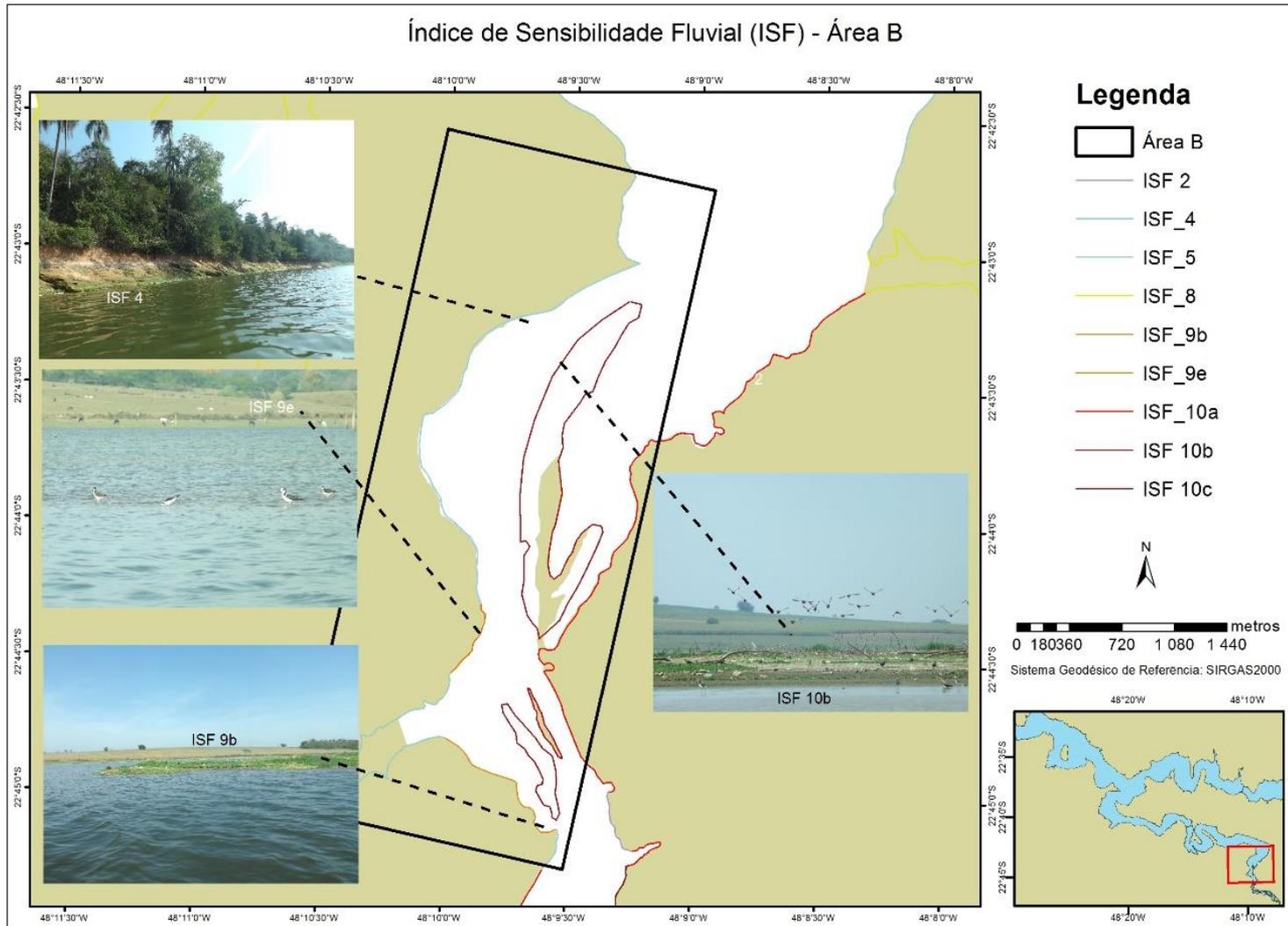
Apesar de o óleo não permanecer na área A, este local merece atenção principalmente do lado esquerdo, pois apresenta índices de sensibilidade altos, sendo que há uma ilha com uma parte de substrato lamoso, cujo o índice é 10b (Figura 45 a) e, entre a ilha e a margem esquerda há um remanso que colabora para a proliferação da fauna local, classificado com ISF de 10c (Figura 45b). Já a margem direita na área A, apresenta um ISF de 2 (Figura 45c) enquanto o rio segue em seu curso natural. Este índice é caracterizado por margem com paredões rochosos e, portanto, região de difícil estagnação do óleo e de fácil limpeza. Logo após estes paredões, inicia-se uma área de transição e deposição onde há a entrada de uma lagoa, conhecida localmente como Nhá Rita. A partir deste ponto o ISF sobe novamente (10b), tornando a área prioritária para contenção, de forma que o óleo não penetre no local, prejudicando a fauna e flora.

Figura 45 - Índice de Sensibilidade Fluvial (ISF)- Área A



A área B possui, em sua maior parte, ISF 4 caracterizado por margens erosivas seguidas por vertentes, conforme a Figura 46. Porém existem duas áreas com índices mais altos (9b e 9e), próximas a um pequeno afluente e resguardadas por uma ilha que as separam do curso natural do rio, que possui fluxo com velocidade maior. Esta área, com velocidade mais baixa, propicia a permanência do óleo por mais tempo. Na região mais ao norte da área B fica mais evidente, na Figura 42, que o óleo está sendo carregado pelo fluxo da água, pois está presente na margem erosiva e não na margem deposicional do rio, indicando que com o passar do tempo o óleo presente na água vai superar as barreiras físicas da margem côncava.

Figura 46 – Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área B



Considerando o tempo de 36 horas após o derramamento, o óleo continuou a descer pelo curso d'água atingindo a área C marcada na Figura 47, permanecendo neste local de por até 50% das 36 horas de simulação. Esta área possui, em sua maior parte, ISF 5 e uma pequena área de ISF 7, caracterizada como margem deposicional com areia (praias fluviais) e margem com vegetação de porte herbáceo, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 48.

Apesar de atingir a área C, o óleo ainda esteve presente, mais de 50% do tempo das 36 horas, na área B, reforçando que este é um local que merece maior atenção durante as operações de emergência, podendo ser um local de contenção do óleo, uma vez que possui cerca de 3,3 km da sua margem esquerda com ISF 4.

Figura 47 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 36h de simulação no mês de novembro

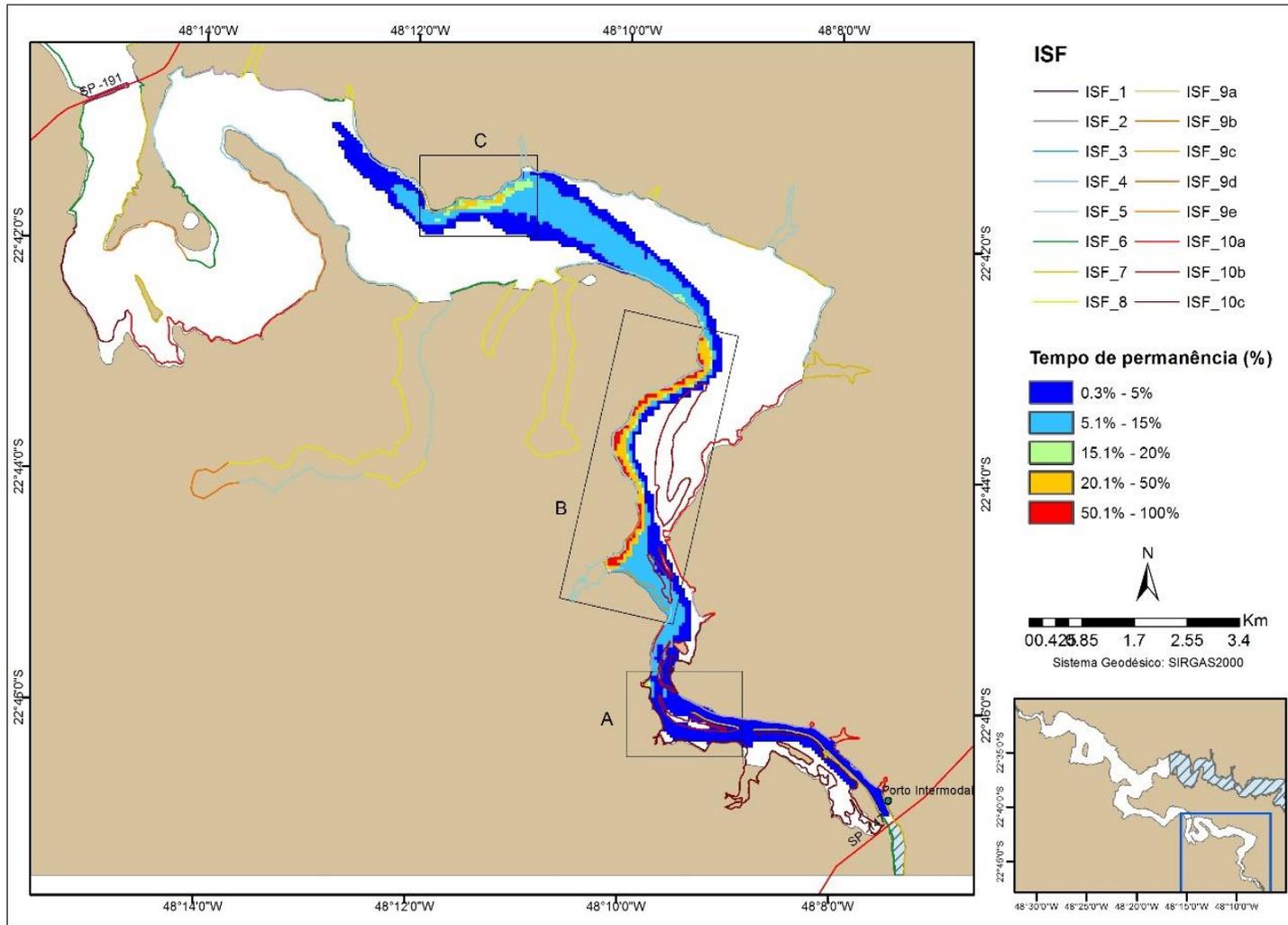
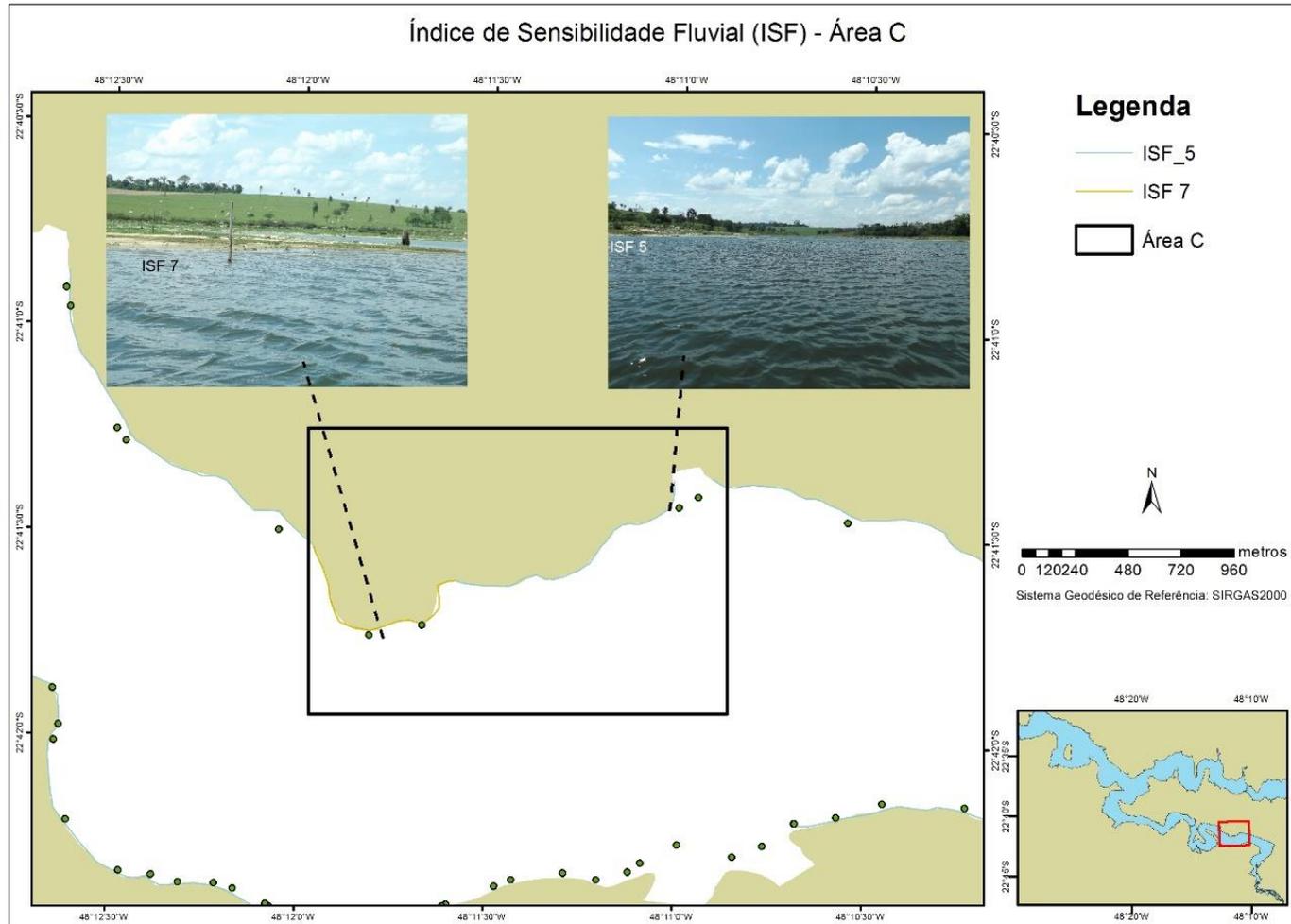


