

Capítulo 3

Metodologia de Análise de Vulnerabilidade de Manguezais
ao óleo

Autores do Capítulo

Núcleo de Estudos em Geoquímica e Ecologia Marinha Costeira - UERJ

Ma. Carla Muniz Sabino

Dr. Filipe de Oliveira Chaves

Dr. Mário Luiz Gomes Soares

Prooceano

Me. Gabriel Vieira de Carvalho

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini

Laboratório de Pesquisa em Monitoramento Ambiental Marinho - UFPA

Prof. Dr. Marcelo Rollnic

Dra. Thaís Angélica da Costa Borba

Colaboradores

Me. Alex Alves

Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Bel. Lucas Silva Pereira

Ma. Maria Rita Olyntho Machado

Dra. Paula Maria Moura de Almeida

Dr. Rafael Silva de Barros

Ma. Ângela Carolina Cidon Mascarenhas

Coordenação Científica do Projeto Costa Norte

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz –
ESPAÇO/UFRJ

Prof. Dr. Filipe de Oliveira Chaves -
NEGEMC/UERJ

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –
PROOCEANO

Prof. Dr. Luiz Paulo de Freitas Assad –
LAMCE/UFRJ

Prof. Dr. Marcelo Rollnic – LAPMAR/UFPA

Prof. Dr. Mário Luiz Gomes Soares -
NEGEMC/UERJ

Coordenação Geral do Projeto

Ma. Maria Eduarda Pessoa- ENAUTA

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini –
PROOCEANO

Bela. Anne Goni Guedes - ENAUTA

Bela. Dyellen Soares Queiroz – ENAUTA

Coordenação de Comunicação do Projeto

Frederico Luna Rinaldi - PROOCEANO

Rebeca Kiperman – ENAUTA

Citação Sugerida

SOARES, M.L.G., CARVALHO, G.V., SABINO, C.M., CHAVES, F.O., BORBA, T.A.C., ROLLNIC, M., PELLEGRINI, J.A.C. “Metodologia de Análise de Vulnerabilidade de Manguezais ao Óleo”, Capítulo 3. Em: Projeto Costa Norte, – Desenvolvimento de Metodologias para o entendimento de processos costeiros e estuarinos e da vulnerabilidade de florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira. v.1. Rio de Janeiro (BR), 2020.

Sumário

3.	Metodologia para Análise de Vulnerabilidade de Manguezais ao Óleo	51
3.1.	Prática Vigente no Licenciamento Ambiental Brasileiro	51
3.2.	Conceitos e Integração dos Conhecimentos.....	53
3.2.1.	Conceito de Vulnerabilidade	55
3.2.2.	Análise de Vulnerabilidade ao Nível Infrassistêmico	60
3.2.3.	Redução da Subjetividade na Análise de Vulnerabilidade	61
3.3.	Suscetibilidade.....	68
3.4.	Sensibilidade.....	77
3.5.	Resiliência	78
3.5.1.	Trabalho (τ)	79
3.5.2.	Taxa de Afastamento.....	80
3.6.	Referências.....	83

Índice de Figuras

Figura 3-1: Exemplo de matriz de integração de probabilidade e sensibilidade para se obter índices de vulnerabilidade ambiental. Fonte: PETROBRAS, 2017, adaptado de KALY, <i>et al.</i> (1999).	53
Figura 3-2: Esquema das variáveis descritoras (<i>proxies</i>) das componentes (susceptibilidade, sensibilidade e resiliência) da vulnerabilidade das florestas de mangue à contaminação por óleo. ...	66
Figura 3-3: Pontos de vazamento potencial considerados na análise de susceptibilidade das florestas de mangue ao óleo no Projeto Costa Norte. Os polígonos azuis representam as bacias sedimentares e os polígonos laranjas representam as bacias efetivas associadas.	69
Figura 3-4: Figura esquemática dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes até chegar no modelo do estuário de São Caetano de Odivelas. O quadro superior representa os pontos de vazamento distribuídos nas bacias da MEB no modelo de dispersão de maior abrangência. O quadro inferior esquerdo indica os pontos de vazamento do modelo de dispersão aninhado para o estuário do rio Pará e o quadro inferior direito indica as fontes de vazamento do modelo de dispersão para o estuário de São Caetano de Odivelas.	72
Figura 3-5: Esquema dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizado para obtenção dos resultados de susceptibilidade em escala regional e nos quatro estuários foco do Projeto Costa Norte – sistema costeiro de Soure, sistema costeiro de Sucuriju, estuário de São Caetano de Odivelas e baía de Turiaçu. As setas indicam o sentido dos aninhamentos.	73
Figura 3-6: Zoom em região de floresta de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas demonstrando as fontes de óleo consideradas na modelagem da taxa de afastamento (pontos azuis).	82

Índice de Tabelas

Tabela 3-1: Algumas definições disponíveis na literatura para suscetibilidade , sensibilidade e resiliência	59
Tabela 3-2: Matriz de vulnerabilidade considerando a integração das componentes suscetibilidade , sensibilidade e resiliência	68
Tabela 3-3: Resumo das configurações dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizados na metodologia de suscetibilidade do Projeto Costa Norte.	74
Tabela 3-4: Matriz de resiliência a partir do cruzamento do Trabalho com a Taxa de Afastamento...79	

3. Metodologia para Análise de Vulnerabilidade de Manguezais ao Óleo

Neste Capítulo serão apresentadas as bases conceituais e metodológicas para a análise de **vulnerabilidade** dos manguezais ao óleo desenvolvida no Projeto Costa Norte (PCN) e aplicada nas regiões de estudo específicas (Capítulo 4).

3.1. Prática Vigente no Licenciamento Ambiental Brasileiro

No atual processo de licenciamento ambiental brasileiro para operações *offshore* da indústria de Óleo e Gás, a análise de **vulnerabilidade** é definida como uma das informações essenciais para a elaboração do Plano de Emergência Individual (PEI)¹, e tem suas diretrizes básicas definidas pela Resolução CONAMA n° 398/2008. Segundo a resolução, a análise de **vulnerabilidade** consiste na avaliação dos efeitos dos incidentes de poluição por óleo sobre a segurança da vida humana e sobre o meio ambiente. Nesse contexto, esta análise é entendida conceitualmente como a sobreposição da **suscetibilidade** - probabilidade do óleo atingir determinadas áreas e ou ecossistemas – e a **sensibilidade** destas áreas e ou ecossistemas ao óleo.

Segundo a Resolução CONAMA n° 398/2008, o mapeamento das áreas com probabilidade de toque de óleo deve ser feito com base em incidentes pretéritos (quando aplicável) ou com a utilização de modelos de dispersão de óleo – considerando as fontes potenciais de vazamento e os cenários acidentais de uma dada atividade. Dentre os fatores socioambientais sensíveis ao óleo que devem ser contemplados na análise de **vulnerabilidade** estão:

- Pontos de Captação de água
- Áreas residenciais, de recreação e outras concentrações humanas;
- Áreas ecologicamente sensíveis, tais como manguezais, bancos de corais, áreas inundáveis, estuários, locais de desova, nidificação, reprodução, alimentação de espécies silvestres locais e migratórias, etc;
- Fauna e flora locais;
- Áreas de importância socioeconômica;
- Rotas de transporte aquaviário, rodoviário e ferroviário;
- Unidades de conservação, terras indígenas, sítios arqueológicos, áreas tombadas e comunidades tradicionais.

¹ Plano de Emergência Individual-PEI: documento ou conjunto de documentos, que contenha as informações e descreva os procedimentos de resposta da instalação a um incidente de poluição por óleo, em águas sob jurisdição nacional, decorrente de suas atividades; (CONAMA n°398/2008)

Para a definição da **sensibilidade** das áreas atingidas, as Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (cartas SAO) são indicadas como fonte primária de informações e reúnem fatores socioambientais que devem ser considerados na análise de **vulnerabilidade**. As cartas SAO reúnem informações sobre a sensibilidade ambiental do litoral ao óleo – definida pelo Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL), recursos biológicos sensíveis ao óleo e atividades socioeconômicas que podem ser prejudicadas por derramamentos de óleo ou afetadas pelas ações de resposta.

As cartas SAO são elaboradas segundo diretrizes do Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2004) que, segundo a Lei Nº 9.966/2000 ('lei do óleo') possui a responsabilidade de indicar, localizar e definir os limites das áreas ecologicamente sensíveis com relação à poluição causada por óleo em águas sob jurisdição nacional. As cartas SAO são elaboradas em três níveis de abrangência: as cartas estratégicas – abrangendo toda a área de uma bacia sedimentar marítima (escala de 1:500.000); as cartas táticas – abrangendo todo o litoral da bacia mapeada (escala de 1:150.000); e as cartas operacionais – abrangendo locais de alto risco e ou **sensibilidade** (escala de 1:10.000 a 1:50.000). Além do levantamento dos fatores sensíveis ao óleo, as cartas SAO agregam também a função de informar a rede de apoio logístico para o planejamento e operação das ações de resposta e contingência como aeroportos e portos, rodovias de acesso, vias marítimas entre outras informações importantes.

Os manguezais são um dos fatores socioambientais que devem ser contemplados na análise de **vulnerabilidade** que embasa a elaboração do PEI no contexto do licenciamento ambiental brasileiro. Nas cartas de **vulnerabilidade** ambiental a vazamento de óleo, elaboradas com essa finalidade, as áreas de manguezal são representadas como trechos de linha de costa, classificados por cores de acordo com o Índice de Sensibilidade do Litoral (ISL). Este é “estabelecido com base no conhecimento das características geomorfológicas da costa, considerando o tipo de substrato, a declividade do litoral e o grau de exposição à energia de ondas e marés” (MMA, 2004). O manguezal apresenta ISL igual a 10, o grau máximo de sensibilidade, pois é um ecossistema de elevada riqueza e valor biológico, congregando ainda, na maioria das situações, fatores como baixa declividade, reduzidos níveis de energia, e solo lamoso. Segundo o MMA (2004), os manguezais funcionam como “verdadeiras armadilhas de retenção de óleo”, e suas características (substrato lamoso e dificuldade de acesso) tornam a limpeza praticamente inviável e, até mesmo, não indicada pois tenderia a introduzir o óleo nas camadas mais profundas do sedimento, agravando o dano potencial.

Contudo, a resolução CONAMA 398/2008 e as diretrizes das cartas SAO (MMA, 2004), brevemente introduzidas acima, não contemplam importantes aspectos metodológicos da análise de **vulnerabilidade** ao óleo. Dessa forma, as consultorias ambientais utilizam metodologias como, por exemplo, o método proposto por Kaly *et al.* (1999) para a definição de um índice de **vulnerabilidade** a partir da **suscetibilidade** e **sensibilidade** (PETROBRAS/EGIS, 2017; PETROBRAS/MOTT MACDONALD, 2017). Neste, após a identificação da probabilidade de presença de óleo na região estudada e dos fatores socioambientais sensíveis ao óleo, os mesmos são classificados em baixa, média e alta **suscetibilidade** e **sensibilidade** para, a partir de uma matriz de integração, serem definidos os índices de **vulnerabilidade** (Figura 3-1). Contudo, ao analisar-se o Índice de Vulnerabilidade Ambiental proposto por Kaly *et al.* (1999) constata-se que a aplicação do mesmo pelos referidos estudos realizados no Brasil se dá de forma parcial. A aplicação de níveis de **sensibilidade** e de **suscetibilidade** contemplam apenas um dos subíndices propostos por Kaly *et al.* (1999), não sendo dessa forma

incorporado o subíndice que se refere à **resiliência**. Merece destaque ainda o aspecto semi-qualitativo dessa análise, pois apenas a **suscetibilidade** é quantificada em termos de probabilidade de determinado alvo ser atingido pelo óleo.

CRITÉRIOS		PROBABILIDADE		
		Baixa (>0 a 30%)	Média (31 a 70%)	Alta (71 a 100%)
SENSIBILIDADE	Baixa	Baixa	Baixa	Média
	Média	Baixa	Média	Alta
	Alta	Média	Alta	Alta

Figura 3-1: Exemplo de matriz de integração de probabilidade e sensibilidade para se obter índices de vulnerabilidade ambiental. Fonte: PETROBRAS, 2017, adaptado de KALY, *et al.* (1999).

Em síntese, a metodologia de análise de **vulnerabilidade** aplicada atualmente no contexto do licenciamento ambiental brasileiro consiste em:

- Realizar um estudo de modelagem de dispersão de óleo para se obter mapas de probabilidade de presença de óleo na região de estudo a partir de cenários acidentais específicos no ponto de perfuração ou produção - vazamento de volumes de 8 m³, 200 m³ e de pior caso (VPC) a ser definido para cada empreendimento;
- Realizar um levantamento dos fatores socioambientais sensíveis ao óleo (nas áreas com probabilidade de toque);
- Classificar a **sensibilidade** e a **suscetibilidade** (baixa, média ou alta) de cada fator socioambiental listado para obter o índice de **vulnerabilidade** a partir de uma matriz de integração;
- Gerar mapas de **vulnerabilidade** em escalas estratégica (1:500.000), tática (1:150.000) e operacional (de 1:50.000 a 1:10.000) sobrepondo o mapa de probabilidade com os fatores socioambientais sensíveis ao óleo levantados para a área de estudo;

3.2. Conceitos e Integração dos Conhecimentos

Como visto anteriormente, a classificação da **vulnerabilidade** de áreas costeiras à contaminação por óleo, na forma atualmente adotada nas Análises de Vulnerabilidade no âmbito do Licenciamento Ambiental das atividades de Exploração e Produção de Petróleo no Brasil, integra as informações da probabilidade do óleo atingir determinada área ou ecossistema (**suscetibilidade**) com a **sensibilidade** dessa área ou ecossistema à contaminação por óleo. Partindo dessa abordagem, os diferentes “fatores socioambientais”, dentre os quais os manguezais, são analisados em uma escala comparativa de **sensibilidade**.

