Capítulo 4

Análise de Vulnerabilidade dos Manguezais – Aplicações na Área de Estudo

Autores do Capítulo

Núcleo de Estudos de Geoquímica e Ecologia Marinha Costeira - UERJ

Me. Alex Alves

Ma. Carla Muniz Sabino

Dr. Filipe de Oliveira Chaves

Bel. Lucas Silva Pereira

Ma. Maria Rita Olyntho Machado

Dr. Mário Luiz Gomes Soares

Prooceano

Me. Gabriel Vieira de Carvalho

Dr. Júlio Augusto de Castro Pellegrini

Coordenação Adjunta

Ma. Carla Muniz Sabino

Me. Gabriel Vieira de Carvalho

Colaboradores

Profa. Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz

Me. Felipe Gonçalves Amaral

Me. Gabriel dos Santos Duarte

Dra. Paula Maria Moura de Almeida

Dr. Rafael Silva de Barros

Prof. Dr. Marcelo Rollnic

Dra. Thaís Angélica da Costa Borba

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

MACHADO, M.R.O., CARVALHO, G.V., ALVES, A., SABINO, C.M., PEREIRA, L.S., CHAVES, F.O., SOARES, M.L.G., PELLEGRINI, J.A.C. “Análise de Vulnerabilidade dos Manguezais – Aplicações na Área de Estudo”, Capítulo 4. 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

4. Vulnerabilidade Ambiental dos Manguezais da Costa Norte 95
4.1. Baía de Turiaçu (MA) 99
4.1.1. Suscetibilidade 100
4.1.2. Sensibilidade 112
4.1.3. Resiliência 116
4.1.4. Vulnerabilidade 121
4.2. Estuário de São Caetano de Odivelas (PA) 138
4.2.1. Suscetibilidade 138
4.2.2. Sensibilidade 151
4.2.3. Resiliência 155
4.2.4. Vulnerabilidade 159
4.3. Sistema Costeiro de Soure (PA) 175
4.3.1. Suscetibilidade 175
4.3.2. Sensibilidade 188
4.3.3. Resiliência 192
4.3.4. Vulnerabilidade 197
4.4. Síntese da Análise de Vulnerabilidade nas Florestas de Mangue da MEB 214

Índice de Figuras

Figura 4-1: Probabilidade máxima de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala *offshore*. Período Chuvoso (a esquerda) e Período Seco (a direita). Os polígonos em preto representam as Bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira, onde as fontes de vazamento encontram-se distribuídas. As localizações aproximadas das áreas de estudo específicas do projeto estão assinaladas com (1) Baía de Turiaçu (MA), (2) Estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e (3) Sistema costeiro de Soure (PA). 96
Figura 4-2: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo à Baía de Turiaçu (MA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita. 101
Figura 4-3: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo na Baía de Turiaçu (MA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 102
Figura 4-4: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo na Baía de Turiaçu (MA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB. nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 103
Figura 4-5: Probabilidade máxima de chegada de óleo na Baía de Turiaçu (MA). Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 105
Figura 4-6: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 106
Figura 4-7: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura. 108
Figura 4-8: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia. 109
Figura 4-9: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura. 110
Figura 4-10: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia. 111
Figura 4-11: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue da baía de Turiaçu (MA). 112
Figura 4-12: Resultados da **sensibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. 114
Figura 4-13: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR na Baía de Turiaçu (MA). Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 115
Figura 4-14: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA). 116
Figura 4-15 – Resultados da **Resiliência** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. 118
Figura 4-16: Trabalho (J), *proxy* da **resiliência**, da Baía de Turiaçu (MA). 119
Figura 4-17: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, da Baía de Turiaçu (MA). 120
Figura 4-18: Distribuição geral das classes de vulnerabilidade nas florestas de mangue da baía de Turiaçu (MA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 121
Figura 4-19: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período chuvoso e maré de quadratura. 125

Figura 4-20: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período chuvoso e maré de sizígia. 126
Figura 4-21: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período seco e maré de quadratura. 127
Figura 4-22: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período seco e maré de sizígia. 128
Figura 4-23: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período chuvoso e maré de quadratura. 131
Figura 4-24: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período chuvoso e maré de sizígia. 131
Figura 4-25: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período seco e maré de quadratura. 132
Figura 4-26: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período seco e maré de sizígia. 132
Figura 4-27: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período chuvoso e maré de quadratura. 134
Figura 4-28: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período chuvoso e maré de sizígia. 135
Figura 4-29: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período seco e maré de quadratura. 136
Figura 4-30: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período seco e maré de sizígia. 137
Figura 4-31: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo ao estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita.. 139
Figura 4-32: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 140
Figura 4-33: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB. nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 141
Figura 4-34: Probabilidade máxima de chegada de óleo na entrada do estuário do Rio Pará. Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). O retângulo cinza escuro representa a localização aproximada do domínio do modelo de dispersão de óleo do estuário de São Caetano de Odivelas, na próxima escala de maior detalhamento. 143
Figura 4-35: Probabilidade máxima de chegada de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas. Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 144
Figura 4-36: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 145
Figura 4-37: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura. 147
Figura 4-38: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia. 148
Figura 4-39: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura. 149

Figura 4-40: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia. 150
Figura 4-41: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA). 151
Figura 4-42: Resultados da **sensibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas à contaminação por óleo. 153
Figura 4-43: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).. 154
Figura 4-44: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA). 155
Figura 4-45: Resultados da **resiliência** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo..... 156
Figura 4-46: Trabalho (J), *proxy* da **resiliência**, do estuário de São Caetano de Odivelas (PA)..... 157
Figura 4-47: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, do estuário de São Caetano de Odivelas (PA). 158
Figura 4-48:Distribuição geral das classes de **vulnerabilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 159
Figura 4-49: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura. 163
Figura 4-50: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período chuvoso e maré de sizígia. 164
Figura 4-51: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período seco e maré de quadratura..... 165
Figura 4-52: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período seco e maré de sizígia. 166
Figura 4-53: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período chuvoso e maré de quadratura 168
Figura 4-54: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período chuvoso e maré de sizígia..... 168
Figura 4-55: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período seco e maré de quadratura. 169
Figura 4-56: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período seco e maré de sizígia. 169
Figura 4-57: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período chuvoso e maré de quadratura. 171
Figura 4-58: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período chuvoso e maré de sizígia..... 172
Figura 4-59: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período seco e maré de quadratura. 173
Figura 4-60: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período seco e maré de sizígia..... 174

Figura 4-61: Área de estudo do sistema costeiro de Soure (PA) e os trechos de costa utilizados como referência da análise de vulnerabilidade e suas componentes. Trecho A - porção mais ao sul da costa leste; trecho B - porção intermediária da costa leste; trecho C - porção ao norte da costa leste; trecho D porção da costa norte. 175
Figura 4-62: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo ao sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita. 177
Figura 4-63: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 178
Figura 4-64: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita. 179
Figura 4-65: Probabilidade máxima de chegada de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 181
Figura 4-66: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 182
Figura 4-67: Resultados da s**uscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 184
Figura 4-68: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 185
Figura 4-69: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 186
Figura 4-70: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 187
Figura 4-71: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA). 188
Figura 4-72: Resultados da **Sensibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. 190
Figura 4-73: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR do sistema costeiro de Soure (PA). Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo. 191
Figura 4-74: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA). 192
Figura 4-75: Resultados da **resiliência** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. 194
Figura 4-76: Trabalho (J), *proxy* da **resiliência**, do sistema costeiro de Soure (PA). 195

Figura 4-77: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, do sistema costeiro de Soure (PA). 196
Figura 4-78: Distribuição geral das classes de **vulnerabilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). 197
Figura 4-79: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período chuvoso e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. 202
Figura 4-80: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período chuvoso e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte..... 203
Figura 4-81: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período seco e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte..... 204
Figura 4-82: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período seco e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte..... 205
Figura 4-83: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período chuvoso e maré de quadratura. 207
Figura 4-84: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período chuvoso e maré de sizígia. 207
Figura 4-85: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período seco e maré de quadratura. 208
Figura 4-86: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período seco e maré de sizígia. 208
Figura 4-87: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período chuvoso e maré de quadratura. 210
Figura 4-88: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período chuvoso e maré de sizígia. 211
Figura 4-89: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período seco e maré de quadratura. 212
Figura 4-90: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período seco e maré de sizígia. 213

Índice de Tabelas

Tabela 4-1: Matriz de **Vulnerabilidade** considerando a integração das componentes **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**. As diferentes cores assinalam os resultados de vulnerabilidade Alta, Média e Baixa. As combinações das componentes citada nos exemplos i e ii mencionados no texto estão indicadas pelas letras em maiúsculas sublinhadas. 98
Tabela 4-2: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 122
Tabela 4-3: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário 123
Tabela 4-4: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 123
Tabela 4-5: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 123
Tabela 4-6: Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não-vulnerável) em cada fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), conforme os cenários analisados. 133
Tabela 4-7: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 161
Tabela 4-8: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 161
Tabela 4-9: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 162
Tabela 4-10: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 162
Tabela 4-11 Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não-vulnerável) em cada fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), conforme os cenários analisados. 170

Tabela 4-12: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 198
Tabela 4-13: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 199
Tabela 4-14: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 199
Tabela 4-15: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário. 199
Tabela 4-16: Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não vulnerável) em cada fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), conforme os cenários analisados. 209

4. Vulnerabilidade Ambiental dos Manguezais da Costa Norte

Neste capítulo, serão apresentadas as aplicações da metodologia proposta para a análise de **vulnerabilidade** dos manguezais à contaminação por óleo em evento acidental (Capítulo 3) para três dos quatro sistemas costeiros e estuarinos estudados em detalhe no Projeto Costa Norte (PCN), Baía de Turiaçu (MA), Estuário de São Caetano de Odivelas (PA), Sistema Costeiro de Soure (PA).

O Sistema Costeiro de Sucuriju (AP) é a área de estudo que apresentou as maiores singularidades dentre todas as áreas de estudo contempladas pelo PCN. Essas singularidades estão representadas por algumas de suas principais características como ser composto por um sistema de lagos perenes, extensas planícies flúvio-lacustres e flúvio-marinhas, apresentar uma alta pluviosidade anual (>2.800 mm/ano) e um regime de hipermarés, com oscilações de nível de até 12 metros de amplitude. Tal complexidade impôs algumas limitações às técnicas utilizadas (mapeamento topo-batimétrico e modelagem numérica) que influenciaram a capacidade da representação da hidrodinâmica nas áreas alagáveis com florestas de mangue e, portanto, a obtenção dos *proxies* determinantes das componentes de **vulnerabilidade**. O Capítulo 5 relata em detalhes as particularidades deste sistema, as limitações associadas que postergaram a aplicação da metodologia desenvolvida para esta área de estudo, e as considerações sobre **vulnerabilidade** a partir dos resultados de **suscetibilidade** *offshore* e dos dados levantados pelo PCN.

Nas áreas de estudo Baía de Turiaçu (MA), Estuário de São Caetano de Odivelas (PA), Sistema Costeiro de Soure (PA) (Figura 4-1) – as análises foram conduzidas para as componentes da **vulnerabilidade – suscetibilidade, sensibilidade** e **resiliência –** e, ao final, para a **vulnerabilidade** propriamente dita. Iniciando com a componente **suscetibilidade**, são analisadas as probabilidades de presença do óleo desde as fontes de vazamentos distribuídas nas bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira (MEB) até as florestas de mangue, assim como são identificadas dentre todas as fontes de vazamento consideradas, aquelas com probabilidade de toque de óleo para cada uma dessas áreas de estudo. Na sequência, são apresentadas as análises de **sensibilidade** e **resiliência** das florestas de mangue ao óleo, onde são identificadas as regiões mais e menos sensíveis e resilientes, considerando as características topográficas e de hidrodinâmica. Por fim, é apresentado o resultado da análise de **vulnerabilidade** das florestas de mangue ao óleo, com base na interpretação integrada das componentes a partir da matriz de vulnerabilidade proposta (ver também Tabela 3-2, Capítulo 3). O resultado da análise de **vulnerabilidade** é, por fim, integrado ao mapeamento das fitofisionomias identificadas em cada área de estudo, permitindo observar a distribuição das diferentes fitofisionomias de florestas de mangue nas classes de **vulnerabilidade.**

Na análise dos resultados da componente **suscetibilidade**, para um entendimento mais abrangente, os resultados serão apresentados desde a escala *offshore,* onde os pontos de vazamento considerados se encontram, até a escala local, mais detalhada, de cada área de estudo. Os aspectos gerais dos resultados de **suscetibilidade** em escala *offshore* são comuns a todas as áreas e, assim, são apresentados a seguir. Os aspectos específicos serão apresentados nos subitens dedicados a cada área de estudo.

Como pode ser visto nos mapas de probabilidade máxima de presença de óleo na região da MEB, considerando todos os pontos de vazamento para os cenários chuvoso e seco (Figura 4-1), há uma significativa variabilidade sazonal na dispersão do óleo desde as fontes localizadas *offshore* até a zona costeira. Esse padrão de dispersão distinto entre os períodos chuvoso e seco é influenciado pelas condições meteoceanográficas características da MEB (ver Capítulo 2).

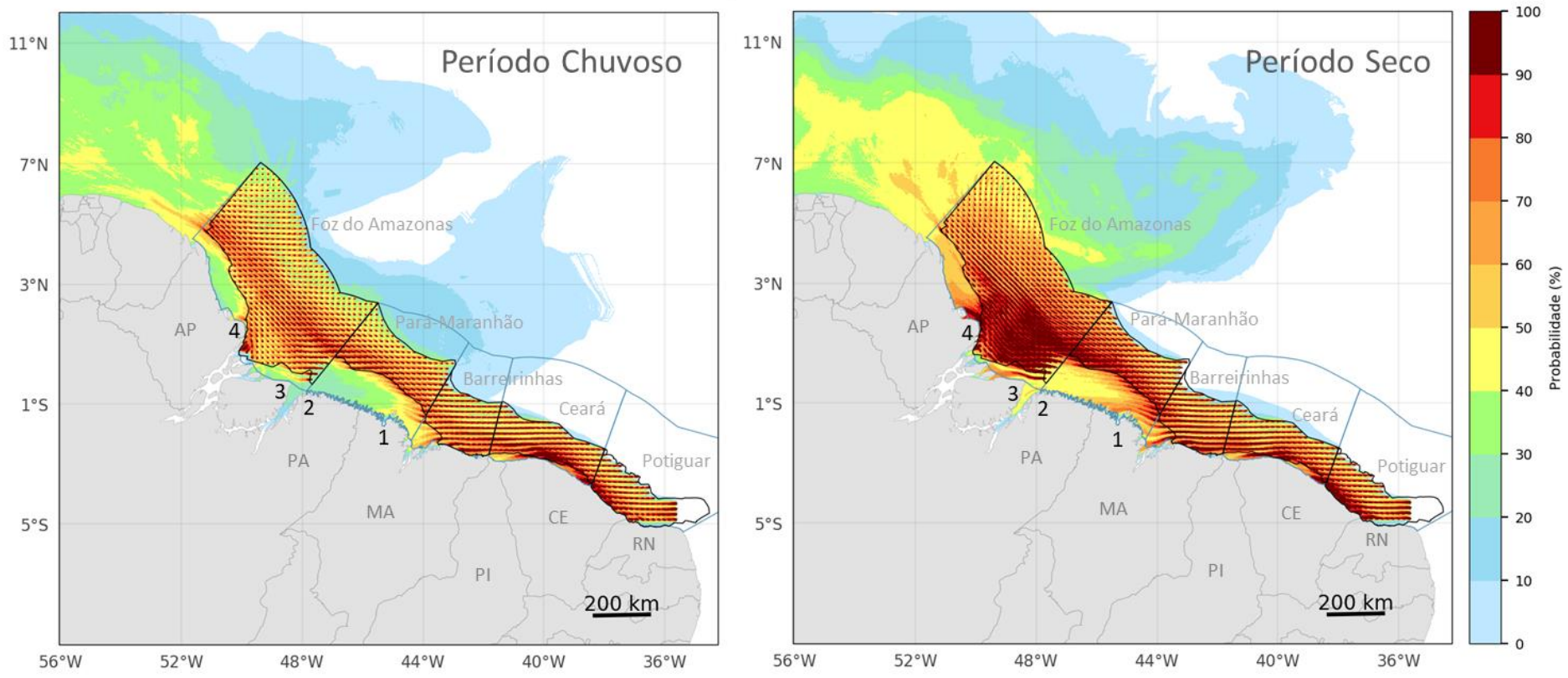


Figura 4-1: Probabilidade máxima de chegada de óleo em cada ponto de grade dos resultados da rodada de escala *offshore*. Período Chuvoso (a esquerda) e Período Seco (a direita). Os polígonos em preto representam as Bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira, onde as fontes de vazamento encontram-se distribuídas. As localizações aproximadas das áreas de estudo específicas do projeto estão assinaladas com (1) Baía de Turiaçu (MA), (2) Estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e (3) Sistema costeiro de Soure (PA).

No **período seco**, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) encontra-se mais ao norte, expondo a região aos ventos alísios do quadrante leste e sudeste, em geral mais intensos que no **período chuvoso**, quando a ZCIT se encontra mais ao sul e os ventos são principalmente do quadrante nordeste e menos intensos. Esse padrão de ventos contribui para que, no **período seco**, o óleo oriundo das bacias efetivas da MEB seja transportado com mais frequência para a plataforma continental, saindo da influência do núcleo da Corrente Norte do Brasil (CNB) (que flui para noroeste acompanhando a orientação do talude), aumentando assim a probabilidade de presença de óleo na zona costeira.

As menores concentrações de probabilidades altas, no **período chuvoso**, indicam uma maior variabilidade na direção do transporte do óleo nesse período. Dessa forma, as trajetórias das simulações que compõem o resultado probabilístico de cada fonte de vazamento não se sobrepõem significativamente, nos mesmos trajetos, quanto no **período seco**, ocasionando menores probabilidades (ver Capítulo 8, Volume 2 para aprofundamento sobre a modelagem de dispersão de óleo estocástica). Nota-se também a influência da retroflexão da CNB, no **período seco**, no mapa de probabilidade máxima apresentado (ver Volume 2, Capítulo 6).

Conforme mencionado e segundo a metodologia proposta no presente estudo (ver Capítulo 3), a **vulnerabilidade** é determinada pela integração de três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** em cada parcela da floresta de mangue, de acordo com a equação apresentada no Capítulo 3 – média ponderada das três componentes, onde a **suscetibilidade** tem peso 5, a **resiliência** tem peso 3 e a **sensibilidade**, peso 2 –, resultando em uma matriz de **vulnerabilidade**.

Dessa forma, é possível identificar qual combinação das componentes da **vulnerabilidade** foram determinantes para a classificação das áreas ocupadas pelas florestas de mangue em **vulnerabilidade** alta, média e baixa (Tabela 4-1) Por exemplo, (i) a **vulnerabilidade** média de determinada parcela de floresta de mangue pode ser resultado de uma baixa **suscetibilidade** (1) associada a uma **sensibilidade** extremamente alta (5) e uma baixa **resiliência** (2), ou (ii) pode ter uma alta **suscetibilidade** (5), porém uma **resiliência** muito alta (5) e uma **sensibilidade** alta (1), conforme destaques em fontes maiúsculas em vermelho (i) e azul (ii) na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Matriz de **Vulnerabilidade** considerando a integração das componentes **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**. As diferentes cores assinalam os resultados de vulnerabilidade Alta, Média e Baixa. As combinações das componentes citada nos exemplos i e ii mencionados no texto estão indicadas pelas letras em maiúsculas sublinhadas.

		Suscetibilidade			Suscetibilidade			Suscetibilidade		
		5 (alta)			3 (média)			1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)		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 (mto. baixa)				Alta	Alta		Média	Média	

Logo, a partir da metodologia desenvolvida foi possível indicar as combinações entre as componentes que ocorrem em cada área de estudo, junto com o percentual da área de mangue associada a cada combinação. Para exemplificar, podemos indicar que no período seco com maré de sizígia, 0,64% das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas estão sujeitas à **vulnerabilidade** média determinada por **suscetibilidade** média, **sensibilidade** muito alta e **resiliência** alta.

Assim, a análise de **vulnerabilidade** aplicada às três áreas de estudo permitiu delinear as principais características a determinar os resultados encontrados em cada área em particular, que apresentamos brevemente a seguir como forma de nortear a leitura desse capítulo.

A Baía de Turiaçu (MA), localizada nas Reentrâncias Maranhenses, é um exemplo típico da costa do Maranhão, onde os manguezais são frequentes na paisagem costeira ocupando as margens de profundos estuários formados devido às várias reentrâncias na costa. Por esse motivo, os manguezais são considerados os ecossistemas mais representativos da costa deste estado.

A região da Baía de Turiaçu (MA) apresenta regime de maré semidiurno e variações na superfície livre que podem atingir quase 7 m de altura em condições de maré de sizígia e cerca de 5 m, em condições de maré de quadratura, caracterizando-se como uma região de macro a hipermaré. Destaca-se nessa área de estudo a ocorrência de diversas planícies hipersalinas, ou apicuns, tipo de feição formado em razão das partes mais internas das zonas entre marés serem atingidas apenas pelas marés de sizígia. Os 325 km^2 de florestas de mangue mapeadas no polígono da área de estudo da baía de Turiaçu (MA) são predominantemente compostos por florestas dominadas por *Rhizophora* spp. (75%), seguida por florestas mistas (17%) e florestas dominadas por *Avicennia* spp (7%).

Os principais fatores a determinar os padrões de **suscetibilidade** observados na baía de Turiaçu (item 4.1.1) são: a proximidade da baía às fontes de vazamento localizadas à leste; a grande influência da maré na hidrodinâmica da baía; a descarga fluvial do rio Turiaçu e o padrão de ventos, predominantemente do quadrante nordeste na região. A **sensibilidade** e a **resiliência** das florestas de mangue na baía de Turiaçu são influenciadas principalmente pela topografia das planícies inundáveis, onde as florestas se desenvolvem (que apresenta elevações de até 10 metros, aproximadamente), associada à propagação da onde de maré e pelas condições hidrodinâmicas associadas às grandes amplitudes de maré observadas nessa área de estudo.

O estuário de São Caetano de Odivelas está inserido na margem leste do estuário do rio Pará, na margem oposta ao sistema costeiro de Soure. Sua desembocadura tem aproximadamente 10 Km e a conexão

principal com este rio se dá por um canal de aproximadamente 1 Km entre a ilha Taipu e a ilha da Rata, que se bifurca em dois rios: rio Mojuim (eixo oeste) e rio Mocajuba (eixo leste). Com variações na superfície livre superiores a 4 m, a maré no estuário de São Caetano de Odivelas caracteriza-se como macromaré, e não apresenta assimetria (tempo de enchente e vazante de aproximadamente 6 horas). Os 65 km^2 de florestas de mangue que dominam as diversas ilhas no interior do estuário de São Caetano de Odivelas apresentam predominância de florestas dominadas por *Rhizophora* spp (63,9%), seguida por florestas mistas (29,8%) e florestas dominadas por *Avicennia germinans* (6,2%).

Os principais fatores na determinação dos padrões de **suscetibilidade** do estuário de São Caetano de Odivelas (item 4.2.1) são: sua localização na margem leste do rio Pará, a morfologia dos canais principais e os ventos predominantemente de nordeste. A **sensibilidade** e a **resiliência** das florestas de mangue deste estuário são influenciadas principalmente pela interação da maré com os canais (gerando correntes da ordem de 1 m/s), e com a topografia das planícies inundáveis onde as florestas se encontram (que apresenta elevações de até 5 metros, aproximadamente).

Por fim, o sistema costeiro de Soure (PA) abrange a costa leste e parte da costa norte da Ilha de Marajó, banhadas pelo rio Pará e pelo oceano Atlântico, respectivamente. Esse sistema está inserido em um ambiente de regime semidiurno, de meso a macromarés (3 a 5 m). Em geral, o período de enchente é inferior ao de vazante, assim a maré é considerada assimétrica.

Os 89 km^2 de florestas de mangue que se distribuem pelo sistema costeiro de Soure (PA) são predominantemente compostos por florestas dominadas por *Rhizophora* spp. (55%), seguida por florestas com presença de vegetação associada (25%), florestas mistas (17%) e florestas dominadas por *Avicennia germinans* (2%).

Nesse sistema costeiro, destaca-se a ocupação vegetal diferenciada por espécies terrestres associadas aos manguezais, principalmente na costa norte da ilha de Marajó. Nesse trecho, há áreas predominantemente ocupadas por esse tipo de vegetação, compondo uma mata de várzea, com baixa ocupação por árvores de mangue. As áreas ocupadas por essa composição vegetal não tiveram sua **vulnerabilidade** analisada, de forma a manter o alinhamento da análise, que foi direcionado às áreas ocupadas somente por florestas de mangue, conforme nas demais áreas de estudo.

A localização do sistema costeiro de Soure (PA) na margem oeste do rio Pará e os ventos predominantemente de nordeste são os fatores mais importantes na determinação dos padrões de **suscetibilidade** nesse sistema (item 4.3.1). A **sensibilidade** e a **resiliência** das florestas de mangue são influenciadas principalmente pela interação da maré com a topografia das planícies inundáveis onde as florestas se encontram, que apresentam elevação predominante entre 1,0 e 2,5 metros.

Esse sistema apresenta costa bastante extensa, e por consistir em um sistema costeiro fluviomarinho com intensas descarga de água doce e energia das marés, apresenta trechos sujeitos a condições bem distintas. Com isso, o sistema costeiro de Soure (PA) caracteriza-se por ser muito dinâmico e diverso, em que os trechos da costa apresentam características variadas por estarem sujeitos a diferentes combinações entre as forçantes que atuam na determinação das componentes e, consequentemente, na **vulnerabilidade**.