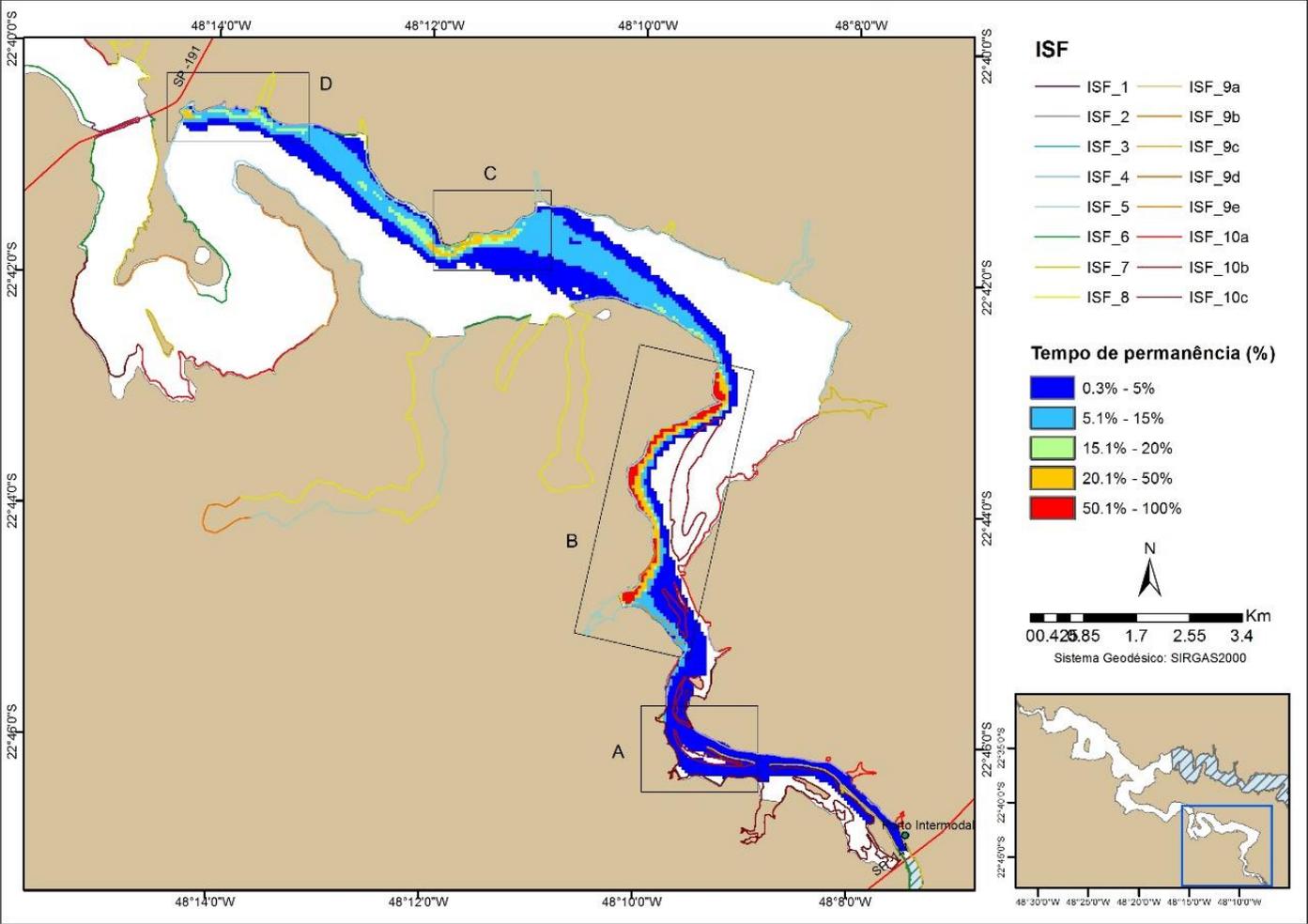
Figura 48 - Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área C



Após 60 horas do derramamento, o óleo percorre em torno de 22 quilômetros e atinge a área D, conforme mostra a Figura 49.

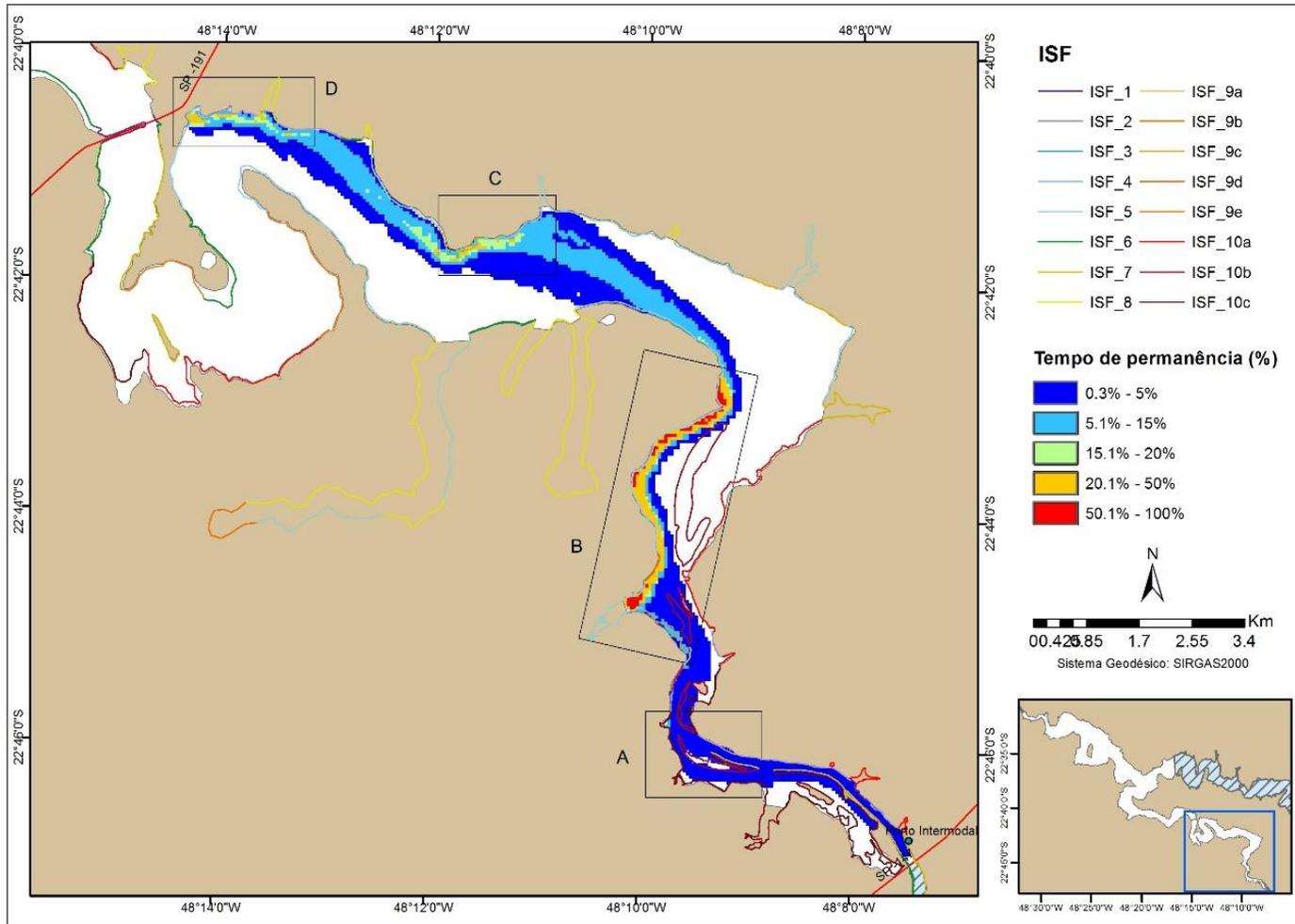
Das 60 horas passadas da simulação do derramamento, o óleo esteve presente nesta área menos de 20% do tempo, o que indica que ele tenha chegado ao local há pouco tempo. A área C ainda continua com um tempo de permanência de óleo em torno de 20%, assim como aconteceu na simulação de 36 horas, evidenciando que seja um local que o óleo passe com velocidade reduzida. Diferente disto, a área B ainda é o local que apresenta a maior taxa de permanência do óleo, com valores acima de 50% das 60 horas após o derramamento.

Figura 49 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 60h de simulação no mês de novembro



Diferentemente do que vinha acontecendo com passar do tempo após a simulação do acidente, no cenário de 72 horas não houve incremento da área atingida pela mancha de óleo, ou seja, isto indica que o óleo estaria atingindo somente até a área D, não ultrapassando este local. O comportamento nas áreas A, B e C foi bastante semelhante ao descrito após 60 horas, mostrando assim que houve estagnação do movimento da mancha de óleo. A Figura **50** mostra a simulação considerando 72 horas.

Figura 50 - Cenário 1 - Tempo de permanência do óleo em 72h de simulação no mês de novembro



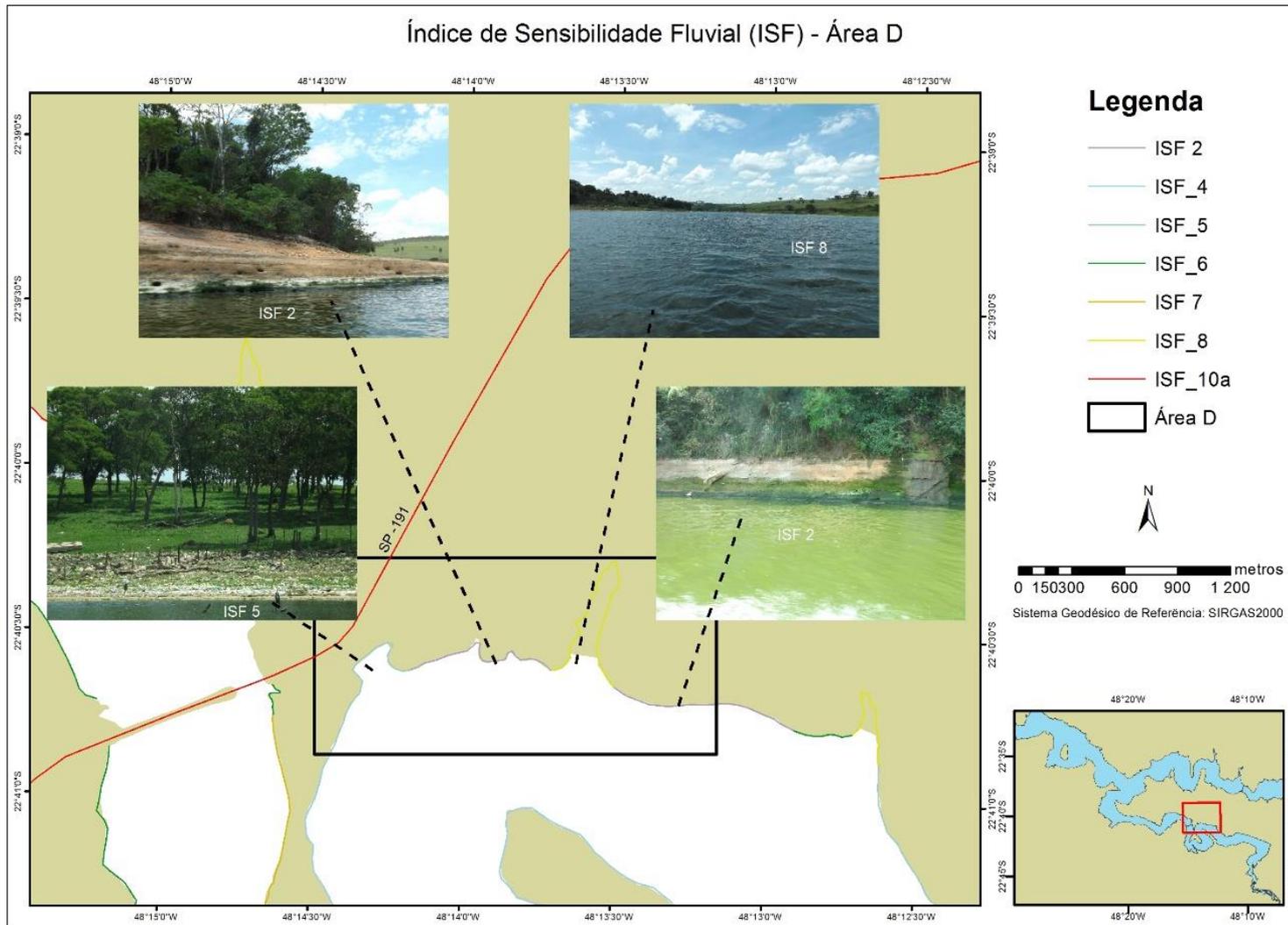
A área D é classificada, em relação à sensibilidade ao óleo, em sua grande parte com índice 2, referente à margem com paredão rochoso. Há também um remanso de um pequeno afluente com ISF 8 (margens com vegetação arbustiva) e um trecho com ISF 5 em margem deposicional com areia. A Figura 51 ilustra estas áreas.

De acordo com os resultados para o cenário 1, destaca-se que a área A deve ser priorizada nas ações de proteção, uma vez que possui os maiores índices de sensibilidade e é atingida nas primeiras 12 horas após um acidente no porto intermodal.

A área B foi o local onde apresentou o maior tempo de permanência do óleo desde 12 horas até 72 horas de simulação. Por este motivo e por não apresentar ISF alto em sua maior extensão, a área B seria o local mais indicado para que as ações de contingência ocorressem.

A área D é o local mais distante da fonte que a mancha atingiu e de onde não evoluiu entre 60 e 72 horas após a simulação.

Figura 51 - Índice de sensibilidade fluvial ao óleo na área D

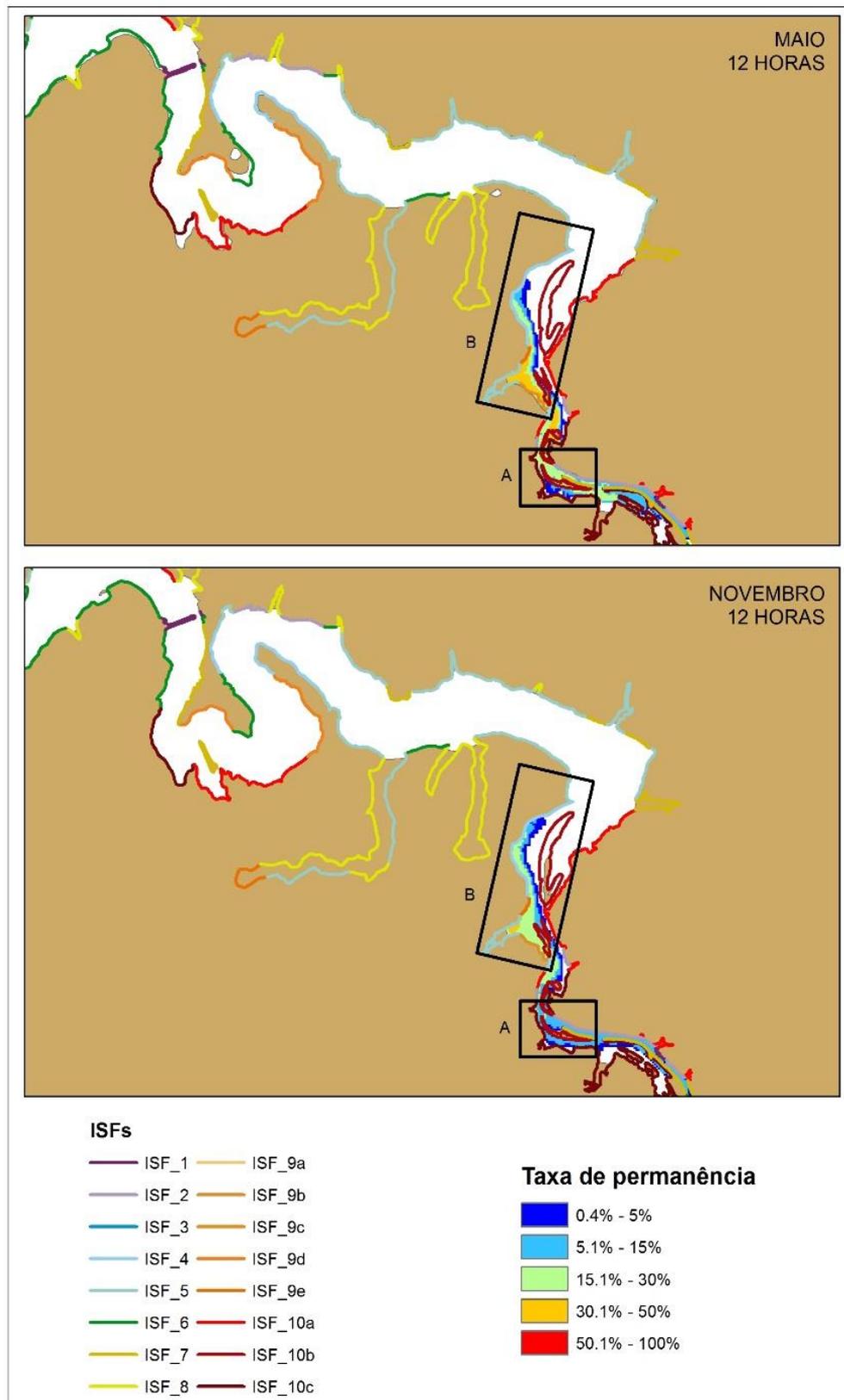


- Cenário 2

Neste cenário foi simulado o derramamento de 36.000 litros de óleo na fonte porto intermodal considerando a velocidade do vento de 2m/s e direção de 135° no mês de maio, quando o nível do reservatório está alto.