No caso específico dos ecossistemas costeiros, Gundlach e Hayes (1978) propuseram o que denominaram de “escala de classificação da **vulnerabilidade** potencial a danos por derramamentos

de petróleo” ou “Índice de Vulnerabilidade”. A escala proposta por esses autores foi a base para elaboração do Índice de Sensibilidade Ambiental da NOAA (<https://response.restoration.noaa.gov/resources/environmental-sensitivity-index-esi-maps>), que norteou diretrizes adotadas internacionalmente, tendo sido incorporada pelas normas e diretrizes brasileiras, conforme descrito anteriormente. Essa escala considerou basicamente a exposição do sistema ao óleo, a persistência do óleo no ambiente e a extensão dos danos biológicos causados pela contaminação por óleo.

Nesse sentido, os manguezais apresentam-se como um ecossistema extremamente frágil no que se refere aos derramamentos de óleo e derivados, com efeitos drásticos sobre o sistema, associado a um alto tempo de residência do óleo no ambiente, um grande período para sua regeneração e grandes dificuldades de remoção/limpeza do óleo. Por essas particularidades, os manguezais apresentam o índice máximo na classificação de **vulnerabilidade** apresentada por Gundlach e Hayes (1978), o qual é reproduzido no ISL (Índice de Sensibilidade do Litoral) adotado no Brasil, conforme anteriormente destacado.

Apesar de considerar a exposição ao óleo, sua persistência no ambiente e a extensão dos danos, Gundlach e Hayes (1978) não apresentam de forma clara o conceito de **vulnerabilidade** que adotaram, o que faz com que as propriedades acima citadas sejam consideradas muitas vezes de forma subjetiva e através de comparações qualitativas entre os diversos sistemas costeiros analisados. Conforme anteriormente mencionado, essa dificuldade persiste nas atuais análises de **vulnerabilidade** ao constatarmos a lacuna metodológica nos procedimentos para classificação de **vulnerabilidade** dos sistemas costeiros ao óleo, conforme resolução CONAMA 398/2008 e diretrizes das cartas SAO (MMA, 2004). Mesmo as alternativas metodológicas adotadas nos estudos ambientais que buscam suprir essa falta de clareza conceitual, por exemplo através do método proposto por Kaly *et al.* (1999), conforme mencionado no item 3.1 do presente capítulo, esbarram em certo grau de subjetividade no que diz respeito à classificação dos “fatores socioambientais” quanto à **sensibilidade** ao óleo, o que impõe uma parcela de subjetividade à classificação da **vulnerabilidade** (Figura 3-1).

Outro aspecto que se observa tanto na proposta original de Gundlach e Hayes (1978) como nas diretrizes que norteiam as análises atualmente realizadas acerca da **vulnerabilidade** dos sistemas costeiros à contaminação por óleo no Brasil (CONAMA nº398/2008; MMA, 2004) é o fato dos manguezais serem apresentados como um sistema homogêneo. Por mais que essa abordagem contemple a alta **sensibilidade** dos manguezais à contaminação por óleo, negligencia as distintas condições ambientais as quais as florestas de mangue estão submetidas e que impõem distintos níveis de **sensibilidade/vulnerabilidade** a esse ecossistema.

Essa abordagem se deve ao fato de que ao ocuparem uma determinada área os manguezais revelam condições bem definidas em escala regional, como por exemplo, ambientes de baixa energia com forte deposição de sedimentos finos, mas não considera a variabilidade de importantes fatores controladores da exposição e da resposta dos manguezais à contaminação por óleo, que variam em escala infrassistêmica, como por exemplo a energia hidrodinâmica e a frequência de inundações pelas marés. Assim, os manguezais, ao contrário de outros sistemas como praias (que são abordadas considerando-se os diferentes níveis de energia de ondas e as diferenças na granulometria do

sedimento) e costões rochosos (que são abordados considerando-se os diferentes níveis de exposição à energia marinha), não têm contempladas as diferentes composições de forçantes ambientais às quais estão submetidos e que interferem na análise de sua **vulnerabilidade** ao óleo.

Por todo o exposto, o Projeto Costa Norte se propôs a enfrentar três grandes desafios em termos de inovação na análise de **vulnerabilidade** dos ecossistemas manguezais à contaminação por óleo: (i) apresentar uma clara, abrangente e embasada definição conceitual de **vulnerabilidade**; (ii) aprofundar a análise de **vulnerabilidade** ao nível infrassistêmico; (iii) reduzir (e se possível eliminar) a subjetividade nas análises de **vulnerabilidade**.

3.2.1. Conceito de Vulnerabilidade

Conforme anteriormente mencionado, no estudo pioneiro de Gundlach e Hayes (1978), o conceito de **vulnerabilidade** não é apresentado de forma clara e explícita, limitação observada em vários outros estudos sobre o tema. De fato, a padronização e aplicação desse conceito é uma questão pendente e um desafio a ser considerado, sendo observadas as mais diversas interpretações e aplicações sobre o que se pode realmente denominar **vulnerabilidade**.

Adger (2006) faz uma ampla revisão de estudos focados na análise de **vulnerabilidade** de sistemas sociais e ambientais e relata uma ampla diversidade de abordagens, métodos e epistemologias. Esse autor, conclui que essa diversidade e aparente falta de consenso sobre o conceito e métodos para determinar a **vulnerabilidade** dos sistemas estudados refletem a diversidade de objetivos bem como dos fenômenos estudados. Para ele, essa diversidade é uma força e sinal de vitalidade, não uma fraqueza, da pesquisa de **vulnerabilidade**. De fato, conforme argumentado por Adger (2006), toda essa análise, divergência e debate contribuíram para o avanço, evolução e aprimoramento dos estudos de **vulnerabilidade**, tanto no que se refere ao aspecto conceitual, como no aspecto metodológico e de quantificação da **vulnerabilidade**.

No que diz respeito ao aspecto conceitual, etapa de consolidação que precede à quantificação da **vulnerabilidade**, Turner *et al.* (2003) e Adger (2006) expõem que os esforços iniciais de avaliação da **vulnerabilidade** de sistemas sociais e/ou ecológicos partiram da análise de risco, incluindo a exposição e a probabilidade do sistema ser atingido por uma perturbação/tensor, característica que podemos denominar de **suscetibilidade**, e a resposta do sistema a essas perturbações/tensores, que podemos caracterizar como **sensibilidade**.

Como descrito na seção anterior, o modelo adotado no Brasil pode ser caracterizado com esse tipo de abordagem, que se limita à avaliação desde o risco até o impacto. Adotar essa abordagem pode ser explicado pela maior viabilidade e facilidade de se caracterizar a **suscetibilidade** dos sistemas, com base em modelos numéricos; e a **sensibilidade**, com base em escalas comparativas, como a proposta por Gundlach e Hayes (1978) e da maior complexidade e dificuldade em se acessar e quantificar a **resiliência** dos sistemas, que portanto não é considerada. Turner *et al.* (2003) afirmam que esse tipo de abordagem, caracterizada por um foco limitado a perturbações e tensores é insuficiente para entender os impactos e as respostas do sistema afetado ou de seus componentes.

De fato, essa prática de priorização de análise da **suscetibilidade** e da **sensibilidade** em detrimento da **resiliência** pode ter origem no próprio debate conceitual, que segundo Adger (2006) seguiu pelo caminho de diferenciação entre **vulnerabilidade** e **resiliência**.

No estudo de Kaly (1999), percebe-se essa distinção conceitual entre **vulnerabilidade** e **resiliência**. Para esse autor, **vulnerabilidade** é o potencial para os atributos de um sistema serem danificados por impactos exógenos e **resiliência** é o potencial de minimizar ou absorver os efeitos desses impactos prejudiciais. Todavia, na prática, ao sugerir a elaboração do Índice de Vulnerabilidade Ambiental, Kaly (1999) agrega os dois conceitos, o que vai ao encontro do apresentado por Adger (2006), que afirma que alguns dos desafios da pesquisa de **vulnerabilidade** são desenvolver medidas robustas e credíveis, incorporar diversos métodos que incluam percepções de risco e **vulnerabilidade** e integrem **vulnerabilidade**, adaptação e **resiliência**.

Adger (2006) aponta ainda o estudo da **resiliência** de sistemas socioecológicos como um campo ainda emergente da ciência. Nessa mesma linha, Turner *et al.* (2003) afirmam, que pelo fato dos diferentes sistemas apresentarem distintos níveis de **resiliência**, a incorporação da **resiliência** tornou-se um elemento crítico na análise de **vulnerabilidade** de sistemas socioambientais.

Ao analisarmos algumas das definições de **vulnerabilidade**, percebemos que de fato a **resiliência** é apresentada, de forma explícita ou de forma indireta, como uma componente das análises de **vulnerabilidade** e que, portanto, sua inclusão nessas análises deve ser efetivada.

Mesmo na definição de **vulnerabilidade** apresentada no estudo clássico de Gundlach e Hayes (1978), percebe-se, de forma implícita a noção das três componentes da **vulnerabilidade**. Esses autores assim definem **vulnerabilidade**: “A **vulnerabilidade** é baseada na interação da linha de costa com os processos físicos que controlam a deposição de óleo, a persistência ou longevidade do óleo naquele ambiente e a extensão dos danos biológicos”. Portanto, percebe-se o conceito de **suscetibilidade** na referência aos “processos físicos que controlam a deposição de óleo”. O conceito de **sensibilidade** está presente na menção à “extensão dos danos biológicos” e o conceito de **resiliência** na citação à “persistência ou longevidade do óleo naquele ambiente”.

De forma similar, Adger (2006) apresenta implicitamente no conceito de **vulnerabilidade**, as três componentes, ao definir **vulnerabilidade** como: “... o estado de **suscetibilidade** a danos causados pela exposição a tensões associados à mudança ambiental e social e à falta de capacidade de adaptação”. Ou seja, a propensão a danos advindos da integração entre a **suscetibilidade** a um tensor, a **sensibilidade** aos efeitos do tensor e à **resiliência** à capacidade de adaptação. Esse autor ainda complementa: “... a **vulnerabilidade** é mais frequentemente conceituada como sendo constituída por componentes que incluem exposição e **sensibilidade** a perturbações ou tensões externas e capacidade de adaptação...”. entendenda-se “exposição” como **suscetibilidade** e “capacidade de adaptação” como **resiliência**.

Turner *et al.* (2003) afirmam que a “A **vulnerabilidade** é registrada não apenas pela exposição a riscos (perturbações e tensões), mas também reside na **sensibilidade** e **resiliência** do sistema que enfrenta esses riscos”.

O Painel Intergovernamental para Mudança Climática (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) também inclui as três componentes (**suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**) ao definir **vulnerabilidade** como “A propensão ou predisposição a ser adversamente afetado. A **vulnerabilidade** abrange uma variedade de conceitos e elementos incluindo **sensibilidade** ou **suscetibilidade** a danos e falta de capacidade de lidar e se adaptar” (IPCC, 2018).

Klein e Nicholls (1999) afirmam que a **vulnerabilidade** é geralmente considerada uma função da capacidade de um sistema de lidar com o estresse e o choque. Segundo esses autores, a análise da **vulnerabilidade** sempre começa com alguma noção da **suscetibilidade** do sistema natural aos efeitos do agente/tensor (no caso específico do estudo deles, os efeitos biogeofísicos da elevação do nível do mar) e de sua capacidade natural de lidar com esses efeitos (**resiliência** e resistência). Portanto, a definição de **vulnerabilidade** apresentada por Klein e Nicholls (1999) também incorpora as três componentes, sendo que a **sensibilidade** é representada não diretamente, mas pela resistência, como seu complemento oposto, pois a resistência representa, segundo os autores, a capacidade do sistema de resistir a perturbações. Em outras palavras, a resistência seria o quanto do estado natural é mantido pelo sistema ao ser submetido a um agente de perturbação, ao passo que a **sensibilidade** representaria o quanto desse estado é alterado por esse agente de perturbação.

Apesar do crescente debate envolvendo a comunidade científica internacional no que se refere aos aspectos conceitual e metodológico acerca da **vulnerabilidade** e de suas componentes, nota-se que no Brasil ainda prevalece algum grau de confusão e indefinição nas análises de **vulnerabilidade**. Como dito na seção anterior, essa deficiência é observada nas diretrizes que regem as análises de **vulnerabilidade** de fatores socioambientais à contaminação por óleo no Brasil, representadas pela resolução CONAMA 398/2008 e as diretrizes das cartas SAO (MMA, 2004).

No Brasil, a Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei no 12.187/2009) define **vulnerabilidade** como o “grau de **suscetibilidade** e incapacidade de um sistema, em função de sua **sensibilidade**, capacidade de adaptação, e do caráter, magnitude e taxa de mudança e variação do clima a que está exposto, de lidar com os efeitos adversos da mudança do clima, entre os quais a variabilidade climática e os eventos extremos”.

Nicolodi e Petermann (2010) se propuseram a avaliar a **vulnerabilidade** da zona costeira brasileira à mudança climática. Todavia, a análise realizada se baseia no risco de sistemas ambientais, sociais e tecnológicos, a qual se aproxima de uma análise da **sensibilidade** desses sistemas, sem fazer menção às demais componentes (**suscetibilidade** e **resiliência**).