4.1. Baía de Turiaçu (MA)

Neste item é apresentada a análise de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), considerando a análise de suas três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**.

4.1.1. Suscetibilidade

Neste item será analisada a **suscetibilidade** Baía de Turiaçu (MA) ao óleo oriundo de potenciais vazamentos distribuídos nas bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira (MEB). Para um entendimento abrangente desta componente da **vulnerabilidade**, a análise será conduzida desde a escala *offshore,* onde os pontos de vazamento considerados se encontram, até a escala regional da baía. Como elucidado no Capítulo 3, a **suscetibilidade** foi dividida em cenários ambientais que cominam a estação do ano – cenário chuvoso (janeiro a junho) e seco (julho a dezembro) – e a fase da maré – cenário de sizígia e quadratura.

Como pode ser visto nos mapas de probabilidade máxima de presença de óleo na região da MEB considerando todos os pontos de vazamento para os cenários seco e chuvoso (Figura 4-1), há pequena variabilidade sazonal na dispersão do óleo desde as fontes até Baía de Turiaçu (MA). Observam-se maiores probabilidades de presença de óleo na entrada da baía no período seco (40 a 50%) quando comparadas ao período chuvoso (30 a 40%), orientadas de nordeste para sudoeste.

A partir da análise inversa (ver Capítulo 3 deste volume para um entendimento geral, ou o Capítulo 8 do Volume 2, para um maior detalhamento desta metodologia), podemos identificar as fontes de vazamento que oferecem risco de presença de óleo para Baía de Turiaçu (MA) (Figura 4-2), associadas à probabilidade (Figura 4-3) e tempo mínimo de toque do óleo (Figura 4-4).

Na Figura 4-2, observa-se que as fontes de vazamentos com riscos estão a leste da Baía de Turiaçu (MA), grande parte localizadas nas bacias efetivas Barreirinhas e Ceará, enquanto as fontes de vazamento sem riscos estão localizadas a oeste e norte, oriundas das bacias efetivas Foz do Amazonas e Pará-Maranhão. Durante o período chuvoso, existem mais fontes de vazamento na bacia Pará-Maranhão, oferecendo risco potencial para a Baía de Turiaçu (MA), enquanto no período seco, as fontes se distribuem apenas nas bacias Barreirinhas, Ceará e Potiguar, com apenas um ponto de vazamento na bacia Pará-Maranhão. Esse padrão é explicado pela maior variabilidade direcional do transporte de óleo no período chuvoso, aumentando a zona de fontes que oferecem risco, e diminuindo as probabilidades associadas ao toque em determinado local.

Constata-se também que a probabilidade de gerar toque de óleo em Turiaçu (MA) nos períodos chuvoso e seco (Figura 4-3) segue a distribuição das fontes de vazamento com toque de óleo (Figura 4-2). No período chuvoso as probabilidades acima de 15% localizam-se na região central da bacia de Barreirinhas e a noroeste da bacia Ceará, chegando a 25%. No período seco as probabilidades são maiores, podendo chegar até 35% na bacia Barreirinhas, em sua porção sudoeste, e em até 25% na bacia Ceará, em sua porção noroeste.

O tempo mínimo de toque (Figura 4-4) é menor no período seco para a bacia Barreirinhas, onde se observa valores de aproximadamente 120 e 180 horas, enquanto no período chuvoso maiores valores de tempo mínimo de toque de óleo são vistos nesta bacia, apresentando valores ≥ 240h. Na bacia do Ceará, os maiores valores de tempo mínimo de toque de óleo também são vistos no período chuvoso, podendo apresentar valores ≥240 em grande parte localizados a sudoeste da bacia.

Associado ao padrão geral de dispersão distinto entre o período seco e chuvoso, discutido na introdução do capítulo, nota-se que tanto no período chuvoso ou período seco apenas fontes à leste da Baía de Turiaçu (MA) oferecem risco de gerar toque de óleo. Durante o período seco, há maior número de fontes de vazamentos que oferecem risco à Baía de Turiaçu (MA), quando comparado ao período chuvoso.

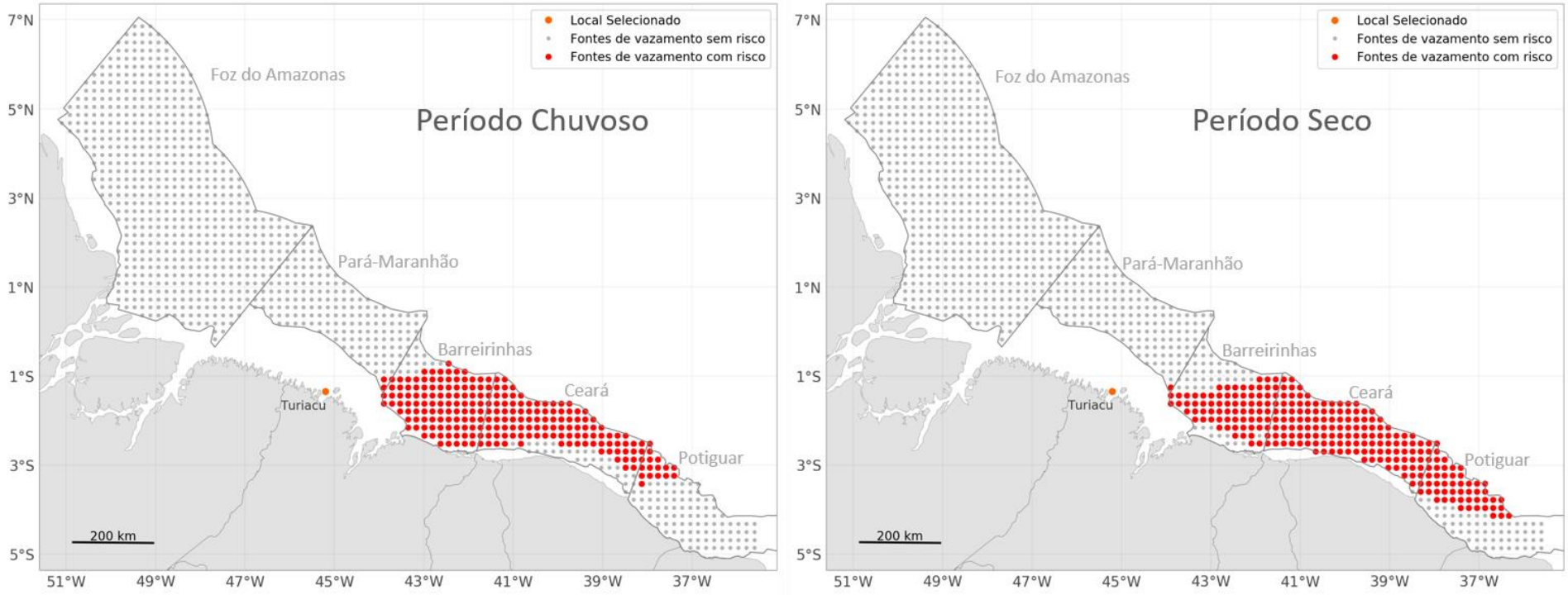


Figura 4-2: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo à Baía de Turiaçu (MA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita.

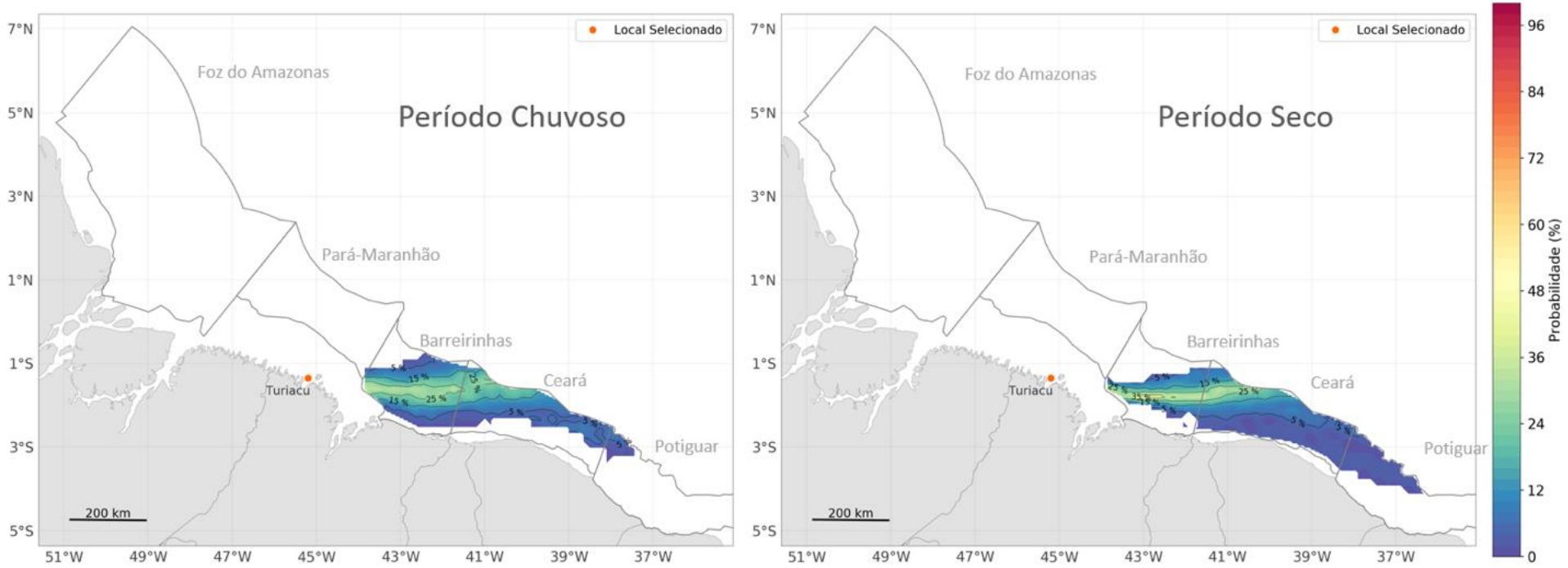


Figura 4-3: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo na Baía de Turiaçu (MA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

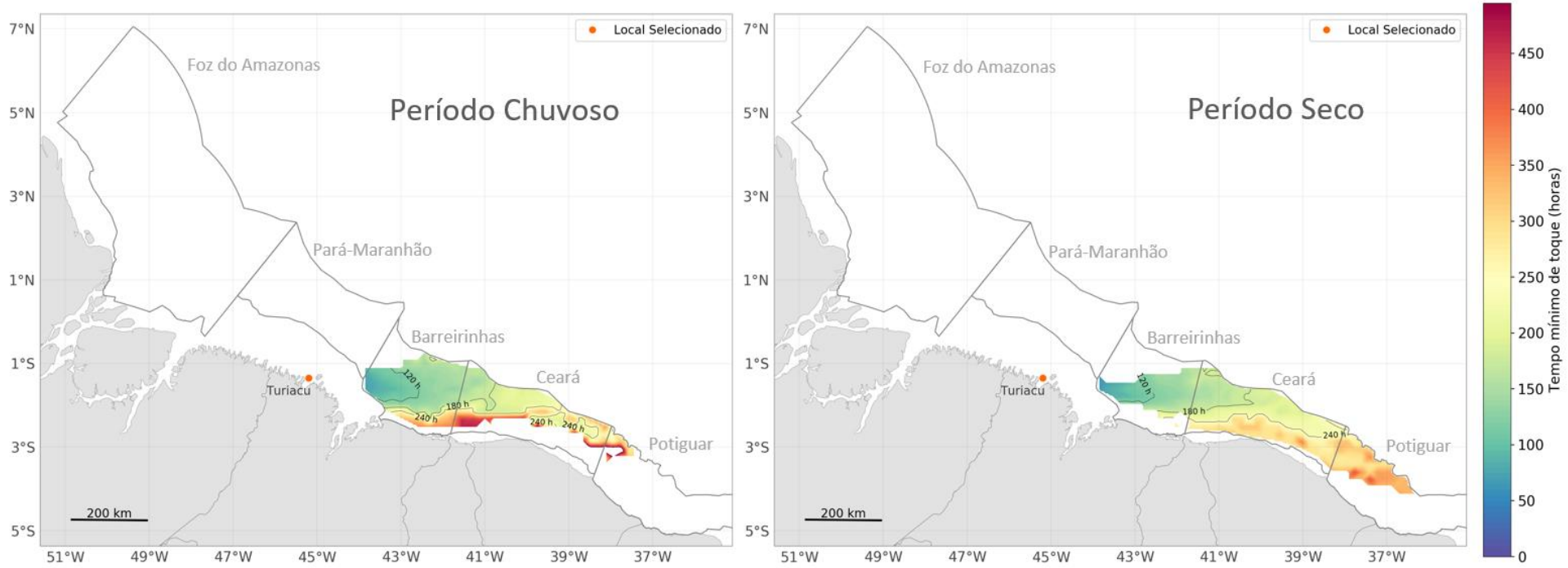


Figura 4-4: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo na Baía de Turiaçu (MA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB. nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

Ampliando o nível de detalhamento, podemos observar na Figura 4-5 a distribuição espacial da probabilidade de presença de óleo na Baía de Turiaçu (MA). Estes resultados representam a continuidade da dispersão de óleo desde as fontes de vazamento até a região da baía, portanto, trazem a influência dos cenários sazonais da escala *offshore* descritos previamente. Estão incluídas divisões de cenários relativos à maré (sizígia ou quadratura), pois essa forçante apresenta grande influência na hidrodinâmica da baía e, portanto, na dispersão do óleo neste sistema costeiro.

Nota-se na Figura 4-5 uma pluma de probabilidade, variando de 30 a 60%, presente na região da boca da Baía de Turiaçu (MA), que é reflexo das fontes de vazamento com risco de toque de óleo mais próximas da baía, localizadas a leste. As probabilidades de presença de óleo diminuem gradualmente para dentro da Baía de Turiaçu (MA). Esse padrão pode ser explicado pela maior proximidade com as fontes de vazamento – favorecendo maiores probabilidades de toque - e pela descarga fluvial do rio Turiaçu – ocasionando um transporte residual para fora da baía e, consequentemente, diminuindo as probabilidades de toque em direção ao interior do sistema.

Naturalmente, as maiores probabilidades de presença de óleo na entrada da baía no período seco acarretam maiores probabilidades em seu interior. Nota-se a classes entre 30-40 e 40-50% alcançando aproximadamente a latitude 1.6°S no período seco, enquanto no período chuvoso observa-se no máximo as classes de 20-30% e 30-40% na mesma latitude. A extensão das classes de probabilidade para o interior da baía é muito similar nos cenários de quadratura e sizígia em período seco e chuvoso.

Em geral, nota-se um gradiente de maiores probabilidades à jusante da baía – explicadas pela maior proximidade com as fontes de vazamento e pela descarga fluvial do rio Turiaçu -, assim como um gradiente de maiores probabilidades oriundas de orientação nordeste-sudoeste, atingindo a porção oeste da baía – causado pelo padrão de ventos, predominantemente do quadrante nordeste na região (ver Volume 2, Capítulo 2). No período chuvoso, apenas em maré de sizígia as classes de probabilidade mais altas têm maior alcance apenas na boca da baía, sem variação das classes dentro dela. Já no período seco, na maré de quadratura, há classes de probabilidade mais altas dentro da baia quando comparado ao cenário da maré de sizígia.

Durante o período chuvoso, a classe de probabilidade mais elevada na Baía de Turiaçu (MA) é de 30-40%, em sizígia, enquanto que no período seco, é a classe de 50-60%, em quadratura. Em ambos os casos, essas probabilidades são observadas com orientação nordeste-sudoeste até a latitude 1.6°S, no máximo.

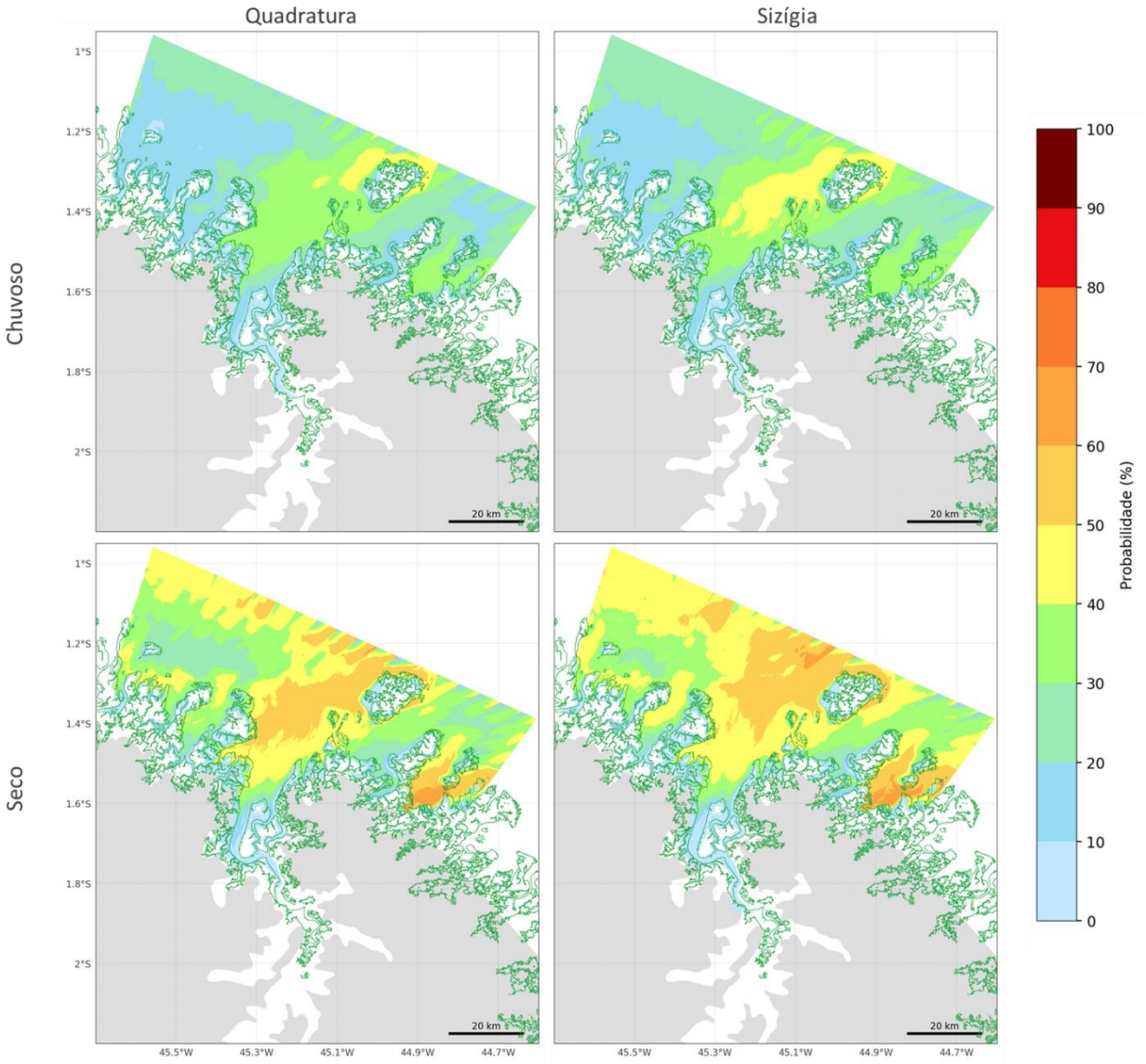


Figura 4-5: Probabilidade máxima de chegada de óleo na Baía de Turiaçu (MA). Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

A seguir, são apresentados os mapas de **suscetibilidade** nas regiões de florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), para os quatro cenários propostos (Figura 4-7 – período chuvoso e maré de quadratura, Figura 4-8 – período chuvoso e maré de sizígia, Figura 4-9 – período seco e maré de quadratura e Figura 4-10 – período seco e maré de sizígia). Nestes, a **suscetibilidade** encontra-se classificada entre não-suscetível (0%), baixa (maior que 0% e menor que 13%), média (maior ou igual a 13% e menor que 40%) e alta (maior ou igual a 40%), conforme a metodologia descrita no Capítulo 3.

A **suscetibilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) é predominantemente baixa em todos os cenários estudados, como pode ser observado na Figura 4-6. No período chuvoso, essa classe abrange 56,0 e 60,1% das áreas de floresta de mangue nas condições de maré de sizígia e quadratura, respectivamente; enquanto no período seco, essas áreas diminuem um pouco e variam de 38,2 a 40,7%, em maré de sizígia e quadratura, respectivamente. As ocorrências de áreas com **suscetibilidade** média são semelhante entre os períodos chuvoso (20,1 a 21,6%) e seco (20,7 a 21,8%) em ambas as condições de

maré A classe alta é observada somente no período seco com baixos percentuais, 5,8 a 8,0%. Áreas não suscetíveis apresentam percentuais expressivos nessa área de estudo. No período seco, abrangem áreas maiores, cujos percentuais variam de 31,7 a 33,1%. No período chuvoso, os percentuais de áreas nessa classe diminuem para 19,8 a 22,4%, em maré de quadratura e sizígia, respectivamente. É notável ainda a pouca influência das condições de maré no resultado das classes de **suscetibilidade** nos cenários estudados, como pode ser observado na Figura 4-6, comparando-se os resultados em marés de quadratura e sizígia.

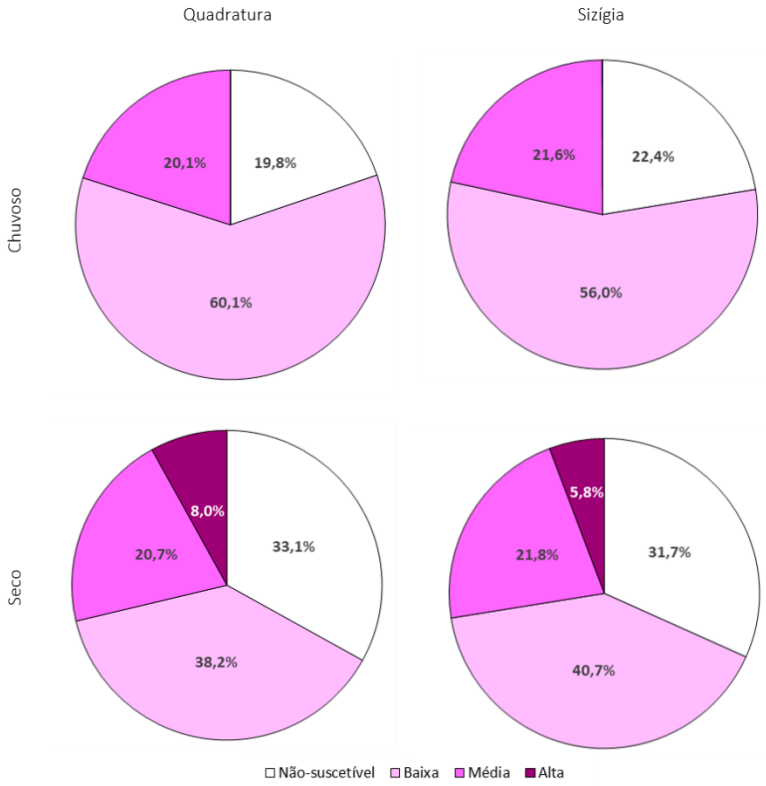


Figura 4-6: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

Na Baía de Turiaçu (MA), há ocorrência de áreas não-suscetíveis e das classes de **suscetibilidade** baixa, média e alta, que são variáveis conforme os cenários dos períodos e as condições de maré. Em geral, a classe de **suscetibilidade** baixa é predominante em florestas internas (como no tipo fisiográfico bacia, ou em transição com a terra firme ou apicum) e distribuída em regiões abrigadas na baía. As florestas classificadas como de **suscetibilidade** média e alta localizam-se nas margens da baía e canais (florestas do tipo fisiográfico franja), distribuídas, em grande parte, na porção intermediária e boca da baía de Turiaçu (MA), voltadas para leste e nordeste, localizadas em Miramar, Ponta Seca, Cunhã-Coema e Sababa.

O período sazonal (chuvoso ou seco) também influencia fortemente a **suscetibilidade**. No período chuvoso, a **suscetibilidade** é menor, enquanto no período seco ela é maior, relacionado ao padrão geral de **suscetibilidade** descrito na introdução deste capítulo. A **suscetibilidade** é pouco variável entre as marés. Pode-se observar em algumas regiões uma ligeira tendência à maior **suscetibilidade** na maré de quadratura quando comparada à maré de sizígia.

A **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA), apresenta variações de acordo com os cenários. No período chuvoso (Figura 4-7 e Figura 4-8), há ocorrência das classes de **suscetibilidade** baixa e média, distribuídas conforme o padrão geral descrito anteriormente, nas marés de quadratura e sizígia,

entretanto, com maior área de florestas não-suscetíveis e pequenas faixas com suscetibilidade alta próxima a Miramar, a oeste, e ao rio Bitiua, a leste, em maré de sizígia. No período seco, há mais áreas com **suscetibilidade** alta e média em relação ao período chuvoso, tanto em maré de quadratura quanto em maré de sizígia, distribuídas conforme o padrão geral. Contudo, no período seco, há mais florestas com **suscetibilidade** alta na maré de quadratura (Figura 4-9 e Figura 4-10).

Como apresentado na descrição da Baía de Turiaçu (MA), os manguezais dessa região podem ser subdivididos em duas feições: floresta de mangue e planície hipersalina (ou apicuns). Quanto às componentes e **vulnerabilidade**, no processo de mapeamento dos manguezais, optou-se por focar apenas nas florestas de mangue, tendo em vista que a ocorrência da feição planície hipersalina restringe-se a uma pequena porção dessa área de estudo.