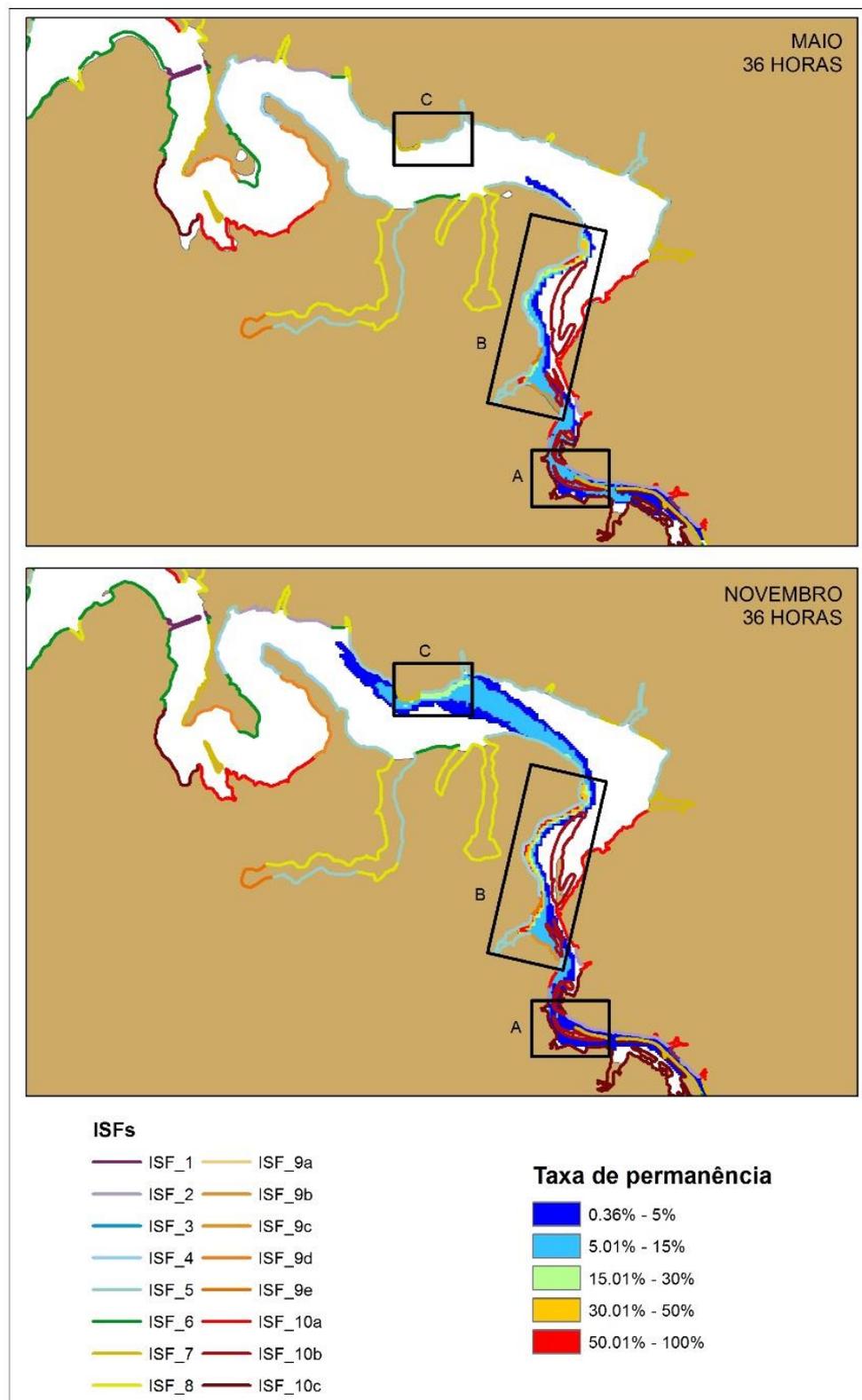
Na Figura 52 pode-se observar que em maio a mancha de óleo, após 12 horas do derramamento, atinge a área A estando presente em torno de 20% do tempo. Esta situação é diferente do que ocorreu em novembro, quando o tempo médio foi de 10% das 12 horas. A mancha também atingiu a área B, mas ainda ficou por um tempo maior no início desta área, o que não aconteceu em novembro, quando atingiu quase que toda a extensão da área B. Isto indica que a velocidade de deslocamento da mancha no mês de maio é mais lenta que em novembro, o que pode estar relacionado com a velocidade do fluxo da água que, tanto na área A quanto na área B, são menores em maio. Outro fator que pode estar contribuindo para o comportamento de dispersão da mancha é o fato da velocidade do vento ser de 2m/s em maio, enquanto em novembro era de 3m/s, pois com menos vento ocorre menor dispersão do óleo.

Figura 52 - Comparação entre as simulações de 12h para maio e novembro



No cenário de 36 horas após o derramamento, observa-se que o óleo está mais espalhado entre as áreas A e B, porém permanecendo um tempo maior no final da área B, sendo que em alguns pontos esteve de 30 a 50% das 36 horas de simulação e em outros acima de 50%. Após a área B, há a indicação de presença do óleo por menos de 5% do tempo, indicando que este começou a se deslocar em direção a área C, porém, sem atingi-la, como mostra a Figura 53. Na mesma figura pode-se observar que, para o mesmo período no mês de novembro, o óleo já tinha uma taxa de permanência de 15 a 30% na área C e iniciava o deslocamento rio abaixo. Isto mostra mais uma vez que a velocidade de deslocamento da mancha em maio é menor que em novembro.

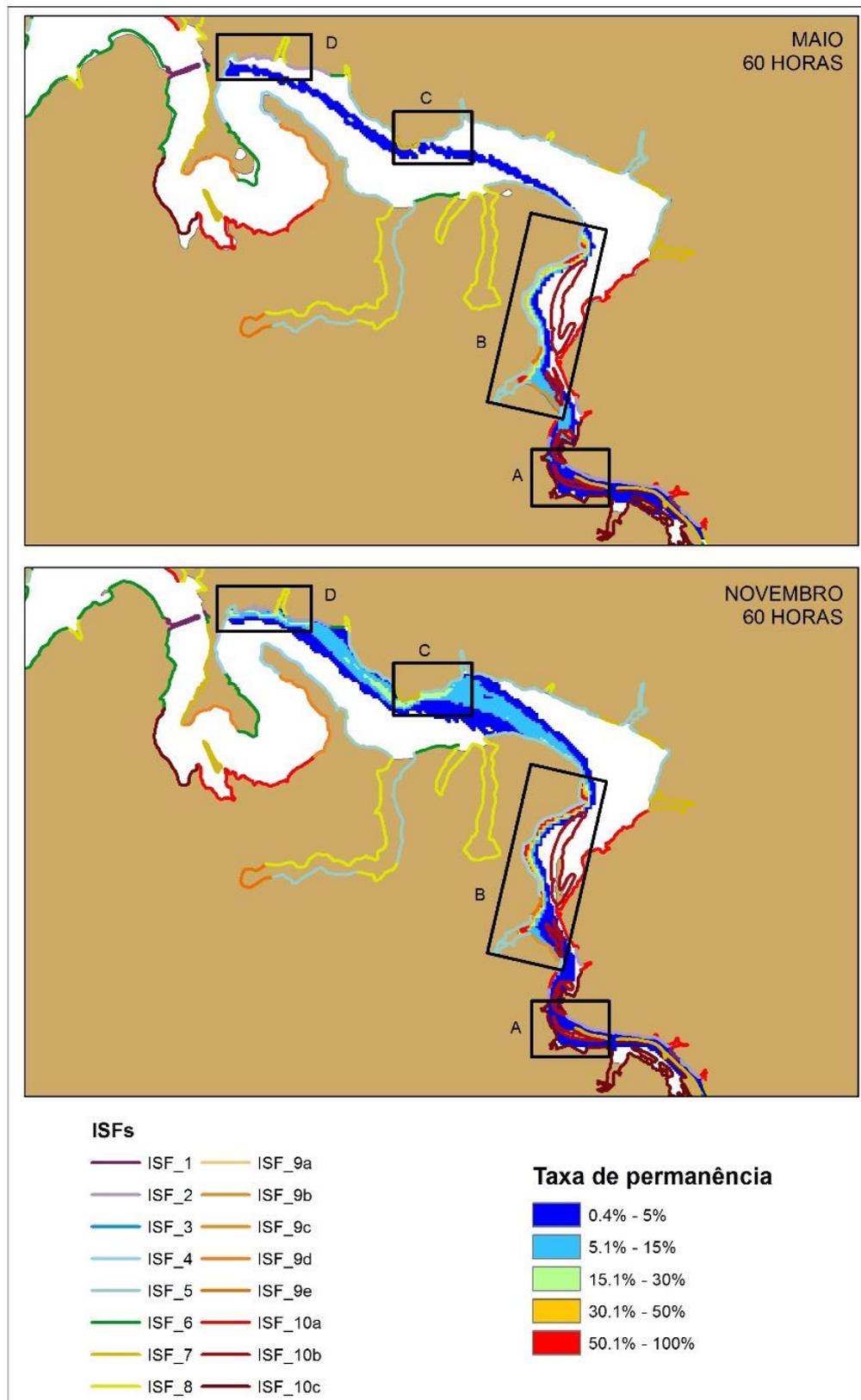
Figura 53 - Comparação entre as simulações de 36h para maio e novembro



A Figura 54 mostra a situação esperada após 60 horas de acidente ocorrido no porto intermodal. Nela, é possível observar que a região onde o óleo permanece por mais tempo continua sendo a área B, assim como ocorre no mês de volume mais baixo do reservatório. Em seguida, o óleo atinge a área C, que nas 36 horas não havia sido atingida, porém não permanece por mais de 5% das 60 horas, diferente de novembro, no qual esteve presente de 15 a 30% do tempo. Além de passar pela área C, a mancha alcança a área D, mas também com uma taxa de permanência abaixo de 5%.

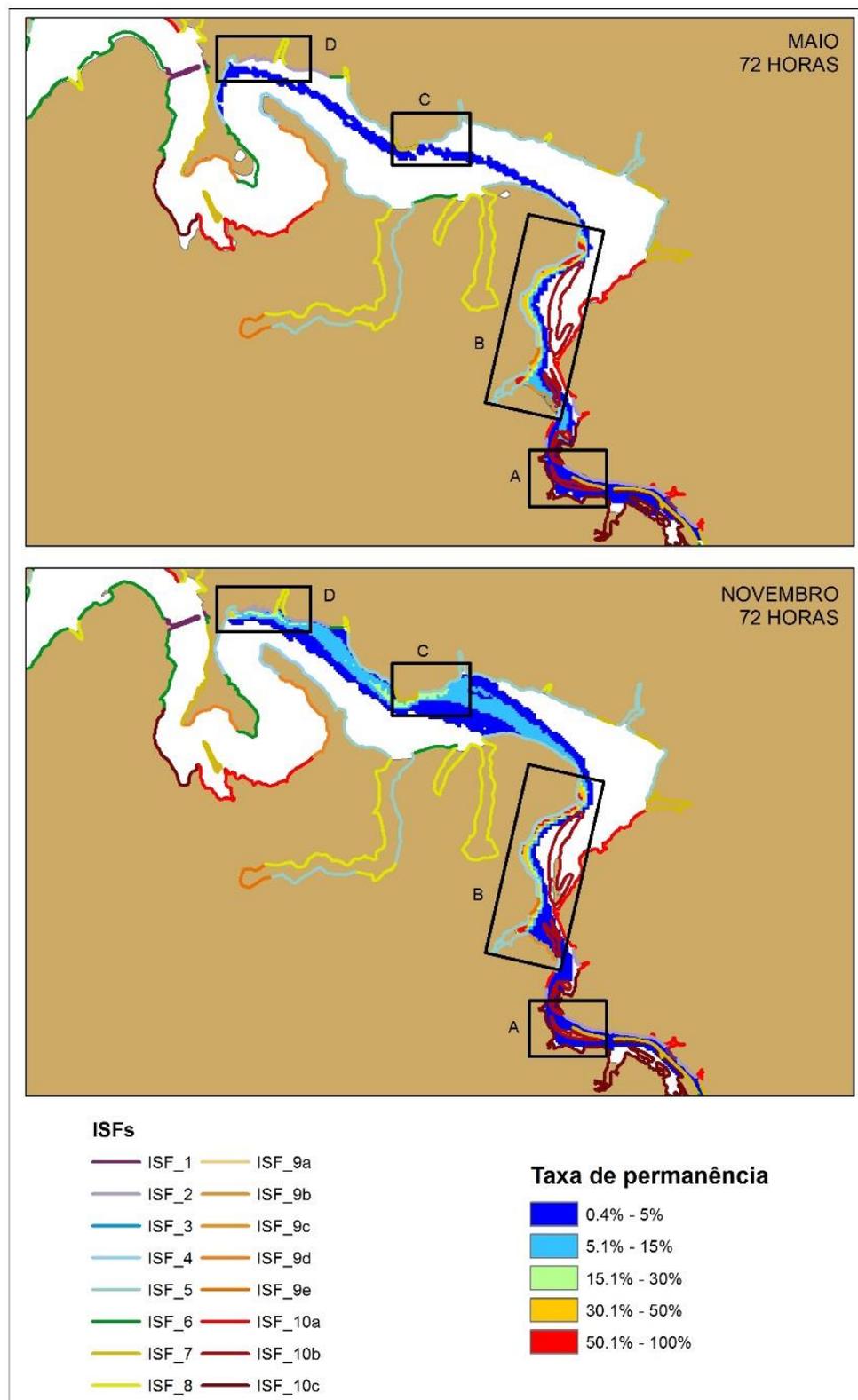
Outro aspecto observado na comparação com o mês de novembro, é a largura da área atingida pela mancha, bem mais evidente após a área B, sendo que em maio é bem menor que novembro e isto ocorre desde a área C até a área D. Além disto, a mancha de óleo não toca as margens entre as áreas C e D, sendo que o toque só ocorre na parte final da área D, que em termos de sensibilidade é classificado com o ISF de 4. Estes fatores, combinados com o baixo tempo em que a mancha está presente em todo este trajeto, indica que a quantidade de óleo que segue no curso d'água após a área B é menor comparada a novembro.