De forma similar, Szlafsztajn e Sterr (2007) apresentam análise da **vulnerabilidade** da zona costeira do estado do Pará. Esses autores apresentam proposta de Índice de Vulnerabilidade Total, composto por dois subíndices: índice de **vulnerabilidade** natural e índice de **vulnerabilidade** socioeconômica, cada um com distintas definições. No primeiro subíndice, a **vulnerabilidade** é definida como “a **suscetibilidade** de recursos a impactos negativos de eventos de risco”. Para o segundo subíndice, a **vulnerabilidade** é definida como “o estado de indivíduos, grupos ou comunidades caracterizados em termos de sua capacidade ou habilidade de ser física ou emocionalmente afetados e de antecipar, enfrentar, resistir e se recuperar do impacto de riscos naturais ou mudanças inesperadas nos seus meios de subsistência e bem-estar”. Observamos, portanto, uma diferenciação conceitual entre esses dois aspectos da **vulnerabilidade**. Não entraremos aqui na discussão sobre a separação ou integração dos sistemas sociais e ecológicos na definição de **vulnerabilidade**, pois não é o objeto do presente estudo e nos levaria a outra linha de debate também muito acalorado no meio científico. O que nos interessa é notarmos que através da separação adotada por Szlafsztajn e Sterr (2007), a **vulnerabilidade** de determinada dimensão ambiental é confundida, ou considerada, apenas sob o aspecto da **suscetibilidade**, ficando aspectos relacionados à **sensibilidade** e à **resiliência** restritos à

componente socioeconômica. Uma análise das entrelinhas, no entanto, nos permite identificar uma leve interface entre **suscetibilidade** e **sensibilidade** na componente ambiental, quando a definição faz menção à “**suscetibilidade** a impactos”, dando a entender que não considera apenas a **suscetibilidade** a um determinado agente de perturbação, mas aos efeitos do mesmo, o que seria dependente da **sensibilidade** do sistema à ação do referido agente.

Por fim, exemplo de análise robusta da **vulnerabilidade**, tanto do ponto de vista conceitual, ao considerar a **vulnerabilidade** sendo composta pelas três componentes, como do ponto de vista de quantificação e redução da subjetividade da análise, é o estudo conduzido pela Fiocruz (BARATA *et al.*, 2014). Esses autores elaboraram um índice quantitativo de **vulnerabilidade** da população dos municípios do Rio de Janeiro às mudanças climáticas, a exemplo da plataforma Vulnerabilidade à Mudança do Clima, da FIOCRUZ (<https://projotovulnerabilidade.fiocruz.br/o-projeto>). Neste estudo foram consideradas as três características básicas da **vulnerabilidade**: exposição, **sensibilidade** e capacidade adaptativa (ou de resposta), tendo como norte conceitual o proposto por Adger (2006). Trata-se portanto, no âmbito do Brasil, de referência de estudo conceitualmente completo com abordagem quantitativa da **vulnerabilidade**.

A discussão e os exemplos anteriormente apresentados explicitam a complexidade conceitual envolvida nas análises de **vulnerabilidade** e a necessidade de aprofundamento e clareza conceitual. É importante ainda destacar, que do conceito de **vulnerabilidade** adotado no âmbito do Projeto Costa Norte, o qual incorpora as três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**, se infere, conforme enfatizado por Brooks (2003), que a definição e análise da **vulnerabilidade** sempre diz respeito a um determinado sistema em relação a um agente definido. Como por exemplo, a **vulnerabilidade** das florestas de mangue (sistema) à contaminação por óleo (agente).

Para concluir a presente discussão acerca dos conceitos envolvendo a **vulnerabilidade** e suas componentes, são apresentadas, na Tabela 3-1, algumas definições encontradas na literatura acerca da **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**. Todavia, é importante destacar que em alguns dos estudos, algumas dessas componentes não são denominadas com a terminologia aqui adotada. Da mesma forma, em alguns estudos as definições se referem a agentes específicos, como por exemplo, mudança climática e elevação do nível médio do mar. Nesses casos, as referidas definições foram relacionadas e adequadas às componentes aqui definidas, respeitando-se os significados apresentados no estudo original.

Tabela 3-1: Algumas definições disponíveis na literatura para **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**.

Suscetibilidade	Sensibilidade	Resiliência ⁴	Fonte
Refere-se à frequência e, quando possível, à intensidade de eventos perigosos que podem afetar o meio ambiente ¹	Perda de diversidade, extensão, qualidade e função dos ambientes ²	Potencial dos ambientes para resistirem aos danos	KALY (1999)
O potencial do sistema de ser afetado por um agente de perturbação	³	Velocidade com que um sistema retorna ao seu estado original após ser perturbado	KLEIN e NICHOLLS (1999)
A natureza e o grau em que um sistema está exposto a variações climáticas significativas ¹	O grau em que um sistema é afetado, de maneira adversa ou benéfica, por estímulos relacionados ao clima.	Capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ambientais de lidar com um evento, tendência ou perturbação perigosa, respondendo ou reorganizando de maneira a manter sua função essencial, identidade e estrutura, além de manter a capacidade de adaptação, aprendizado e transformação	IPCC (2001, 2018)
É a natureza e o grau em que um sistema experimenta estresse ambiental ou sócio-político. As características dessas tensões incluem sua magnitude, frequência, duração e extensão de área do risco ¹	Grau em que um sistema é modificado ou afetado por perturbações	Capacidade de um sistema evoluir para acomodar riscos ambientais ou mudanças de política e expandir a faixa de variabilidade com a qual ele pode lidar	ADGER (2006)
É a natureza e a intensidade do estresse ambiental (biofísico e climático) ou sociopolítico experimentado por um sistema (população; território) ¹	Intensidade com a qual um sistema pode sofrer danos ou ser afetado por perturbações, determinadas pelas susceptibilidades intrínsecas ao sistema	Habilidade que um sistema tem de mudar (ou introduzir mudanças) para acomodar os estresses ambientais ou mudanças políticas, e manejar, da melhor forma possível, as suas consequências	BARATA <i>et al.</i> (2014); FIOCRUZ ⁵

Notas:

- Suscetibilidade** é apresentada como “exposição”;
- Definido pelo autor como “dano”;
- Os autores apresentam o conceito de “resistência”, que representa o oposto de **sensibilidade** (vide texto acima);
- Representada, em alguns estudos, como “capacidade adaptativa”;
- Plataforma Vulnerabilidade à Mudança do Clima (<https://projotovulnerabilidade.fiocruz.br/o-projeto>).

Após os esclarecimentos acerca da base conceitual sobre **vulnerabilidade** adotada no Projeto Costa Norte, que incorpora as três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**, passemos a outro desafio enfrentado pelo PCN.

3.2.2. Análise de Vulnerabilidade ao Nível Infrassistêmico

Ao analisarmos a escala de **sensibilidade** de sistemas costeiros proposta por Gunlach e Hayes (1978), percebe-se que os manguezais, além de serem considerados como um dos sistemas costeiros mais sensíveis à contaminação por óleo, são apresentados como um sistema homogêneo, sendo assim situados em uma única classe de **sensibilidade**. Percebe-se que na escala apresentada por esses autores, alguns sistemas como costões rochosos e praias possuem distinções segundo o nível de energia e exposição à ação marinha, distinção não observada para os manguezais. Isso se deve ao fato de, em sistemas como praias e costões rochosos, a distinção entre a energia ser condição externa ao sistema, suprassistêmica, havendo, portanto, praias e costões que se localizam em regiões com diferentes graus de energia e exposição. No caso dos manguezais, a condição geral para ocorrência do ecossistema é que o ambiente seja abrigado e de baixa energia. Todavia, ao analisarmos o sistema numa perspectiva infrassistêmica, percebe-se que há uma grande variação de níveis de energia (e.g. frequência de inundação pelas marés), que faz com que parcelas distintas de um mesmo manguezal, ou manguezais localizados em diferentes locais, possam estar submetidas a condições ambientais bastante diversas.

Apesar de Gunlach e Hayes (1978) tratarem os manguezais de forma homogênea em sua escala de **sensibilidade**, o reconhecimento da possibilidade de condições distintas dentro de um mesmo ecossistema encontra respaldo no próprio estudo desses autores, que afirmam que as informações biológicas apresentadas são apenas gerais e devem ser complementadas com dados de campo coletados durante estudos específicos.

De fato, o modelo de “assinatura energética” aplicado ao ecossistema manguezal (LUGO e SNEDAKER, 1974; CINTRON e SCHAEFFER-NOVELLI, 1983, 1985; CINTRON *et al.*, 1985; LUGO *et al.*, 1990; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 1990; TWILLEY, 1995), demonstra que atributos estruturais e funcionais dos manguezais são controlados por forçantes como energia solar, aporte de água doce e de nutrientes, e energia das marés, combinadas em diversas intensidades. Portanto, apesar de existirem fatores numa escala global, que regem a ocorrência de manguezais em determinada região, os atributos estruturais e funcionais de cada manguezal são regidos pela interação de fatores em escala regional (“assinatura energética”) e fatores em escala local (por exemplo, associados a gradientes de frequência de inundação pelas marés).

Exemplo dessa variabilidade infrassistêmica pode ser encontrado ao analisarmos os estudos de Cintron e Schaeffer-Novelli (1983), Getter *et al.* (1984) e Schaeffer-Novelli *et al.* (1993), que relatam a variabilidade na **vulnerabilidade** (na verdade da **suscetibilidade**) de florestas de mangue segundo as características geomorfológicas e energia hidrodinâmica. Segundo esses autores, manguezais ribeirinhos podem ser menos vulneráveis a derramamentos de óleo no mar, pois o fluxo dos rios pode impedir a penetração do óleo, dependendo das condições da maré. As florestas de bacia também seriam mais vulneráveis a derramamentos terra adentro, pois geralmente estão separadas do mar por uma berma, logo não são atingidas com frequência pelas marés. No entanto, em períodos de marés muito altas (marés de sizígia), quando são inundadas, poderiam ser atingidas por manchas de óleo provenientes do mar, o que seria um desastre muito maior que nos manguezais ribeirinhos e de franja porque, devido às condições de circulação serem bastante restritas no tipo fisiográfico de bacia, o óleo pode persistir por um período de tempo bastante prolongado. Em relação às florestas do tipo franja e ilhote, estas são mais vulneráveis a derramamentos no mar, pois

são inundadas diariamente. Entretanto, devido à alta circulação, o óleo é parcialmente retirado do sistema pela maré, logo só ocorrem danos mais severos nas partes interiores da franja e em locais mais protegidos, onde a energia do mar é mais baixa.

De forma similar, Garrity *et al.* (1994) observam que mesmo em áreas severamente afetadas por óleo, os danos apresentam-se distribuídos de forma “aleatória” (em manchas), dependendo basicamente do padrão de deposição do óleo, da persistência do óleo no ambiente e de características físicas locais. Esses autores ainda descrevem que a posição das árvores em relação à topografia e o tipo de sedimento influenciam a taxa de mortalidade.

Jimenez *et al.* (1985), em estudo sobre a mortalidade massiva de manguezais, afirmam que a recuperação do sistema vai depender, dentre outras características relacionadas ao distúrbio (natureza, persistência e recorrência), das características de cada floresta afetada.

Frente ao anteriormente exposto, deve-se ter em mente que, dentro de um mesmo sistema ou região, podem ser encontrados comportamentos distintos em termos de **sensibilidade**, **suscetibilidade** e **resiliência** e, conseqüentemente, **vulnerabilidade** dos diferentes trechos de manguezais. Tal variação vai ocorrer por diversos motivos, desde as características ambientais, como circulação hidrodinâmica, posição da floresta em relação ao corpo d’água principal (florestas mais internas ou mais externas), frequência de inundação pelas marés, geomorfologia costeira, granulometria do sedimento, entre outras. Essa particularidade dos manguezais encontra respaldo no alerta apresentado no estudo de Turner *et al.* (2003), ao afirmarem que não se deve presumir que todas as partes do sistema têm a mesma **vulnerabilidade**; subsistemas e componentes do sistema, podem sofrer exposição diferente, registrar diferentes impactos e apresentar diferentes respostas.

Por todo o exposto, fica evidente que a abordagem infrassistêmica é um avanço na análise da **vulnerabilidade** de manguezais à contaminação por óleo. Historicamente, o Núcleo de Estudos em Manguezais (NEMA/UERJ) tem avançado nessa direção, partindo do reconhecimento conceitual e de uma análise que considerou as variabilidades intrínsecas aos manguezais, quando do diagnóstico dos danos aos manguezais frente ao derramamento de óleo ocorrido na baía de Guanabara no ano 2000 (SOARES, 2002; SOARES *et al.*, 2003). Tal abordagem conceitual foi consolidada em estudo publicado por Soares (2003). Posteriormente, esse conceito foi testado e aplicado na tese de Pellegrini (2010), cujos resultados são apresentados em Pellegrini *et al.* (2009) e Soares *et al.* (2020), quando florestas de mangue de Garapuí (BA) foram diferenciadas, ainda de forma qualitativa, quanto à **suscetibilidade**, **sensibilidade**, **resiliência** e **vulnerabilidade** ao óleo.

O presente estudo, Projeto Costa Norte, parte de toda essa experiência acumulada e propõe novo avanço, um salto na busca de inovação, ao agregar a análise infrassistêmica à busca de abordagem quantitativa das componentes da **vulnerabilidade** dos manguezais à contaminação por óleo, buscando reduzir a subjetividade nas análises de **vulnerabilidade**.

3.2.3. Redução da Subjetividade na Análise de Vulnerabilidade

Conforme mencionado acima, um dos desafios propostos no Projeto Costa Norte, visando a redução (ou eliminação) da subjetividade inerente às análises de **vulnerabilidade**, foi a busca pela quantificação das diferentes componentes. O ponto de partida para esse processo consiste na

definição de *proxies* que representem cada uma das componentes da **vulnerabilidade** – **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** – e que sejam passíveis de quantificação, conforme descreveremos a seguir.

A **suscetibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo pode ser considerada a componente de mais fácil quantificação, pois representa a probabilidade de uma dada área de manguezal ser atingida pelo óleo, sob determinadas condições (cenários) como origem do óleo e condições meteorológicas e oceanográficas. Portanto, essa componente foi quantificada segundo os modelos de dispersão de óleo, conforme detalhado no item 3.3 a seguir.

A **sensibilidade** à contaminação por óleo busca representar a resposta que uma dada floresta apresenta aos efeitos do óleo. Como observado por Soares (2002), essa resposta pode ser mais ou menos severa e ir desde efeitos subletais até a morte das florestas. Essa variabilidade de respostas, que representa o quanto a floresta “sente” o efeito do óleo, dependerá das condições naturais às quais a floresta está submetida. Conforme relatado em diversos estudos, são várias as características dos manguezais que podem influenciar a **sensibilidade** do sistema frente à contaminação por óleo (GETTER *et al.*, 1984; SNEDAKER, 1985; JACKSON *et al.*, 1989; GARRITY *et al.*, 1994, 1995; HAYES, 1996; DUKE *et al.*, 1999; DUKE e BURNS, 1999). A **sensibilidade** considera a exposição das florestas de mangue às condições de estresse natural, o que as tornam mais sensíveis a estresses adicionais associados à contaminação por óleo.