Assim, a **suscetibilidade** nas florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) é predominantemente baixa, com a ocorrência da classe alta apenas no período seco. Observa-se ainda que uma importante área da floresta apresenta **suscetibilidade** zero, ou seja, é não suscetível. A **suscetibilidade** apresenta variação espacial e entre os períodos sazonais (chuvoso ou seco), e pouca influência do tipo de maré (quadratura ou sizígia).

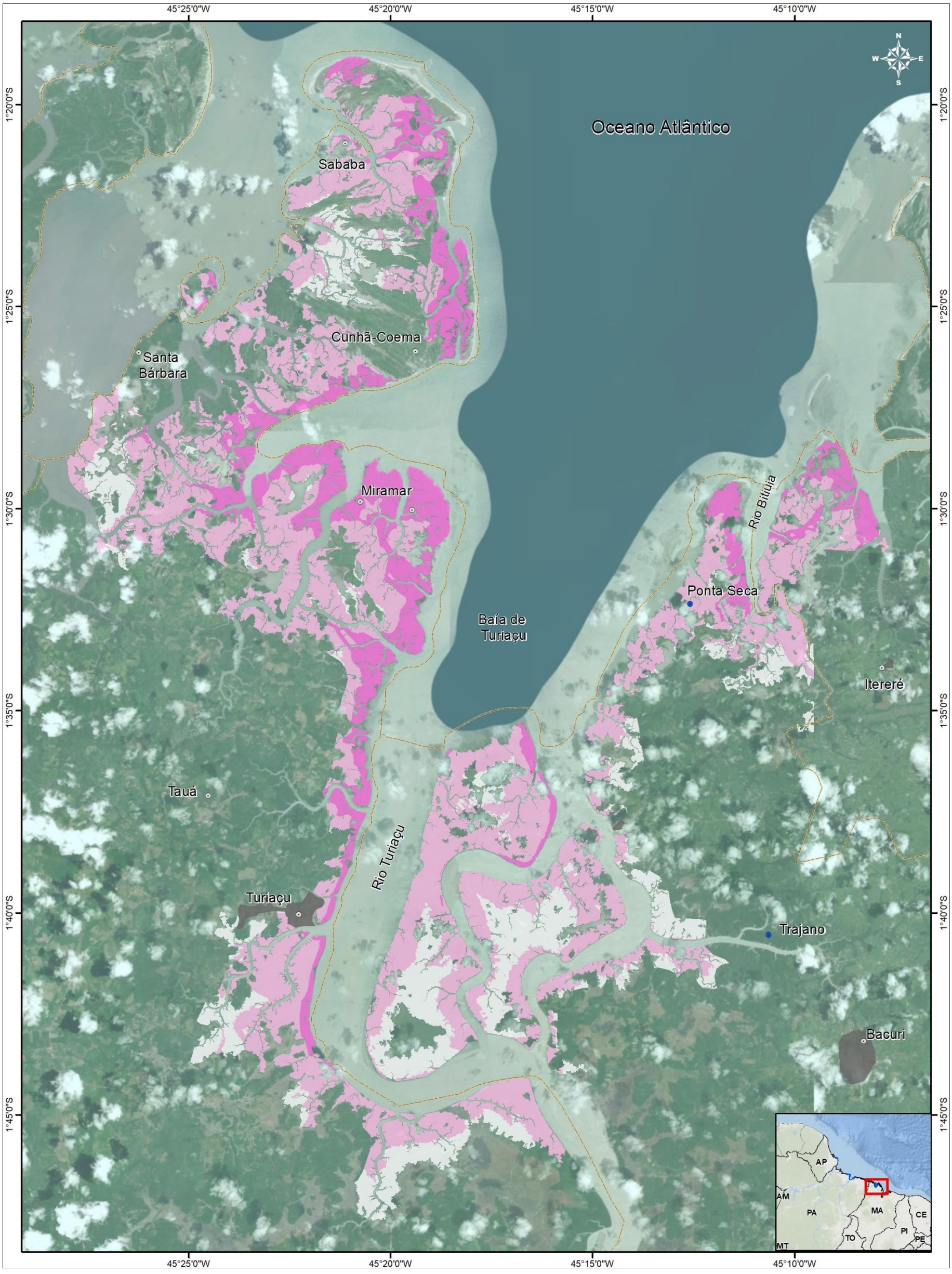
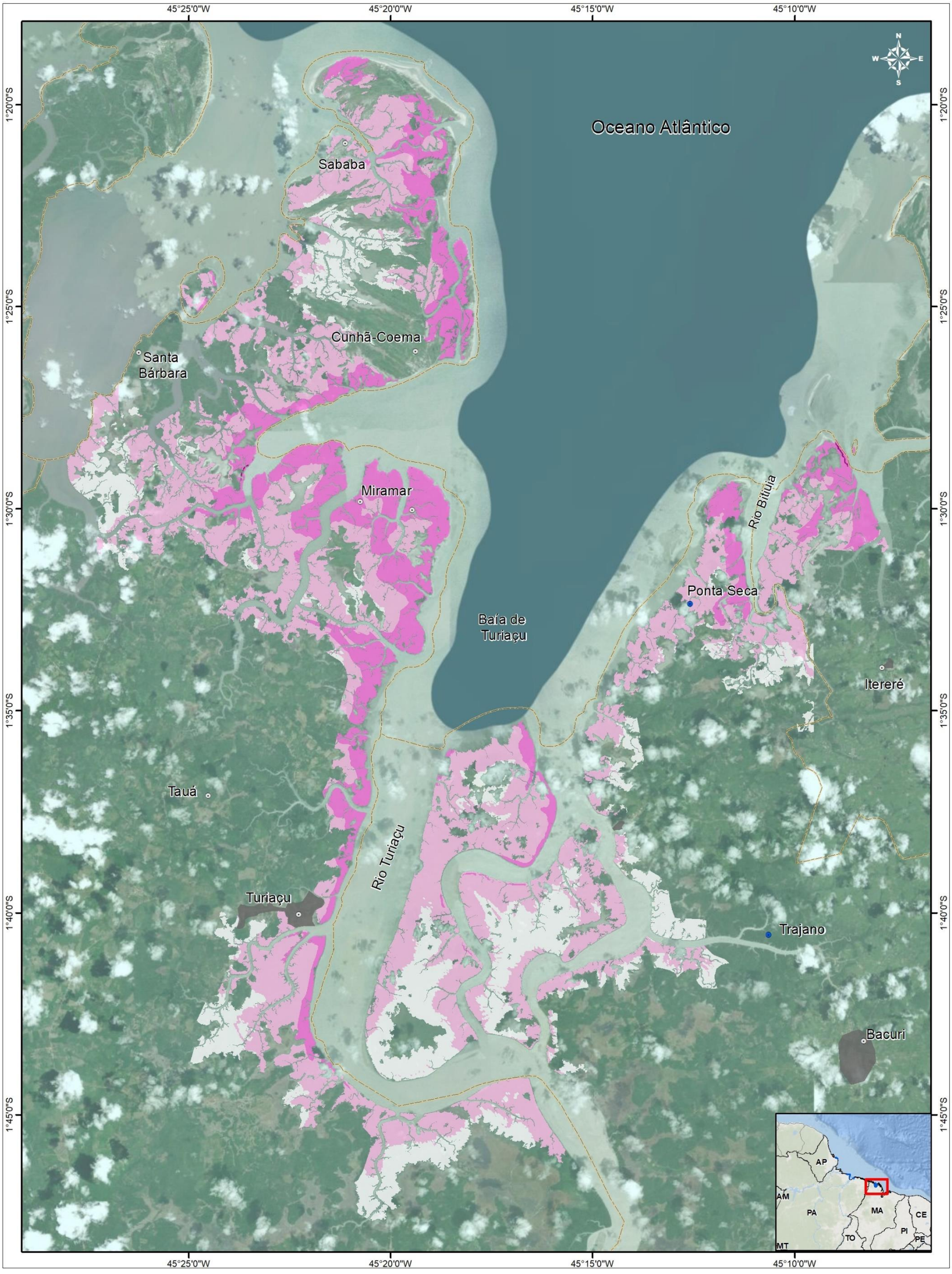


Figura 4-7: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura.



PROJETO COSTA NORTE

SUSCETIBILIDADE
BAÍA DE TURIAÇU (MA)
Período CHUVA – Maré de SIGÍZIA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Suscetibilidade
- Não Suscetível
- Baixa
- Média
- Alta

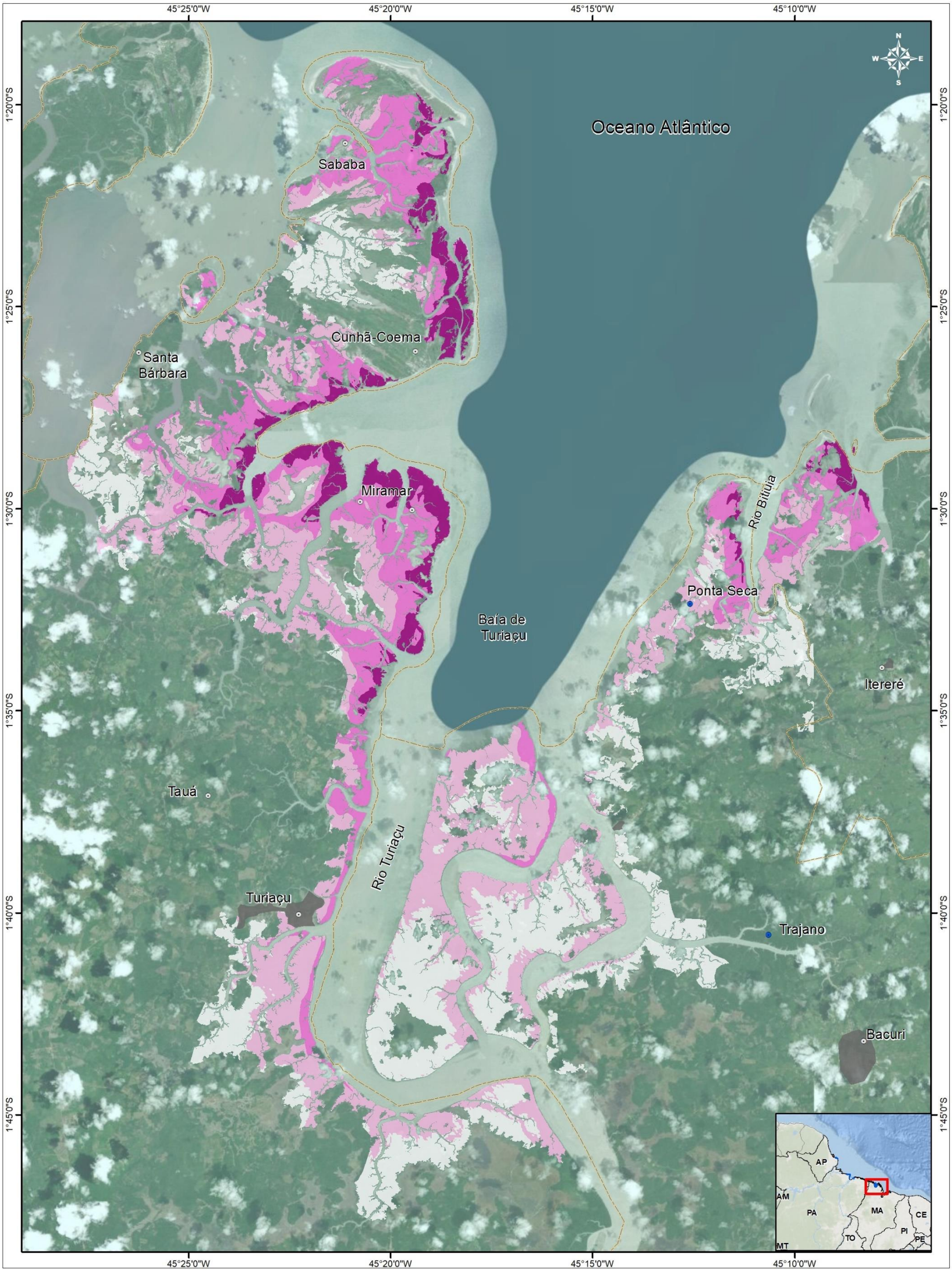
- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-8: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia.



PROJETO COSTA NORTE

SUSCETIBILIDADE
BAÍA DE TURIAÇU (MA)
Período SECA – Maré de QUADRATURA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Suscetibilidade
- Não Suscetível
- Baixa
- Média
- Alta

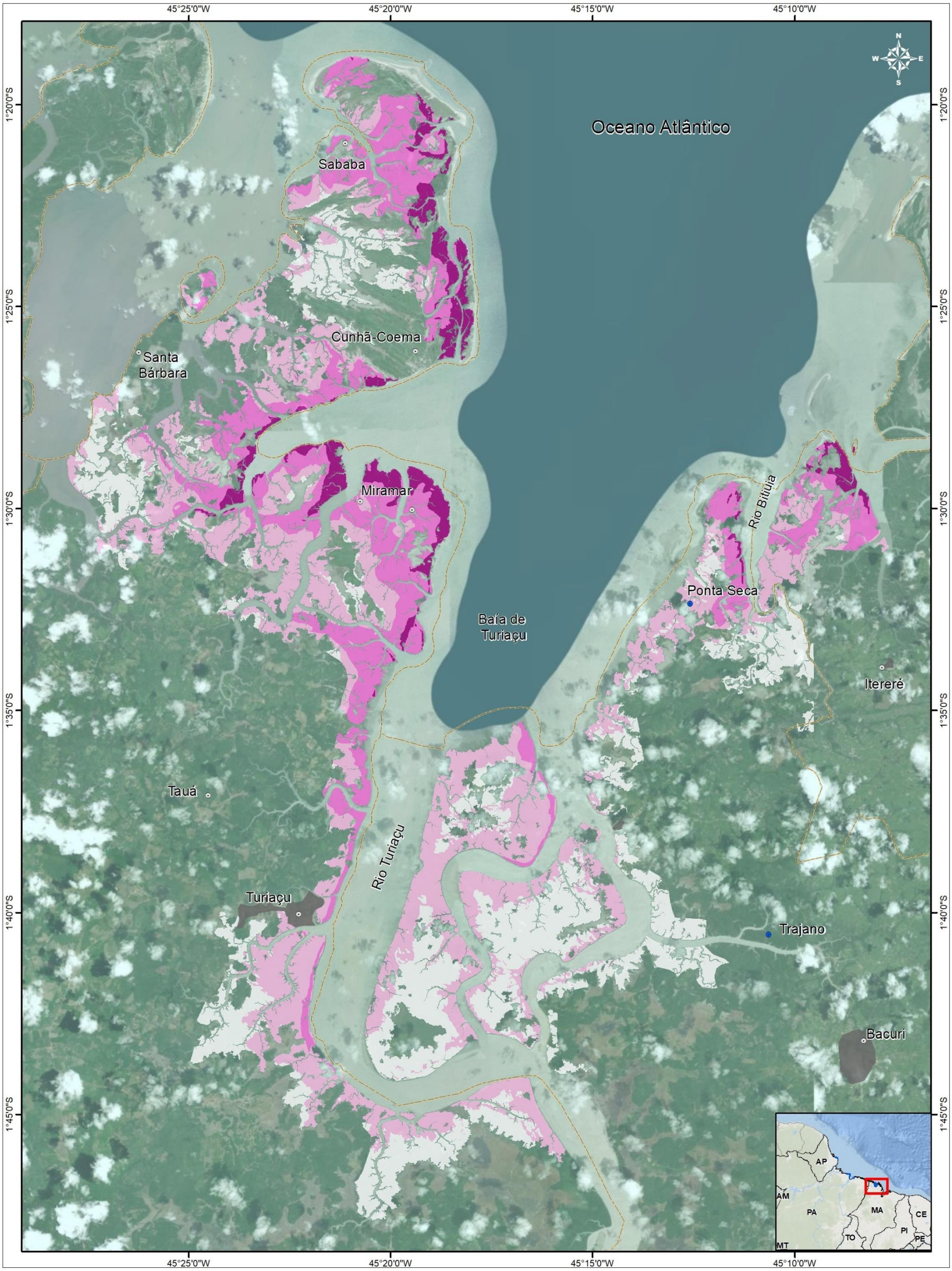
- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-9: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura.



PROJETO COSTA NORTE

SUSCETIBILIDADE
BAÍA DE TURIAÇU (MA)
Período SECA – Maré de SIZIGIA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Suscetibilidade
- Não Suscetível
- Baixa
- Média
- Alta

- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-10: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia.

4.1.2. Sensibilidade

Conforme descrito no Capítulo 3, a circulação de água é um aspecto propício ao desenvolvimento do ecossistema manguezal. Parcelas de florestas de mangue expostas à maior circulação de água (maior energia hidrodinâmica) possuem condições mais favoráveis para seu desenvolvimento, em contrapartida, quanto menor for a circulação de água (menor energia hidrodinâmica), maior será o seu nível de *stress* natural e portanto, maior sua **sensibilidade** a um tensor adicional – no caso, o óleo. Portanto, de acordo com o pressuposto conceitual e metodológico adotado no Projeto Costa Norte, a **sensibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo é inversamente proporcional ao nível da energia hidrodinâmica do sistema, mensurada pelo somatório anual da Energia Cinética (Ec), e classificada como alta, muito alta ou extremamente alta. Dentre os sistemas costeiros, os manguezais são os mais sensíveis ao óleo. Assim, a escala adotada para essa componente parte da classe alta, em reconhecimento à alta sensibilidade atribuída previamente aos manguezais.

Dentre as classes de **sensibilidade**, há predomínio da classe alta (59,1%), seguida da classe muito alta (40,4%), e pequenas regiões apresentando **sensibilidade** extremamente alta (0,5%) – estas concentradas nas regiões com topografia mais elevada e, consequentemente, com menor circulação de água ao longo do ano (Figura 4-11)

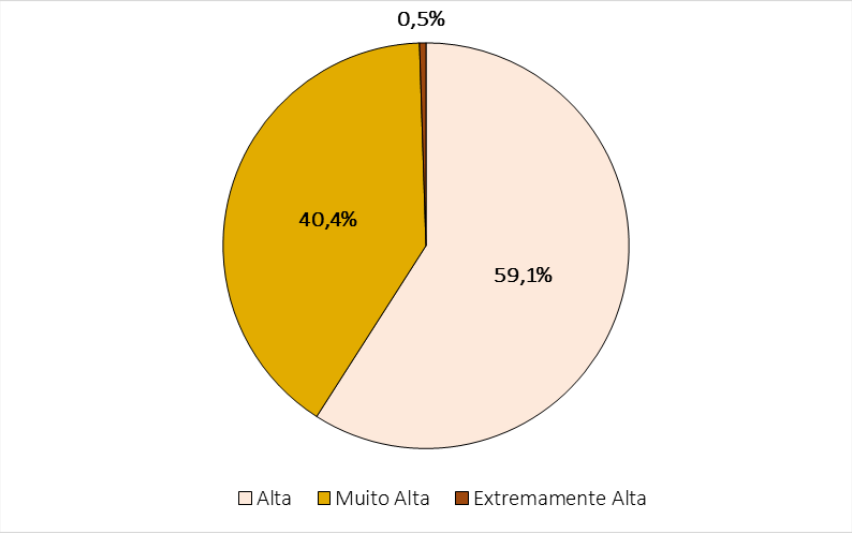


Figura 4-11: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue da baía de Turiaçu (MA).

O mapa de **sensibilidade** para a Baía de Turiaçu (MA) (Figura 4-12) evidencia o padrão espacial desta componente, em que há aumento da **sensibilidade** das margens para o interior das zonas entre marés – acompanhando o gradiente de frequência de inundação pelas marés e o gradiente topográfico geral (ver Volume 2, Capítulo 7.4.2.4). Esse padrão relaciona-se à topografia da região (Figura 4-13), que, ao interagir com a propagação da maré na baía, determina a frequência de inundação e a energia cinética associada a cada parcela de mangue.

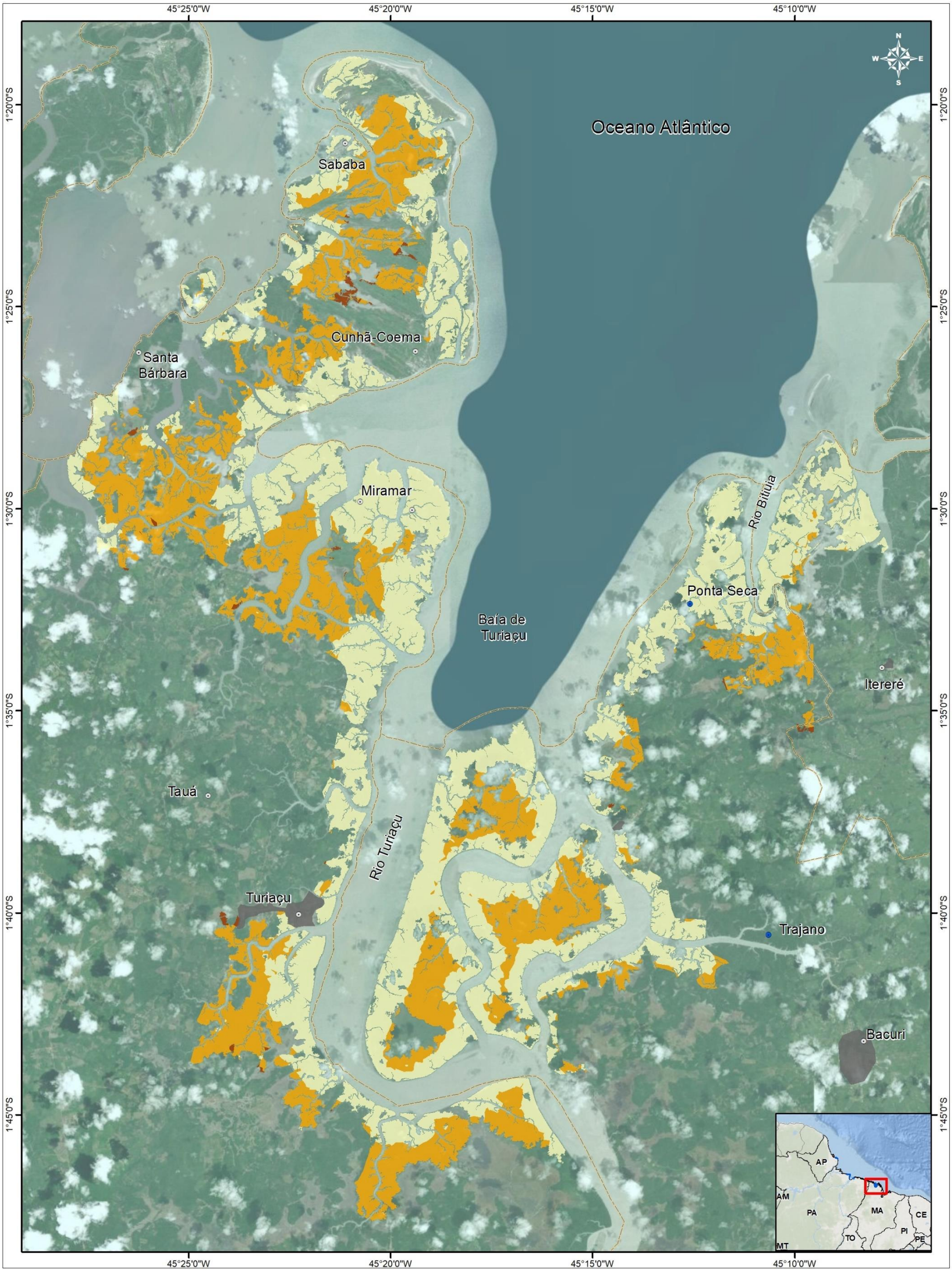
Nota-se que as florestas de mangue em margens na porção marinha da baía apresentam faixas mais largas com classe de **sensibilidade** alta, principalmente florestas próximas a Miramar, Ponta Seca e nas ilhas centrais, o que está relacionado com a topografia mais baixa e, portanto, com maior circulação de água ao longo do ano.

As florestas de mangue ao lado oeste da Baía de Turiaçu (MA) e nas ilhas centrais são as que apresentam maiores áreas com **sensibilidade** muito alta, com a classe alta em suas margens, onde próximo a Cunhã- Coema há a área mais extensa com **sensibilidade** extremamente alta da baía.

Sendo assim, de forma resumida, observa-se que a maior parte das florestas de mangue localizadas nas margens da Baía de Turiaçu (MA) apresentam **sensibilidade** alta e florestas em regiões mais internas com **sensibilidade** muito alta à contaminação por óleo. Essa característica se relaciona ao gradiente topográfico e, consequentemente, à inundação pelas marés, que vão determinar a energia à qual cada porção da floresta está submetida. As áreas classificadas como extremamente sensíveis ao óleo são pontuais devido à alta energia hidrodinâmica associada às grandes variações de maré que predominam na Baía de Turiaçu (MA), já que esta classe de **sensibilidade** é característica de florestas de mangue esporadicamente inundadas pelas marés, na transição com a terra firme, apicum ou áreas topograficamente elevadas e, portanto, se desenvolvendo em ambiente mais estagnado e com menor energia hidrodinâmica.

Como apresentado na descrição da Baía de Turiaçu (MA), os manguezais dessa região podem ser subdivididos em duas feições: floresta de mangue e planície hipersalina (ou apicuns). Quanto às componentes e **vulnerabilidade**, no processo de mapeamento dos manguezais optou-se por focar apenas nas florestas de mangue, tendo em vista que a ocorrência da feição planície hipersalina restringe-se a uma pequena porção dessa área de estudo.