Figura 54 - Comparação entre as simulações de 60h para maio e novembro



O cenário de 72 horas (Figura 55) é bastante semelhante ao de 60 horas. A única diferença é que a mancha ainda continua o seu trajeto por, aproximadamente, 1km a jusante de onde tinha parado anteriormente, saindo da área D, mas ainda em uma região com o mesmo ISF de 4, descrito anteriormente. Mesmo que a presença do óleo tenha sido por um tempo menor que 5% da simulação, este cenário não ocorreu no mês de novembro, quando a mancha parou na área D.

Figura 55 - Comparação entre as simulações de 72h para maio e novembro



Os resultados encontrados para o cenário 2 mostraram que a priorização da área A deve ser mantida quando o reservatório aumenta o seu nível, pois independente do volume, ela é atingida já nas primeiras 12 horas e a permanência da mancha de óleo nesta área ocorre por mais tempo do que no cenário 1.

A área B também foi o local em que a mancha se concentrou e permaneceu por praticamente todo o período. Apenas uma pequena parte da mancha, verificada pela largura do local atingido, seguiu para as áreas C e D, diferente do que aconteceu no mês de novembro. Isto está relacionado com a velocidade do fluxo da água que em maio é menor que em novembro, pois maio é o período em que o processo de acúmulo de água está em seu máximo. A partir deste mês o reservatório começa a liberar a água para compensar a falta de chuvas e produzir energia, aumentando a vazão e a velocidade do fluxo nos meses seguintes, até novembro.

Tanto para o cenário 1 quanto para o 2, nas condições utilizadas nestas simulações, o óleo percorreu, aproximadamente, 22 km pelo rio num raio de 15 km do porto intermodal.

Na mídia digital estão disponíveis dois vídeos, referentes aos cenários de novembro e maio, que mostram a evolução da mancha de óleo durante as 72 horas iniciais após a simulação do derramamento dos 36000 litros de diesel no porto intermodal de Anhembi-SP.

8.9. Índices de vulnerabilidade

8.9.1. Cenário acidental 1

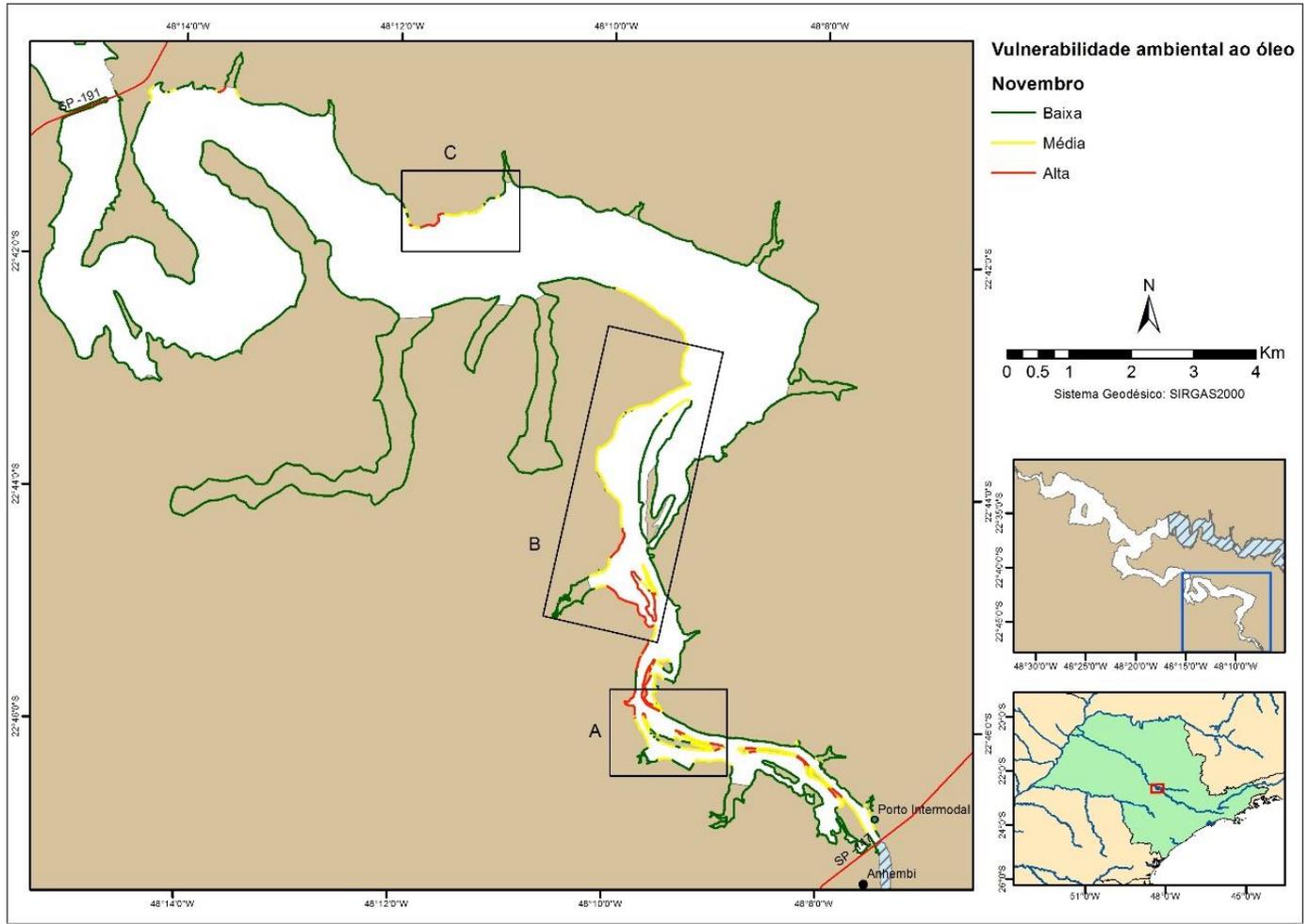
O índice de vulnerabilidade ambiental fluvial ao óleo para o cenário 1, correspondente à simulação de um derramamento de óleo no mês de novembro, próximo ao porto intermodal de Anhembi, é apresentado na Figura 56.

Neste cenário, as margens classificadas como sendo de alta vulnerabilidade contabilizam 9,2 km e a classe média está presente em 20,7 km das margens. Os demais locais receberam a classificação de baixa vulnerabilidade, de acordo com os critérios estabelecidos.

As áreas de média vulnerabilidade correspondem àquelas que possuem ISF de 4 a 6 e com tempo de permanência do óleo acima de 5% e também as áreas com ISF de 7 a 10, mas que o óleo passou e não permaneceu por mais de 5%. Esta classe de vulnerabilidade está presente na maior parte das margens que foram tocadas pelo óleo, principalmente na área B, por causa das características dos ISFs já foram explicados anteriormente.

As margens com maior vulnerabilidade são aquelas cujo o ISF é de 7 a 10, o que corresponde a margens com vegetação tanto herbácea quanto arbustiva, diques fluviais, barras de meandro e depósitos aluviais e que ficaram em contato com o contaminante por mais de 5% do tempo da simulação. Estes locais foram identificados nas áreas A e B, onde ocorrem as maiores variabilidades das feições de relevo da região. Desta forma, são as zonas que devem ser priorizadas nas ações de emergência desde o início do derramamento até as 72 horas seguintes.

Figura 56 - Índice de vulnerabilidade ambiental fluvial ao óleo para o mês de novembro considerando a simulação de derramamento de 36000 L de óleo diesel no porto intermodal de Anhembi.



8.9.2. Cenário acidental 2

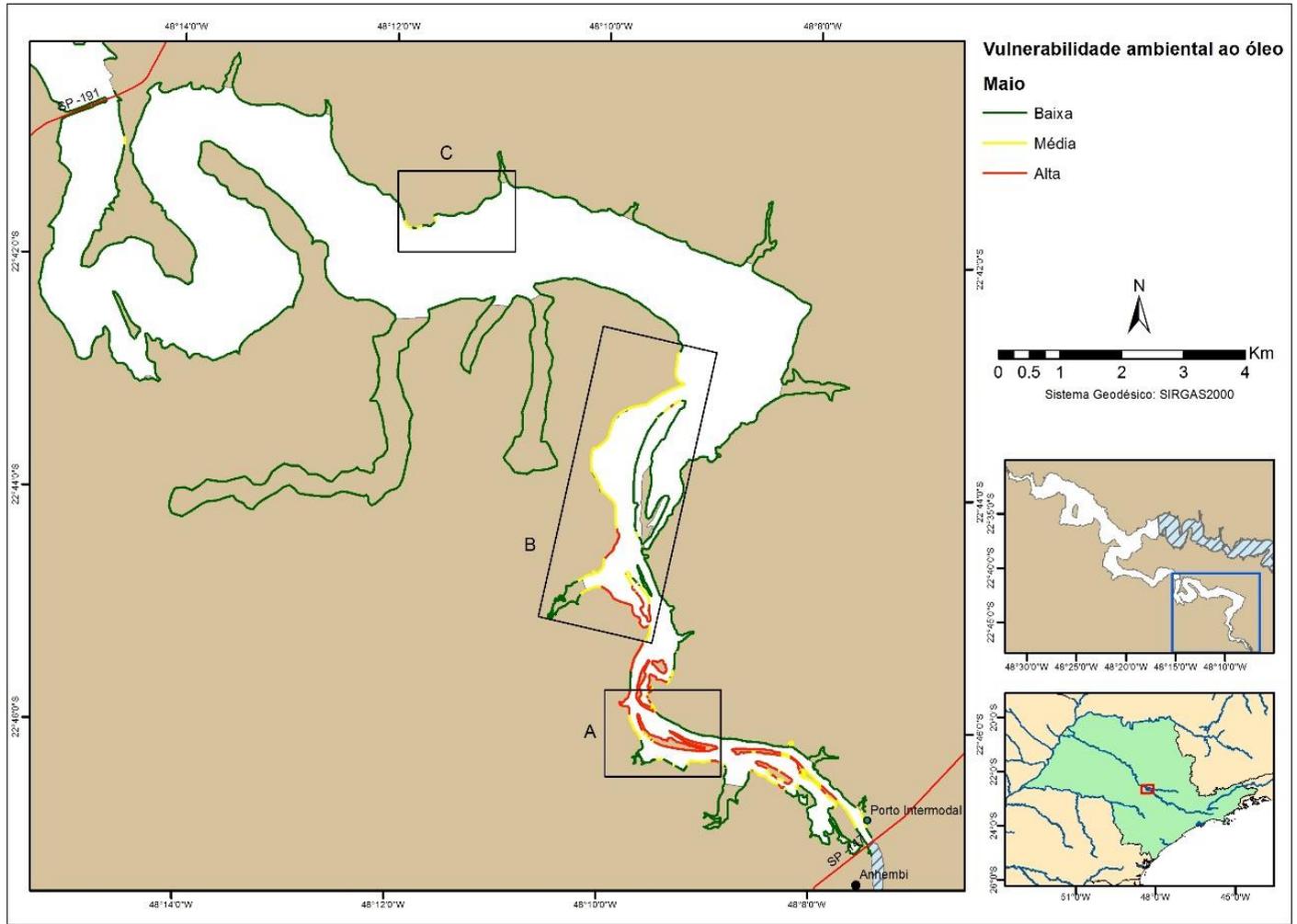
Neste cenário, em que a simulação foi realizada considerando o mês de maio e suas condicionantes, a vulnerabilidade ambiental ao óleo apresentou o resultado mostrado na Figura 57.

As margens classificadas como média vulnerabilidade somaram um total de 13,1 km e as de alta vulnerabilidade foram mapeadas em 15,7 km da área. Com relação à distribuição espacial destas áreas, observa-se que as altas vulnerabilidades estão localizadas mais a montante, na área A e no início da área B, justamente nos locais atingidos pela mancha que apresentam os maiores ISFs (9 e 10), caracterizados principalmente por depósitos aluviais com lagos e substrato lamoso. Estes locais são altamente sensíveis e no mês de maio ficam encobertos com uma lâmina de água, o que aumenta o tempo de contato com o óleo diesel derramado, tornando-os muito vulneráveis.

As áreas de média vulnerabilidade estão mais concentradas na área B e alguns pontos na área A, com ISFs de 4 e 7 respectivamente, indicando margens erosivas seguidas por vertentes e margens com vegetação de porte herbáceo. Apesar de a área B permanecerem em contato com o diesel por mais tempo, o ISF mais baixo condicionou esta área a ter uma vulnerabilidade média. Na área A, o que ocasionou esta classificação de vulnerabilidade foi o baixo tempo de contato com a mancha, mesmo tendo um ISF 7.

Comparando-se estes resultados com os apresentados para o mês de novembro nota-se que houve uma diminuição das margens classificadas como sendo de média vulnerabilidade e um aumento das classificadas como alta vulnerabilidade. Isto está relacionado com as condições de operação da usina hidrelétrica a jusante do reservatório, pois, como já mencionado anteriormente, no mês de maio o reservatório está acumulando água e o seu nível está bastante alto, o que implica em menos água passando pela usina, conseqüentemente a velocidade de escoamento é menor. Desta maneira, o óleo se desloca mais lentamente ao longo do curso d'água e, portanto, permanece por mais tempo nos locais que oferecem maior resistência.

Figura 57 - Índice de vulnerabilidade ambiental fluvial ao óleo para o mês de maio considerando a simulação de derramamento de 36000 L de óleo diesel no porto intermodal de Anhembi.



Analisando os dois cenários, na simulação para o mês em que o reservatório apresenta o nível de água mais baixo (novembro), foram identificadas 9,2 km de áreas de alta vulnerabilidade num raio de 12 km do porto intermodal, localizado em Anhembi, e 20,7 km de média vulnerabilidade em até 15 km de raio do porto. As demais áreas foram consideradas de baixa vulnerabilidade.

Para o mês em que o volume do reservatório está mais elevado (maio), as margens com alta vulnerabilidade somaram 15,7 km, distantes num raio de até 5,8 km do porto e as de média vulnerabilidade foram mapeadas em 13,1 km num raio de 7,3 km do porto.

9. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos a partir do cruzamento da informação da sensibilidade ambiental ao óleo no ambiente fluvial (ISF) com a simulação do deslocamento da mancha de óleo, permitiram identificar as áreas vulneráveis e que necessitam de atenção prioritária em eventuais derramamentos de diesel considerando um acidente de 36000 litros no porto intermodal de Anhembi. Este é o combustível utilizado pelos empurradores de barcaças que trafegam pela importante hidrovia Tietê-Paraná transportando produtos que são estocados e passados para o transporte terrestre no porto intermodal de Anhembi-SP.