Essa abordagem tem como base conceitual o apresentado por Lugo (1978) que analisou a forma de atuação de tensores (naturais ou antrópicos) segundo o ponto de ação dos mesmos sobre o sistema. Segundo o modelo apresentado por esse autor, os sistemas naturais, no caso as florestas de mangue, possuem um dreno natural de energia, que corresponde à manutenção do sistema, ou seja, quanto de energia o sistema gasta para se manter/sobreviver, que é representado pela respiração. Assim, tensores adicionais viriam a acrescentar novos drenos de energia, afetando o sistema, podendo causar desde efeitos subletais até o colapso do sistema, segundo a severidade do tensor ou do rigor ambiental (estresse natural) ao qual o sistema está previamente submetido.

Pelo anteriormente exposto, partimos da premissa de que sistemas submetidos a diferentes níveis de estresse natural (e, portanto, a diferentes níveis de gasto energético relacionado a sua manutenção) possuem diferentes graus de **sensibilidade** a tensores adicionais, no caso da nossa análise, à contaminação por óleo.

Portanto, o desafio do PCN foi identificar um *proxy* que pudesse ser indicador dos diferentes níveis de estresse natural aos quais as florestas de mangue possam estar submetidas. Segundo Soares (2003), a **sensibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo depende das condições físico-químicas do sedimento e da frequência de inundação pelas marés. Essa afirmação encontra respaldo no modelo de “assinatura energética” (LUGO e SNEDAKER, 1974; CINTRON e SCHAEFFER-NOVELLI, 1983, 1985; CINTRON *et al.*, 1985; LUGO *et al.*, 1990; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 1990; TWILLEY, 1995), que demonstra que a energia das marés, junto com a energia solar, representa um dos principais suprimentos de energia para o desenvolvimento das florestas de mangue. Essa abordagem também é sustentada pela literatura clássica de manguezais (LUGO E SNEDAKER, 1974; POOL *et al.*, 1975, 1977; TWILLEY *et al.*, 1986; TWILLEY, 1995) que demonstra que florestas de mangue submetidas a maior energia hidrodinâmica e maior frequência de inundação pelas marés,

por estarem submetidas a melhores condições ambientais (menor estresse) possuem maior desenvolvimento estrutural e maiores níveis de produção, como resultado das melhores condições físico-químicas do substrato, associadas à maior oxigenação pela energia das marés, controle dos níveis de sais e remoção de compostos tóxicos oriundos da decomposição da matéria orgânica.

Em estudo realizado em Garapuí, Bahia (PELLEGRINI, 2010; PELLEGRINI *et al.*, 2009; SOARES *et al.*, 2020), tal abordagem foi aplicada de forma qualitativa, utilizando-se como indicadores da energia hidrodinâmica e do estresse ambiental a posição das florestas em relação aos corpos de água, o desenvolvimento estrutural e a arquitetura das árvores (relação altura/dap e número de troncos por indivíduo). Nas áreas estudadas pelo Projeto Costa Norte, não foi possível a identificação de relação clara entre os atributos estruturais e arquitetura das florestas de mangue com níveis de estresse representados por diferenças de energia hidrodinâmica, exceto na Baía de Turiaçu (MA), onde observa-se alteração da estrutura e arquitetura das florestas de mangue em áreas de transição com planícies hipersalinas (com menor frequência de inundação pelas marés).

Considerando-se a relevância da energia hidrodinâmica, representada pela frequência de inundação pelas marés, no desenvolvimento das florestas de mangue e na redução dos níveis de estresse natural aos quais essas florestas estão submetidas e, a possibilidade dessa energia ser mensurada através das ferramentas adotadas no PCN, definiu-se como *proxy* para a **sensibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo, a **Energia Cinética** a qual cada porção da floresta está submetida. A adoção dessa variável física leva em consideração as bases conceituais apresentadas anteriormente, segundo as quais a energia hidrodinâmica associada ao fluxo das marés, portanto, energia cinética, é transferida para os sistemas através da oxigenação do substrato e da remoção de compostos nocivos.

Por fim, a **resiliência** das florestas de mangue considera a capacidade de resposta de cada parcela da floresta à contaminação por óleo. Segundo Soares (2003), ao analisar o modelo de ação de tensores apresentado por Lugo (1978) sob a ótica da contaminação por óleo, tão importante quanto o ponto de ação do tensor no sistema, é a persistência do mesmo, a qual pode prolongar os efeitos letais e subletais (**sensibilidade**) da contaminação por óleo e retardar o processo de recuperação do ecossistema (**resiliência**), características essas que tornam o impacto por óleo em manguezais extremamente danoso e delicado. Nesse sentido, a **resiliência** das florestas de mangue será diretamente afetada pelas características que controlam o tempo de residência do óleo no ambiente.

Diversos estudos citam diferentes características dos manguezais que podem controlar tanto a **sensibilidade** como a **resiliência** do sistema frente à contaminação por óleo (GETTER *et al.*, 1984; SNEDAKER, 1985; JACKSON *et al.*, 1989; GARRITY *et al.*, 1994, 1995; HAYES, 1996; DUKE *et al.*, 1999; DUKE e BURNS, 1999). A análise dos dados disponíveis na literatura nos permite concluir, que o processo de recuperação dos manguezais frente à contaminação por óleo é extremamente variável, dependendo das peculiaridades de cada caso.

Assim, torna-se difícil estimar tanto os efeitos de derramamentos de óleo sobre determinado manguezal, bem como sua capacidade de recuperação, devendo-se, segundo Garrity *et al.* (1995), considerar as variações nas condições ambientais (físicas, hidrológicas, meteorológicas e climáticas).

Soares (2002) listou algumas características determinantes da resposta dos manguezais à contaminação por petróleo e derivados, bem como para o processo e recuperação do sistema, conforme segue: (1) tipo e quantidade de óleo; (2) características geomorfológicas; (3) frequência de inundação pelas marés; (4) energia das marés; (5) características do sedimento; (6) espécie vegetal; (7) atividade da macrofauna bentônica; (8) atividade microbiana.

Segundo Soares (2003), a capacidade de resposta das florestas de mangue à contaminação por óleo, que representa a **resiliência**, é função tanto da remoção biológica do óleo (degradação microbiana dos hidrocarbonetos), que depende das condições físico-químicas e frequência de inundação pelas marés, como da remoção física do óleo pelo fluxo das marés. Devemos acrescentar ainda, a capacidade de regeneração das florestas atingidas pelo óleo.

A relevância da energia das marés é destacada por Garrity *et al.* (1994), que afirmam que em locais onde o fluxo das marés é mais intenso, tanto o óleo aderido aos vegetais, como os hidrocarbonetos presentes no sedimento, tendem a ser removidos mais rapidamente, levando a impactos menos severos e recuperação mais rápida da floresta de mangue.

Portanto, fica evidente a relevância da energia das marés na determinação da capacidade de remoção física e de degradação microbiana do óleo em florestas de mangue.

Todavia, devemos ainda analisar a pertinência, possibilidade e viabilidade de se agregar outras características na construção dos *proxies* a serem adotados na análise da **resiliência** das florestas de mangue da Costa Norte Brasileira à contaminação por óleo. Assim, considerando-se que o objetivo do presente estudo é a determinação de classes comparativas de **resiliência**, podemos descartar, dentre os aspectos listados por Soares (2002), citados acima, o tipo e quantidade de óleo, tendo em vista que em determinado cenário essa característica será similar para todas as florestas de mangue. Ainda em relação aos fatores listados por Soares (2002), a geomorfologia está basicamente incorporada na quantificação da energia e frequência de inundação pelas marés e as características físico-químicas do sedimento, relacionadas à degradação do óleo, também são fortemente determinadas pela energia das marés, se considerarmos não haver variações significativas na granulometria do sedimento nos sistemas estudados, com predomínio de sedimento lamoso, exceção feita a setores limitados dos sistemas, como os bancos arenosos presentes em algumas regiões.

Em florestas fortemente impactadas por óleo, onde se observa mortalidade parcial ou total das árvores, a capacidade de regeneração das florestas é uma variável a ser considerada na análise de **resiliência**. Essa regeneração, porém, só pode ser considerada a partir do momento em que o ambiente esteja relativamente favorável ao estabelecimento de novos jovens de espécies de mangue, o que só ocorre após a remoção física e/ou biológica do óleo, que conforme mencionado acima depende fortemente da energia e lavagem pelas marés. Soares (2002) analisa diversos estudos que constata falha ou deficiência no processo de regeneração de áreas de manguezal atingidas por derramamento de óleo, onde o óleo ainda persiste.

A capacidade de regeneração das florestas de mangue dependerá basicamente da presença de banco de jovens no sub-bosque da floresta e do aporte de propágulos de áreas vizinhas. Nesse sentido, no âmbito do Projeto Costa Norte, essa capacidade foi analisada em todas as florestas onde

se realizaram levantamentos fitossociológicos. Não foram identificados indícios significativos de reduzida capacidade de regeneração das florestas de mangue dos sistemas estudados, que possibilitasse a discriminação das florestas quanto ao seu potencial de regeneração. Assim, constatou-se o predomínio de florestas saudáveis e com potencial de regeneração, com base nas seguintes características: (i) presença de banco de jovens em muitas das florestas; (ii) predomínio de padrão de distribuição das árvores em classes de tamanho (dap e altura) compatível com florestas saudáveis com recrutamento de jovens e potencial de regeneração; (iii) predomínio, em cada um dos sistemas estudados, de extensas e bem conservadas florestas de mangue, garantindo aporte permanente de propágulos para áreas que venham a experimentar morte de árvores.

Dessa análise constatou-se ainda a possibilidade de variações locais nos tempos de regeneração segundo algumas das características locais, algumas das quais são inclusive incorporadas na análise das marés, como áreas com baixa frequência de inundação pelas marés e, portanto submetidas a maior rigor ambiental e menor taxa de aporte de propágulos de florestas vizinhas, característica que também pode ser inferida dos *proxies* descritos a seguir, que inferem a possibilidade de transporte de partículas (seja óleo ou propágulos).

De toda a análise realizada, conforme anteriormente apresentado, conclui-se que a **resiliência** das florestas de mangue à contaminação por óleo pode ser estimada de forma bastante robusta através de *proxies* que representem tanto a capacidade de remoção física do óleo, como a capacidade de degradação microbiana do óleo. Para tanto, a resiliência foi representada pela composição de dois *proxies*: o **Trabalho** e a **Taxa de Afastamento**. O **Trabalho** representa, quantitativamente, a capacidade de uma força aplicada sobre um corpo em produzir deslocamento desse corpo. Dessa forma, ele pode representar tanto a possibilidade de remobilização e deslocamento físico de partículas de óleo, como a transferência de energia para o sedimento, determinando, nesse último caso a possibilidade de oxigenação do sedimento e incremento da remoção biológica (degradação) do óleo.

A **Taxa de Afastamento** quantifica a capacidade de remoção física do óleo desde uma determinada parcela da floresta de mangue, ou seja, representa a velocidade média de afastamento de uma mancha de óleo a partir de um ponto no interior da floresta de mangue.

É importante esclarecer, todavia, que a análise aqui apresentada não considera os efeitos da quantidade de óleo que atinge uma determinada porção da floresta de mangue sobre a **resiliência**. Ou seja, não considera a capacidade de remoção física ou biológica do óleo no que depende da quantidade de óleo que há no ambiente. Essa relação representa, de certa forma, uma interação entre as componentes, **suscetibilidade** e **resiliência**. Essa questão é de certa forma compensada na integração final das componentes para a definição da **vulnerabilidade**, quando é atribuído maior peso à **suscetibilidade** em relação à **resiliência**.

Na Figura 3-2 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é apresentada de forma esquemática a abordagem conceitual, de base interdisciplinar, adotada no Projeto Costa Norte, para determinação das componentes da **vulnerabilidade** (**suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**). Os procedimentos adotados para o cálculo dos *proxies* relacionados a cada uma das componentes da **vulnerabilidade** são detalhados nas seções 3.3, 3.4 e 3.5.

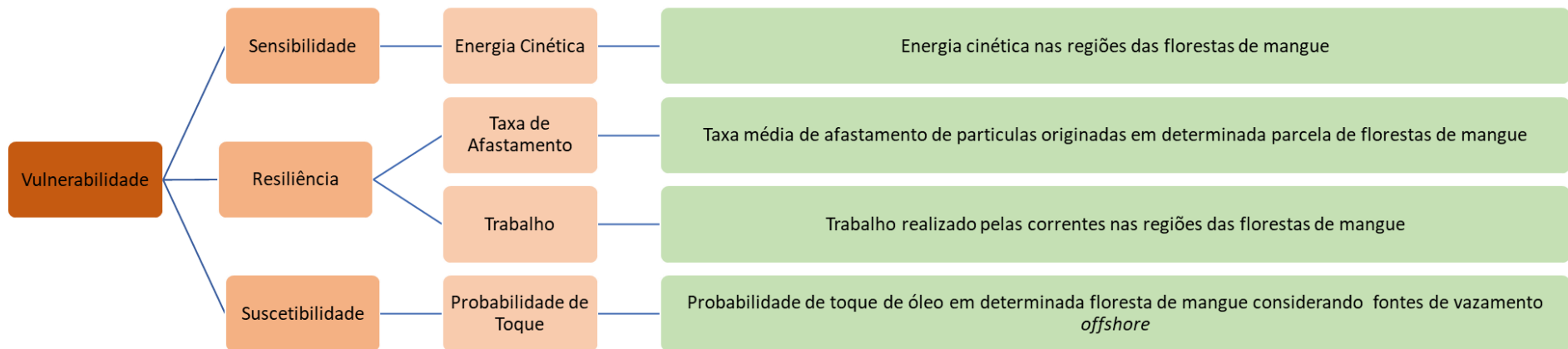


Figura 3-2: Esquema das variáveis descritoras (*proxies*) das componentes (**suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**) da vulnerabilidade das florestas de mangue à contaminação por óleo.