No entanto, por ocuparem as áreas mais elevadas da zona entre marés, sendo atingidas apenas pelas marés mais altas de sizígia, as planícies hipersalinas (apicuns) podem ser classificadas com **sensibilidade** extremamente alta no caso dessa feição se apresentar como uma área suscetível ao toque de óleo.



PROJETO COSTA NORTE

SENSIBILIDADE

BAÍA DE TURIAÇU (MA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Sensibilidade
- Extremamente Alta
- Muito Alta
- Alta

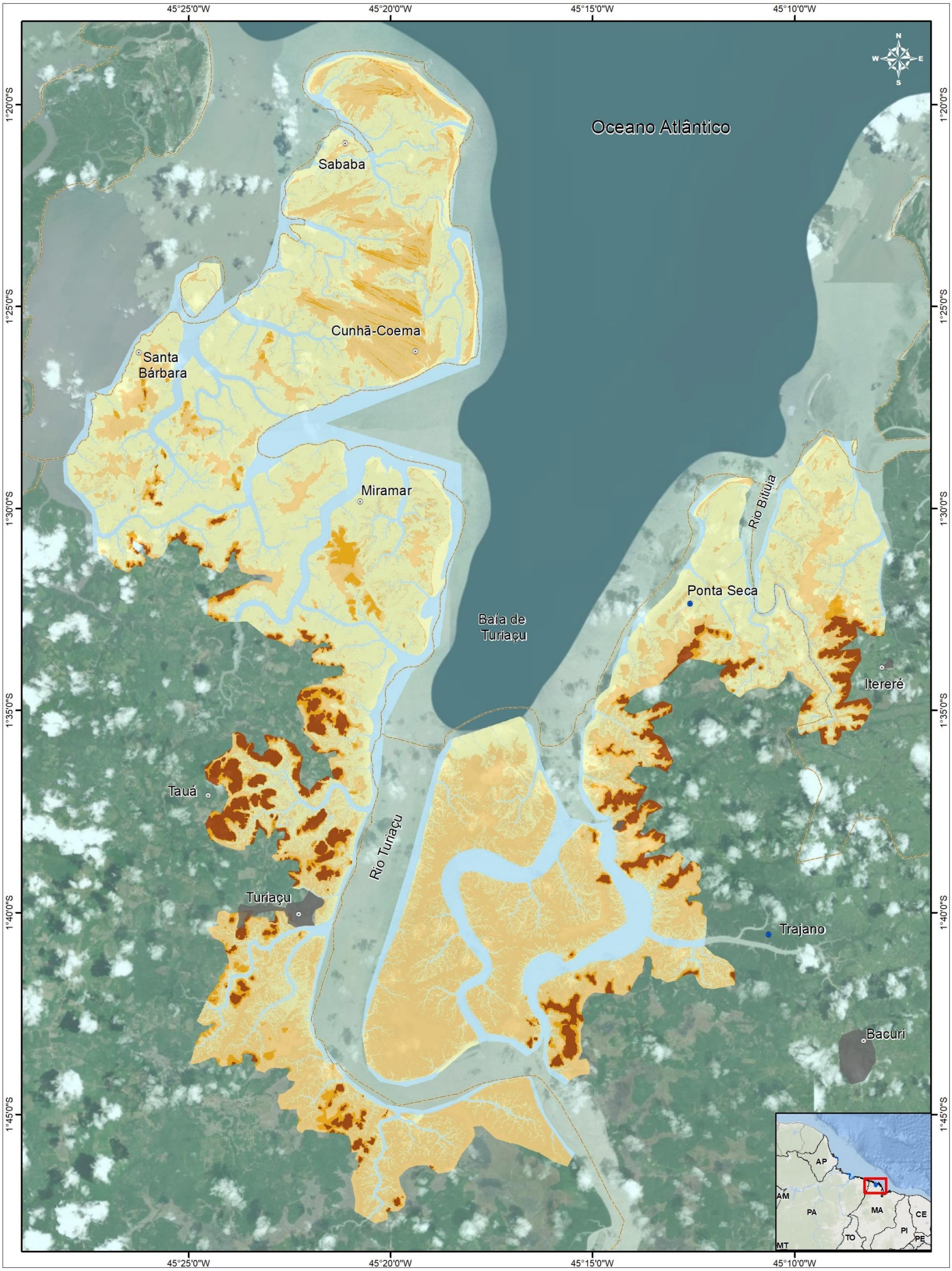
- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-12: Resultados da **sensibilidade** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo.



PROJETO COSTA NORTE

MODELO DIGITAL DE TERRENO - MDT

BAÍA DE TURIAÇU (MA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Altitude(m)
- 0
- 0 - 2,5
- 2,5 - 5
- 5,0 - 10
- >10

- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-13: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR na Baía de Turiaçu (MA). Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

4.1.3. Resiliência

Conforme descrito no Capítulo 3, a **resiliência** indica a capacidade de determinada parcela de manguezal de se recuperar dos efeitos de um dado tensor. No caso da contaminação por óleo essa capacidade está diretamente relacionada à capacidade de remoção do óleo tanto por ação física – remoção pelas correntes e lavagem pelas marés – quanto pela ação microbiológica – processo de decomposição e transformação do óleo. A **resiliência** é classificada como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Dessa forma, segundo a metodologia proposta, o grau de **resiliência** é função dos parâmetros Trabalho (Joules) e Taxa de Afastamento (metros/hora) (ver Capítulo 3 para entendimento geral e Capítulo 7 e 8 do Volume 2 para detalhes metodológicos). Enquanto o Trabalho é função da velocidade do escoamento e da quantidade de água deslocada de determinada parcela de manguezal, a Taxa de Afastamento indica a velocidade média de afastamento do óleo removido. Desta forma, enquanto o Trabalho é determinado unicamente por aspectos da hidrodinâmica de determinada parcela de mangue, a taxa de afastamento é dependente também da hidrodinâmica das parcelas de manguezal vizinhas.

As classes de **resiliência** alta e média ocupam a maior parte da baía (Figura 4-14), com percentuais de 38,2% e 30,0%, respectivamente. As classes muito baixa e baixa são as mais raras, com percentuais de 1,3% e 6,3%, respectivamente, enquanto a classe muito alta ocupa 24,2% das florestas de mangue.

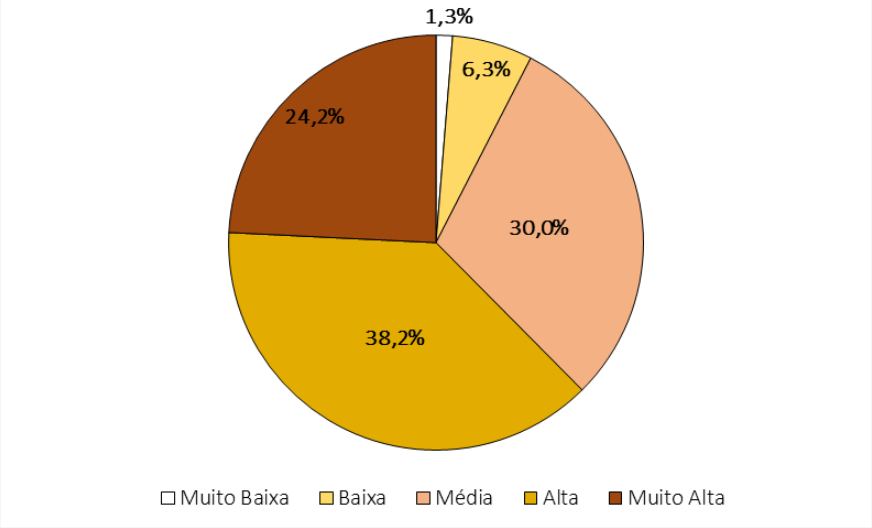


Figura 4-14: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA).

O mapa de **resiliência** da Baía de Turiaçu (MA) é apresentado na Figura 4-15. Na Baía de Turiaçu (MA), ocorrem as 5 classes definidas para **resiliência**, sendo as classes alta e média predominantes no estuário. De modo geral, ocorre um gradiente dos níveis de **resiliência**, das florestas de franja, que ocorrem nas margens dos rios e canais, para o interior. Conforme esperado, esta **resiliência** é mais elevada nas margens e diminui conforme sua internalização, devido ao gradiente de energia hidrodinâmica que ocorre neste sistema. Os *proxies* da **resiliência,** Trabalho (Figura 4-16) e Taxa de Afastamento (Figura 4-17), apresentam padrões semelhantes entre si na Baía de Turiaçu (MA), como pode ser observado pela comparação entre as classes intermediárias nesses dois mapas.

As ilhas centrais são limitadas pelos rios e, portanto, tem grande parte de sua área submetido à alta frequência de inundação. Por conta desta conformação, estas são as regiões que possuem as maiores faixas de alta **resiliência** do estuário, não ocorrendo áreas com baixa **resiliência**. O povoado de Sababa encontra-se em faixas de alta e média **resiliência** por conta de sua proximidade com os corpos d'água

principais. Portanto, as classes mais baixas de **resiliência** ficam restritas à faixa de transição para terra firme e apicuns. De forma similar, outras regiões como as florestas nas proximidades da cidade de Turiaçu e o interior do rio Bitiua apresentam o mesmo padrão de gradação citado anteriormente, restringindo as áreas de baixa **resiliência** na transição para a terra firme na região de fundo dos canais, onde a circulação de água e a frequência de inundação pelas marés são menores.

PROJETO COSTA NORTE

RESILIÊNCIA
BAÍA DE TURIAÇU, MA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Resiliência
- Muito Baixa
- Baixa
- Média
- Alta
- Muito Alta

- Porto
- Cidade
- Limites Municipais
- Área Edificada
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-15 – Resultados da **Resiliência** das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo.

Figura 4-16: Trabalho (J), *proxy* da resiliência, da Baía de Turiaçu (MA).

TAXA DE AFASTAMENTO (m/h)

Componente da Resiliência
BAÍA DE TURIAÇU (MA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Tx Afastamento (m/h)
- Baixa
- Média
- Alta

- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-17: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, da Baía de Turiaçu (MA).

4.1.4. Vulnerabilidade

Segundo a metodologia proposta no presente estudo, a **vulnerabilidade** é determinada pela integração de três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** em cada parcela da floresta de mangue, de acordo com a equação apresentada no Capítulo 3 - média ponderada das três componentes, onde a **suscetibilidade** tem peso 5, a **resiliência** tem peso 3 e a **sensibilidade**, peso 2. É importante ressaltar que as regiões não suscetíveis ao óleo são classificadas como não vulneráveis, independente do seu grau de **resiliência** e **sensibilidade.**

A **vulnerabilidade** das florestas de mangue na Baía de Turiaçu é predominantemente baixa, variando entre 53,5% e 78,2% da área de florestas de mangue, segundo o cenário analisado, conforme pode ser observado na Figura 4-18. Observa-se, em menor proporção a ocorrência de florestas com **vulnerabilidade** média (oscilando entre 2,0% e 13,2% segundo o cenário analisado). A classe alta **vulnerabilidade** ocorre apenas nos cenários de períodos secos. Destaca-se ainda, que grande parte das florestas de mangue da baía de Turiaçu (19,8% a 33,0%) não se apresenta vulnerável à contaminação de óleo.

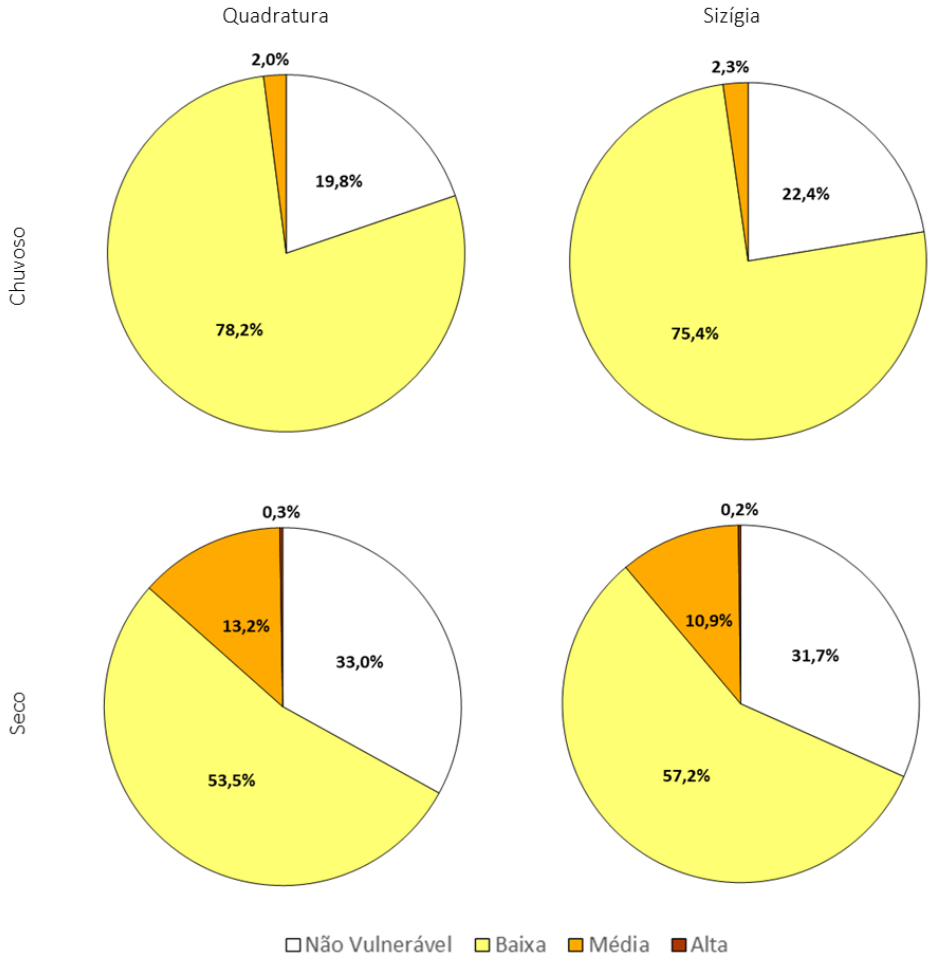


Figura 4-18: Distribuição geral das classes de vulnerabilidade nas florestas de mangue da baía de Turiaçu (MA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

A **vulnerabilidade** de cada região pode ser analisada com base no resultado da combinação de suas componentes, conforme apresentado no Capítulo 3. Na Tabela 4-2, Tabela 4-3, Tabela 4-4 e Tabela 4-5 são destacadas as combinações entre as componentes que ocorrem na Baía de Turiaçu (MA), em que as classes

de **vulnerabilidade** são indicadas pelas cores. Os resultados menores que 0,005% são desconsiderados e em resultados a partir de 0,006%, o arredondamento de duas casas decimais o torna 0,01%.

A Baía de Turiaçu (MA) apresentou combinações entre as componentes que resultaram em ocorrência superior a 10% na classe de **vulnerabilidade** baixa, especialmente no período chuvoso. Abaixo, destaca-se as configurações mais representativas para cada classe de **vulnerabilidade**.

As raras regiões de florestas de mangue que apresentam **vulnerabilidade** alta na Baía de Turiaçu (MA) estão associadas a uma configuração principal, que ocorre principalmente no período seco: locais com alta **suscetibilidade** e **sensibilidade** muito alta, mesmo que a **resiliência** seja alta.

Poucas florestas de mangue apresentam **vulnerabilidade** média, mas quando ocorrem, é por duas configurações principais: (i) locais com **suscetibilidade** média, **sensibilidade** muito alta, e **resiliência** alta; (ii) florestas com alta **suscetibilidade**, **sensibilidade** alta e **resiliência** muito alta.

A maior parte das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) apresentam **vulnerabilidade** baixa e estão associadas a configurações distintas, que dependem também do cenário analisado, pois essa classe ocorre com maior frequência no período chuvoso. As principais configurações entre as componentes são: (i) locais com **suscetibilidade** baixa, **sensibilidade** alta e **resiliência** alta; (ii) florestas com **suscetibilidade** baixa, **sensibilidade** muito alta e **resiliência** alta; (iii) locais com **suscetibilidade** baixa, **sensibilidade** alta e **resiliência** muito alta; (iv) florestas com média **suscetibilidade**, **sensibilidade** alta e **resiliência** muito alta.

Tabela 4-2: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)						10,96%			11,63%
	4 (alta)					1,33%	7,11%		15,43%	24,51%
	3 (média)				<0,005%	0,14%	<0,005%	0,01%	4,93%	0,01%
	2 (baixa)				<0,005%	0,01%		0,08%	3,14%	0,01%
	1 (mto. baixa)							0,02%	0,07%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-3: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)						11,15%			11,00%
	4 (alta)					1,57%	8,22%		14,64%	22,70%
	3 (média)					0,10%	0,01%	0,02%	4,54%	0,01%
	2 (baixa)				<0,005%	0,01%		0,08%	2,66%	0,01%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,05%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-4: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			5,47%			6,30%			8,37%
	4 (alta)		0,23%	2,06%		4,21%	9,19%		9,32%	15,66 %
	3 (média)		0,01%	<0,005 %	<0,005%	0,49%	<0,005 %	0,01%	2,73%	<0,005 %
	2 (baixa)	<0,005%	<0,005%		0,01%	0,11%		0,07%	1,98%	0,01%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,06%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-5: Matriz de **vulnerabilidade** para a Baía de Turiaçu (MA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			4,08%			7,04%			10,05%
	4 (alta)		0,20%	1,26%		4,36%	9,49%		9,20%	16,94%
	3 (média)		0,01%	<0,005%	<0,005%	0,38%	<0,005%	0,01%	2,62%	<0,005%
	2 (baixa)	<0,005%	<0,005%		<0,005%	0,12%		0,06%	1,77%	0,01%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,04%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Os mapas de **vulnerabilidade das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) à contaminação por óleo em evento acidental** são apresentados para os quatro cenários avaliados na Figura 4-19, Figura 4-20, Figura 4-21 e Figura 4-22.

Observa-se que a baía apresenta **vulnerabilidade** predominantemente baixa, principalmente na porção interna da baía e em áreas abrigadas. Essas regiões também apresentam importante ocorrência da classe não vulnerável, em todos os cenários.

Destaca-se a ocorrência das classes de **vulnerabilidade** média e alta concentradas principalmente em fundos de canais ou áreas distantes dos corpos d'água. Nesses casos, as florestas de mangue encontram reduzida energia hidrodinâmica em função de uma menor lavagem pelas marés, tendem a ser mais sensíveis e menos resilientes. Outra configuração relevante é a apresentada por áreas de alta **suscetibilidade**, localizadas na porção externa da Baía. Nessas áreas, possivelmente por conta da intensa ação marinha de ventos e ondas, a **vulnerabilidade** encontra-se nas classes média e alta. Como exemplo podemos citar a região conhecida como Miramar; a leste de Sababa, a leste de Cunhã-Coema e próximo ao rio Bitiua.

O período sazonal (chuvoso ou seco) influencia a **vulnerabilidade**, devido ao seu efeito sobre a **suscetibilidade**. No período chuvoso, a **vulnerabilidade** é menor, enquanto no período seco ela é maior. Conforme explicado na para a **suscetibilidade**, o padrão de dispersão distinto entre os períodos chuvoso e seco é influenciado pelas condições meteoceanográficas, aumentando assim a probabilidade de presença de óleo na zona costeira.

A **vulnerabilidade** é pouco variável entre os cenários de marés, assim como observado para a **suscetibilidade**.

Como apresentado na descrição da Baía de Turiaçu (MA), os manguezais dessa região podem ser subdivididos em duas feições: floresta de mangue e planície hipersalina (ou apicuns). Quanto às componentes e **vulnerabilidade**, no processo de mapeamento dos manguezais, optou-se por focar apenas nas florestas de mangue, tendo em vista que a ocorrência da feição planície hipersalina restringe-se a uma pequena porção dessa área de estudo.

Portanto, na Baía de Turiaçu (MA), a **vulnerabilidade** é predominantemente baixa principalmente por conta da baixa **suscetibilidade**. A **vulnerabilidade** só se apresenta média e alta sob cenários específicos de combinação entre as componentes e em determinadas áreas mais internas da baía.

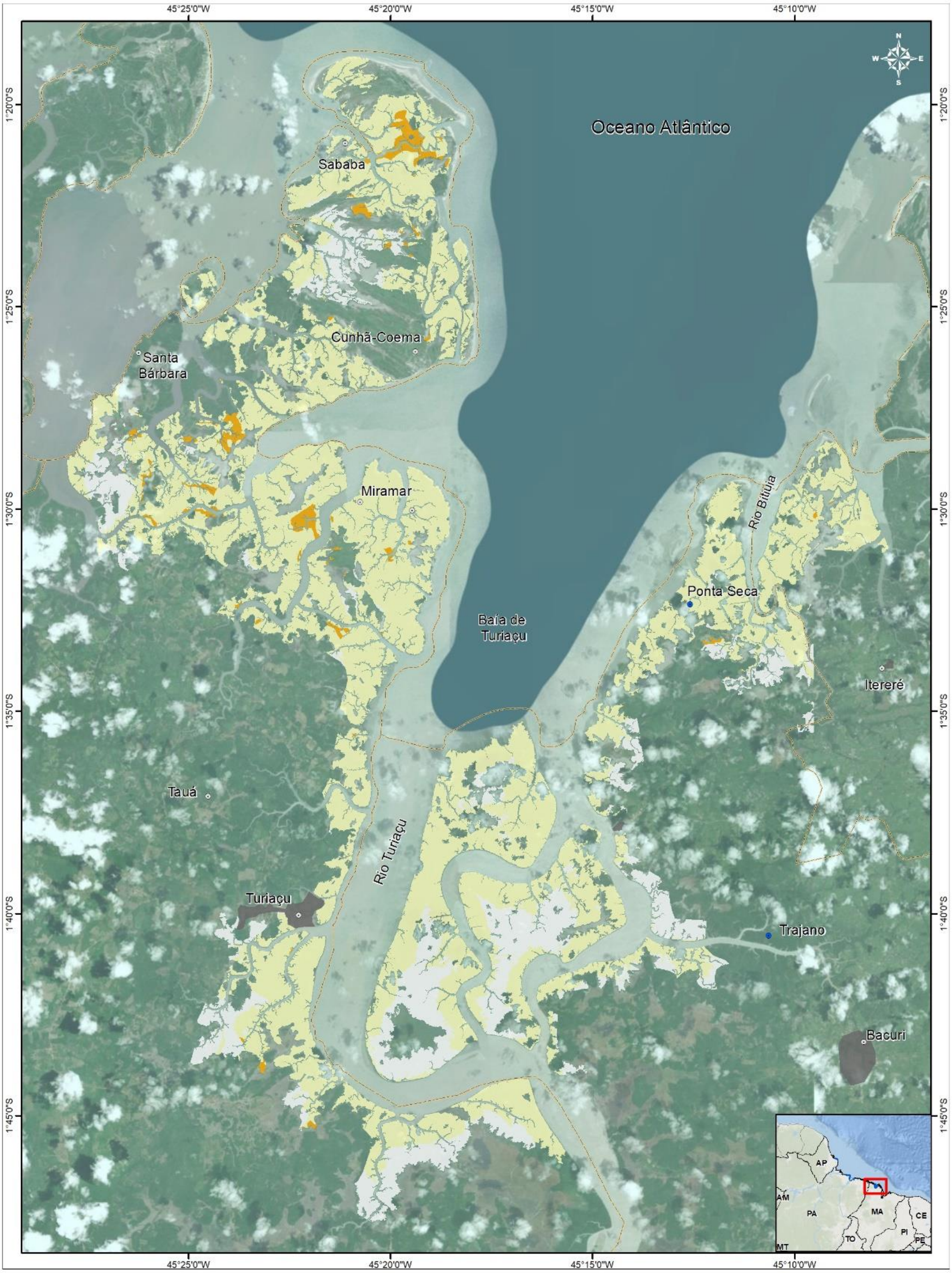


Figura 4-19: Vulnerabilidade das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período chuvoso e maré de quadratura.