Apesar de o porto intermodal ser o local de maior potencial de ocorrência de um acidente, recomenda-se que outros pontos sejam considerados como fontes de derramamento ao longo do reservatório, para que sejam identificadas outras áreas que necessitem de prioridade na contenção do contaminante.

A modelagem computacional, realizada no software SisBahia, foi de fundamental importância na previsão do movimento da mancha de óleo em um possível acidente, pois possibilitou a geração de diferentes cenários, considerando o comportamento típico de vento e precipitação na região para dois meses específicos, baseados em série histórica.

Uma ressalva quanto ao programa SisBahia é que apesar de ser um software gratuito, ele depende de dois outros programas, que são proprietários. Isto dificulta a sua utilização, pois há a necessidade das respectivas licenças.

O índice de sensibilidade ambiental ao óleo para ambiente fluvial considerou apenas as características da geomorfologia fluvial, no entanto, é interessante que se elabore a carta de sensibilidade ambiental (SAO) com as informações socioeconômicas locais e as características biológicas da área. No entanto, ressalta-se que nesta metodologia proposta, é o ISF, parte integrante da carta SAO e ancorado basicamente nas informações geomorfológicas, que é utilizado para a elaboração da vulnerabilidade.

A matriz utilizada para se obter os índices de vulnerabilidade considerou três situações em relação à mancha de óleo, sendo a ausência do óleo, a passagem direta da mancha e a permanência do contaminante por um período de tempo superior a 5% da simulação de 72h. Para trabalhos futuros, é interessante uma análise de caráter biológico, para se especificar quais os limites aceitáveis de tempo de exposição ao contaminante, considerando-se a fauna e a flora locais, de forma a apoiar os ajustes de valores da matriz.

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que os cenários produzidos contém informações relevantes para a elaboração de planos de emergência em casos de derramamento de óleo diesel em corpos d'água interiores, assim como ocorrem na zona costeira com acidentes de outros derivados de petróleo. Desta forma, recomenda-se que mais trabalhos sejam desenvolvidos com o objetivo de aprimorar e padronizar uma metodologia de elaboração de cartas de vulnerabilidade ambiental ao óleo para ambiente fluvial, seja ele lótico ou lêntico.

REFERÊNCIAS

ADMINISTRAÇÃO DA HIDROVIA DO PARANÁ. [2012]. Disponível em: <<http://www.ahrana.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). **Estatísticas da Navegação Interior 2012**. Brasília: ANTAQ, 2013. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/Portal/Estatisticas_NavInterior.asp> Acesso em: 12 set. 2013.

AGUILAR, R. L. **Avaliação da Influência das Características Geomorfológicas na Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo no Baixo Curso do Rio Tietê (SP)**. 2013. [s.n.]. Trabalho de iniciação científica- Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2013.

ALMEIDA, F.F.M. Novas ocorrências de fósseis no pré-cambriano brasileiro. **Anais da Academia brasileira de Ciências**. V.28, n.4, p. 44-45. 1956.

ALMEIDA, F.F.M. Os fundamentos geológicos do relevo Paulista. **Bol. Inst. Geogr. e Geol.** São Paulo, 1964. vol. 41, p. 169-263.

ANDRADE R. C., **Uma nova abordagem para a solução numérica de problemas de advecção e difusão multidimensional em corpos de água naturais**. 2006. 176 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006

ARAÚJO, S. I.; SILVA, G. H.; MUEHE, D. CARVALHO, M. T. M.; MENEZES, P. M. L.; ALCÂNTARA, A. V.; VARGAS, M. A. M.; TAKAHASHI, L. T. **Mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo: ambientes costeiros, estuarinos e fluviais**. Rio de Janeiro: Petrobras: Jauá, 2006. 168p.

ASCE- American Society of Civil Engineers. State-of-the art Review of Modeling Transport and Fate of Oil Spills. **Journal of Hydraulic Engineering**. v. 122.n.11.p594-604, 1996.

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima do Ceará e Potiguar**. Brasília, 2004. 58 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima de Santos**. Brasília, 2007. 124 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima do Espírito Santo**. Brasília, 2012. 80p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. **Atlas de sensibilidade ambiental ao óleo da Bacia Marítima da Bahia**. Brasília, 2012. 118p.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº398**, de 11 de junho de 2008. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, originados em portos organizados, instalações portuárias, terminais, du. . [S.l.]: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2008.

CAETANO-CHANG, M.R., WU, F.F. Diagênese de arenitos da Formação Pirambóia no Centro Este Paulista. **Geociências**, v. 22, N. Especial, p. 33-47, 2003

CARVALHO, F.T.; GALO, M.L.B.T.; VELINI, E.D. and MARTINS, D.. Plantas aquáticas e nível de infestação das espécies presentes no reservatório de Barra Bonita, no rio Tietê. **Planta daninha**. 2003, v.21, n.spe, p. 15-19.

CIGAGNA, C, BONOTTO, D.M., STURARO, J.R. Batimetria e estudo de parâmetros morfométricos do reservatório da floresta estadual “Edmundo Navarro De Andrade” (FEENA) Rio Claro/SP. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 33, n. 4, p.720-732, 2014

COSTA, F.H.S, PETTA, R.A., LIMA, R.F.S., MEDEIROS, C.N. Determinação da vulnerabilidade ambiental na bacia Potiguar, região de Macau (RN), utilizando sistemas de informações geográficas. **Revista brasileira de Cartografia** n. 58/02, p.119- 127, 2006.

CUNHA, C. M. L. **A Cartografia do Relevo no Contexto da Gestão Ambiental**, 2001. 128f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001

FACINCANI, E.M. **Morfotectônica da Depressão Periférica Paulista e Custas Basálticas: regiões de São Carlos, Rio Claro e Piracicaba.** 2000. 222p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2000.

FAY, J. A. Oil on the Sea. **Plenum Press**, New York-London, 1969. 114p.

FAY, J. A., Physical Processes in the Spread of Oil on the Water Surface, **Plenum Press**, New York. 1971.

FERNANDES, R. M. **Modelação de Derrames de Hidrocarbonetos.** Dissertação (Engenharia do Ambiente), 2001.

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.** v. 12, n. 2, p. 61-72, 2008.

FINGAS, M. Introduction to spill modeling. In: _____. **Oil spill science and technology: prevention, response, and clean up.** Elsevier, 2010. 187-200.

GOBBI, E. F. **Um modelo auto-ajustável para turbulência na escala sub-malha.** 1991. [s.n.] Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

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

HAYES, M. O.; MICHEL, J.; DAHLIN, J. A.; BARTON, K. Identifying and mapping sensitive resources for inland area planning. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE, **Proceedings...** p. 365-371, 1995.

HAYES, M. O.; MICHEL, J.; MONTELLO, T. M. The reach sensitivity index (RSI) for mapping river and streams. In: INTERNATIONAL OIL SPILL CONFERENCE. **Proceedings...** p. 343-350. 1997.

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

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1981a.

IPT. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. 2v.

ITOPF. **Fate of Marine Oil Spills. Technical Information Paper**. London, UK. n 2, 2002. Disponível em: <www.itopf.com>. Acesso em 02 set. 2013.

KREBS, A.S.J. **Contribuição ao conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos da área correspondente à bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, SC**. 2002. 1 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise variográfica com o variowin: lab. geomatemática**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2004. 25 p. Texto didático. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/Variowin.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2013.

LEACOCK, E. **The Exxon Valdez oil spill**. Environmental Disasters. New York: Facts On File, Inc. 2005. 100p.

LEHR et al. Revisions of the ADIOS oil spill model. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, p. 191-19, 2002.

LEITÃO, P. M. C. F. L., **Modelo de Dispersão Lagrangeano Tridimensional**. Lisboa, 1996.130 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – setor Oceanografia, Universidade Técnica de Lisboa.

LOURENCO, R. W., LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, Feb. 2005 .

MENDOZA-CANTÚ, A.; HEYDRICH,S.C.; CERVANTES, I.S.; OROZCO, O.O. Identification of environmentally vulnerable areas of priority of prevention and

management of pipeline crude oil spills. **Journal of Environmental Management**. v. 92, 2011. p.1706-1713.

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

MONTEIRO, C. A. de F. **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto de Geografia, 1973. 129 p

MORTATTI, J. et al. Hidrologia dos rios Tietê e Piracicaba: series temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2004.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **An Introduction to coastal habitats and biological resources for oil spill response**. NOAA Technical Memorandum NOS ORCA 115. Seattle: Hazardous Materials Response and Assessment Division. 2002.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Oil Spill case histories 1967-1991: Summaries of Significant U.S. and International Spills**. Report N. HMRAD 92-11.141 Seattle, Washington, 1992 . Disponível em: <http://response.restoration.noaa.gov/book_shelf/26_spilldb.pdf>. Acesso em 15 mai. de 2013.

OLITA, A., CUCCO, A., SIMEONE, S., RIBOTTI, A., FAZIOLI, L. SORGENTE, B. SORGENTE, R. Oil spill hazard and risk assessment for the shorelines of a Mediterranean coastal archipelago. **Ocean & Coastal Management**. United Kingdom, v. 57, n. 1, p. 44-52, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.11.006> . Acesso em: 24 fev 2013.

PALADINO, E.E. **Modelagem Matemática e Simulação Numérica de Trajetórias de Derrames de Petróleo no Mar**. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

PEREIRA, M. M. R. **Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas**. 2004, 118 f. Tese (Doutorado em Ciências - Área: Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

PEREZ FILHO, A, QUARESMA, C.C., ESPÍNDOLA, C.R, RODRIGUES, T.R.I., Geomorfologia antropogenética: reativação da rede de drenagem e processos erosivos relacionados à construção civil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** 2006.

PEREZ FILHO, A., SOARES, P. R.B., ESPÍNDOLA, C.R., Processos erosivos e reativação de canais de drenagem no planalto ocidental paulista. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 19. 2001, Recife. **Anais...** Universidade Federal de Pernambuco,. v.1. p. 84-85.

PETRI, S., FULFARO, V. J. **Geologia do Brasil (Fanerozóico)** - São Paulo: T. A. Queiroz - Ed. da Universidade de São Paulo. 1983

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade 2010. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/rs2010/pt/relatorio-de-sustentabilidade/desempenho-operacional/balanco-de-nossas-atividades/transporte/>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

REED, M. et al. Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of State of the Art. **Spill Science & Technology Bulletin**, v.5, n. 1, p.3-16, 1999.

RODRIGUES, T.R.I., **Influência de reservatórios hidrelétricos na gênese e evolução da rede de drenagem no baixo curso do Rio São José dos Dourados (SP)**. 2006. [s.n.]. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP, 2007.

ROMERO, Á. F. **Mapa de vulnerabilidade ambiental ao óleo e cartas SAO. Trecho: Praia Grande- Ilha Comprida, litoral paulista**. p. 203. Universidade Estadual Paulista-UNESP - Rio Claro. 2009.

ROMERO, A.F., ABESSA, D.M.S, FONTES, R.F.C., SILVA, G.H. Integrated assessment for establishing an oil environmental vulnerability map: Case study for the Santos Basin region, Brazil. **Marine Pollution Bulletin**. United Kingdom, v. 74, n. 1, p. 156-164, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.012>. Acesso em: 24 fev 2013.

ROSMAN, P. C. C. **Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**, Rio de Janeiro, 2013. Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica. Disponível em: <http://www.SisBaHiA.coppe.ufrj.br/SisBaHiA_RefTec_V92.pdf>. Acesso em: 10/04/2013.

ROSMAN, P.C.C., GOBBI, E. F. A Self-Adjusting Subgrid “Turbulence” Model for Shallow Water Flow. In: CONGRESSO LATINO IBERO AMERICA-NO SOBRE MÉTODOS COMPUTACIONAIS PARA ENGENHARIA, 19. 1990. Rio de Janeiro.

SANTIAGO, D. I. **Aplicação de um Modelo Lagrangiano de Trajetória de Partículas para a modelagem da Dispersão em Águas Rasas e Simulação da Dispersão no Canal de Acesso ao Porto de Vitória.** 2007. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

STEELE et al. Oil in the Sea: Inputs, Fates, and Effects. Washington, D.C.: **National Academy Press.** 1985.

STURARO, J. R. & LANDIM, P. M. B. 1988, Estudo do Nível Piezométrico pela Análise Geoestatística. **Revista Geociências.** São Paulo:, v.2, p. 201-210.

SUGUIO, K., BIGARELLA, J. J. Ambientes fluviais. Florianópolis: UFSC, 1990. 181p.

WANG, S.D., SHEN, Y.M., ZHENG, Y.H. Two-dimensional numerical simulation for transport and fate of oil spills in seas. **Ocean Engineering**, v.32, p.1556-1571, 2005.

WALTER, R. J. **Local emergency planning committee guidebook: understanding the EPA risk management program rule.** New York: American Institute of Chemical Engineers, 1998.

WIECZOREK, A. **Mapeamento de sensibilidade a derramamentos de petróleo do parque estadual da Ilha do Cardoso (PEIC) e áreas adjacentes.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2006.

YAMAMOTO, J.K, LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 215 p.

APÊNDICE A – Ficha de campo para o mapeamento do índice de sensibilidade ambiental ao óleo em ambiente fluvial.



**LEVANTAMENTO DE CAMPO
ELABORAÇÃO DE MAPAS DE SENSIBILIDADE ÁREAS FLUVIAIS**



Data: ___/___/___ Turno: _____ Segmento _____ Articulação: _____

Waypoint Inicial: _____ Final: _____ Coordenadas (iniciais): N: _____ E: _____

• **SEGMENTO:** MARGEM DO RIO ENSEADA (FURNA) OUTRO _____

• **CARACTERÍSTICA:** confluência canal entre rios e lagos dique braço rio açude

Outra: _____

• **FEIÇÃO:**

1. **Barranco NÃO vegetado:** baixa decliv. média decliv. alta decliv. | cascalho / seixos areia

2. **Barranco vegetado:** baixa decliv. média decliv. alta decliv.