Cada uma das componentes da **vulnerabilidade**, após calculados os respectivos *proxies*, foram categorizadas em classes, conforme descrito nas seções 3.3 (**suscetibilidade**), 3.4 (**sensibilidade**) e 3.5 (**resiliência**). Em seguida, foram atribuídos valores para cada classe: **suscetibilidade** (classes 1, 3 e 5), **sensibilidade** (classes 1, 3 e 5) e **resiliência** (classes 1, 2, 3, 4 e 5).

Com isso, foi possível realizar o cálculo do **Índice de Vulnerabilidade**, a partir da média ponderada das componentes na qual a **suscetibilidade** tem peso 5, a **resiliência** tem peso 3 e a **sensibilidade** tem peso 2. Note que a equação abaixo explicita a relação das componentes com a **vulnerabilidade**, onde a **sensibilidade** e a **suscetibilidade** são diretamente proporcionais e a **resiliência** é inversamente proporcional (quanto maior a **resiliência**, menor a **vulnerabilidade**):

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = \frac{\alpha * \text{sensibilidade} + \beta * \text{suscetibilidade} + \gamma * (6 - \text{resiliência})}{\alpha + \beta + \gamma}$$

Onde:

$$\alpha = 2$$

$$\beta = 5$$

$$\gamma = 3$$

Os índices de **vulnerabilidade** obtidos foram categorizados em classes, a partir da análise crítica da matriz de resultados considerando o cruzamento entre as componentes. Dessa forma, foram estabelecidos limites das classes:

- **Baixa Vulnerabilidade:** índice de vulnerabilidade menor que 2,5;
- **Média Vulnerabilidade:** índice de vulnerabilidade entre 2,5 e 3,5;
- **Alta Vulnerabilidade:** índice de vulnerabilidade maior que 3,5;

A matriz de categorização da **vulnerabilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo, segundo as diferentes combinações de **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** é apresentada na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Matriz de **vulnerabilidade** considerando a integração das componentes **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**.

		Suscetibilidade			Suscetibilidade			Suscetibilidade		
		5 (alta)			3 (média)			1 (baixa)		
Resiliência	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (muito alta)	1 (alta)	5	3	1	5	3	1
		5 (muito alta)	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	4 (alta)	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
	3 (média)	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Baixa	Baixa
	2 (baixa)	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa	Baixa
	1 (muito baixa)	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Média	Média	Média	Baixa

3.3. Suscetibilidade

A **suscetibilidade** é definida como o grau de exposição a um dado tensor, ou seja, no contexto do Projeto Costa Norte, representa a probabilidade de determinada floresta de mangue ser atingida por óleo. Diferente do contexto de aplicação do conceito de **suscetibilidade** no processo de licenciamento ambiental de atividades de perfuração e produção na indústria de óleo e gás no Brasil – na qual a avaliação dos riscos de contaminação parte da perspectiva de uma determinada fonte de vazamento potencial – no PCN a abordagem dessa componente é orientada pela perspectiva do ativo ambiental: as florestas de mangue nas bacias Foz do Amazonas e Pará-Maranhão. Esta inversão de perspectiva traz desafios às metodologias de modelagem probabilística de dispersão de óleo ² disponíveis.

Partindo do ponto de vista da floresta de mangue, uma determinação abrangente de sua **suscetibilidade** ao óleo deve levar em conta um conjunto abrangente de fontes potenciais de vazamento. Dessa forma, foi utilizado o conceito de bacia efetiva³, e as potenciais fontes de vazamento consideradas foram distribuídas ao longo da Margem Equatorial Brasileira (MEB) (Figura 3-3). Assim, ao invés de se considerar como fontes de risco apenas áreas que já tem perspectiva de

² Metodologia para se obter a distribuição espacial de probabilidade de presença de óleo a partir da integração de uma série de simulações determinísticas sob distintos cenários ambientais. Simulações determinísticas de dispersão de óleo descrevem o destino do poluente sob condição ambiental específica (p. ex. correntes e ventos atuantes em um dia determinado).

³ Segundo MME/EPE (2017) bacias efetivas são definidas como “a parte da bacia sedimentar com chances para a existência de acumulações de petróleo ou de gás natural. Fora dela, considera-se que a prospectividade da área sedimentar é praticamente nula, conforme o conhecimento vigente na época da avaliação”

exploração e produção atualmente (blocos já leiloados na MEB), se leva em conta uma região mais abrangente com possibilidade de exploração futura.

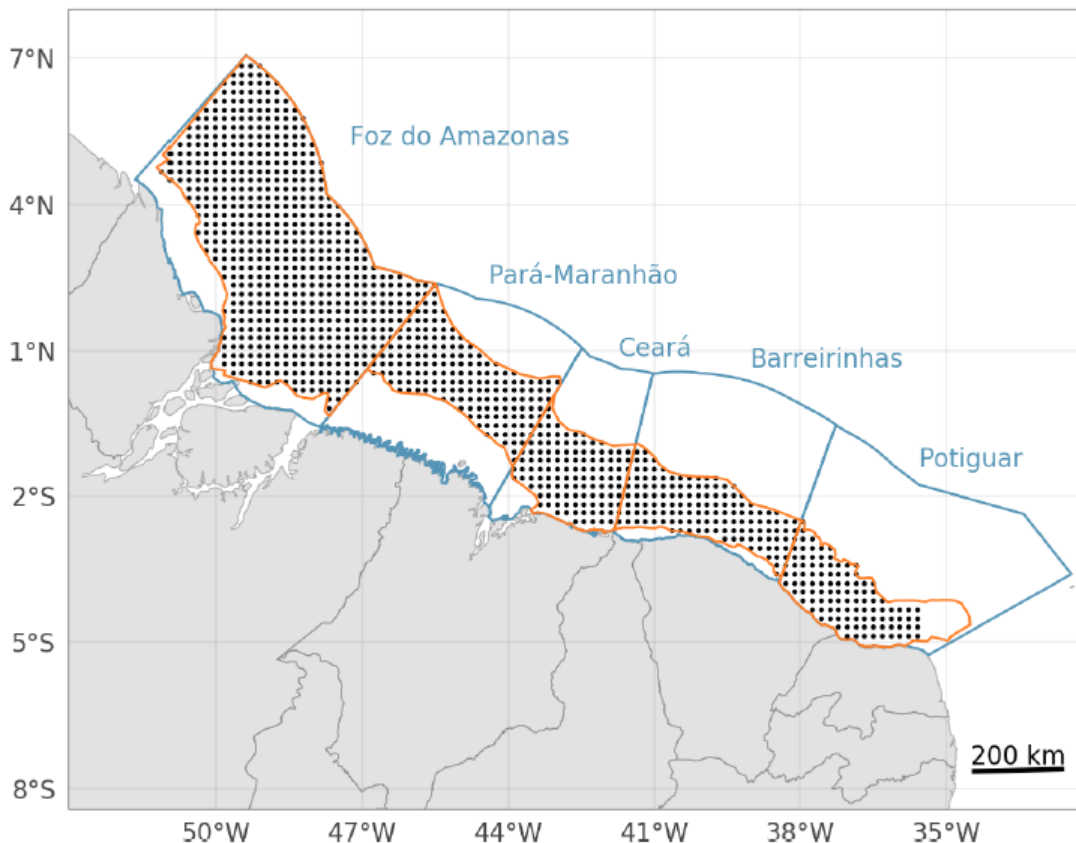


Figura 3-3: Pontos de vazamento potencial considerados na análise de **suscetibilidade** das florestas de mangue ao óleo no Projeto Costa Norte. Os polígonos azuis representam as bacias sedimentares e os polígonos laranjas representam as bacias efetivas associadas.

No âmbito do PCN, um sistema de modelagem de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes foi desenvolvido, e está descrito detalhadamente no Capítulo 8.3 do Volume 2 do presente relatório. Algumas considerações são importantes de serem ressaltadas para um entendimento geral das premissas utilizadas.

A primeira delas é referente à abrangência das fontes consideradas e às incertezas associadas a essa abordagem. Ao aumentar a abrangência das fontes representadas, assume-se a incerteza do tipo de óleo derramado. Dessa forma, foram realizadas algumas simplificações no modelo de dispersão de óleo desenvolvido, removendo fenômenos de intemperismo, propriedades do óleo, balanço de massa e a contabilização de mapas de espessura. É importante ressaltar que tais simplificações resultam em uma abordagem mais conservadora, na medida que não há perda de massa do óleo ao longo do seu transporte, aumentando o seu alcance e persistência no ambiente.

Outra incerteza associada na abordagem de múltiplas fontes é relacionada com as características do vazamento. A determinação do cenário acidental consiste na descrição do volume total de óleo vazado, da vazão, e da duração do vazamento, e é um conjunto de informações com grande impacto nos resultados probabilísticos. Dessa forma, foram considerados vazamentos com 24 horas de

duração, tendo em vista que nas modelagens de dispersão de óleo para os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) de plataformas de produção são usualmente utilizados vazamentos de 24h para os cenários acidentais associados ao volume de pior caso. Os desenvolvimentos necessários para se chegar nas configurações aqui brevemente resumidas podem ser vistos no Capítulo 8.3 do Volume 2.

Duas potencialidades do sistema de múltiplas fontes devem ser destacadas: a interatividade e a análise inversa. A primeira, consiste no fato de que, uma vez realizadas as simulações probabilísticas de cada fonte de vazamento, os resultados podem ser explorados de diferentes formas. Pode-se avaliar a probabilidade máxima de presença de óleo em determinado local considerando todas as fontes de vazamento ou considerando um conjunto específico de fontes (p. ex. todas as fontes em determinada bacia, ou em determinado bloco de exploração a ser ofertado pela ANP) – a partir do pós-processamento dos resultados já obtidos. Essa potencialidade é ampliada no PCN através da integração do sistema à Plataforma WEB (projetocostanorte.com.br), na qual os resultados de **suscetibilidade** podem ser visualizados a partir da escolha das fontes a serem consideradas.

Além da interatividade na obtenção dos resultados de probabilidade de presença de óleo, o sistema de múltiplas fontes também possibilitou a realização da Análise Inversa. Esta análise consiste em um pós-processamento que busca entre cada resultado probabilístico de cada fonte de vazamento, a probabilidade e o tempo mínimo de chegada a um determinado local selecionado. Ambos os valores são armazenados no local das fontes de vazamento *offshore*, que são usados para criar mapas de possíveis regiões de origem de óleo a um ponto específico. Dessa forma, identifica-se quais pontos de vazamento - dentre os considerados no modelo de múltiplas fontes - geram probabilidade de toque de óleo para aquele ponto, e com que tempo mínimo de contato. Como será visto no Capítulo 4, a Análise Inversa fornece importantes informações para a análise de **suscetibilidade** das áreas de estudo específicas.

Além do desafio de se considerar um abrangente conjunto de fontes de vazamento, outro desafio que se apresenta para a modelagem de dispersão de óleo desde a concepção do PCN é a forma de lidar com tamanha variação de escalas. Este desafio – comum à modelagem hidrodinâmica – vem do balanço entre abrangência e detalhamento espacial. As fontes de vazamento consideradas são em regiões oceânicas *offshore* - com escalas de movimento de centenas de quilômetros - enquanto as áreas de estudo específicas são no interior de sistemas costeiros e estuarinos - com pequenos canais entrecortando extensas planícies inundáveis com florestas de mangue. Não é viável obter os resultados ao mesmo tempo em uma grade que tenha resolução de alguns metros – necessário para o detalhamento das florestas de mangue – e extensão espacial da ordem de 1000 km – necessário para simular o transporte do óleo desde as fontes de vazamento na MEB até alcançar os sistemas costeiros e estuarinos estudados.

No âmbito do PCN, foram implementados alguns modelos hidrodinâmicos a partir de duas abordagens distintas, uma para representar a circulação oceânica e da plataforma continental da MEB, utilizando um modelo com assimilação de dados e grade regular (TOSTE *et al.* 2020) (Volume 2, Capítulo 7.2 e 7.3), e outra para representar a circulação costeira e estuarina, a partir de modelos com grade não-estruturada e utilização de topografia de alta resolução obtida por LiDAR, possibilitando a simulação das correntes nas regiões de florestas de mangue (Volume 2, Capítulo

7.4). Porém, como obter um resultado de dispersão de óleo probabilístico integrado entre estas escalas?

Para abordar esse desafio, foi desenvolvida uma metodologia que pode ser vista como um aninhamento de modelos de dispersão de óleo, tornando possível utilizar modelos hidrodinâmicos de resoluções e abrangências distintas para obter resultados probabilísticos integrados (CARVALHO *et al.* 2020). A metodologia elaborada (explicada em detalhes no Capítulo 8.3 do Volume 2) pode ser resumida nos seguintes passos:

1. Rodar o modelo de dispersão de óleo probabilístico com as múltiplas fontes de vazamento consideradas (escala *offshore*), com duração de vazamento fixo. São gravados resultados da *área varrida*, *tempo mínimo de toque*, e *tempo de exposição*⁴ em uma grade regular.
2. Selecionar pontos na interseção entre as escalas para serem usados como fontes de partículas da escala aninhada. São extraídos os tempos de exposição dos resultados da rodada *offshore* em cada posição das fontes da escala aninhada. Essa informação reflete a variabilidade de uma mancha de óleo passando e é usada para definir a distribuição das durações dos vazamentos da rodada aninhada.
3. Rodar o modelo de dispersão de óleo probabilístico com múltiplas fontes na escala aninhada. A duração de vazamento de cada rodada determinística (de cada fonte) é selecionada aleatoriamente do conjunto de tempos de exposição, obtido no passo anterior.
4. Os resultados probabilísticos de ambas as escalas rodadas são integrados a partir da multiplicação de probabilidades:
 - a. A probabilidade máxima da rodada *offshore* é computada em cada ponto fonte da rodada aninhada (pontos de interseção).
 - b. Os mapas probabilísticos de cada fonte da rodada aninhada são multiplicados pela probabilidade computada da rodada *offshore*.
 - c. A probabilidade máxima na grade aninhada é computada em cada ponto de grade – probabilidades máximas dentre os resultados probabilísticos de cada fonte do modelo aninhado para cada ponto de grade.