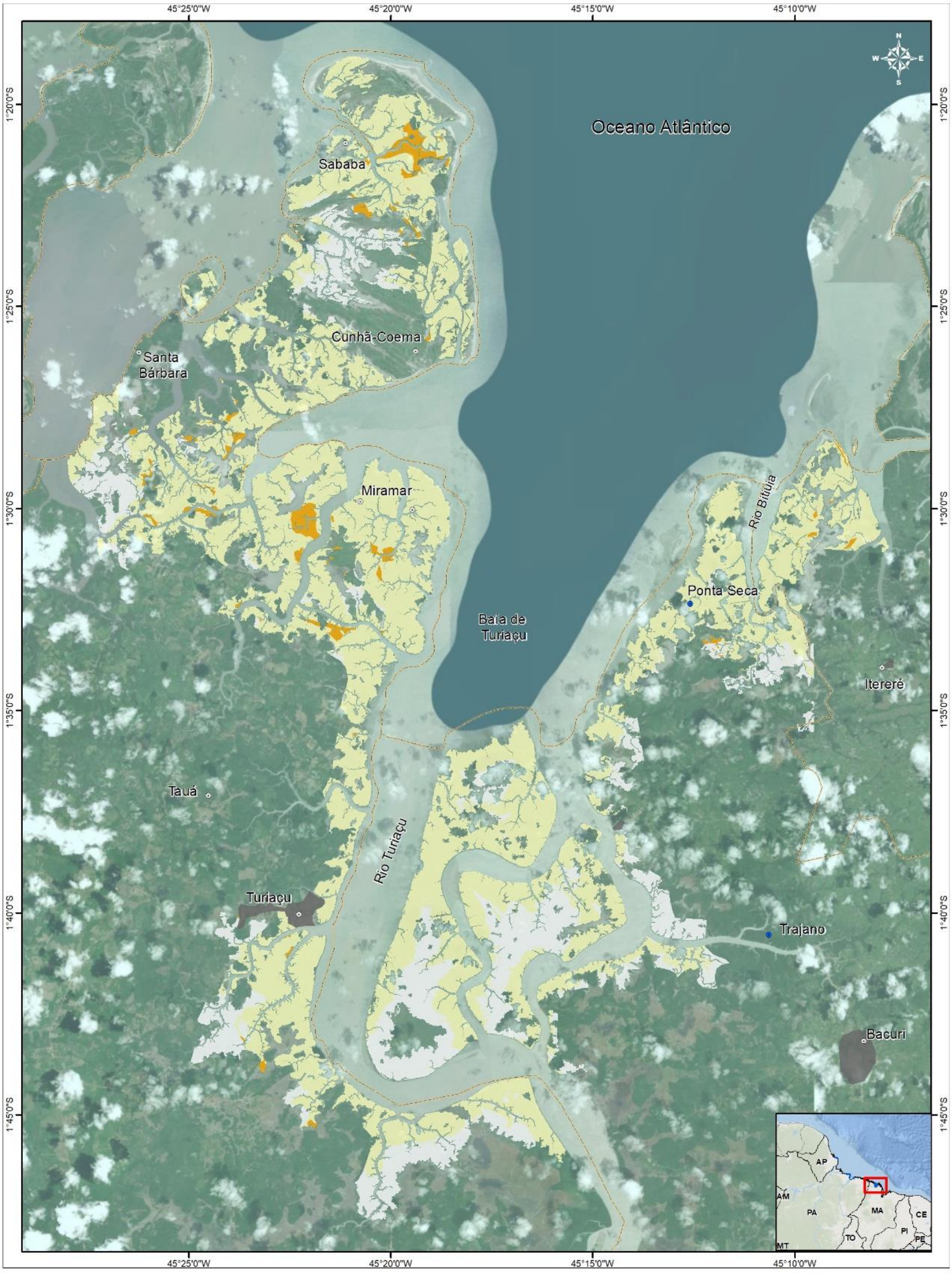


Figura 4-20: Vulnerabilidade das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período chuvoso e maré de sizígia.

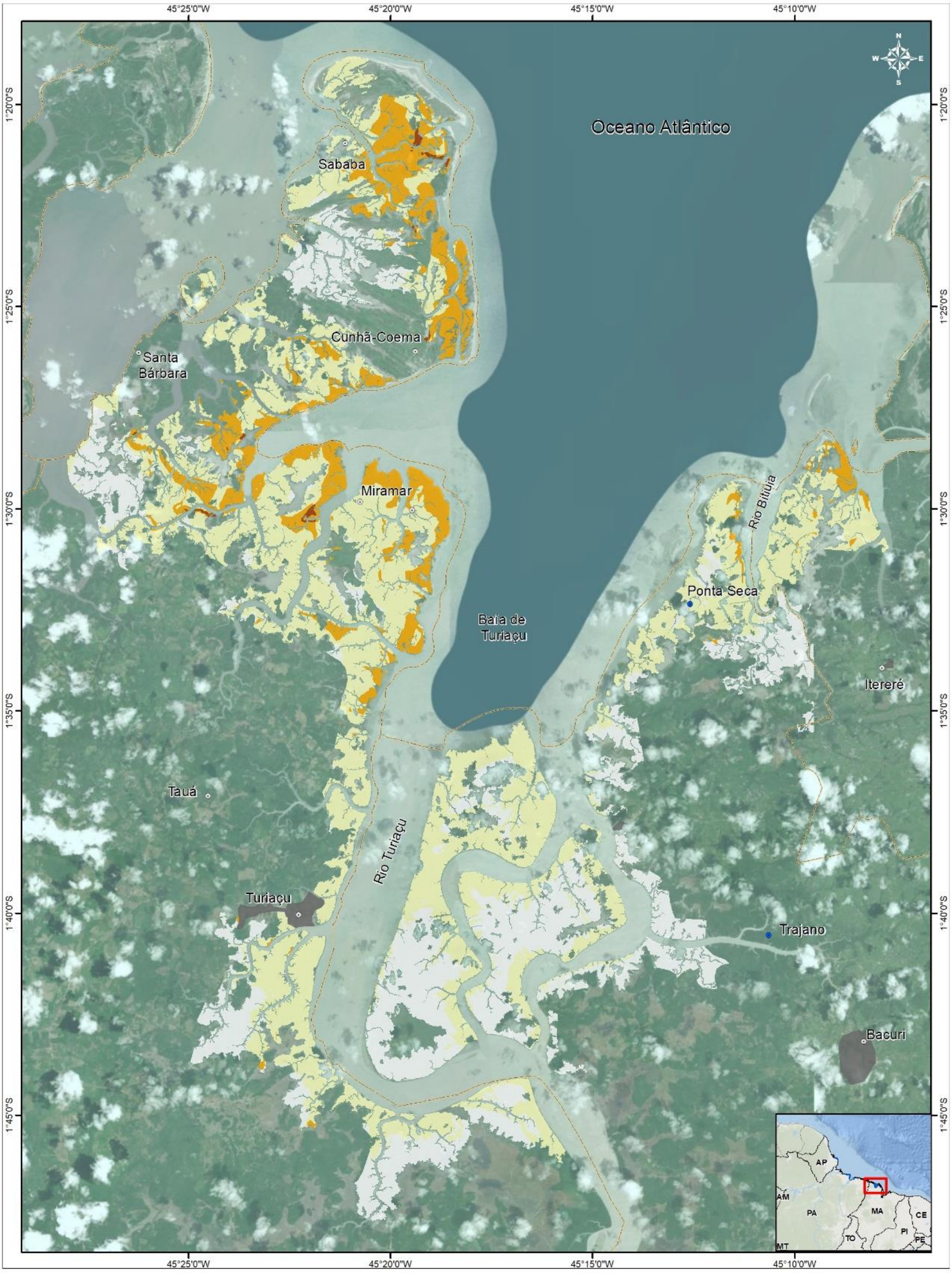


Figura 4-21: Vulnerabilidade das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período seco e maré de quadratura.

VULNERABILIDADE DAS FLORESTAS DE MANGUE NA BAÍA DE TURIAÇU (MA) À CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO EM EVENTO ACIDENTAL

CENÁRIO: Período SECA – Maré de SIZÍGIA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta

- Porto
- Cidade
- Área Edificada
- Limites Municipais
- Corpos Hídricos

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-22: Vulnerabilidade das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA) representativo do período seco e maré de sizígia.

As fitofisionomias representam o detalhamento das florestas de mangue, e revelam a variabilidade que pode ser observada na vegetação desse ecossistema. A identificação das fitofisionomias abordadas no presente Capítulo considerou a combinação entre a composição de espécies e a altura do dossel, conforme descrito no Volume 2, Capítulo 10. Para Baía de Turiaçu (MA), a composição pode ser de *Avicennia* spp. (Av); *Rhizophora* spp. (Rh); Mista (combinação entre as duas espécies citadas anteriormente). As classes de altura de dossel atribuídas a esse sistema são: até 6 m; de 6 a 10 m; de 10 a 15 m; e maior 15 m.

A partir da espacialização das fitofisionomias encontradas na Baía de Turiaçu (MA), apresenta-se a análise de integração entre as fitofisionomias e as classes de **vulnerabilidade**. Na Tabela 4-6, o percentual de cada fitofisionomia nas classes de **vulnerabilidade** baixa, média e alta é apresentado. A espacialização dos resultados pode ser observada nos mapas de **integração dos resultados de vulnerabilidade ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue**, conforme os cenários estabelecidos para o período chuvoso (Figura 4-27 e Figura 4-28), e seco (Figura 4-29 e Figura 4-30), nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente.

Tendo em vista o predomínio da classe de baixa **vulnerabilidade** em todos os cenários considerados para as florestas do estuário de Turiaçu (MA), é possível estabelecer algumas relações entre as diferentes fitofisionomias e sua **vulnerabilidade** à contaminação por óleo.

Na Baía de Turiaçu (MA), apesar do predomínio da classe de baixa **vulnerabilidade** em todas as fitofisionomias, observa-se que a contribuição de áreas de **vulnerabilidade** média tende a ser maior nas fitofisionomias com menor desenvolvimento estrutural, sobretudo para aquelas dominadas por *Rhizophora* spp. ou florestas mistas. Isto ocorre por conta do gradiente de desenvolvimento estrutural da franja em direção ao interior. Podemos observar tanto nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, quanto na Tabela 4-6 que as florestas mistas são as que possuem maior proporção classificada como de média e alta **vulnerabilidade** em todos os cenários analisados. Este padrão, no entanto, não é observado para as florestas dominadas por *Avicennia* spp., o que pode ser explicado pelo fato das florestas de baixo desenvolvimento estrutural dominadas por essa espécie, representarem florestas jovens nas franjas dos manguezais, possuindo, portanto, **resiliência** alta a muito alta e alta **sensibilidade** (no caso o menor nível de sensibilidade) e, por conseguinte, baixa **vulnerabilidade**.

Ao considerar os cenários mais drásticos, ou seja, período de seca, cabe destacar que as florestas mistas com baixo desenvolvimento estrutural (fitofisionomias com altura menor que 6m) possuem entre 14% e 16% de sua área classificada como de média ou alta **vulnerabilidade**. Todas as fitofisionomias, sob todos os cenários sempre apresentam, para a classe florestas com alta **vulnerabilidade**, contribuição inferior a 1%, sendo que sob cenários chuvosos essa classe não ocorre em toda a Baía de Turiaçu (MA).

Observando os dados por espécie dominante, as florestas dominadas por *Avicennia* spp. possuem os menores valores percentuais associados à classe média **vulnerabilidade** no período seco (variação de 3% a 8%). Essas florestas não apresentam-se com alta **vulnerabilidade** em nenhum dos cenários analisados. As florestas de *Rhizophora* spp. apresentam um padrão inverso, isto é, contam com as maiores proporções nesta classe de média **vulnerabilidade** (variação de 12% a 16%) nas florestas de menor desenvolvimento estrutural (altura < 10m). De forma similar, as florestas mistas concentram a maior parte de sua área com **vulnerabilidade** média nas fitofisionomias de menor desenvolvimento estrutural com variação percentual de 13,5% a 15,5%.

Ao avaliar a mudança no período de marés para as diferentes fitofisionomias em relação à classe de vulnerabilidade média e alta, observa-se um impacto similar para as fitofisionomias de *Rhizophora* spp. e florestas mistas. A variação entre o período chuvoso e seco acarretou variação percentual da classe média de 2% para 15%; para a classe alta esta variação foi de 0% para 1% aproximadamente. As fitofisionomias compostas por *Avicennia* spp., por outro lado, apresentaram a menor variação percentual entre diferentes períodos de chuva para a vulnerabilidade média: de aproximadamente 0,1% a 8% sem ocorrência da vulnerabilidade alta. Portanto, é possível afirmar, em linhas gerais, que as florestas dominadas por *Avicennia* spp. nesta baía são menos vulneráveis que as outras composições vegetais presentes. Todavia, percebe-se ainda, que em linhas gerais as fitofisionomias dominadas por *Rhizophora* spp. e representadas por florestas mistas possuem maiores contribuição da classe "não vulnerável", com destaque para as fitofisionomias de maior desenvolvimento estrutural

De forma visual, percebe-se nos mapas integrados (Figura 4-27, Figura 4-28, Figura 4-29 e Figura 4-30) o predomínio de *Rhizophora* spp. nessas regiões de maior vulnerabilidade – o que reflete o predomínio geral destas fitofisionomias na Baía de Turiaçu (MA).

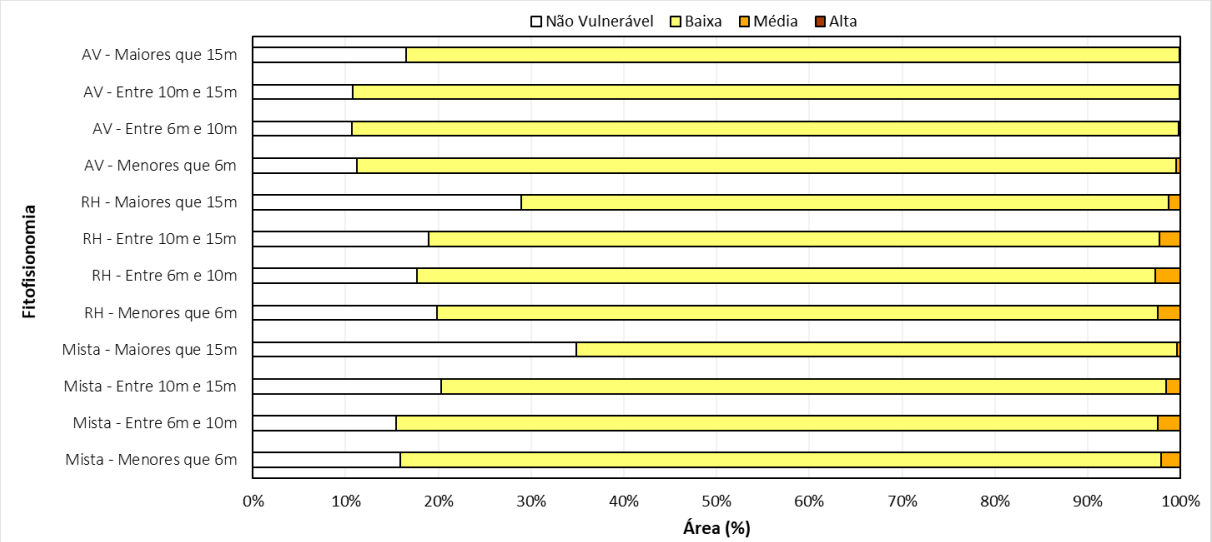


Figura 4-23: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período chuvoso e maré de quadratura.

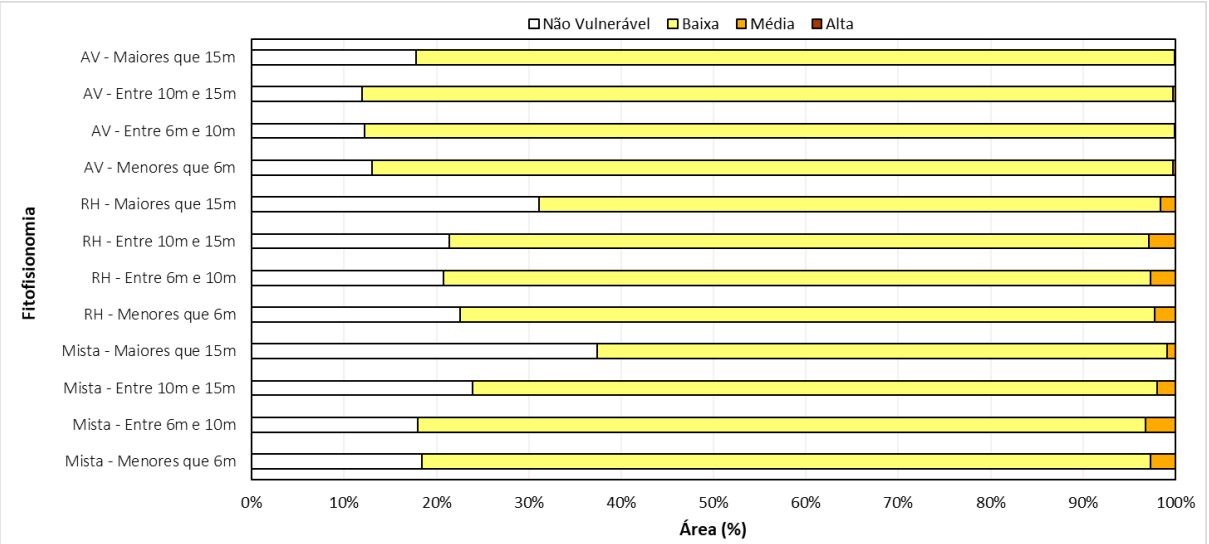


Figura 4-24: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período chuvoso e maré de sizígia.

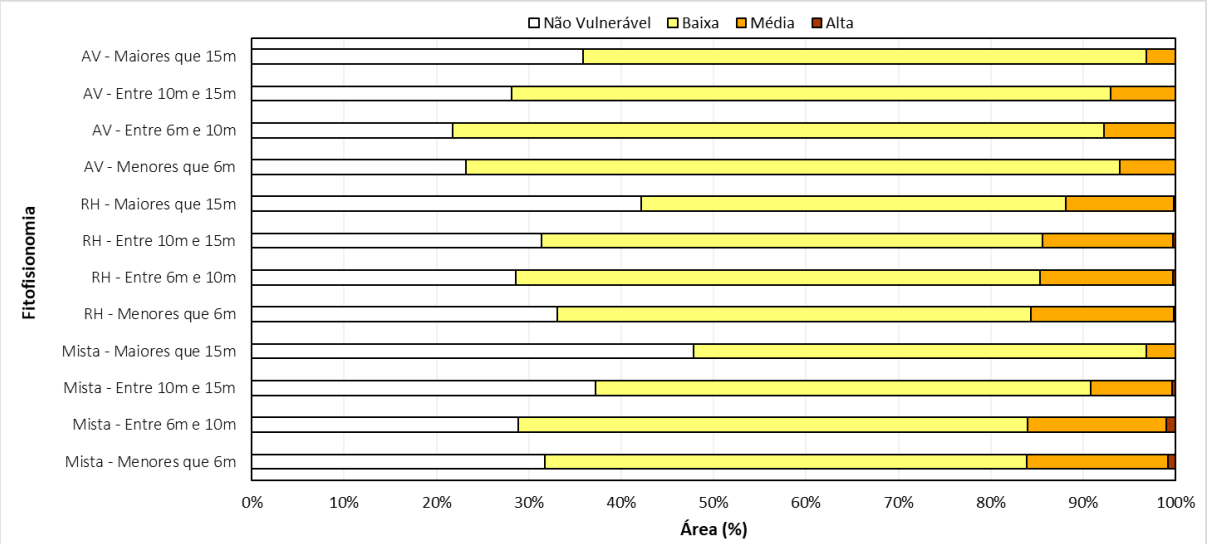


Figura 4-25: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período seco e maré de quadratura.

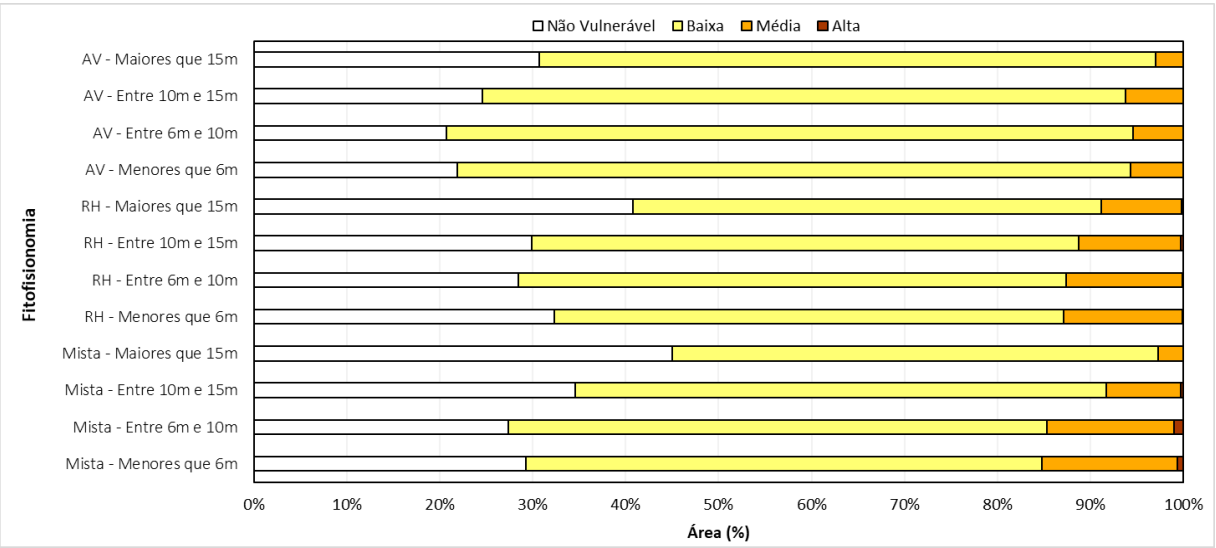


Figura 4-26: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), no período seco e maré de sizígia.

Tabela 4-6: Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não-vulnerável) em cada fitofisionomia na Baía de Turiaçu (MA), conforme os cenários analisados.

Fitofisionomias	Classes de Vulnerabilidade na Baía de Turiaçu (MA)															
	Chuvoso | Quadratura				Chuvoso | Sizígia				Seco | Quadratura				Seco | Sizígia			
	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta
Mista < 6m	15,9	82,0	2,1	0,0	18,5	78,9	2,7	0,0	31,7	52,2	15,3	0,8	29,3	55,5	14,5	0,7
Mista 6m - 10m	15,4	82,1	2,4	0,0	18,0	78,8	3,2	0,0	28,8	55,2	15,0	1,0	27,3	58,0	13,7	1,0
Mista 10m - 15m	20,3	78,1	1,6	0,0	23,9	74,1	2,0	0,0	37,2	53,6	8,8	0,3	34,6	57,1	8,0	0,3
Mista > 15m	34,9	64,7	0,4	0,0	37,4	61,7	0,9	0,0	47,9	49,0	3,1	0,0	45,0	52,2	2,8	0,0
RH < 6m	19,8	77,7	2,5	0,0	22,6	75,1	2,3	0,0	33,1	51,3	15,5	0,2	32,3	54,8	12,8	0,1
RH 6m - 10m	17,7	79,6	2,7	0,0	20,7	76,6	2,6	0,0	28,6	56,7	14,5	0,2	28,4	58,9	12,5	0,2
RH 10m - 15m	18,9	78,8	2,2	0,0	21,4	75,7	2,9	0,0	31,3	54,3	14,1	0,3	29,9	58,8	11,0	0,3
RH > 15m	29,0	69,8	1,2	0,0	31,1	67,2	1,6	0,0	42,1	46,0	11,8	0,1	40,8	50,3	8,7	0,2
AV < 6m	11,2	88,3	0,5	0,0	13,0	86,7	0,3	0,0	23,2	70,7	6,1	0,0	21,9	72,4	5,7	0,0
AV 6m - 10m	10,7	89,2	0,1	0,0	12,2	87,7	0,1	0,0	21,7	70,6	7,7	0,0	20,7	73,9	5,4	0,0
AV 10m - 15m	10,8	89,1	0,1	0,0	12,0	87,8	0,2	0,0	28,1	64,9	7,1	0,0	24,6	69,2	6,2	0,0
AV >15m	16,5	83,4	0,1	0,0	17,8	82,1	0,1	0,0	35,9	61,0	3,2	0,0	30,7	66,3	3,0	0,0

Mista = Floresta com composição mista de espécies; RH = *Rhizophora spp.*; AV = *Avicennia* spp.