Mata de terra firme Floresta de várzea Capoeira Veg. Arbustiva Veg. Herbácea Gramínea Cultivo: _____

Outro: _____

3. **Barranco rochoso vegetado:** baixa decliv. media decliv. alta decliv. | compacto fragmentado matacões

4. **Barranco rochoso NÃO vegetado:** baixa decliv. media decliv. alta decliv. | compacto fragmentado matacões

5. **Baixil lodoso vegetado**

6. **Baixil lodoso NÃO vegetado**

7. **Barra de lagoa** | rasa média funda

8. **Banco de macrófitas** -> **Tipo de macrófita:** _____

FOTOS:

• **RETRO ÁREA:**

Mata de terra firme Capoeira Floresta de várzea Banco de macrófitas aquáticas Gramínea/ campo

- () Vegetação arbustiva () Vegetação alagada () Cultivo / plantação _____ () Barranco
 () Outro: _____

FOTO: _____

• **ÁGUA- MARGEM:**

Coloração da água: _____ Transparência da água: _____

• **AVES:**

Garça branca Garça Moura Socó Socó Cinza Maguari Tuiuiu Jaçanã Carcará Cabeça Seca Colhelheiro Marreco Baturi

Pássaro Preto Quero-Quero Maçarico Maçarico Cinza Batuira Biguá Frango d'água Tatuira Iguá Andorinha Martim-Pescador

Outra: _____

FOTO: _____

• **ELEMENTOS BIOLÓGICOS (outros animais):**

• **IMPACTOS ANTRÓPICOS:**

- | | | | | |
|------------------------------------|--------------------|------------------------------|------------------|--------------|
| 1- Lixo | 2- Mineração; | 3- Queimada; | 4- aterro; | 5- dragagem; |
| 6- Lançamento de esgoto doméstico; | 7- Porto de areia; | 8- Plantações / agrotóxicos; | 9- Desmatamento; | |

- **BÓIAS:**

- **ANOTAÇÕES:**

ANEXO A – Tabela de feições

Organização: Guilherme Otávio Gallo

<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>1</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>2</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>3</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>4</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>5</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>6</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>7</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>8</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>9</p>	<p>Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto</p> <p>10</p>
Páginas 4, 5 e 6	Páginas 7 e 8	Páginas 9 e 10	Página 11	Páginas 12 e 13	Páginas 14 e 15	Páginas 16 e 17	Página 18	Páginas 19 a 23	Páginas 24 a 28

Localização de Feições por Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo

Margens com Paredões Rochosos (rocha sólida)

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

1

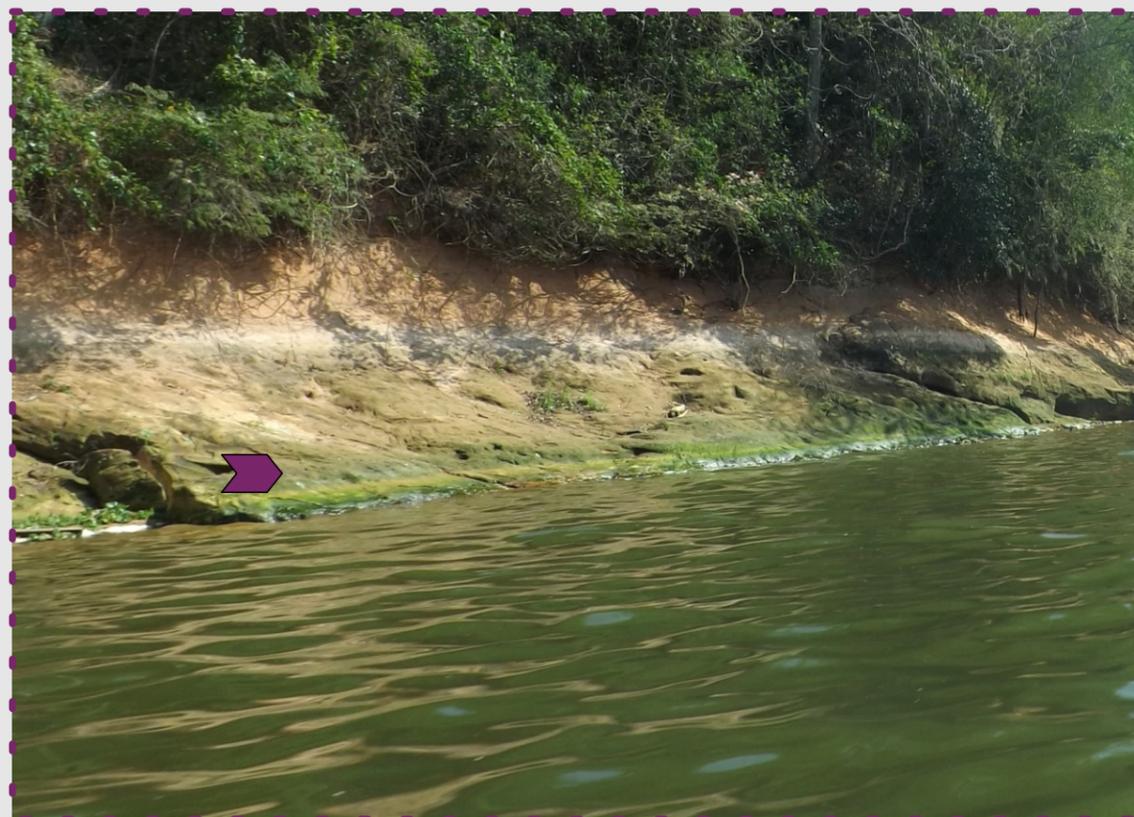


Ilustração da Feição

Margens com Paredões Rochosos (rocha sólida)

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens com paredões rochosos (rochas sólidas)	1	Linhas de cor roxa 	119	38	105	1a - Bancos rochosos expostos		1a - Margens rochosas expostas	

Margens Construídas (paredões concretados)



Ilustração da Feição

Margens Construídas
(paredões concretados)

Índice de Sensibilidade
Fluvial ao Óleo Proposto

1

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens construídas com paredões concretados	1	Linhas de cor roxa 	119	38	105		1 - Estruturas Artificiais	1b - Vertical, revestimentos sólidos	



Ilustração da Feição

Pontes

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Pontes	1	Linhas ou pontos (a depender da escala) de cor roxa 	119	38	105		1 - Estruturas Artificiais	1b - Vertical, revestimentos sólidos	

Margens com Paredões Rochosos (rocha fraturada ou estratificada)



Ilustração da Feição

Margens com Paredões Rochosos
(rocha fraturada ou estratificada)

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

2

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens com paredões rochosos (rochas fraturadas ou estratificadas)	2	Linhas de cor violeta 	174	153	191	1a - Bancos rochosos expostos		1a - Margens rochosas expostas	

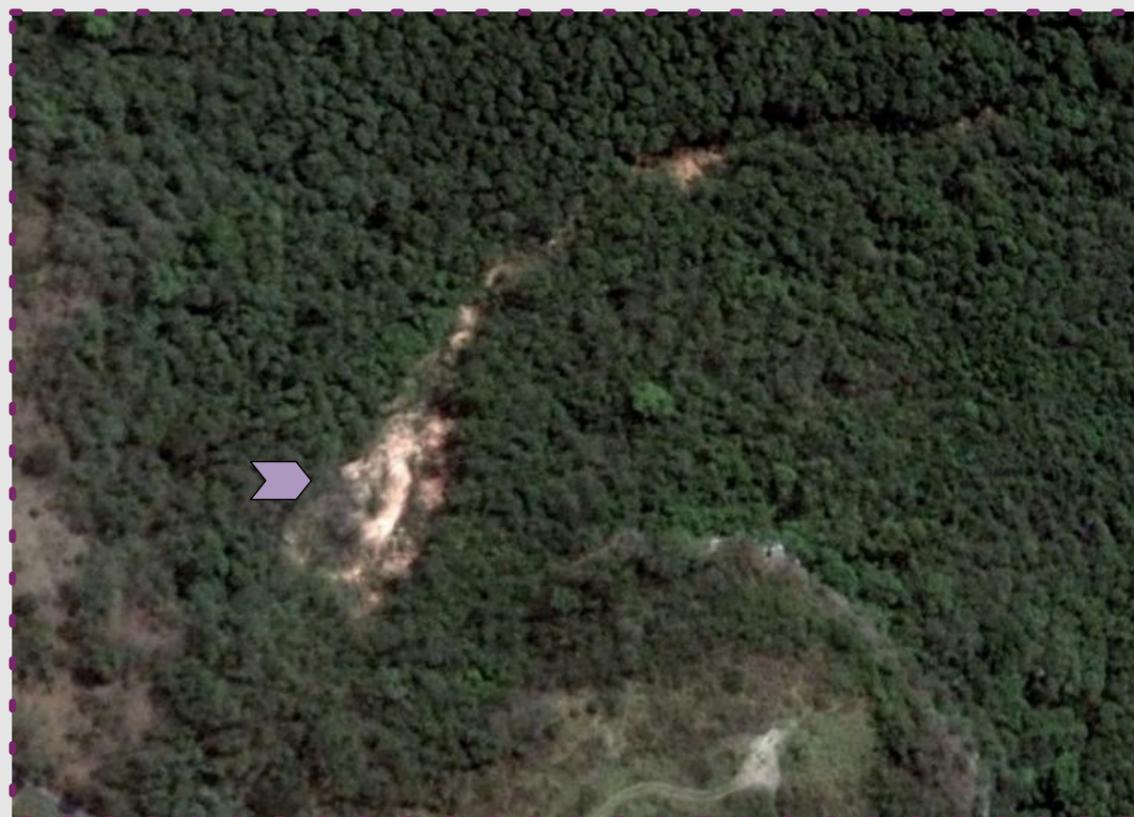


Ilustração da Feição

Soleiras Fluviais com Cachoeiras

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Soleiras Fluviais com cachoeiras	2	Pontos de cor violeta 	174	153	191	2- Bancos de rochas, lajes de leito rochoso	3- Corredeira e/ou cachoeira	2- Obstáculos rochosos, saliências rochosas	5- Canal navegável com rápidos sobre rochas 4- para canais não navegáveis

Margens Erosivas seguidas por Terraços (com meandros ou lagos sobre o terraço)



Ilustração da Feição

Margens Erosivas seguidas por Terraços (com meandros ou lagos sobre os terraços)

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

3

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens erosivas seguidas por terraços (com meandros ou lagos sobre o terraço)	3	Linhas de cor azul escuro 	0	151	212	3- Margens erodidas em sedimentos inconsolidados	4- Escarpa ou barranco	3 - Margens erosivas em sedimentos inconsolidados	



Ilustração da Feição

Soleiras Fluviais com Rápidos

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Soleiras Fluviais com Rápidos	3	Linhas ou pontos (a depender da escala) de cor azul escuro 	0	151	212	2- Bancos de rochas, lajes de leito rochoso	2- Laje ou afloramento rochoso	2- Obstáculos rochosos, saliências rochosas	5- Canal navegável com rápidos sobre rochas 4- para canais não navegáveis

Margens Erosivas seguidas por Vertentes

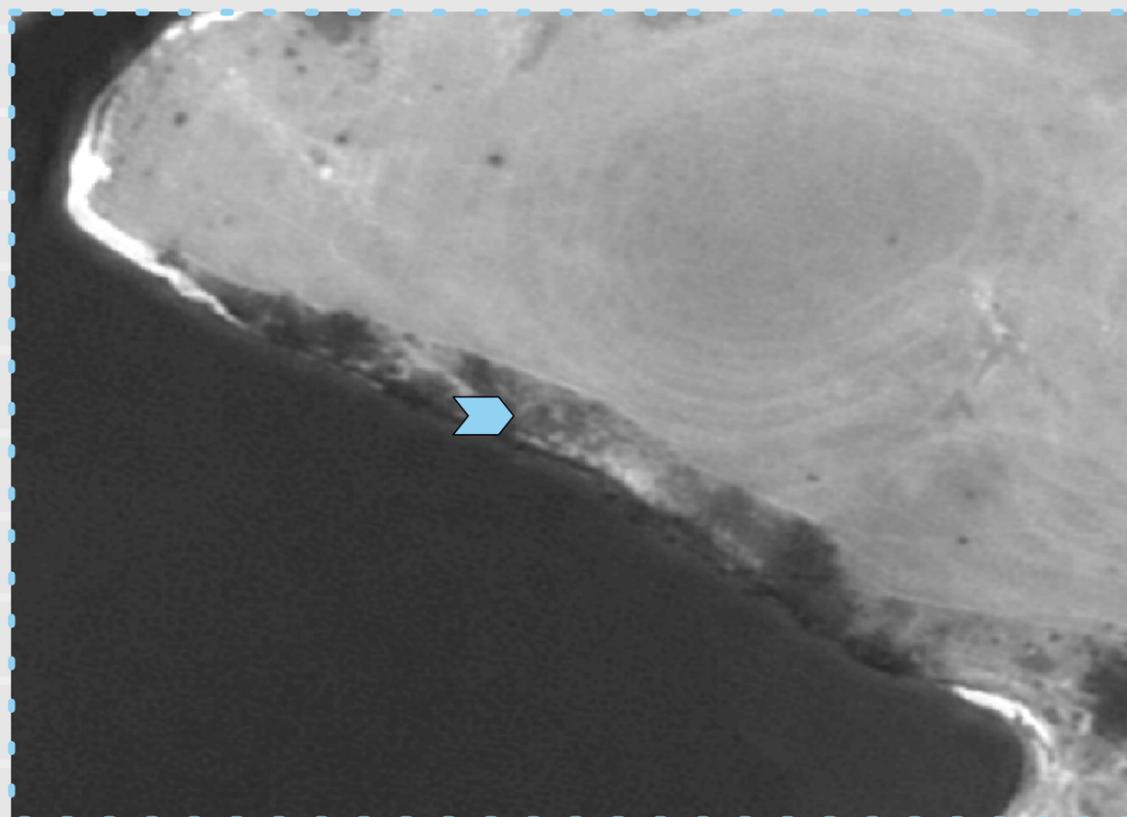


Ilustração da Feição

Margens Erosivas seguidas por Vertentes

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

4

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens erosivas seguidas por vertentes	4	Linhas de cor azul claro 	146	209	241		4- Escarpa ou barranco		

Margens Depositionais
com Areia
(Praias Fluviais)

Índice de Sensibilidade
Fluvial ao Óleo Proposto

5



Ilustração da Feição

Margens Depositionais com Areia (Praias Fluviais)

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens deposicionais com areia (praias fluviais)	5	Linhas de cor verde piscina	152	206	201	4- Bancos de areia e bancos de baixa declividade 5- Praias mistas de areia e cascalho de baixa declividade 6- Praia de cascalho de baixa declividade	5- Praia ou banco de areia/seixo exposta 6- Praia ou banco de areia/seixo abrigada 7- Praia ou banco de lama exposto 8- Praia ou banco de lama abrigado	4- Barras de areia e margens de baixa declividade 5- Barras mistas de areia e seixos e margens de baixa declividade 6a- Barras de seixos e margens de baixa declividade	