Essa metodologia pode ser utilizada com múltiplos aninhamentos – como feito para alcançar a escala do estuário de São Caetano de Odivelas, no qual a integração entre as escalas se dá em 2 estágios. Para exemplificar, apresentam-se os pontos de vazamento da grade mais abrangente e os pontos de conexão para o primeiro aninhamento (estuário do Rio Pará) e para o segundo aninhamento, para então obter a **suscetibilidade** no estuário de São Caetano de Odivelas (Figura 3-4).

⁴ O tempo de exposição reflete o tempo que uma mancha de óleo teria passado por um ponto de grade em cada simulação determinística podendo, portanto, representar a duração de vazamento na nova escala. Essa variável é proveniente da escala anterior, ou seja, para a sua utilização na escala aninhada é necessário obtê-la na escala anterior. Em termos práticos, o tempo de exposição é obtido a partir do número de passos de tempo ao qual uma célula da grade do modelo ficou exposto a pelo menos 1 partícula de óleo.

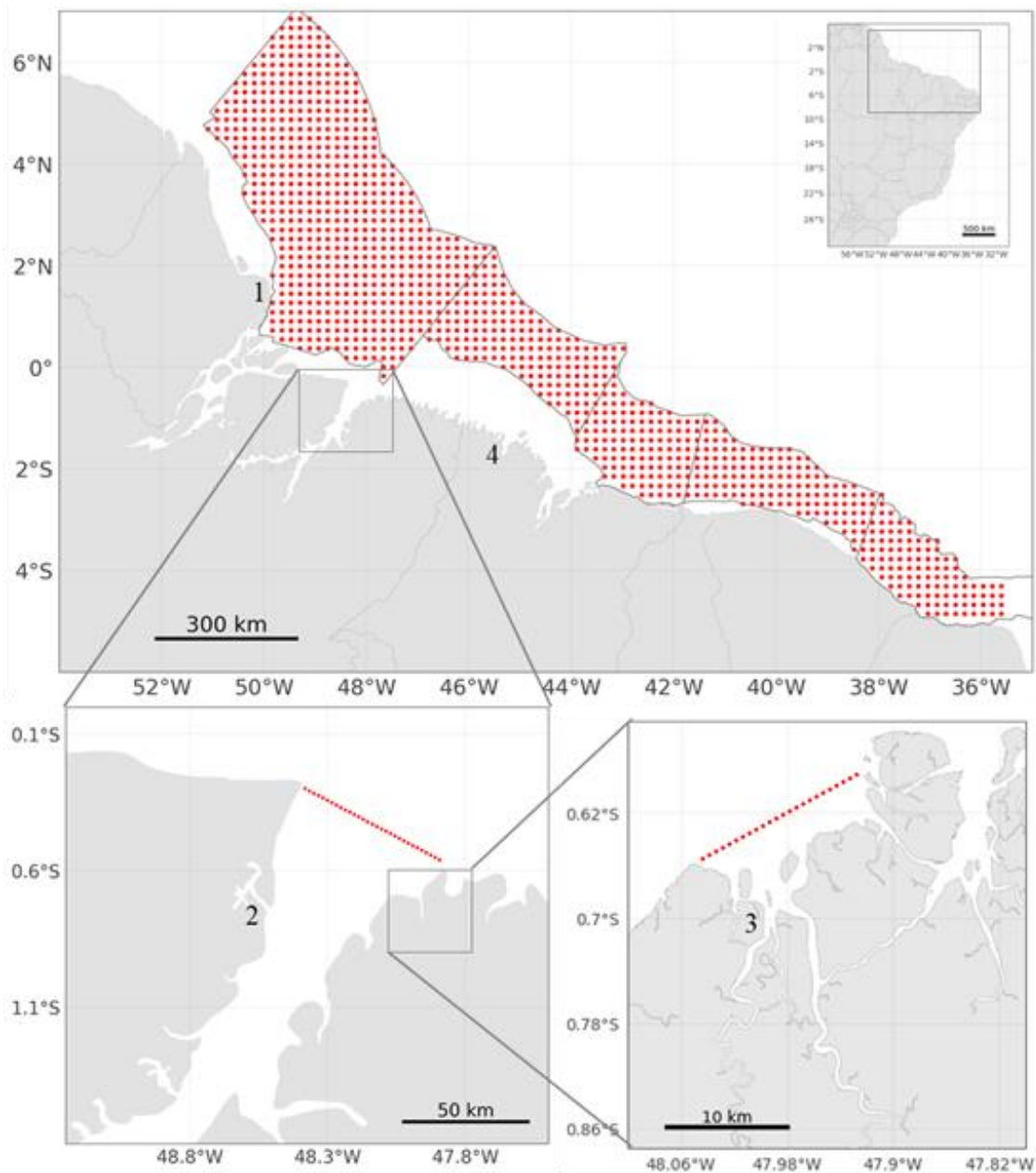


Figura 3-4: Figura esquemática dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes até chegar no modelo do estuário de São Caetano de Odivelas. O quadro superior representa os pontos de vazamento distribuídos nas bacias da MEB no modelo de dispersão de maior abrangência. O quadro inferior esquerdo indica os pontos de vazamento do modelo de dispersão aninhado para o estuário do rio Pará e o quadro inferior direito indica as fontes de vazamento do modelo de dispersão para o estuário de São Caetano de Odivelas.

Foram utilizados 5 modelos hidrodinâmicos distintos para forçar os modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes (as configurações de cada um são descritas no Capítulo 7 do Volume 2). Todos os modelos cobrem o ano de 2016, a saber:

- ROMS G1 – Modelo com grade estruturada com 1/12° de resolução espacial e que abrange toda a MEB. Este modelo foi utilizado como forçante da rodada de dispersão de

óleo de escala *offshore*, onde são distribuídas as fontes de vazamento por todas as bacias da MEB.

- Pará-Amazonas – Modelo com grade não-estruturada e resolução espacial variável, abrange da costa do Amapá até a costa do Maranhão, incluindo os principais estuários. Este modelo é utilizado tanto como uma escala intermediária entre o modelo *offshore* e o estuário de São Caetano de Odivelas, quanto como forçante para o modelo de dispersão para o sistema costeiro de Soure.
- Turiaçu - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo a baía de Turiaçu.
- São Caetano de Odivelas - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo o estuário de São Caetano de Odivelas.
- Sucuriçu - Modelo de grade não-estruturada e resolução espacial variável cobrindo o sistema costeiro de Sucuriçu.

O modelo de maior abrangência espacial contempla as fontes de vazamento, a partir do qual os demais serão aninhados e terão seus resultados probabilísticos integrados aos dele. Dessa forma, estende-se o alcance da área de probabilidade de toque das manchas originadas nas fontes de vazamento da escala *offshore* às regiões costeiras/estuarinas, com todo o ganho de detalhamento e resolução oferecido pelos modelos nessa escala – sem precisar de um modelo hidrodinâmico e de dispersão de óleo único que represente todas as escalas.

Um infográfico indicando o aninhamento dos modelos de dispersão de óleo utilizados para a obtenção da **suscetibilidade** em cada área de estudo específica e os modelos hidrodinâmicos utilizados como forçantes é apresentado na Figura 3-5:

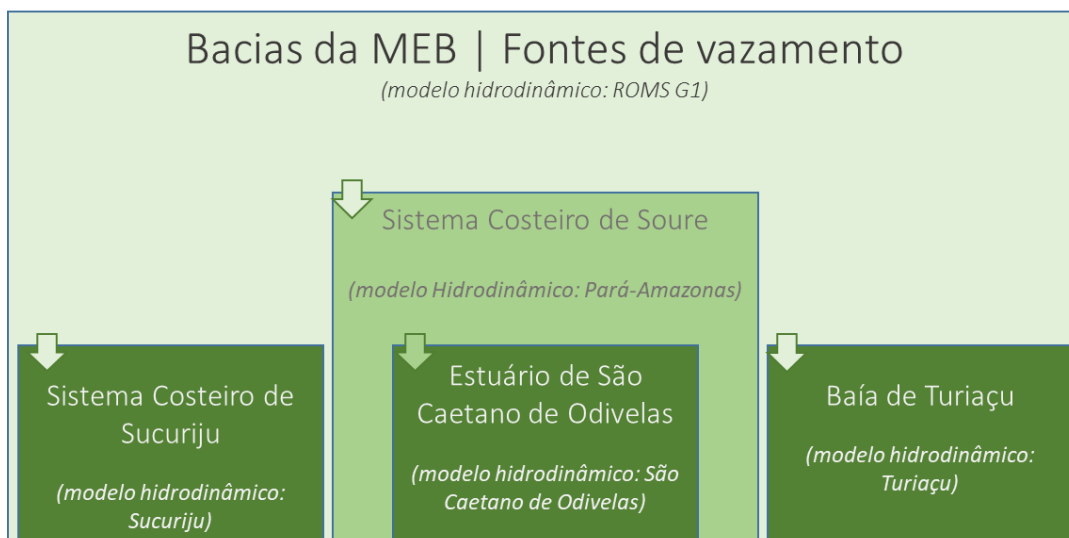


Figura 3-5: Esquema dos aninhamentos dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizado para obtenção dos resultados de suscetibilidade em escala regional e nos quatro estuários foco do Projeto Costa Norte – sistema costeiro de Soure, sistema costeiro de Sucuriçu, estuário de São Caetano de Odivelas e baía de Turiaçu. As setas indicam o sentido dos aninhamentos.

O processo de configurações dos modelos de dispersão de óleo utilizados na obtenção da **suscetibilidade** no PCN é apresentado em detalhes no Capítulo 8.3.1.2.4, e as configurações utilizadas encontram-se resumidas na Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Resumo das configurações dos modelos de dispersão de óleo com múltiplas fontes utilizados na metodologia de **suscetibilidade** do Projeto Costa Norte.

Modelo	Nº de fontes	Resolução	Intervalo entre simulações	Duração das simulações	Duração do Vazamento	Nº de partículas por simulação	Forçante Hidrodinâmica
Bacias da MEB	1.138	1 km	2 dias	30 dias	24 horas	10.000	ROMS G1
Rio Pará	31	200 m	3 horas	15 dias	Variável	5.000	Pará-Amazonas
Baía de Turiaçu	30	50 m	3 horas	15 dias	Variável	5.000	Turiaçu
Estuário de São Caetano de Odivelas	32	10 m	3 horas	15 dias	Variável	5.000	São C. Odivelas
Sistema costeiro de Soure	41	50 m	3 horas	15 dias	Variável	5.000	Soure
Sistema costeiro de Sucuriçu	33	20 m	3 horas	15 dias	Variável	5.000	Sucuriçu

Outro desafio do PCN – ligado a uma das motivações iniciais do PCN - é a representação da dispersão de óleo no interior do manguezal. Questionamentos como: qual o alcance do óleo no interior das florestas de mangue? Como representar as correntes nessas regiões? São perguntas que se colocam nos limites metodológicos desta área de conhecimento.

Ao alcançar uma floresta de mangue, o poluente pode ser transportado para seu interior, onde tanto a hidrodinâmica quanto o transporte e o intemperismo do óleo serão afetados pela própria floresta. Conforme explorado em diversos estudos (WOLANSKY *et al.* 1992, MAZDA & WOLANSKY 1995, MAZDA *et al.* 1997, MAZDA *et al.* 2005, MAZDA & KAMIYAMA, 2007), a hidrodinâmica é afetada pela interação da água com a vegetação de maneira complexa e diversas abordagens de parametrizações são propostas para representar esse efeito. O sedimento fino, encharcado e rico em matéria orgânica característico desse ecossistema é em grande parte oleofílico, favorecendo a retenção do óleo. A presença de tocas e galerias de caranguejos e outros organismos e as raízes das árvores também são fatores que favorecem a retenção do óleo (DUKE *et al.*, 2000; CULBERTSON *et al.*, 2007, LEWIS *et al.*, 2011, SANTOS *et al.*, 2011 *apud* DUKE, 2016). Porém, assim como o nível de toxicidade do óleo varia com o tipo de óleo, a retenção do óleo pelos mecanismos citados também (HENSEL *et al.* 2010).

Assim, do ponto de vista da **suscetibilidade**, uma importante questão pode ser formulada: até que distância, a partir do seu limite externo, determinada floresta de mangue é suscetível à contaminação por óleo? Acredita-se que a resposta a essa pergunta passe pelas seguintes considerações:

- Qual são as características físico-químicas do óleo que chegou ao manguezal?
- Qual a quantidade de óleo que chegou no manguezal?
- Como é o campo hidrodinâmico na floresta de mangue?
- Como é a interação do poluente com o ambiente, considerando a vegetação e as características do sedimento?

O último ponto é dependente do primeiro na medida que a interação do óleo com a floresta de mangue será variável para cada tipo de óleo - um derivado leve terá uma adsorção pelo sedimento e retenção pelas raízes do mangue diferente de um óleo altamente emulsificado. Como descrito, a ampliação da abrangência de pontos de vazamento considerados impõe incertezas quanto às características do óleo e do vazamento. Portanto, também conduz à incerteza sobre os dois primeiros pontos – tipo e quantidade do óleo que chega na floresta de mangue.