*Não Vulnerável

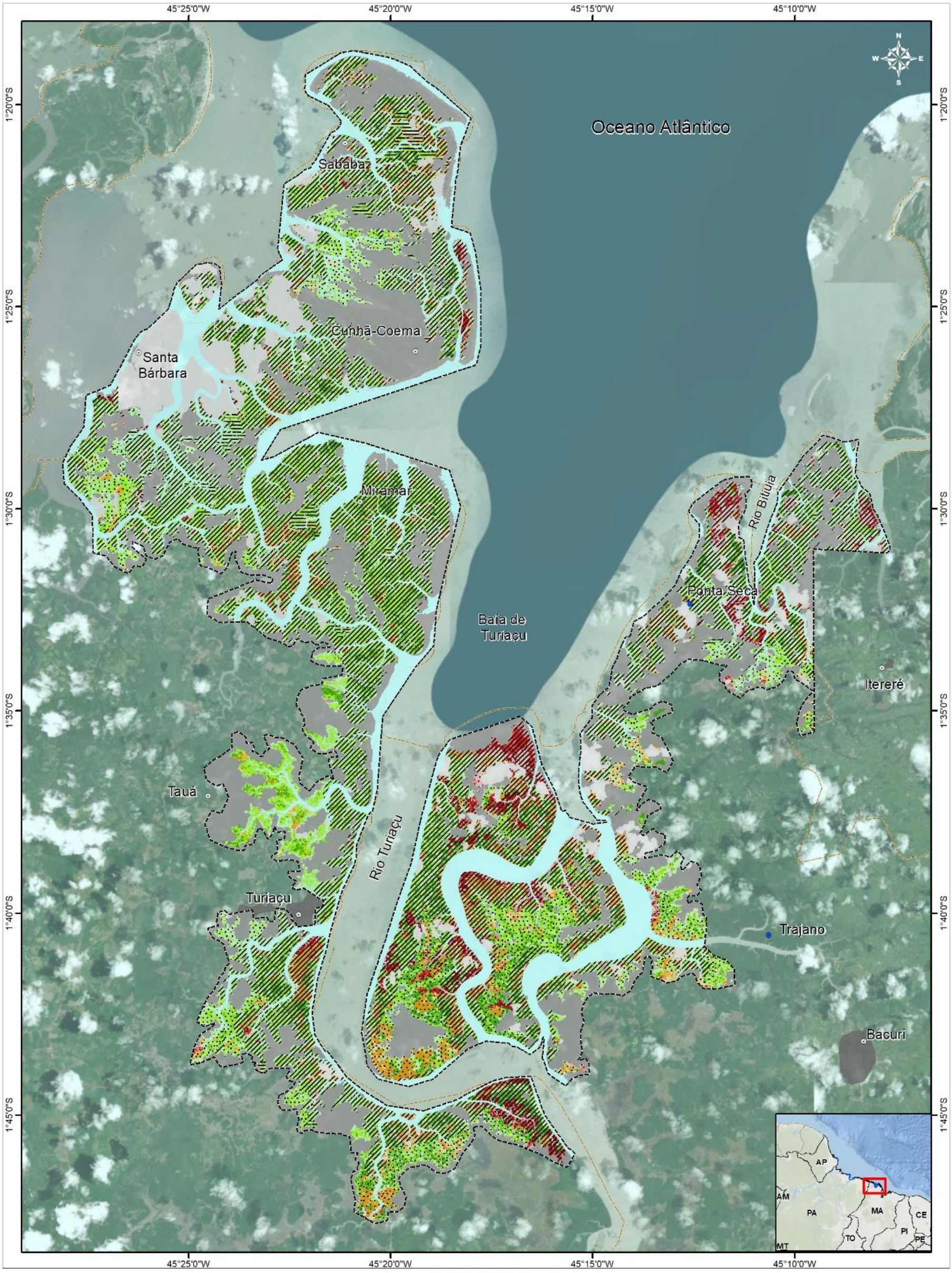
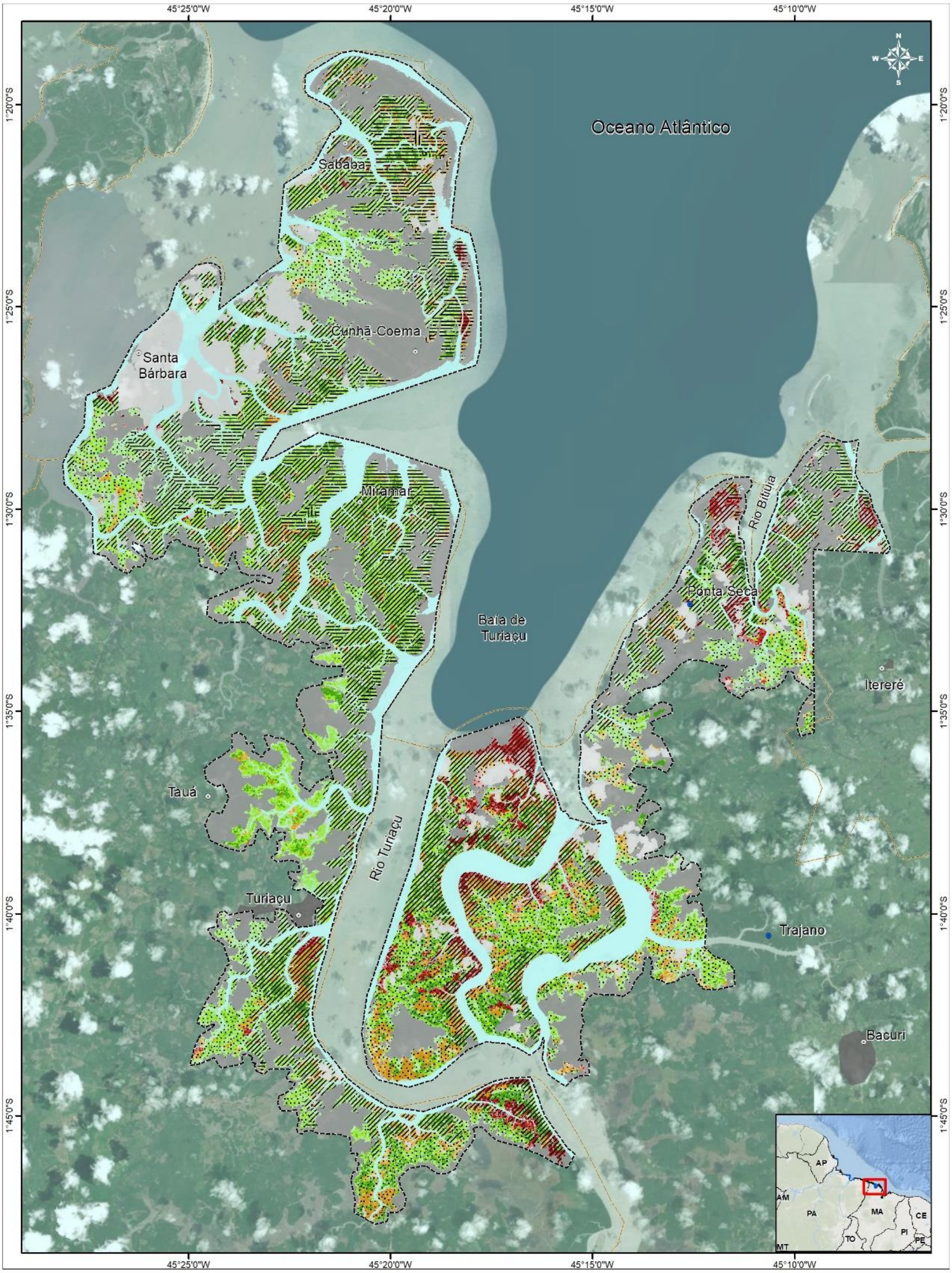


Figura 4-27: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período chuvoso e maré de quadratura.

Figura 4-28: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período chuvoso e maré de sizígia.



PROJETO COSTA NORTE

INTEGRAÇÃO

FITOFISIONOMIAS E VULNERABILIDADE
BAÍA DE TURIAÇU (MA)
Período SECA Maré de QUADRATURA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

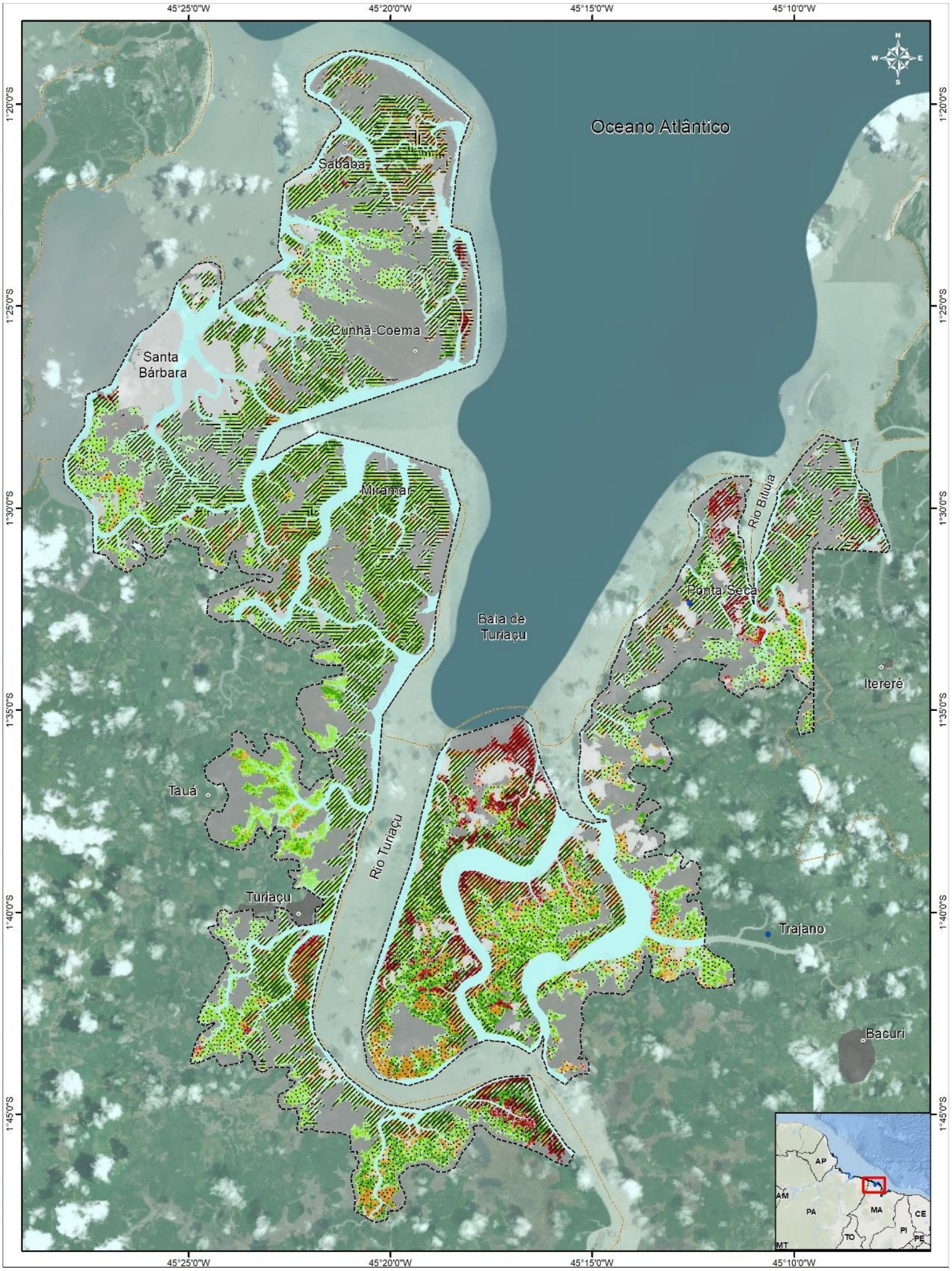
- AV - Menores que 6m
- AV - Entre 6m e 10m
- AV - Entre 10m e 15m
- AV - Maiores que 15m
- Mista - Menores que 6m
- Mista - Entre 6m e 10m
- Mista - Entre 10m e 15m
- Mista - Maiores que 15m
- RH - Menores que 6m
- RH - Entre 6m e 10m
- RH - Entre 10m e 15m
- RH - Maiores que 15m
- Sem Informação
- Outros
- Água
- Área de Estudo

Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta
- Limites Municipais
- Área Edificada
- Porto
- Cidade

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km
Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp

Figura 4-29: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período seco e maré de quadratura.



CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

INTEGRAÇÃO
FITOFISIONOMIAS E VULNERABILIDADE
BAÍA DE TURIAÇU (MA)
Período SECA Maré de SIZÍGIA

- AV - Menores que 6m
- AV - Entre 6m e 10m
- AV - Entre 10m e 15m
- AV - Maiores que 15m
- Mista - Menores que 6m
- Mista - Entre 6m e 10m
- Mista - Entre 10m e 15m
- Mista - Maiores que 15m
- RH - Menores que 6m
- RH - Entre 6m e 10m
- RH - Entre 10m e 15m
- RH - Maiores que 15m
- Sem Informação
- Outros
- Água
- Área de Estudo

Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta
- Limites Municipais
- Área Edificada
- Porto
- Cidade

Escala 1:150.000
0 0,75 1,5 3 Km
Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-30: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue na Baía de Turiaçu (MA), período seco e maré de sizígia.

4.2. Estuário de São Caetano de Odivelas (PA)

Neste item é apresentada a análise de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), considerando a análise de suas três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**.

4.2.1. Suscetibilidade

Neste item será analisada a **suscetibilidade** do estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo oriundo de potenciais vazamentos distribuídos nas bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira (MEB).

Como pode ser visto nos mapas de probabilidade máxima de presença de óleo na região da MEB para os cenários seco e chuvoso (Figura 4-1), há grande variabilidade sazonal na dispersão do óleo desde as fontes até o estuário do rio Pará. Observam-se maiores probabilidades de presença de óleo na entrada do estuário do Rio Pará, no período seco, (40 a 50%), quando comparadas ao período chuvoso (20 a 30%). Como exposto e discutido na introdução deste capítulo, essa diferença está relacionada aos padrões meteoceanográficos característicos da MEB, dentre os quais o regime de ventos alísios de nordeste (período chuvoso) e de leste/sudeste (período seco) associado à migração sazonal da ZCIT figura como principal aspecto.

A partir da análise inversa (ver Capítulo 3 deste volume para entendimento geral, ou o Capítulo 8 do Volume 2, para detalhamento desta metodologia) podemos identificar as áreas dentro das bacias efetivas da MEB que oferecem risco de presença de óleo para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA) (Figura 4-31), associadas à probabilidade (Figura 4-32), e tempo mínimo de toque do óleo (Figura 4-33). Nota-se que durante o período chuvoso, existem mais fontes de vazamento que oferecem risco potencial para o estuário de São Caetano de Odivelas, distribuídas em todas as Bacias efetivas da MEB, enquanto no período seco, as fontes se distribuem apenas nas Bacias Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar. Porém, é no período seco que as maiores probabilidades de presença de óleo na entrada do estuário do rio Pará são observadas. Esse padrão é explicado pela maior variabilidade direcional do transporte de óleo no período chuvoso, aumentando as áreas que oferecem risco, e diminuindo as probabilidades associadas ao toque em determinado local.

Nota-se também que apesar da ampla distribuição de fontes potenciais de óleo para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), é a sudoeste da Bacia Pará-Maranhão e em uma faixa central da Bacia de Barreirinhas que as maiores probabilidades se concentram (acima de 10%). O tempo mínimo de toque é menor no período chuvoso, onde se observam valores de aproximadamente 60 horas para as fontes de vazamento na Bacia Foz do Amazonas, enquanto no período seco os menores tempos de toque de óleo são relativos às fontes na Bacia Pará-Maranhão (cerca de 100 horas). Ou seja, apesar de não tão frequentes, os processos dinâmicos responsáveis por transportar o óleo desses pontos de vazamento, à norte/noroeste do estuário do rio Pará, estão associados a um tempo mínimo mais curto.

Associado ao padrão geral de dispersão distinto entre o período seco e chuvoso, discutido na introdução do capítulo, nota-se que no período seco apenas fontes à leste do estuário de São Caetano de Odivelas oferecem risco. Durante o período chuvoso, devido à maior descarga fluvial dos rios Amazonas e Pará e ao padrão de ventos de nordeste, fontes à oeste do estuário de São Caetano de Odivelas (na Bacia Foz do Amazonas) também oferecem risco, evidenciando um processo de dispersão na plataforma continental para leste. Apesar de ainda não ser descrito na literatura científica, esse processo foi observado na trajetória dos derivadores lançados no PCN e encontra-se descrito no Volume 2, Capítulo 6 (Processos Costeiros e Estuarinos).

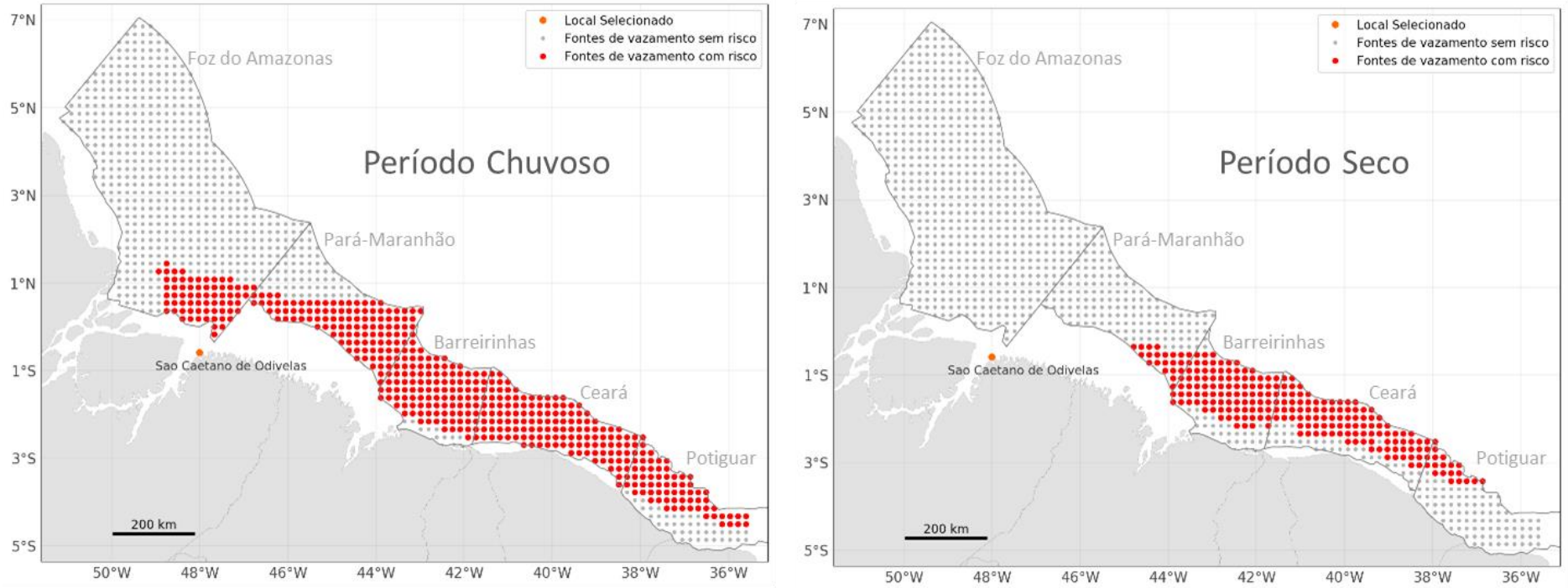


Figura 4-31: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo ao estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita.

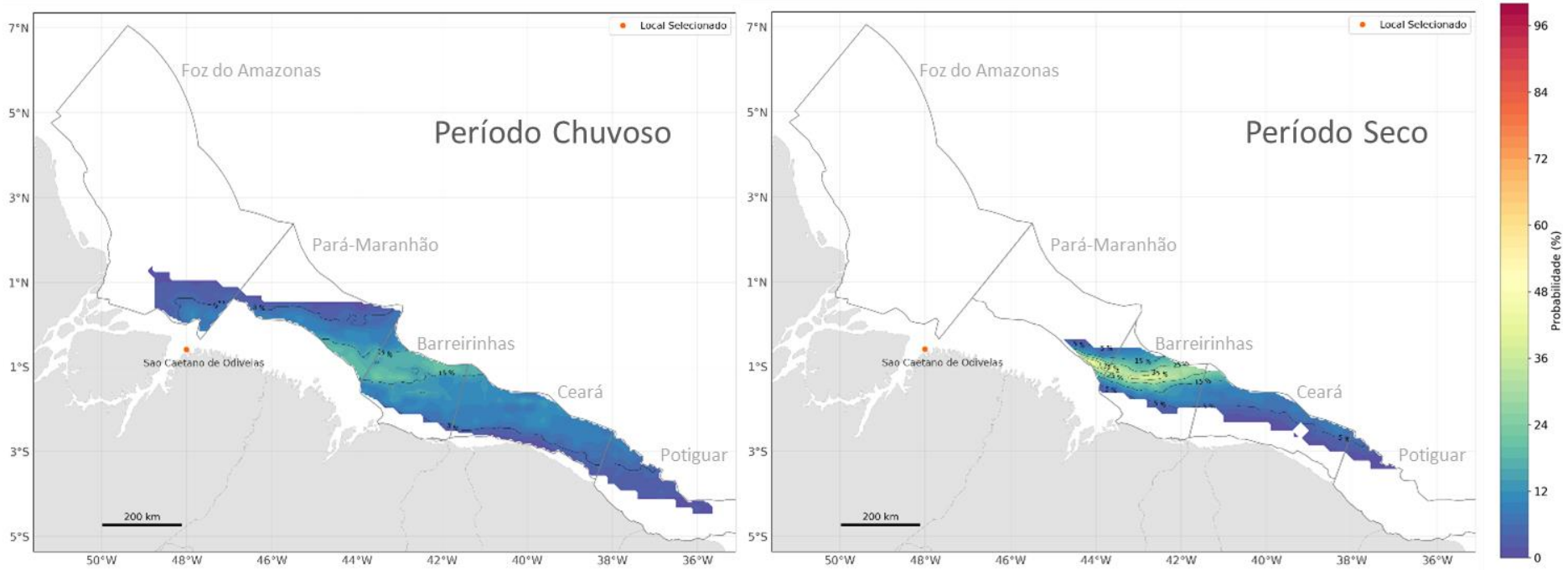


Figura 4-32: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

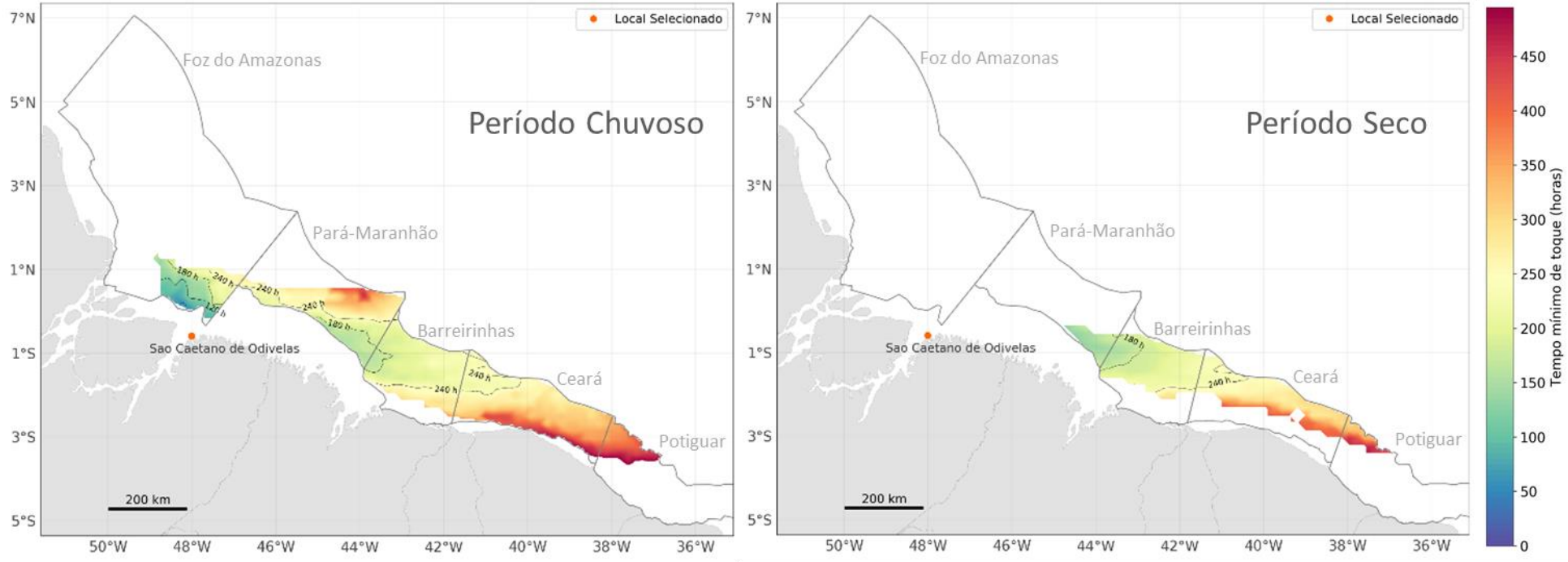


Figura 4-33: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB. nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

Aumentando o nível de detalhamento, podemos observar na Figura 4-34 e Figura 4-35 a distribuição espacial da probabilidade de presença de óleo no estuário do rio Pará e no estuário de São Caetano de Odivelas, respectivamente. Estes resultados representam a continuidade da dispersão de óleo desde as fontes de vazamento até esses sistemas estuarinos e, portanto, trazem a influência dos cenários sazonais da escala *offshore* descritos previamente. Adicionalmente, são incluídas divisões de cenários relativos à maré (sizígia ou quadratura), pois essa forçante apresenta grande influência na hidrodinâmica estuarina e, portanto, na dispersão do óleo nestes sistemas costeiros.

Nota-se, na Figura 4-34, duas plumas de alta probabilidade de presença na plataforma adjacente a foz do estuário do rio Pará, que são reflexo das duas fontes de vazamento mais próximas do estuário (ver a localização das fontes na Figura 4-1). Entretanto, mesmo com a proximidade, podemos ver que, devido ao transporte preferencial para oeste, não são essas as fontes que ocasionam maior **suscetibilidade** para São Caetano de Odivelas (Figura 4-32).

Associado aos padrões gerais descritos para o estuário do rio Pará (apresentados na análise de **suscetibilidade** do sistema costeiro de Soure, item 4.3.1), na região da entrada do estuário de São Caetano de Odivelas (retângulo cinza escuro) observam-se probabilidades de no máximo 10-20%, no período chuvoso e, de no máximo 30-40%, no período seco.

Vemos na Figura 4-35 o detalhamento da probabilidade máxima de presença de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas, considerando todas as fontes de vazamento. Como padrões gerais, nota-se um gradiente de maiores probabilidades a jusante do estuário. Esse padrão pode ser explicado pela maior proximidade com as fontes de vazamento – favorecendo maiores probabilidades de toque - e pela descarga fluvial dos rios Mojuim e Mocajuba – ocasionando um transporte residual para fora do estuário e, consequentemente, diminuindo as probabilidades de toque em suas porções mais a montante.

Nota-se também um gradiente de maiores probabilidades na porção oeste dos canais, associado na entrada do estuário pela morfologia do canal principal, que tem em sua porção oeste a principal ligação com o rio Pará, e no estuário como um todo ao padrão de ventos predominantemente do quadrante nordeste (ver Volume 2, Capítulo 2). Em consequência desta provável influência do vento no gradiente de maiores probabilidades na porção oeste do sistema como um todo, a maior parte das florestas de mangue na margem leste do rio Mocajuba não são suscetíveis ao óleo oriundo das fontes consideradas. Tanto no período seco quanto no chuvoso, em maré de sizígia, nota-se um maior alcance de classes de probabilidade mais altas estuário adentro devido à maior incursão da maré.