Margens com Cobertura Agrícola

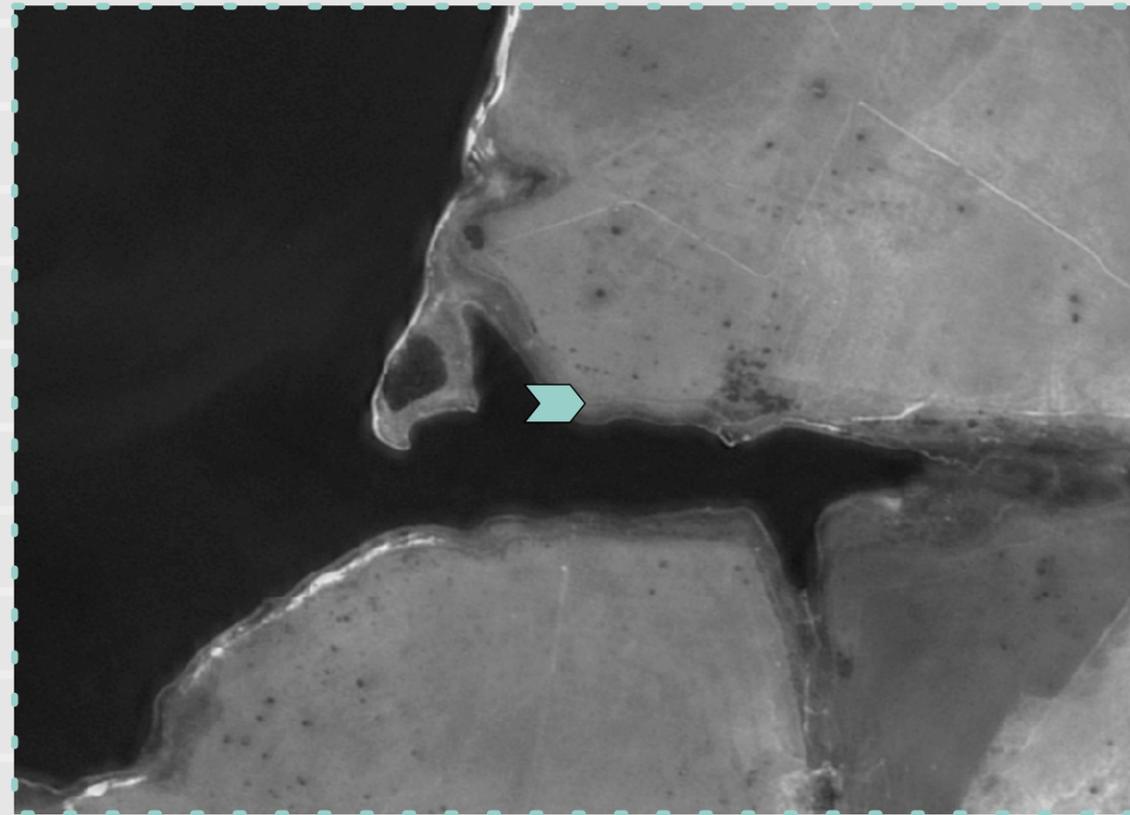


Ilustração da Feição

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens com cobertura agrícola	5	Linhas de cor verde piscina 	152	206	201				



Ilustração da Feição

Margens Depositionais com Cascalho (Praias Fluviais)

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens deposicionais com cascalho (praias fluviais)	6	Linhas de cor verde mata 	0	149	32	4- Bancos de areia e bancos de baixa declividade 5- Praias mistas de areia e cascalho de baixa declividade 6- Praia de cascalho de baixa declividade	5- Praia ou banco de areia/seixo exposta 6- Praia ou banco de areia/seixo abrigada 7- Praia ou banco de lama exposto 8- Praia ou banco de lama abrigado	4- Barras de areia e margens de baixa declividade 5- Barras mistas de areia e seixos e margens de baixa declividade 6a- Barras de seixos e margens de baixa declividade	

Enrocamentos



Ilustração da Feição

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Enrocamentos	6	Linhas de cor verde mata /	0	149	32	6b- Enrocamentos		6b- Enrocamentos	

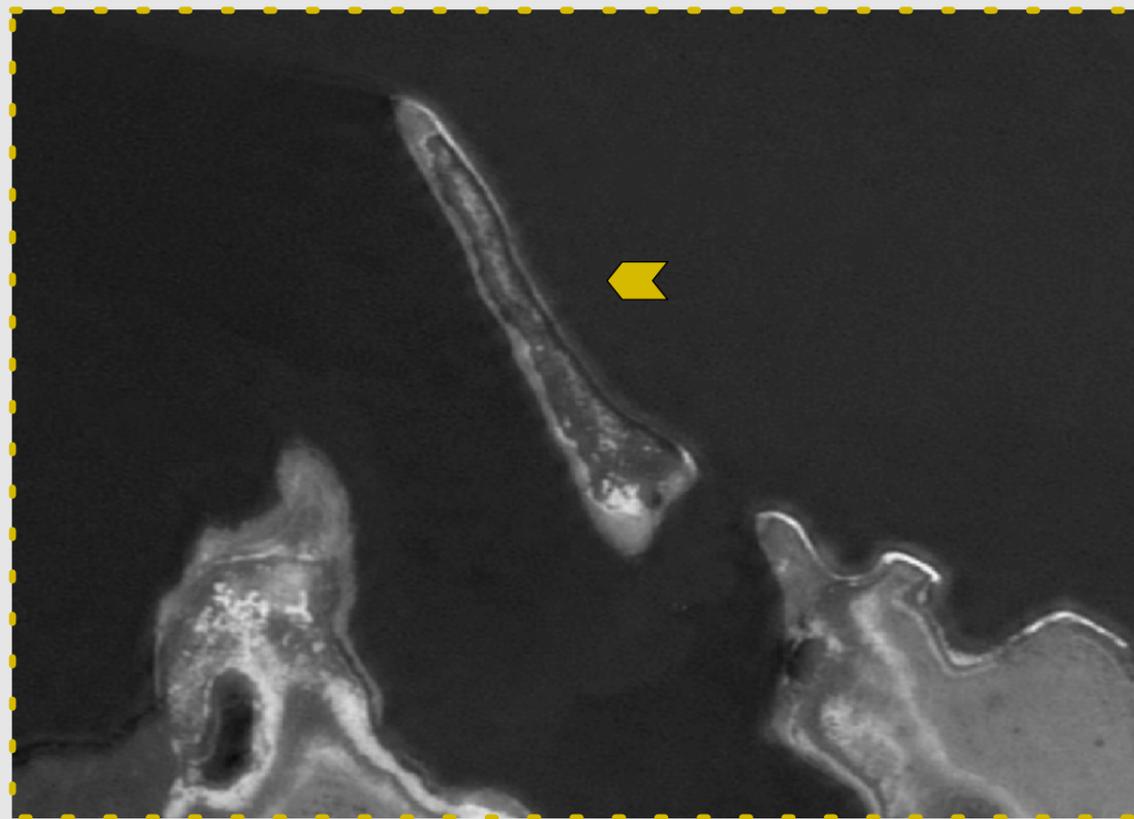


Ilustração da Feição

Ilhas Fluviais

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Ilhas Fluviais	7	Polígonos de cor ocre ■	214	186	0				

Margens com Vegetação de Porte Herbáceo



Ilustração da Feição

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens com vegetação de porte herbáceo	7	Linhas de cor ocre 	214	186	0				



Ilustração da Feição

Margens com Vegetação de Porte Arbustivo

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Margens com vegetação de porte arbustivo	8	Linhas de cor amarela 	225	232	0				

Dique Fluvial seguido por Terraços Fluviaes ou Vertentes

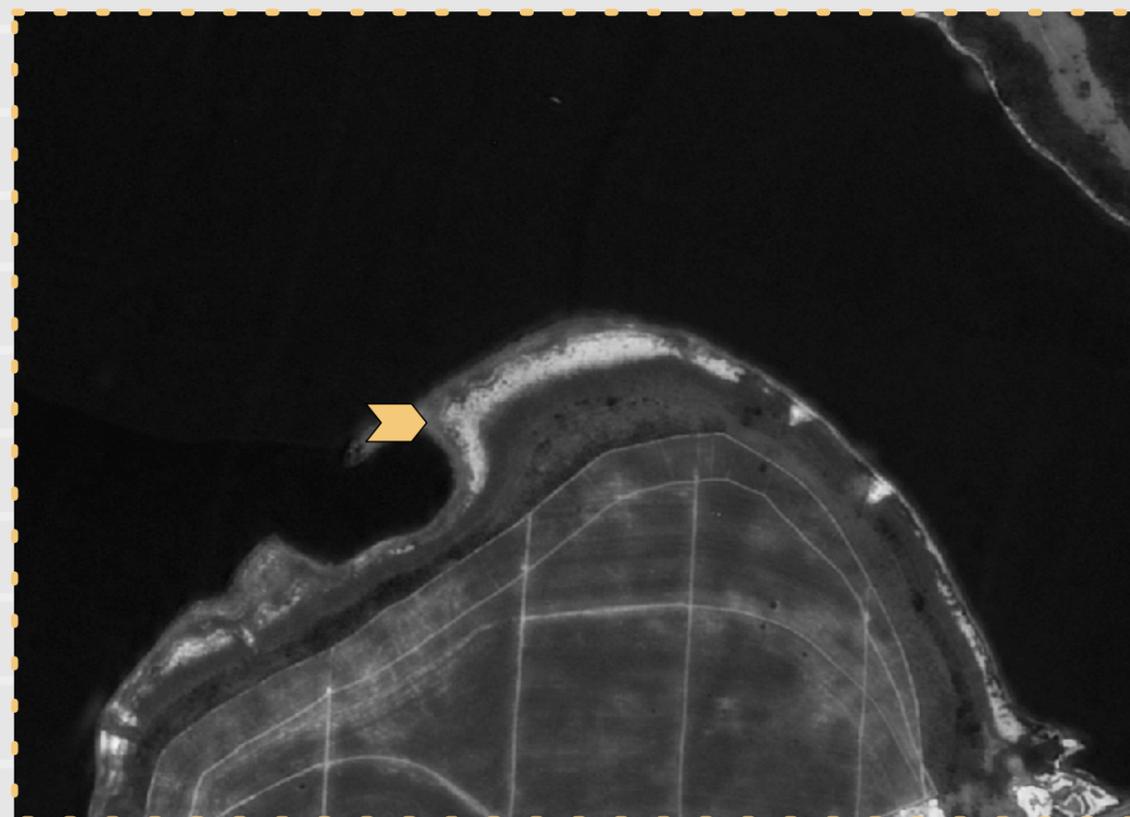


Ilustração da Feição

Dique Fluvial seguido por Terraços Fluviaes ou Vertentes

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

9a

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Dique fluvial seguido por terraços fluviaes ou vertentes	9a	Polígonos de cor laranja 	245	202	122				



Ilustração da Feição

Dique Fluvial seguido por Planícies Aluviais

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Dique fluvial seguido por planícies aluviais	9b	Polígonos de cor laranja ■	222	145	36				

Barras de Meandro

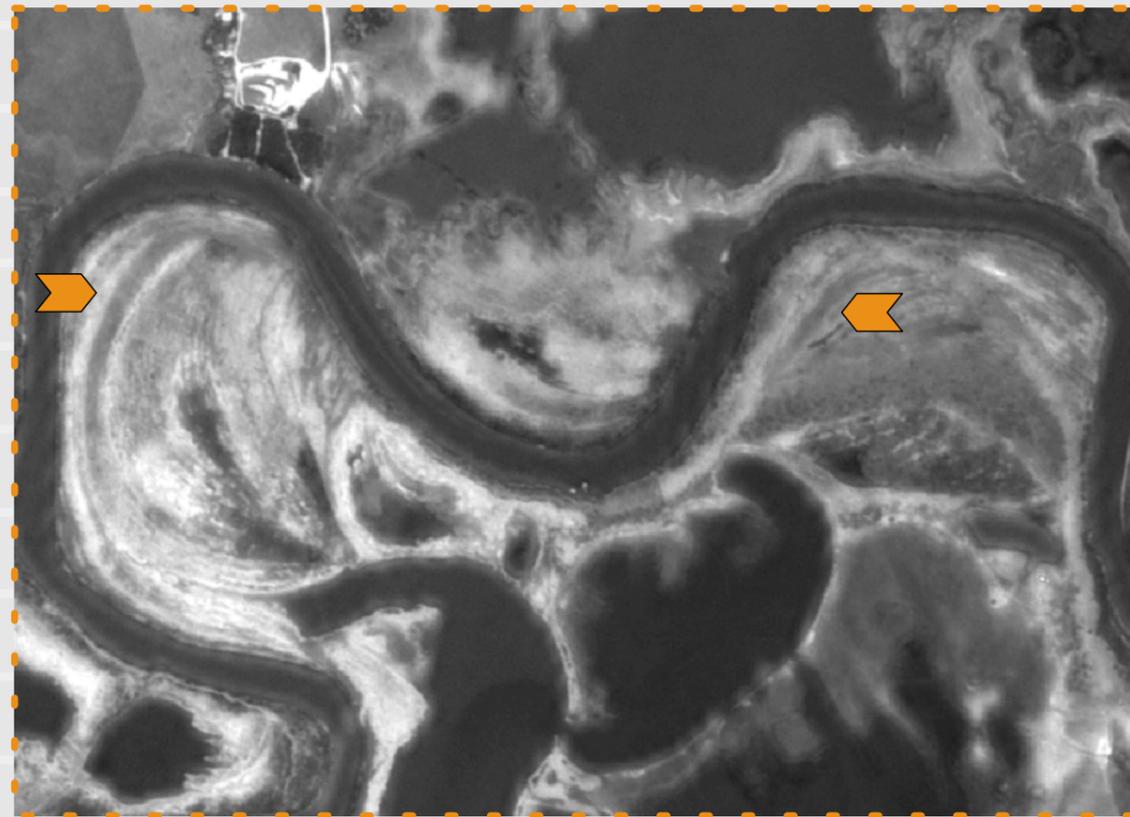


Ilustração da Feição

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Barras de meandro	9c	Polígonos de cor laranja 	235	143	23				9a ou b-canal meandrante (se navegável 9a, se não navegável 9b) com lagos de meandro e oxbow (meandros abandonados)