O terceiro ponto “Como é o campo hidrodinâmico na floresta de mangue?”, é resolvido diretamente pelos modelos hidrodinâmicos nas áreas de estudo específicas do projeto. Tais modelos utilizaram topografia de altíssima resolução nas regiões de florestas de mangue, e foram calibrados para considerar o efeito de atrito do manguezal sobre as correntes (ver Volume 2, Capítulo 7.4.1). O levantamento topográfico obtido no âmbito do PCN com a tecnologia LiDAR (descrito no Capítulo 5 do volume 2) possibilitou tanto a modelagem hidrodinâmica no interior das florestas de mangue quanto a avaliação dos dados de topografia disponíveis (p. ex. SRTM, ver Capítulo 7.4.2.3 do Volume 2) e a avaliação de metodologias alternativas para a definição da topografia em áreas de mangue onde não se tem dados topográficos de LiDAR (Volume 2, Capítulo 7.3.1.2). Dessa forma, a dispersão das partículas nas regiões de mangue é forçada por um campo hidrodinâmico que leva em conta não só a topografia detalhada destas regiões como também o efeito da vegetação de mangue sobre a hidrodinâmica.

Por fim, resta a última questão “Como é a interação do poluente com o ambiente, considerando a vegetação e o tipo de sedimento?”. Pela alta dependência desta questão com o tipo de óleo, características do sedimento, densidade das raízes, dentre outras variáveis, não foi considerado o efeito de retenção do óleo pela floresta de mangue, assumindo uma abordagem conservadora. Todavia, considerou-se a alteração da influência do vento sobre a deriva das partículas no interior das florestas de mangue. Enquanto em mar aberto, o óleo é transportado pela ação conjunta das correntes e do vento. Ao adentrar uma floresta de mangue, considerou-se que a ação do vento sobre o óleo cessa, devido à barreira física das árvores de mangue e suas raízes.

As análises de **suscetibilidade** foram separadas em cenários ambientais significativos para cada escala de análise. Os resultados probabilísticos na escala *offshore* foram divididos em dois períodos sazonais, período seco (julho a dezembro) e chuvoso (janeiro a junho). Exemplificando, na composição do resultado probabilístico do modelo de dispersão de óleo em escala *offshore* do

período chuvoso, consideram-se todos os resultados determinísticos cujo vazamento simulado se inicia entre os dias 01 de janeiro de 2016 a 30 de junho de 2016.

Aumentando a escala de detalhamento para os resultados dos modelos de dispersão de óleo dos sistemas costeiros e estuarinos, à divisão sazonal se adiciona a divisão entre cenários de maré de quadratura e sizígia. Ou seja, os resultados probabilísticos na escala costeira/estuarina apresentam 4 cenários: chuvoso/quadratura, chuvoso/sizígia, seco/quadratura, seco/sizígia. Da mesma forma que foi exemplificado acima, o resultado probabilístico do modelo de dispersão de óleo em escala detalhada de um dos sistemas costeiro/estuarino para o período seco com maré de quadratura é composto pela integração de todas as simulações determinísticas que tiveram a passagem do óleo pela interseção das escalas no período seco (julho a dezembro) e em maré de quadratura.

É importante ressaltar que o mapa de probabilidade de presença de óleo nas escalas de detalhamento do PCN para, por exemplo, o período seco com maré de quadratura é composto pelas simulações de manchas de óleo que passaram pela entrada do estuário no cenário específico (ver Capítulo 8 do Volume 2 para a localização da interface entre as escalas em cada modelo de dispersão de óleo costeiro e estuarino aninhado). Após essa entrada no sistema costeiro/estuarino no cenário determinado, o transporte do óleo é acompanhado por 15 dias (Tabela 3-3).

Por fim, seguindo a metodologia de divisão de classes das demais componentes de **vulnerabilidade**, a **suscetibilidade** das florestas de mangue nas áreas de estudo específicas é dividida em 4 classes:

- **Não suscetível:** pontos onde a probabilidade de presença de óleo é igual a 0%, ou seja, representa regiões não expostas ao risco analisado, considerando as fontes de vazamento utilizadas.
- **Baixa suscetibilidade:** pontos onde a probabilidade de presença de óleo é maior que 0% e menor que 13%.
- **Média suscetibilidade:** pontos onde a probabilidade de presença de óleo é maior ou igual a 13% e menor que 40%.
- **Alta suscetibilidade:** pontos onde a probabilidade de presença de óleo é maior ou igual a 40%.

A divisão em classes foi feita a partir do método estatístico iterativo *jenks natural breaks*, no qual a partir do conjunto de valores de probabilidade de óleo nas florestas de mangue das quatro áreas de estudo é feita a separação em grupos nos quais a variância entre os grupos é maximizada e a variância entre os valores dentro dos grupos é minimizada. Dessa forma, as classes das componentes são compartilhadas por todas as áreas, tornando os resultados comparáveis entre áreas.

Ressalta-se que, devido às particularidades do sistema costeiro de Sucuiju que impuseram limitações ao mapeamento topo-batimétrico e à modelagem hidrodinâmica (ver em detalhes no Capítulo 5), os resultados de **suscetibilidade** nas regiões de floresta de mangue deste sistema não foram considerados válidos.

O desenvolvimento específico do sistema de modelagem de dispersão de óleo a partir de múltiplas fontes - guiado pelos objetivos gerais do Projeto Costa Norte - forneceu ferramentas que contribuíram para moldar as metodologias integradas do projeto. A partir do sistema de múltiplas fontes, pôde-se obter o parâmetro “**Taxa de Afastamento**”, que se relaciona com o grau de **resiliência** das florestas de mangue (ver capítulo 3.5). Este processo de construção de metodologia pode ser visualizada pela analogia a um pêndulo que oscila entre a visão do todo e a específica, carregando informações bidirecionalmente.

3.4. Sensibilidade

Conforme o marco conceitual metodológico exposto no item 3.2.3, a determinação da **sensibilidade** nas florestas de mangue teve como *proxie* a **Energia Cinética** (E_c) associada ao fluxo de água gerado pelas marés em cada porção da floresta de mangue. Dessa forma, quanto menor a E_c de determinada porção da floresta de mangue, maior será seu nível de estresse natural e, portanto, maior sua **sensibilidade** a um tensor externo adicional – o óleo.

No âmbito do Projeto Costa Norte, foram desenvolvidos modelos hidrodinâmicos de alta resolução⁵ para os 4 sistemas costeiros e estuarinos de interesse específico, que incluem a representação das correntes associadas à propagação da onda de maré não apenas nos rios e canais, mas também nas zonas entremarés onde se encontram as florestas de mangue. Esse detalhamento da hidrodinâmica nas regiões de manguezal foi possibilitado pelo levantamento topográfico obtido por LiDAR, representando um grande avanço técnico que se encontra detalhado nos capítulos 5 (LiDAR) e 7 (Modelagem Hidrodinâmica) do Volume 2 do presente relatório.

A partir da intensidade das correntes em cada ponto de grade dos modelos hidrodinâmicos no interior do manguezal, a E_c foi calculada para cada intervalo de escrita dos resultados (1 hora), e os resultados ao longo de 1 ano foram somados. Assim, o *proxy* para a **sensibilidade** utilizado é o somatório anual da E_c em cada porção de manguezal.

De forma geral, a E_c é a energia associada ao movimento de uma massa ou objeto, logo, quanto maior sua velocidade, maior será sua energia. De forma simplificada a energia cinética pode ser traduzida pela equação a seguir:

$$E_c = \frac{m \cdot \bar{V}^2}{2}$$

⁵ O modelo utilizado para a simulação da hidrodinâmica local foi o *D-Flow Flexible Mesh* (Delft3D), desenvolvimento pela Deltares, tendo sido implementado em malha flexível 2D, onde o tamanho dos elementos em área de mangue variou de 10 a 50 m. Dados horários foram obtidos para cada ponto de grade. Os modelos foram calibrados com dados oceanográficos coletados no PCN (ver Capítulo 4 do Volume 2).

Onde a unidade de m é expressa em kg e de V em m/s . Sabendo-se que a massa específica (ρ) de um fluido é a razão entre a massa e o volume, obtém-se:

$$Ec = \frac{\rho \cdot Vol \cdot \vec{V}^2}{2}$$

Para a equivalência das unidades finais, considerou-se ρ sendo 1000 kg/m^3 . O volume é dado por:

$$Vol = A \cdot h$$

Sendo A a área e h a altura da coluna d'água. Uma vez que o valor obtido é representativo de uma unidade de área (e não para uma unidade de grade) de $1 \times 1 \text{ m}$, a área foi desconsiderada para a equação final. Estabelecendo, desta forma:

$$Ec = \frac{\rho \cdot A \cdot h \cdot \vec{V}^2}{2}$$

O somatório anual da energia cinética calculado em cada ponto de grade do modelo foi interpolado para uma grade regular de $10 \times 10 \text{ m}$ – grade comum a todas as componentes de **vulnerabilidade** - traduzindo assim, a energia da massa de água local. Por fim, conforme a metodologia exposta, a **sensibilidade** das florestas de mangue é dividida em 3 classes:

- **Sensibilidade extremamente alta:** regiões onde a energia cinética é maior que 0 J e menor que $0,2 \text{ J}$.
- **Sensibilidade muito alta:** regiões onde a energia cinética é maior ou igual a $0,2 \text{ J}$ e menor que 158 J .
- **Sensibilidade alta:** regiões onde a energia cinética é maior ou igual a 158 J .

Como as demais componentes, a divisão em classes foi feita a partir do método estatístico iterativo *jenks natural breaks*, no qual a partir do conjunto de valores de Ec (somatório anual) nas florestas de mangue das quatro áreas de estudo é feita a separação em grupos (*clusters*). Devido à grande amplitude de variação dos valores do *proxy* utilizado (valores de 0 a 10^6 J), a divisão em classes pelo *natural breaks* foi obtida após a conversão dos valores em escala logarítmica (base 10).

Ressalta-se que, devido às particularidades do sistema costeiro de Sucuiju que impuseram limitações ao mapeamento topo-batimétrico e à modelagem hidrodinâmica (ver em detalhes no Capítulo 5), os resultados de **sensibilidade** neste sistema não foram considerados válidos.

3.5. Resiliência

Considerando a fundamentação conceitual da componente **resiliência** discutida no item 3.2.3, a diferenciação comparativa infrassistêmica desta componente é feita a partir de dois *proxies*: **Trabalho** (Joules) e **Taxa de afastamento** (metros por hora). O primeiro é um indicador da capacidade de remobilização e remoção tanto física quanto biológica, na medida que indica a energia associada à capacidade de deslocamento da massa de água em determinada porção de manguezal, assim como a transferência de energia para o sedimento, determinando a possibilidade de oxigenação e incremento da remoção biológica (degradação) do óleo. O segundo indica a

capacidade do sistema de afastar o tensor, a partir da remoção do óleo, incorporando não só a dinâmica da parcela de manguezal, mas também das áreas adjacentes.

A composição do nível de **resiliência** é feita a partir de uma média ponderada destes dois *proxies*, na qual o **Trabalho** tem peso 2 – por se relacionar tanto à remoção física quanto à biológica – e a **Taxa de afastamento** tem peso 1.

Apresenta-se a matriz de composição da **resiliência** na Tabela 3-4, na qual a **resiliência** é classificada em 5 classes: muito baixa (1), baixa (2), média (3), alta (4) e muito alta (5), a partir da integração das classes dos *proxies* que a compõe.

Tabela 3-4: Matriz de **resiliência** a partir do cruzamento do Trabalho com a Taxa de Afastamento.

		Taxa de afastamento		
		Alta	media	baixa
Trabalho	Muito alto	Muito alta	Alta	Alta
	Alto	Alta	Alta	Média
	Medio	Alta	Média	Baixa
	Baixo	Média	Baixa	Baixa
	muito baixo	Baixa	Baixa	Muito baixa

Apresenta-se a seguir a metodologia para a obtenção do **Trabalho** e da **Taxa de Afastamento**, bem como para definição das classes que compõem esses dois *proxies*, conforme apresentadas na tabela 3-4. Ressalta-se que, devido às particularidades do sistema costeiro de Sucuiju que impuseram limitações ao mapeamento topo-batimétrico e à modelagem hidrodinâmica (ver em detalhes no Capítulo 5), os resultados de **resiliência** neste sistema não foram considerados válidos.

3.5.1. Trabalho (τ)

Assim como para **Energia Cinética**, a obtenção do **Trabalho** foi possível a partir da quantificação das correntes e da variação do nível d'água - associado à interação da onda de maré com a morfologia das regiões estudadas - pelos modelos hidrodinâmicos de alta resolução desenvolvidos no âmbito do Projeto Costa Norte (ver Capítulo 7 do Volume 2). Dessa forma, como será descrito a seguir, o cálculo do **Trabalho** pôde ser feito para cada ponto de grade dos modelos em uma frequência horária (intervalo de escrita dos resultados) e, posteriormente, obtido o somatório anual. O somatório anual do **Trabalho** em cada ponto de grade dos modelos no interior das florestas de mangue foi interpolado em uma grade regular com 10 metros de resolução, comum a todas as componentes de **vulnerabilidade**, possibilitando o cálculo da **vulnerabilidade**, a partir da matriz de integração (Tabela 3-2).

O Trabalho (τ), enquanto grandeza física, é um definidor quantitativo de uma força aplicada que produz deslocamento de uma massa – ou seja, a variação de energia. Representa a razão direta da força pela distância, quando a força possui mesma direção do movimento, o trabalho será positivo ($\tau > 0$); o oposto, negativo ($\tau < 0$). Contudo, uma vez que a metodologia da modelagem aplicada

não considera uma área de canal e sim pontos de grade no interior de florestas de mangue, apenas a magnitude da velocidade (módulo) foi adotada para o cálculo final, assim como o módulo da diferença entre altura de coluna d'água em cada ponto de grade.

Admitindo-se que força é a derivada do momento e desconsiderando a variação da velocidade em $M \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$, onde apenas a porção variável da coluna d'água terá movimento, a parcela que irá entrar ou sair do sistema, gera, desta forma, uma variação de energia ($\tau = \Delta E$).

$$\tau = \vec{V} \cdot \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot d$$

Onde é \vec{V} a velocidade, Δt é o intervalo de tempo, Δm é a massa da porção de coluna d'água a ser deslocada e d a distância a ser percorrida (nesse caso admite-se uma unidade de comprimento).