Durante o período chuvoso, as classes de probabilidade mais elevadas no estuário de São Caetano de Odivelas são de 15-20%, em sizígia, enquanto no período seco, são na classe de 30-40%, também em sizígia. Em ambos os casos essas probabilidades são observadas apenas em uma pequena região na porção oeste na entrada do estuário. Durante o período seco, por conta das maiores probabilidades na entrada do estuário e da menor descarga fluvial, observa-se um aumento da **suscetibilidade** em porções mais para montante, sobretudo no eixo ao longo da porção oeste do estuário, onde podem-se observar valores máximos entre 12,5 e 15,0% no interior do rio Mojuim (latitude 0,75°S), na maré de sizígia. Por outro lado, no rio Mocajuba, observam-se valores de **suscetibilidade** entre 7,5 e 10% nas marés de sizígia, sem haver um avanço significativo em direção ao estuário superior (montante). Por fim, apesar de ser importante considerar as incertezas associadas aos modelos nas estimativas, nota-se que parcela significativa do estuário de São Caetano de Odivelas possui **suscetibilidade** inferior a 2,5%, e que grande parte dessas áreas estão submetidas à exposição zero e, portanto, não suscetíveis à contaminação por óleo oriundo das fontes de vazamento aqui consideradas.

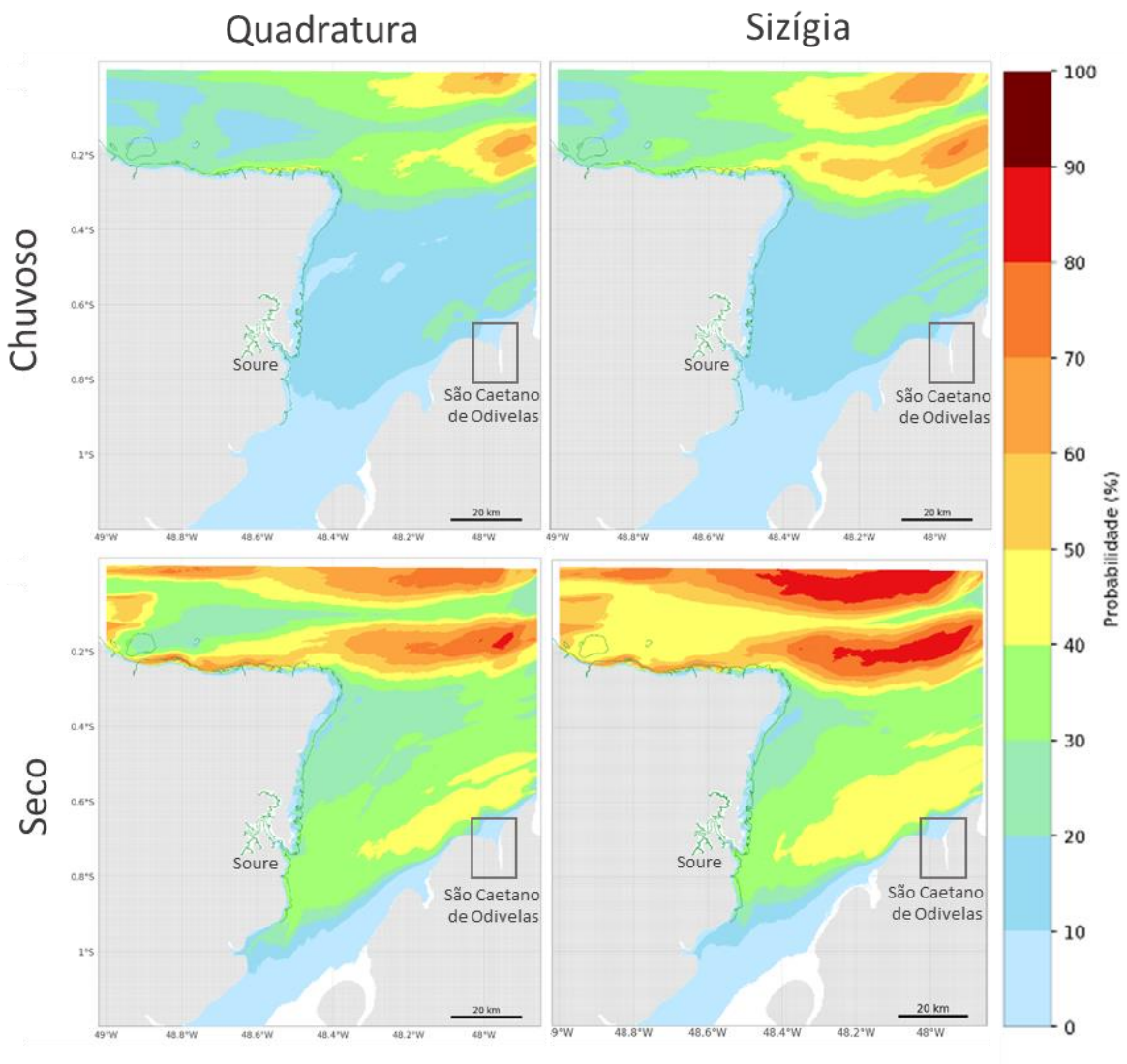


Figura 4-34: Probabilidade máxima de chegada de óleo na entrada do estuário do Rio Pará. Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita). O retângulo cinza escuro representa a localização aproximada do domínio do modelo de dispersão de óleo do estuário de São Caetano de Odivelas, na próxima escala de maior detalhamento.

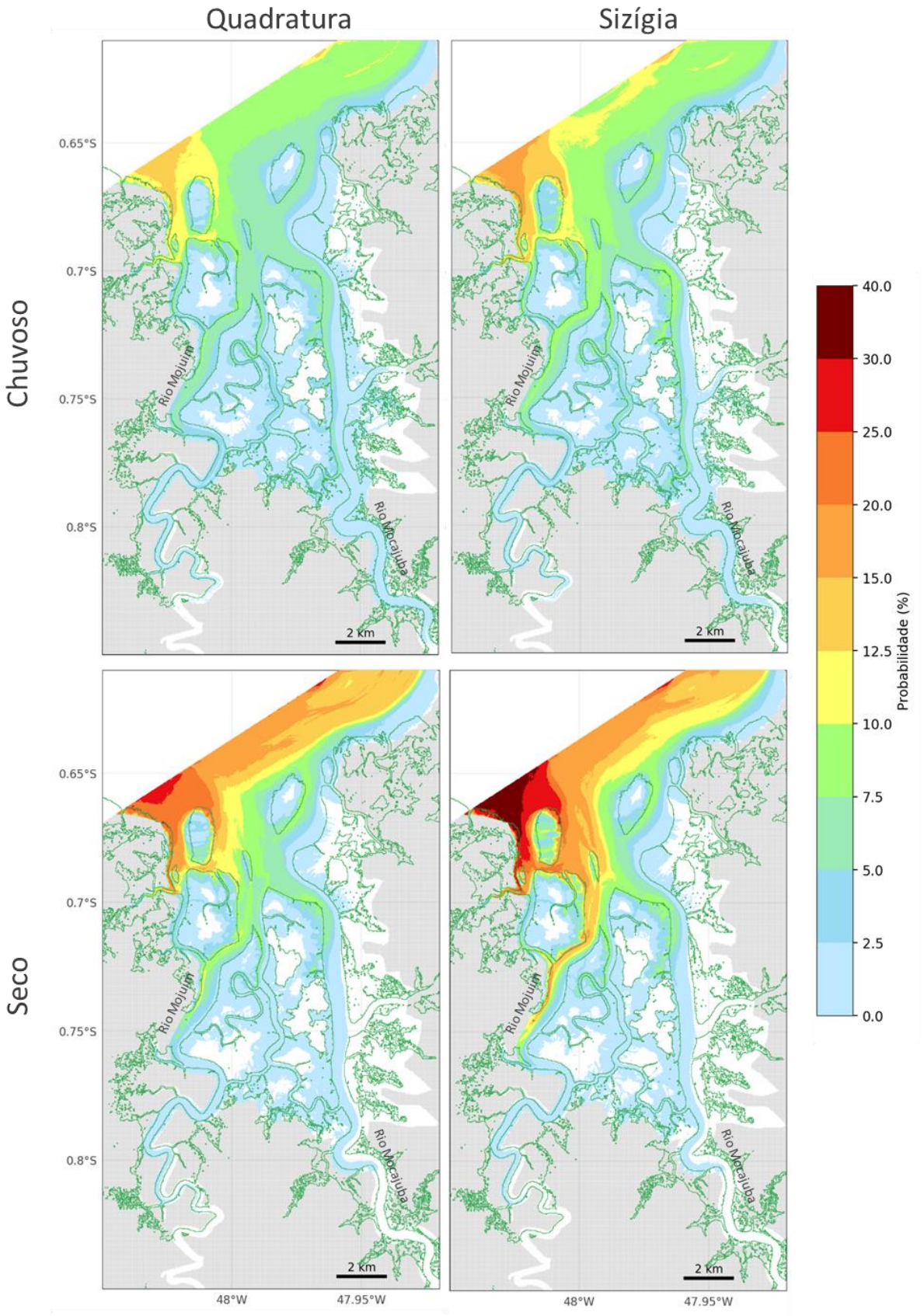


Figura 4-35: Probabilidade máxima de chegada de óleo no estuário de São Caetano de Odivelas. Períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

Apresenta-se, a seguir, os mapas de **suscetibilidade** nas regiões de florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas, para os quatro cenários propostos (Figura 4-37, Figura 4-38, Figura 4-39 e Figura 4-40). Nestes, a **suscetibilidade** encontra-se classificada entre não-suscetível (0%), baixa (maior que 0% e menor que 13%), média (maior ou igual a 13% e menor que 40%) e alta (maior ou igual a 40% e menor ou igual que 100%), conforme a metodologia descrita no Capítulo 3.

A **suscetibilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) é predominantemente baixa em todos os cenários estudados (Figura 4-36). No período chuvoso, essa classe abrange 65,3 a 73,6% das áreas de florestas de mangue; enquanto no período seco, essa área varia de 51,6 a 53,9%. Há poucas áreas com **suscetibilidade** média, e sua ocorrência é mais rara no período chuvoso (0,0 a 0,2%) que no período seco (0,6 a 1,7%), destacando-se os percentuais extremamente baixos de áreas nessa classe. Neste estuário, não há ocorrência de áreas de floresta em classe alta, independente do período sazonal ou da condição de maré. Cabe destaque que, como na Baía de Turiaçu (MA), as áreas não suscetíveis também apresentam percentuais expressivos, 45,5 a 46,6% no período seco e 26,4 a 34,5% no período chuvoso, em São Caetano de Odivelas, sendo essas áreas as maiores após as áreas classificadas como **suscetibilidade** baixa. Da mesma forma que na Baía de Turiaçu (MA), destaca-se a baixa influência das condições de maré no resultado das classes de **suscetibilidade** nos cenários estudados, como pode ser observado na Figura 4-36, com exceção do período chuvoso, onde observa-se uma diminuição da área não suscetível na maré de quadratura.

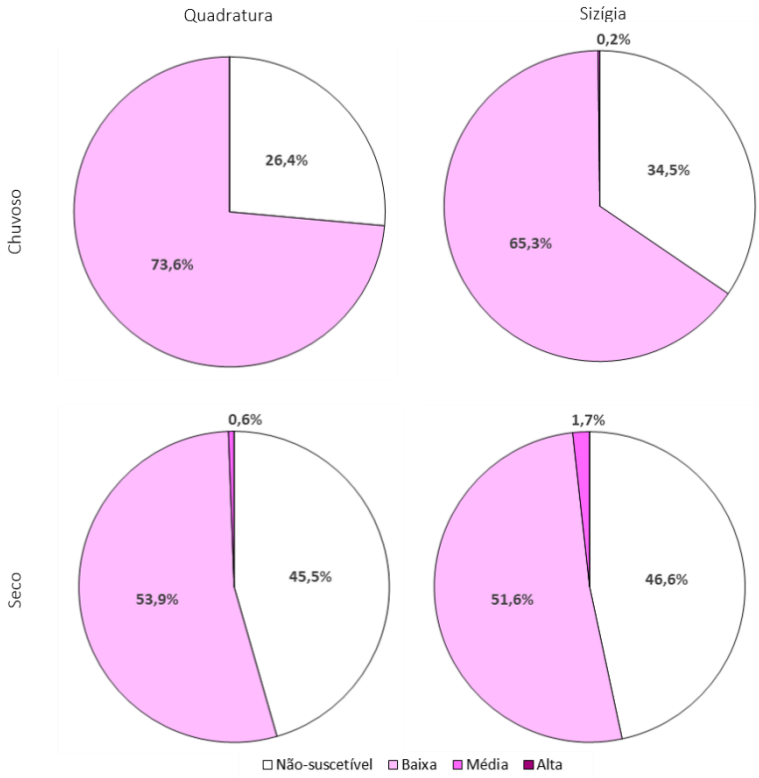


Figura 4-36: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

Durante o período chuvoso com maré de quadratura, a classe média não é observada. Com maré de sizígia, a porção nordeste da ilha de Taipu apresenta esta faixa de **suscetibilidade**.

No período seco, quando as probabilidades na entrada do estuário do rio Pará - e consequentemente na entrada do estuário de São Caetano de Odivelas - são maiores, mais regiões são classificadas com **suscetibilidade** média. Nos períodos de maré de quadratura, apenas a porção nordeste da ilha de Taipu apresenta classe média, porém no período de sizígia as ilhas do Papagaio e do Marinheiro também apresentam **suscetibilidade** média, em áreas restritas às margens nas porções nordeste e leste das ilhas.

As florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas não suscetíveis ao óleo oriundo das fontes de vazamento consideradas se concentram na margem leste do rio Mocajuba, e nos interiores das ilhas da Rata, do Papagaio, da Macaca e de São Miguel. Destaca-se que no período chuvoso, existem menos áreas não suscetíveis que no período seco, o que é explicado pelo acréscimo da elevação do nível médio de água causado pela maior descarga fluvial nesse período. Nota-se que nas ilhas da Macaca, de São Miguel, do Papagaio e da Rata existem mais áreas não suscetíveis no cenário de quadratura em ambos os períodos sazonais (seco e chuvoso), devido ao maior alcance da área de inundação em momentos de maior amplitude de elevação da maré. Em contraposição, as florestas de mangue na margem leste do rio Mocajuba têm mais áreas suscetíveis no período de quadratura em ambos os cenários, o que pode refletir uma resposta aos padrões de propagação da maré nos rios Mocajuba e Mojuim.

Portanto, observa-se que as florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas podem ser classificadas como possuindo **suscetibilidade** predominantemente baixa, e que a classe alta não ocorre em nenhum cenário. A **suscetibilidade** média é restrita a pequenas porções das florestas de franja localizadas na entrada do estuário (ilhas Taipu, do Marinheiro e do Papagaio). Destaca-se ainda, conforme citado anteriormente, que uma área significativa da floresta apresenta **suscetibilidade** zero, sobretudo nas margens leste do rio Mocajuba e nas porções internas das ilhas de São Miguel e ilha da Macaca.

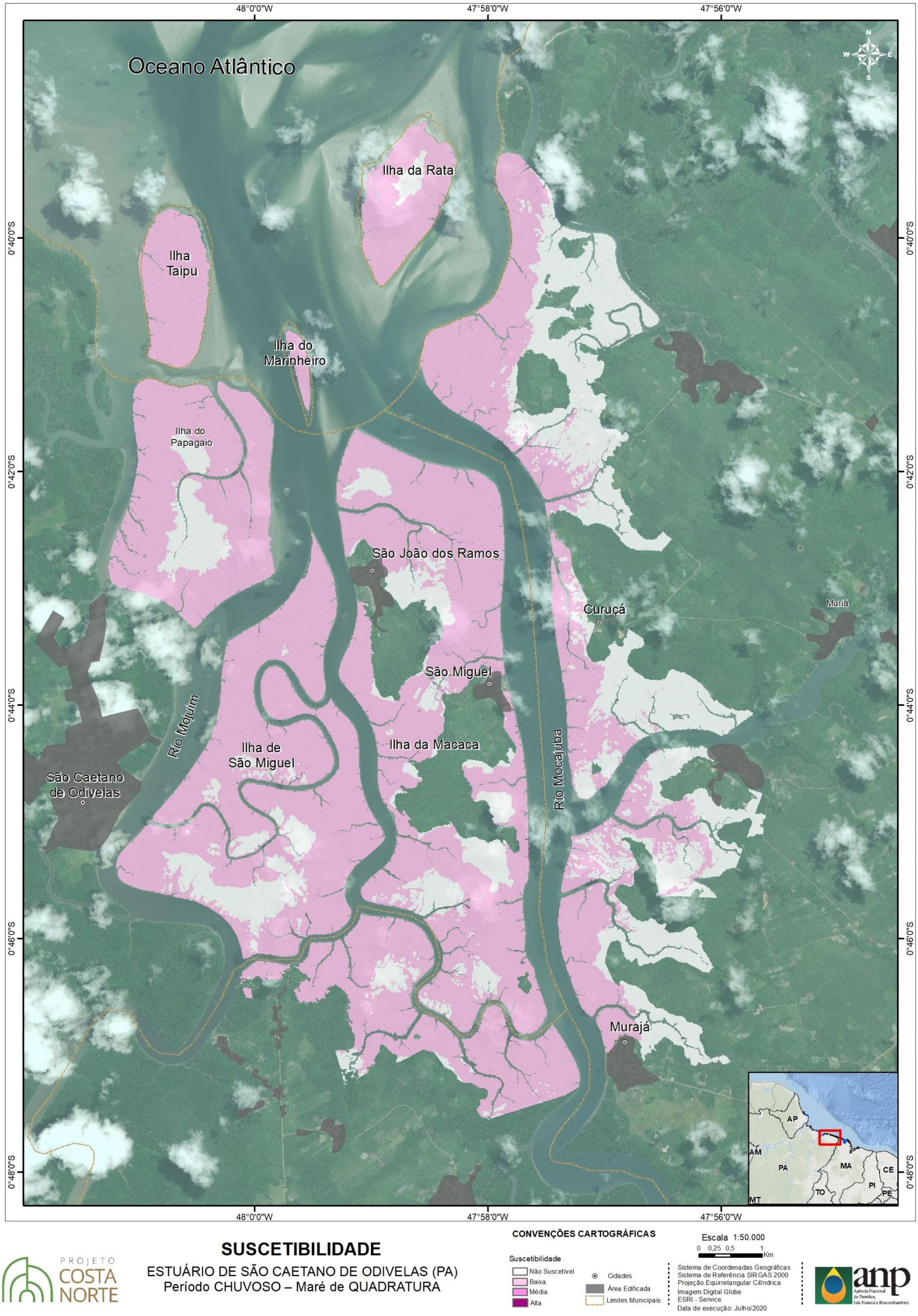
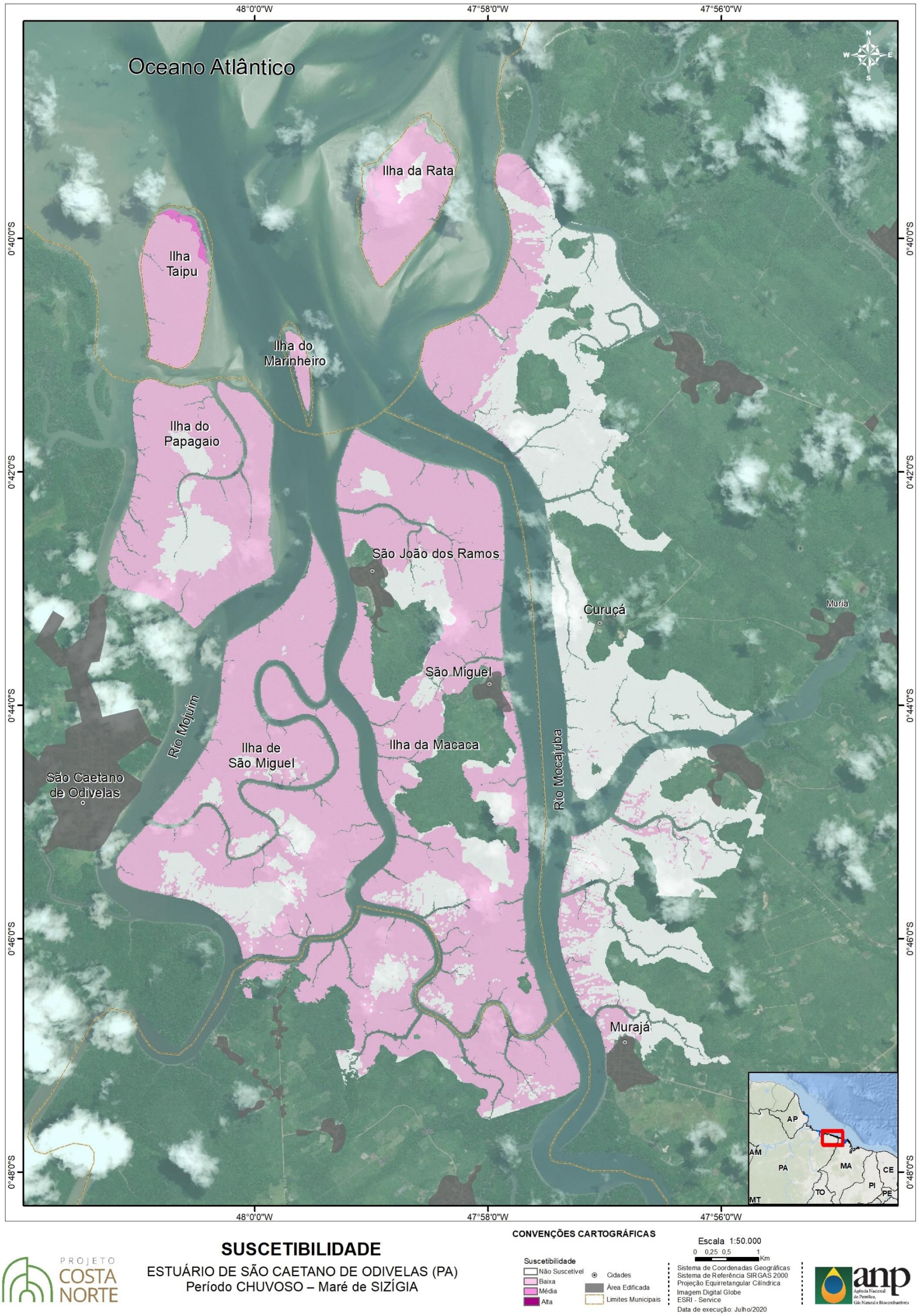


Figura 4-37: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura.



SUSCETIBILIDADE

ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)
Período CHUVOSO – Maré de SIZÍGIA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

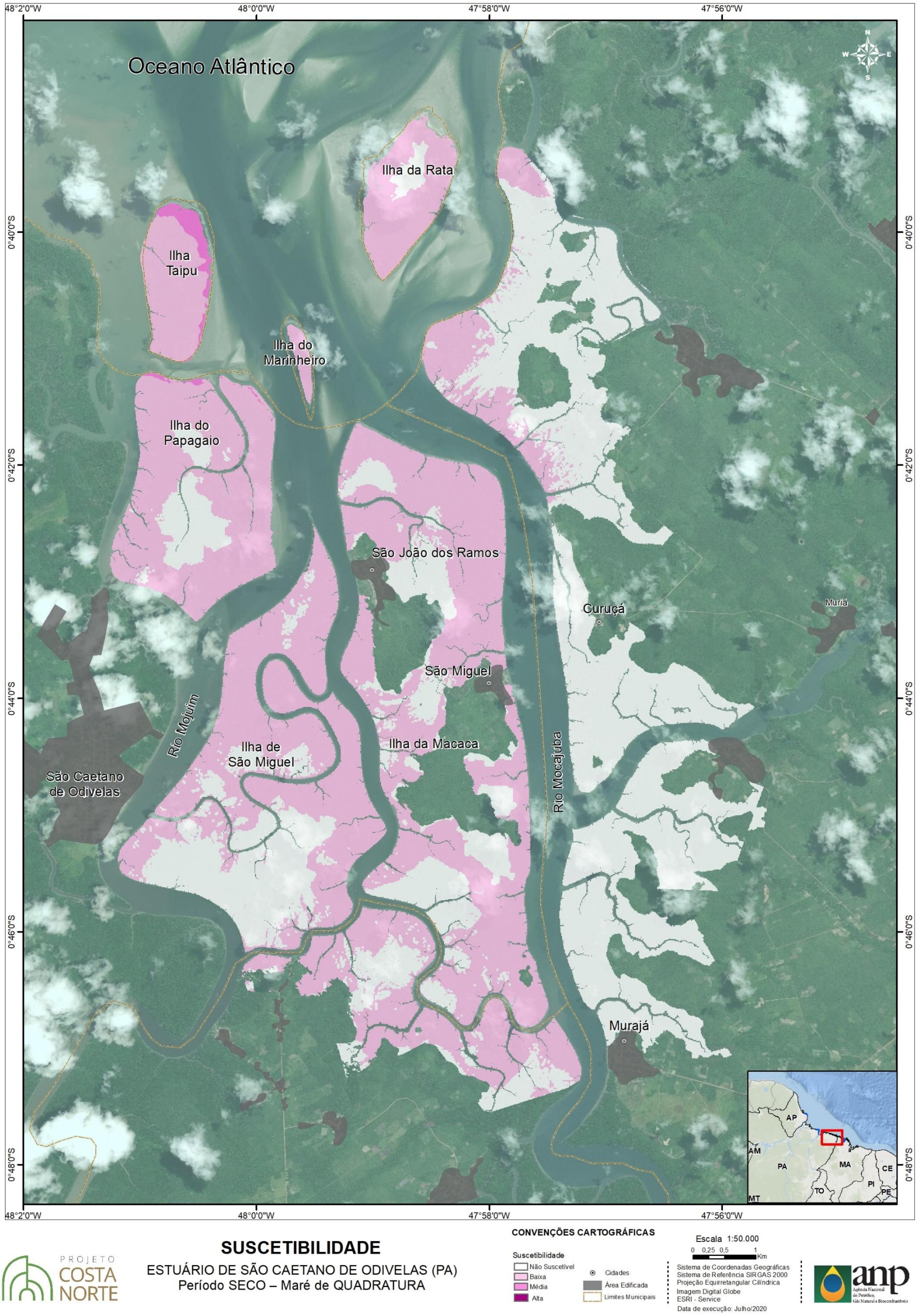
Suscetibilidade
- Não Suscetível
- Baixa
- Média
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-38: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia.