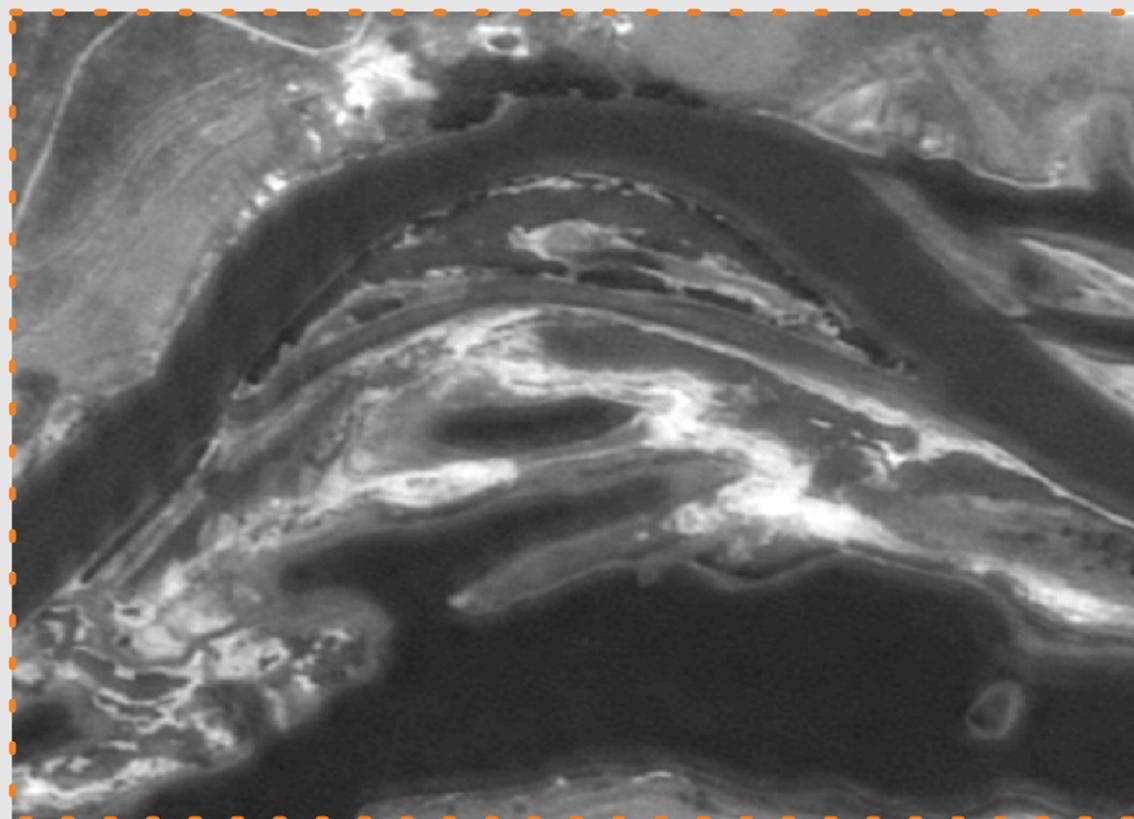


Ilustração da Feição

Barras de Meandro Alagadas

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Barras de meandro alagadas	9d	Polígonos de cor laranja 	245	129	30	10c- pântanos de água doce (vegetação herbácea) 10d- pântanos de água doce (vegetação de mata)	10b- vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo, etc)	10c e d- pântanos de água doce	9a ou b- canal meandrante (se navegável 9a, se não navegável 9b) com lagos de meandro e oxbowl (meandro abandonado)

Confluências com Coalescência de Planícies Fluviais

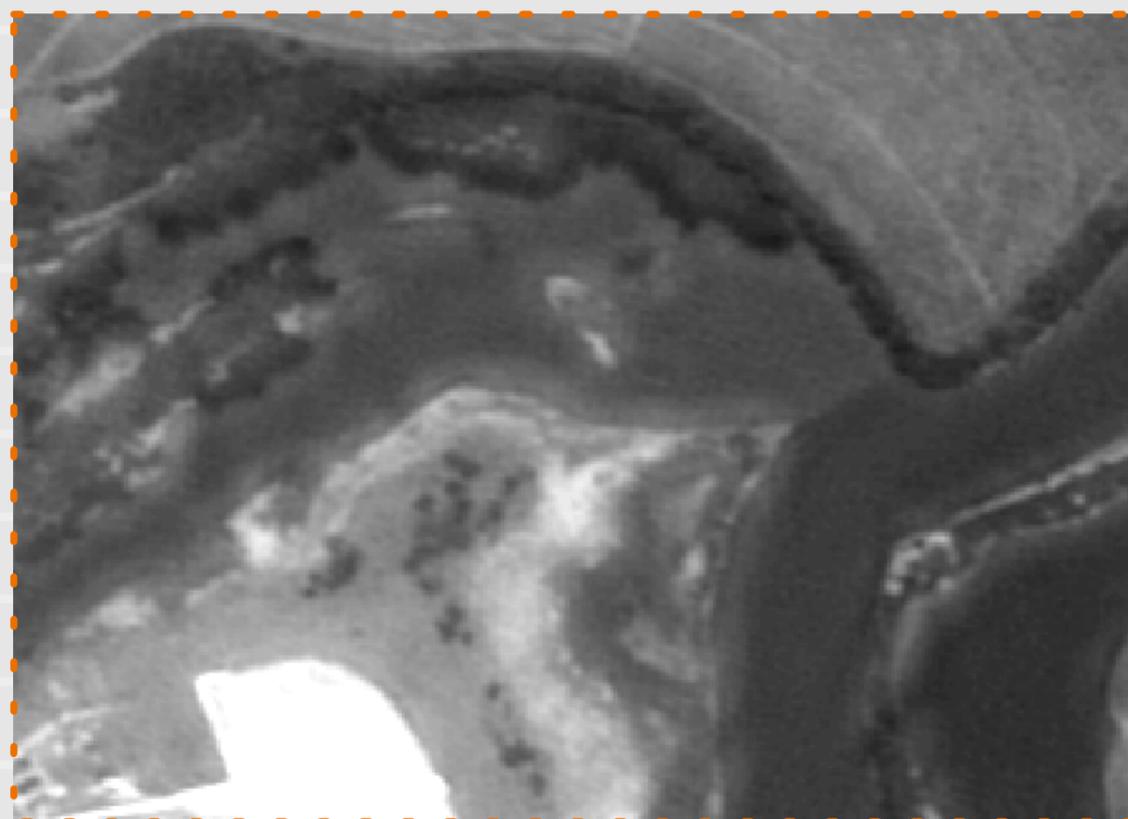


Ilustração da Feição

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Confluências com coalescência de planícies fluviais	9e	Pontos de cor laranja ●	235	112	0	10c ou 10d- pântanos de água doce	9- zona de confluência entre rios e lagos		

Banco de Macrófitas
(aquáticas)

Índice de Sensibilidade
Fluvial ao Óleo Proposto

10
a



Ilustração da Feição

Banco de Macrófitas (aquáticas)

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Banco de macrófitas aquáticas	10a	Linhas e pontos (a depender da escala) de cor vermelha 	255	0	0		10a - Banco de macrófitas aquáticas		

Depósitos Aluviais com Meandro Abandonado

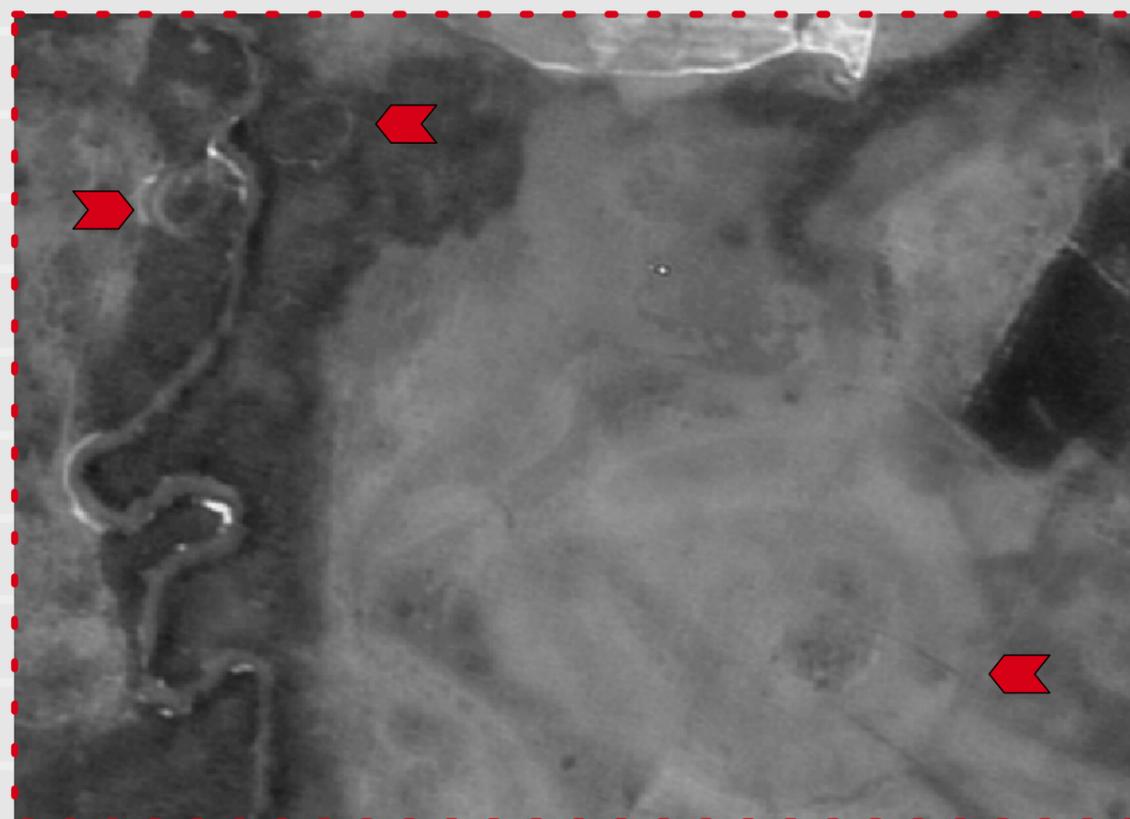


Ilustração da Feição

Depósitos Aluviais com Meandro Abandonado

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

10
a / b

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Depósitos (planícies) aluviais (incluindo com meandro abandonado)	10a (cobertura herbácea)	Polígonos de cor vermelha ■	255	0	0				
	10b (cobertura arbórea)	Polígonos de cor vermelha ■	176	6	14		10b- Vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo etc.)	10c ou d- Pântanos de água doce	9a ou b- canal meandrante (se navegável 9a, se não navegável, 9b) com lagos de meandro e oxbowl (meandros abandonados)

Depósitos Aluviais
(leque aluvial)

Índice de Sensibilidade
Fluvial ao Óleo Proposto

10
a / b



Ilustração da Feição

Depósitos Aluviais (leque aluvial)

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Depósitos (planícies) aluviais (incluindo áreas de leque aluvial, além das planícies)	10a (cobertura herbácea)	Polígonos de cor vermelha ■	255	0	0	10c -Pântanos de água doce (vegetação herbácea)	10a - Banco de macrófitas aquáticas		8 - Navegável Baixo gradiente e variável corrente, com escoamento confinado a canal relativamente reto e margens bem definidas. Extensas e baixas várzeas.
	10b (cobertura arbórea)	Polígonos de cor vermelha ■	176	6	14	10d -Pântanos de água doce (vegetação de mata) 9a - Bancos de vegetação herbácea	10b - Vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo etc.)	10 c / d Pântanos de água doce	

Substrato Lamoso



Ilustração da Feição

Substrato Lamoso

Índice de Sensibilidade Fluvial ao Óleo Proposto

10b

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA				BIBLIOGRAFIA			
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Substrato Lamoso	10b	Linhas e pontos (a depender da escala) de cor vermelha 	176	6	14	10b- Substrato lamoso não vegetado			

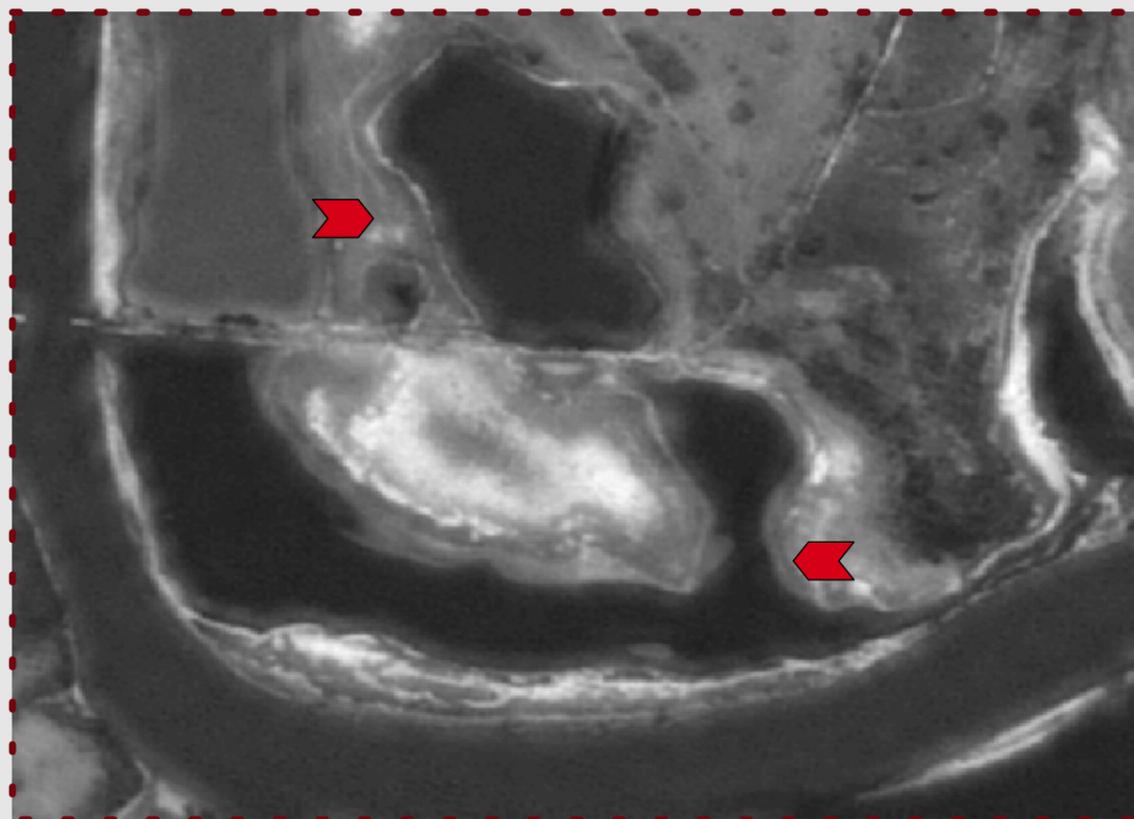


Ilustração da Feição

Depósitos Aluviais com Lagos

FEIÇÕES MAPEADAS	ÍNDICE PROPOSTO	LEGENDA			BIBLIOGRAFIA				
		Descrição	R	G	B	Michel et al. (1994, p. 30)	Araújo (2006, p. 39)	Hayes, Michel e Dahlin (1995)	Hayes, Michel, Montello (1997, p. 347)
Depósitos (planícies) aluviais (incluindo com lagos (várzea e/ou lagos de meandros))	10c	Polígonos de cor vermelha ■	117	6	12		10b - Vegetação alagada (igapós, várzea, chavascal, campo etc.)	10c ou d Pântanos de água doce	9a ou b-canal meandrante (se navegável 9a, se não navegável, 9b) com lagos de meandro e oxbowl (meandros abandonados)

Bibliografia

ARAUJO, S. I.; SILVA, G. H. ; MUEHE, D. *Mapas de Sensibilidade Ambiental a Derrames de Óleo*. 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006. 166p.

HAYES, M.O.; J. MICHEL; J.A. DAHLIN. *Identifying and mapping sensitive resources for inland area planning*. Proc. 1995 Intl. Oil Spill Conference, API Publ. No. 4620, American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 365-371

HAYES, M.O.; J. MICHEL; T.M. MONTELLO. *The Reach Sensitivity Index (RSI) for mapping rivers and streams*. Proc. 1997 International Oil Spill Conference, API Publ. 4651, American Petroleum Institute, Washington, D.C., pp. 343-350..

MICHEL, J.; M.O. HAYES; J.A. DAHLIN; K. BARTON. *Sensitivity mapping of inland areas technical support to the Inland Area Planning Committee working group*, USEPA Region 5. Hazardous Materials Response and Assessment Division, NOAA, Seattle, WA, HAZMAT Report 95-4, 1994, 54 pp