Sendo:

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta Vol \text{ e } \Delta Vol = \rho \cdot A \cdot \Delta h$$

Onde a variação de volume é calculada por unidade de área multiplicada pela variação de altura da coluna d'água. O trabalho é expresso por:

$$\tau = \rho \cdot \vec{V} \cdot A \cdot d \cdot \frac{|h_1 - h_2|}{\Delta t}$$

A partir de uma análise espacial do resultado gerado (somatório anual do **Trabalho** interpolado na grade regular), foi definido que esse *proxy* seria dividido em 5 classes. Da mesma forma que para o *proxy* de **sensibilidade** (E_c), a grande amplitude de variação dos valores obtidos (de 0 a 10^3) conduziu à utilização de escala logarítmica (base 10) anteriormente a aplicação do método estatístico de agrupamento *jenks natural breaks*.

As classes definidas para o **Trabalho** são listadas a seguir.

- **Muito baixo:** maior que 0 J e menor que $10^{-3,7}$ J
- **Baixo:** maior ou igual a $10^{-3,7}$ J e menor que $10^{-1,7}$ J
- **Médio:** maior ou igual a $10^{-1,7}$ J e menor que $10^{-0,3}$ J
- **Alto:** maior ou igual a $10^{-0,3}$ J e menor que 10^1 J
- **Muito alto:** maior ou igual a 10^1 J

3.5.2. Taxa de Afastamento

Ao longo das discussões metodológicas interdisciplinares do PCN, foi identificada a possibilidade de utilizar a ferramenta de modelagem de dispersão de óleo com múltiplas fontes (ver Capítulo 8.3, Volume 2) para indicar a capacidade de remoção física do poluente que já houvesse hipoteticamente atingido determinada parcela de mangue e, com isso, atuar como um parâmetro na composição da componente **resiliência**. Esse parâmetro foi nomeado como **taxa de afastamento**, pois representa a velocidade média de afastamento de uma mancha de óleo a partir de um ponto no interior da floresta de mangue.

A metodologia consiste em simular a dispersão do óleo a partir de pontos espalhados no interior das florestas de mangue – simulando o hipotético “risco materializado”, conceito base da componente **resiliência**. Dependendo da hidrodinâmica de cada região interna das florestas de mangue, as partículas levarão mais, ou menos tempo para serem removidas e transportadas para longe do ponto inicial. Dessa forma, regiões com tendência a estagnação e com baixa hidrodinâmica apresentam menor **taxa de afastamento**, indicando menor **resiliência**.

Foram executadas simulações de dispersão de óleo com múltiplas fontes distribuídas a cada 100 metros por toda a região de floresta de mangue de cada sistema costeiro e estuarino estudado. As simulações foram conduzidas ao longo de um ano, com espaçamento temporal entre simulações de 3 horas e duração de cada simulação por 15 dias.

Ao contrário das rodadas para a análise de **suscetibilidade**, cada simulação utiliza apenas 1 partícula, e o objetivo não é de obter a área varrida por cada partícula, mas sim obter a posição de cada partícula ao longo das simulações. Desta forma, foi necessário alterar o código do modelo para que salvasse a trajetória de cada partícula simulada a cada 1 hora. Após o término da simulação, para cada fonte de lançamento foi obtida a velocidade de afastamento da partícula em relação ao ponto inicial, promediada por todas as simulações ao longo do ano simulado (2.920 simulações por fonte ao longo do ano). Ou seja, a **taxa de afastamento** de um ponto do interior da floresta de mangue é a média da taxa de afastamento de cada simulação de dispersão a partir daquele ponto ao longo do ano, garantindo uma ampla representatividade da variabilidade de condições hidrodinâmicas. O deslocamento das partículas após saírem de uma região de mangue – adentrando um canal, por exemplo – é desconsiderado. Como a **resiliência** indica o grau de capacidade de resposta e recuperação do manguezal ao óleo, e o tempo necessário para recuperação completa é da ordem de 30 anos (DUKE, *et al.* 2016), este parâmetro não foi dividido em cenários ambientais (períodos seco e chuvoso, ou cenários de maré de sizígia e quadratura).

Na Figura 3-6 apresenta-se um trecho do domínio do modelo de múltiplas fontes aplicado na obtenção da taxa de afastamento no estuário de São Caetano de Odiveiras, exemplificando a distribuição das fontes de lançamento de partículas. Ressalta-se que a representação da hidrodinâmica no interior das florestas de mangue é um pré-requisito para esta análise, e que isso foi obtido através da utilização da topografia detalhada (LiDAR) na configuração do modelo digital de terreno dos modelos hidrodinâmicos de alta resolução nos sistemas costeiros e estuarinos (ver Capítulo 5 e 7 do Volume 2).

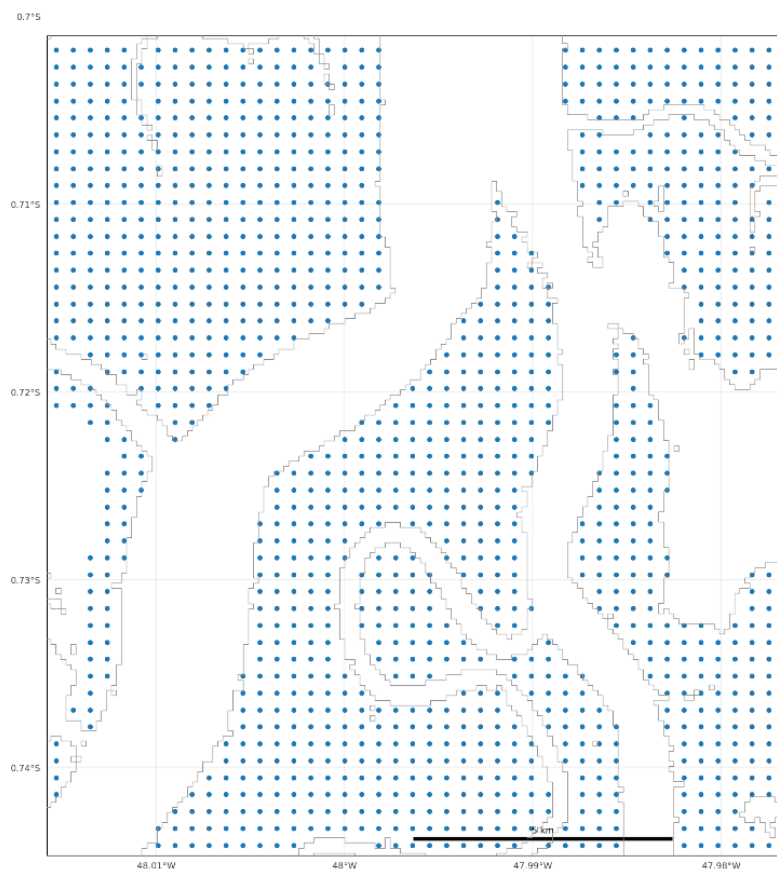


Figura 3-6: Zoom em região de floresta de mangue no estuário de São Caetano de Odiveias demonstrando as fontes de óleo consideradas na modelagem da **taxa de afastamento** (pontos azuis).

É importante ressaltar que este parâmetro é influenciado não só pela hidrodinâmica local dos pontos de lançamento, mas também pela hidrodinâmica das regiões adjacentes. Por exemplo, um ponto que tenha uma alta capacidade de remoção do óleo, porém que o mesmo seja transportado para uma região adjacente com alta estagnação, terá como reflexo uma **taxa de afastamento** não tão alta e conseqüente redução do nível de **resiliência**.

Assim como para as outras componentes, a **taxa de afastamento** foi classificada a partir do método *jenks natural breaks* levando-se em conta o conjunto de resultados dos sistemas costeiros e estuarinos. Dessa forma, a **taxa de afastamento** foi dividida em 3 classes:

- **Baixa taxa de afastamento:** maior ou igual a 0 e menor que 34 metros por hora.
- **Média taxa de afastamento:** maior ou igual a 34 m/h e menor que 69 m/h.
- **Alta taxa de afastamento:** maior ou igual a 69 m/h.

3.6. Referências

- CARVALHO, G.V.; CABRAL, M.M.; DE OLIVEIRA, A.L.S.C.; GARÇÃO, H.F., AND PELLEGRINI, J.A.C., 2020. Methodology to evaluate the coastal susceptibility to oil spills originated in large marine areas – Costa Norte Project. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95, pp. 1344–1348. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208. doi.org/10.2112/SI95-258.1
- CINTRÓN, G.; LUGO, A.E.; MARTINEZ, R. 1985. Structural and Functional Properties of Mangrove Forests. *The Botany and Natural History of Panama*. Ed. W.G. D'Arcy e Correa, M.D.A. Missouri Botanical Garden. Saint Louis, Missouri. p. 53-66.
- CINTRÓN, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. 1983. Introducción a la ecología del manglar. *Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe - ROSTLAC*. Montevideo, Uruguay. 109 pp.
- DUKE, N.C. 2016. Oil spill impacts on mangroves: Recommendations for operational planning and action based on a global review. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.082.
- HENSEL, P., PROFFITT, E.C., DELGADO, P., SHIGENAKA, G., YENDER, R., HOFF, R., MEARN, A.J., 2010. In: Hoff, R. (Ed.), *Oil Spills in Mangroves Planning and Response Considerations*.
- IBP. 2012. Propostas de Análise de Riscos e de Resposta a Emergências por Vazamento de Óleo no Mar devido às Atividades de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural.
- IPCC (2001) *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Summary for Policymakers*, WMO.
- IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
- IPIECA. 2013. *Oil spill risk assessment and response planning for offshore installations*.
- KALY U., BRIGUGLIO L., MCLEOD H., SCHMALL S., PRATT C. AND PAL R. 1999. Environmental Vulnerability Index (EVI) to summarise national environmental vulnerability profiles. SOPAC Technical Report 275. 66p.; 3 annexes, 2 figures, 1 table. ISBN 982-207-009-8
- LUGO, A. E.; SNEDAKER, S.C. 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5: 39-64.
- MAZDA, Y. et al. Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, [s.l.], v. 1, no 3, p. 193–199, 1997.

- MAZDA, Yoshihiro; KAMIYAMA, K. Tidal deformation and inundation characteristics within mangrove swamps. *Mangrove Science*, [s.l.], v. 45, no March, p. 21–29, 2007.
- MAZDA, Yoshihiro; KANAZAWA, N.; WOLANSKI, E. Tidal asymmetry in mangrove creeks. *Hydrobiologia*, [s.l.], v. 295, no 1–3, p. 51–58, 1995.
- MAZDA, Yoshihiro; KOBASHI, D.; OKADA, S. Tidal-scale hydrodynamics within mangrove swamps. *Wetlands Ecology and Management*, [s.l.], v. 13, no 6, p. 647–655, 2005.
- MMA, 2004. Ministério do Meio Ambiente. Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo Cartas SAO. Brasília, DF, 2004, 107p.
- MME/EPE. 2017. Zoneamento Nacional de Recursos de Óleo e Gás. Ciclo 2015-2017 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília
- NICOLODI, J. L. PETERMANN, R. M. 2010. Potential vulnerability of the Brazilian coastal zone in its environmental, social, and technological aspects. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* (2010), 5(2): 184-204
- PETROBRAS/MOTT MACDONALD. 2017. Análise de Vulnerabilidade. Teste de Longa Duração de Farfan - Poço 3-SES-176D, Concessão BM-SEAL 11 - Bacia de Sergipe-Alagoas.
- PETROBRAS/EGIS. 2017. Análise da Vulnerabilidade. Plano de Emergência Individual – PEI. Atividade de Perfuração Marítima nos Blocos BM-PEPB-1 e BM-PEPB-3 Bacia de Pernambuco-Paraíba Estudo de Impacto Ambiental – EIA.
- POOL, D.J.; SNEDAKER, S.C.; LUGO, A.E. 1977. Structure of mangrove forests in Florida, Puerto Rico, Mexico and Costa Rica. *Biotropica*, 9 (3): 195-212.
- POOL, D.J.; LUGO, A.E.; SNEDAKER, S.C. 1975. Litter production in mangrove forests of Southern Florida and Puerto Rico. In: *Proceedings of the International Symposium on the Biology and Management of Mangroves*. G.E. Walsh; S.C. Snedaker; H.J. Teas (eds.). Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Gainesville, Florida, Vol. I. pp. 213-237.
- RESOLUÇÃO CONAMA nº 398/2008–“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, dutos, sondas terrestres, plataformas e suas instalações de apoio, refinarias, estaleiros, marinas, clubes náuticos e instalações similares, e orienta a sua elaboração”
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y., CINTRON-MOLERO, G., ADAIME, R.R., CAMARGO, T.M. 1990. Variability of mangrove ecosystems along the Brazilian coast. *Estuaries*, v.13, n.2, pp. 204-218.
- SPAULDING, M.L. 2017. State of the art review and future directions in oil spill modeling. *Marine Pollution Bulletin*, 115, 7-19.

TOSTE, R, SOARES, A.E., NEHME, D.M., SANCHO, L., BÖCK, C., ASSAD, L.P.F., LANDAU, L. 2020. 4DVAR Data Assimilation in the Brazilian Equatorial Margin – Costa Norte Project. *In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), Global Coastal Issues of 2020. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95*, pp. 1326–1332. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

TWILLEY, R.R. 1995. Properties of mangrove ecosystems related to the energy signature of coastal environments. *In: Maximum Power. C. Hall (ed.). University of Colorado Press. Boulder, Colorado.* pp. 43-61.

TWILLEY, R.R.; LUGO, A.E.; PATTERSON-ZUCCA, C. 1986. Litter production and turnover in basin mangrove forests in Southwest Florida. *Ecology*, 67 (3): 670-683.

WOLANSKI, E.; MAZDA, Y.; RIDD, P. Mangrove hydrodynamics. [s.l.], v. 41, p. 43–62, 1992.