SUSCETIBILIDADE
ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)
Período SECO – Maré de QUADRATURA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Suscetibilidade
- Não Suscetível
- Baixa
- Média
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-39: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura.

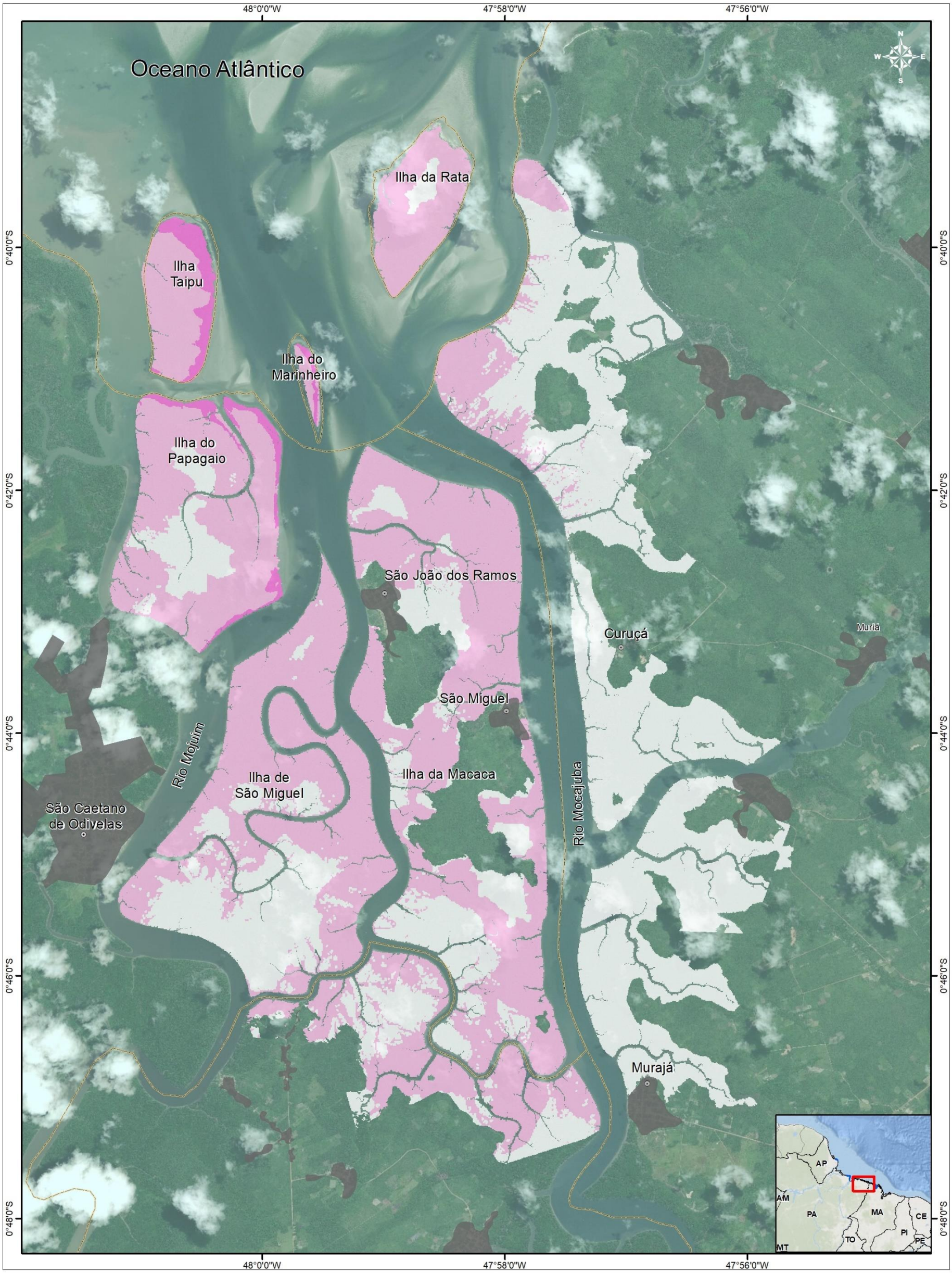


Figura 4-40: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia.

4.2.2. Sensibilidade

Como descrito no Capítulo 3, a circulação de água é um fator determinante ao desenvolvimento do ecossistema manguezal. Parcelas de florestas de mangue expostas à maior circulação de água (maior energia hidrodinâmica) possuem condições mais favoráveis para seu desenvolvimento, da mesma forma, quanto menor for a circulação de água (menor energia hidrodinâmica), maior será o seu nível de *stress* prévio e portanto, maior sua **sensibilidade** a um tensor adicional – no caso, o óleo. Dessa forma, de acordo com o pressuposto conceitual e metodológico adotado no PCN, a **sensibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo é inversamente proporcional ao nível da energia hidrodinâmica do sistema, mensurada pelo somatório anual da Energia Cinética (Ec).

Nota-se a ocorrência das três classes de **sensibilidade** no estuário de São Caetano de Odivelas (Figura 4-41 e Figura 4-42). Do total de 65,26 km^2 de florestas de mangue nesta área de estudo, observa-se o predomínio das classes muito alta (62,1%) e alta (34,7), e algumas poucas regiões com **sensibilidade** extremamente alta (3,2%) – estas relacionadas a regiões com topografia mais elevada no interior das ilhas do estuário e, consequentemente, com menor circulação ao longo do ano. Nota-se que as florestas de mangue às margens do rio Mocajuba apresentam uma faixa mais larga com classe de **sensibilidade** alta, o que está relacionado à topografia mais baixa e, portanto, com maior circulação de água ao longo do ano. As ilhas de São Miguel, de Taipu, do Papagaio e da Rata, apresentam **sensibilidade** predominantemente 'Muito Alta', com a classe 'Alta' em suas margens. Destas ilhas citadas, a ilha do Papagaio apresenta a maior faixa de margem com a classe 'Alta'. A ilha do Marinheiro é predominantemente 'alta', indicando uma boa circulação de água.

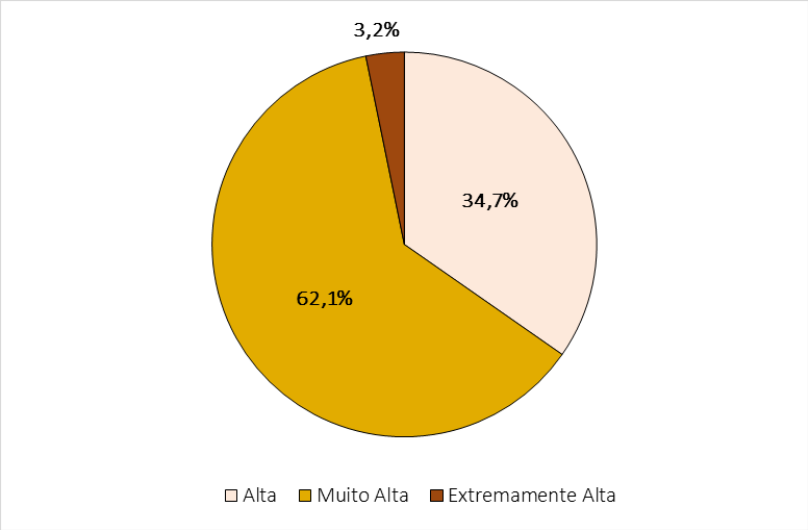
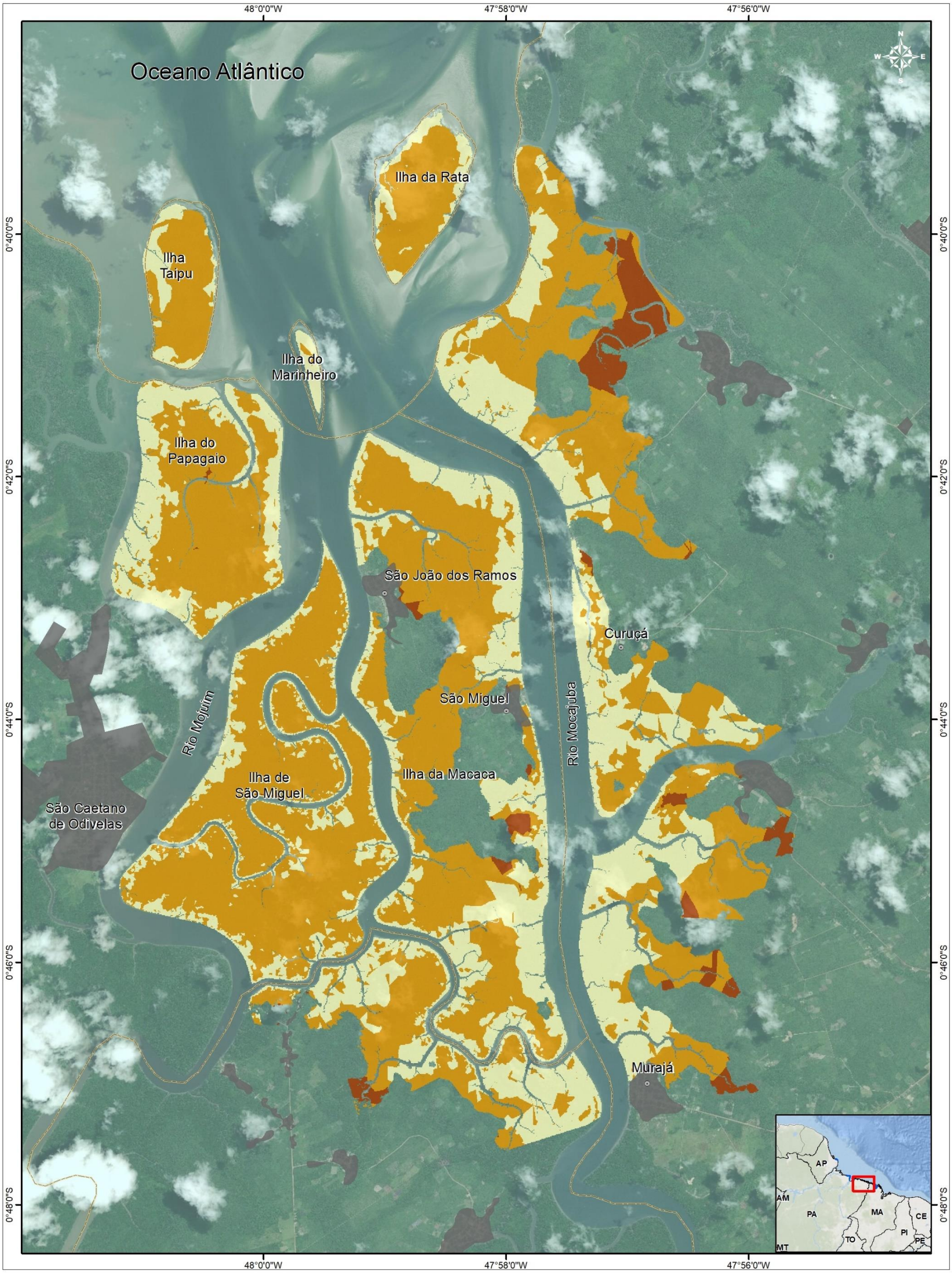


Figura 4-41: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

Como pode ser visto no mapa de **sensibilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (Figura 4-42) o padrão de distribuição espacial desta componente é muito relacionado à topografia da região (Figura 4-43) que, ao interagir com a propagação da maré no estuário, determina a frequência de inundação e a energia cinética associada a cada parcela de mangue. Dessa forma, nota-se o padrão geral de aumento da **sensibilidade** das margens para o interior das zonas entre-marés – acompanhando o gradiente topográfico geral e o gradiente de frequência de inundação pelas marés (ver Volume 2, Capítulo 7.4.2.4).

Portanto, em linhas gerais observa-se que a maior parte das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas apresenta **sensibilidade** "muito alta" à contaminação por óleo. Essa característica se

relaciona ao predomínio de áreas elevadas com frequência intermediária de inundação pelas marés. Poucas são as áreas classificadas como “extremamente sensíveis” ao óleo, as quais são restritas às florestas de mangue esporadicamente inundadas pelas marés, na transição com a terra firme e, portanto, se desenvolvendo em ambiente mais estagnado e com menor energia hidrodinâmica. Por fim, é importante destacar que as florestas com maior energia hidrodinâmica, localizadas às margens dos rios e canais de maré, apesar das condições mais favoráveis ao seu desenvolvimento, são classificadas como possuindo “alta sensibilidade”. Isso se deve ao fato de partirmos, na abordagem conceitual/metodológica adotada, conforme apresentado no Capítulo 3, do pressuposto de que todas as florestas de mangue possuem, dentre todos os sistemas costeiros, o maior nível de sensibilidade ao óleo.



PROJETO COSTA NORTE

SENSIBILIDADE

ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Sensibilidade
- Extremamente Alta
- Muito Alta
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-42: Resultados da **sensibilidade** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas à contaminação por óleo.

PROJETO COSTA NORTE

MODELO DIGITAL DE TERRENO - MDT

ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Altitude(m)
- 0 - 1
- 1,0 - 1,2
- 1,2 - 1,4
- 1,4 - 1,8
- 1,8 - 2
- 2,0- 2,2
- 2,2 - 2,4
- 2,4 - 5
- >5,0

Cidades
Área Edificada
Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

anp Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

Figura 4-43: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

4.2.3. Resiliência

Conforme descrito no Capítulo 3, a **resiliência** indica a capacidade de determinada parcela da floresta de mangue de se recuperar dos efeitos de um dado tensor. No caso da contaminação por óleo essa capacidade está diretamente relacionada à capacidade de remoção do óleo tanto por ação física – remoção pelas correntes e lavagem pelas marés – quanto pela ação microbiológica – processo de decomposição e transformação do óleo.

Dessa forma, segundo a metodologia proposta, o grau de **resiliência** é função dos parâmetros Trabalho (Joules, Figura 4-46) e Taxa de Afastamento (metros/hora, Figura 4-47) (ver Capítulo 3 para entendimento geral e Capítulo 7 e 8 do Volume 2 para detalhes metodológicos). Enquanto o Trabalho é função da velocidade do escoamento e da variação de altura da coluna d'água, a Taxa de Afastamento indica a velocidade média de afastamento do óleo removido. Desta forma, enquanto o Trabalho é determinado unicamente por aspectos da hidrodinâmica de determinada parcela de mangue, a taxa de afastamento é dependente também da hidrodinâmica das parcelas de manguezal vizinhas.

No estuário de São Caetano de Odivelas ocorrem as 5 classes definidas para a **resiliência** (Figura 4-44 e Figura 4-45), com predomínio das classes média (59,8%) e baixa (26,6%). As classes muito baixa e alta apresentam 6,6% e 6,5% respectivamente, e a classe muito alta apresenta cobertura bem pontual, de apenas 0,6%. Como padrão geral, nota-se um gradiente de níveis de **resiliência** mais elevados nas florestas de franja às margens de rios e canais para níveis mais baixos nas áreas internas. Esse padrão relaciona-se, em linhas gerais, ao gradiente de energia hidrodinâmica dentro das florestas de mangue.

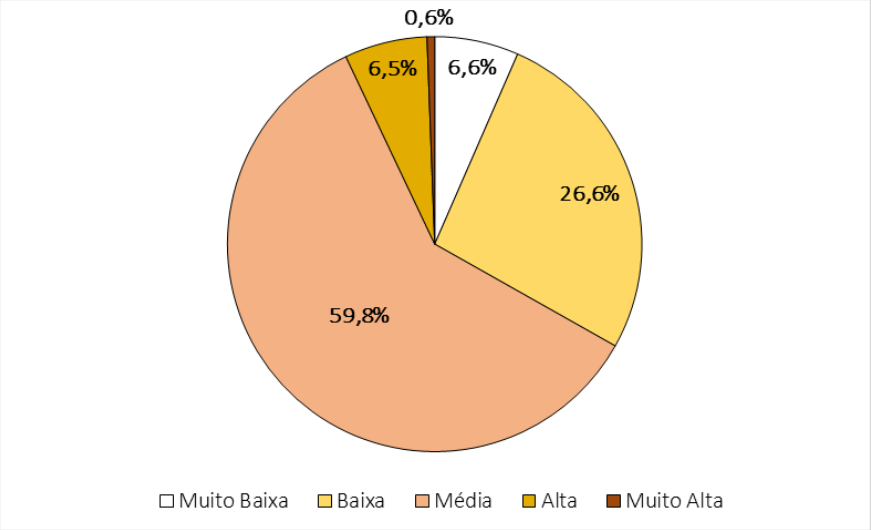


Figura 4-44: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

Nota-se uma faixa de **resiliência** muito alta na margem leste do rio Mocajuba que, conforme descrito anteriormente, é reflexo de um terreno topograficamente mais baixo e por conseguinte sujeito à maior energia hidrodinâmica associada à propagação da maré. De forma similar, ao sul da ilha do Marinheiro, na porção noroeste da ilha da Macaca, nas franjas do canal interno da ilha de São Miguel e em pequenos trechos da ilha do Papagaio, são observadas florestas de mangue com **resiliência** muito alta. As ilhas de Taipu, ilha da Rata, ilha do Marinheiro e ilha de São Miguel não apresentam a classe de **resiliência** muito baixa, estando essa classe restrita a porções internas das florestas de mangue, na transição para a terra firme, em regiões classificadas como possuindo alta e extremamente alta **sensibilidade** – ou seja, com baixa energia hidrodinâmica (baixos níveis de circulação e frequência de inundação pelas marés).

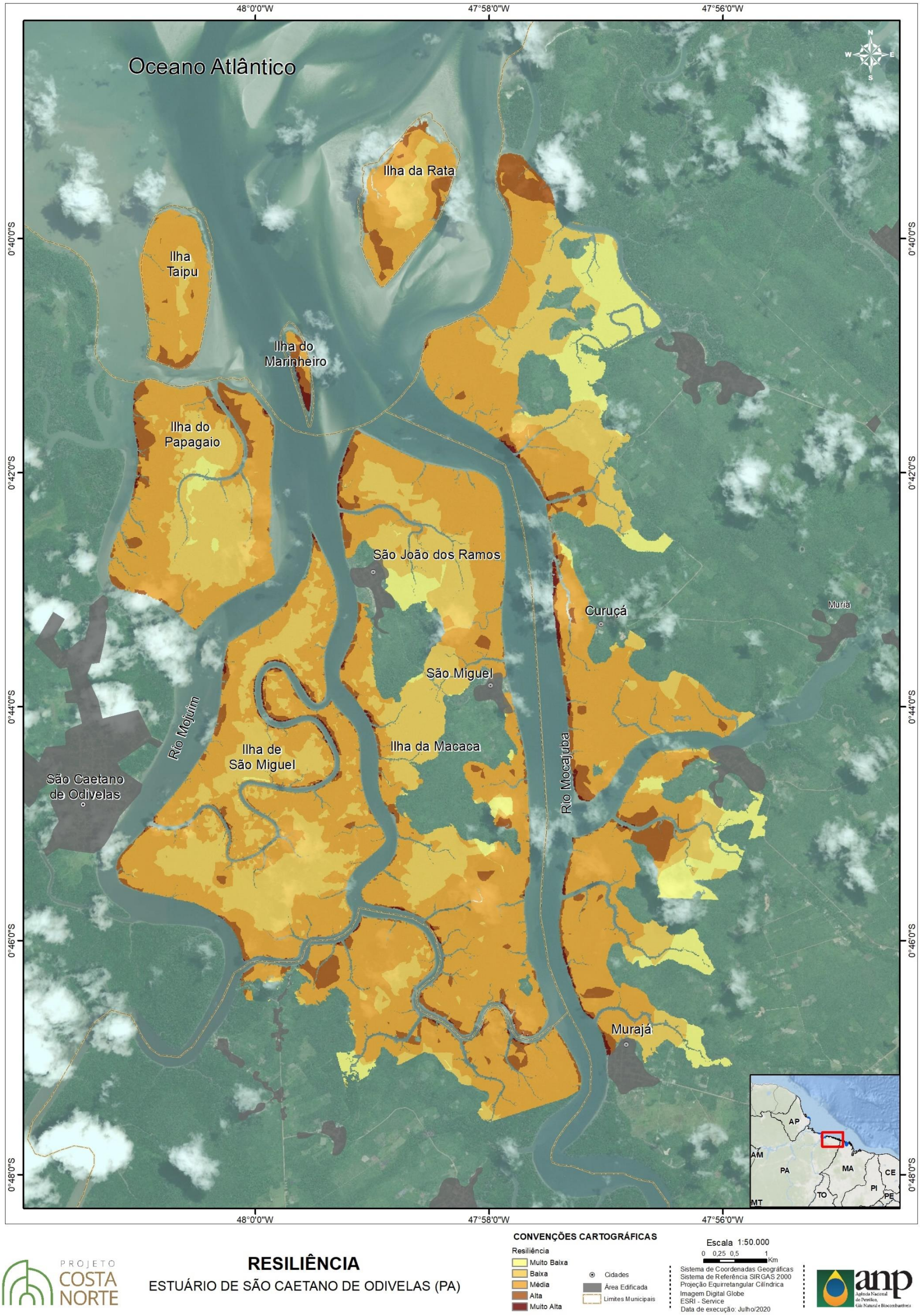


Figura 4-45: Resultados da **resiliência** das florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo.

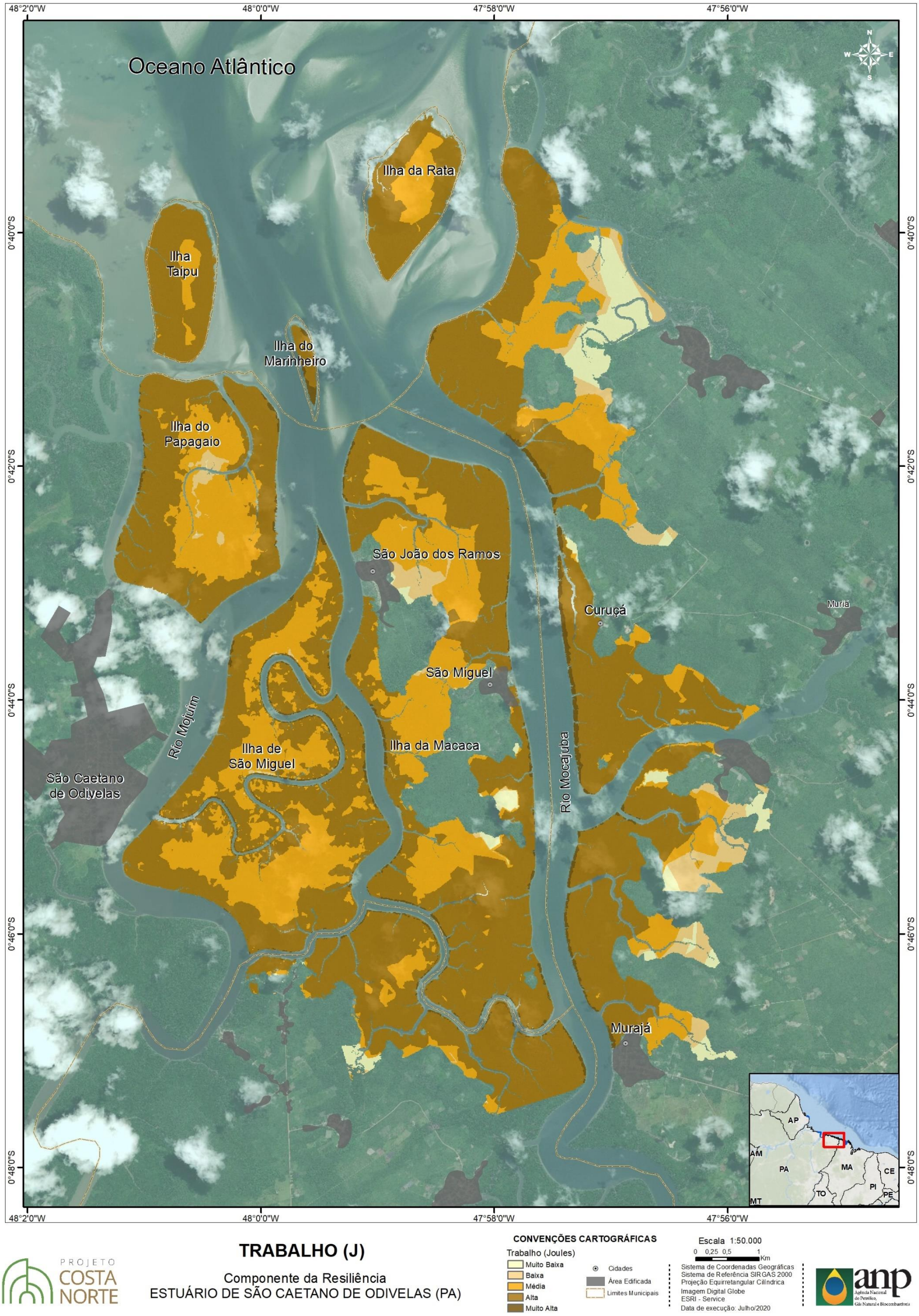
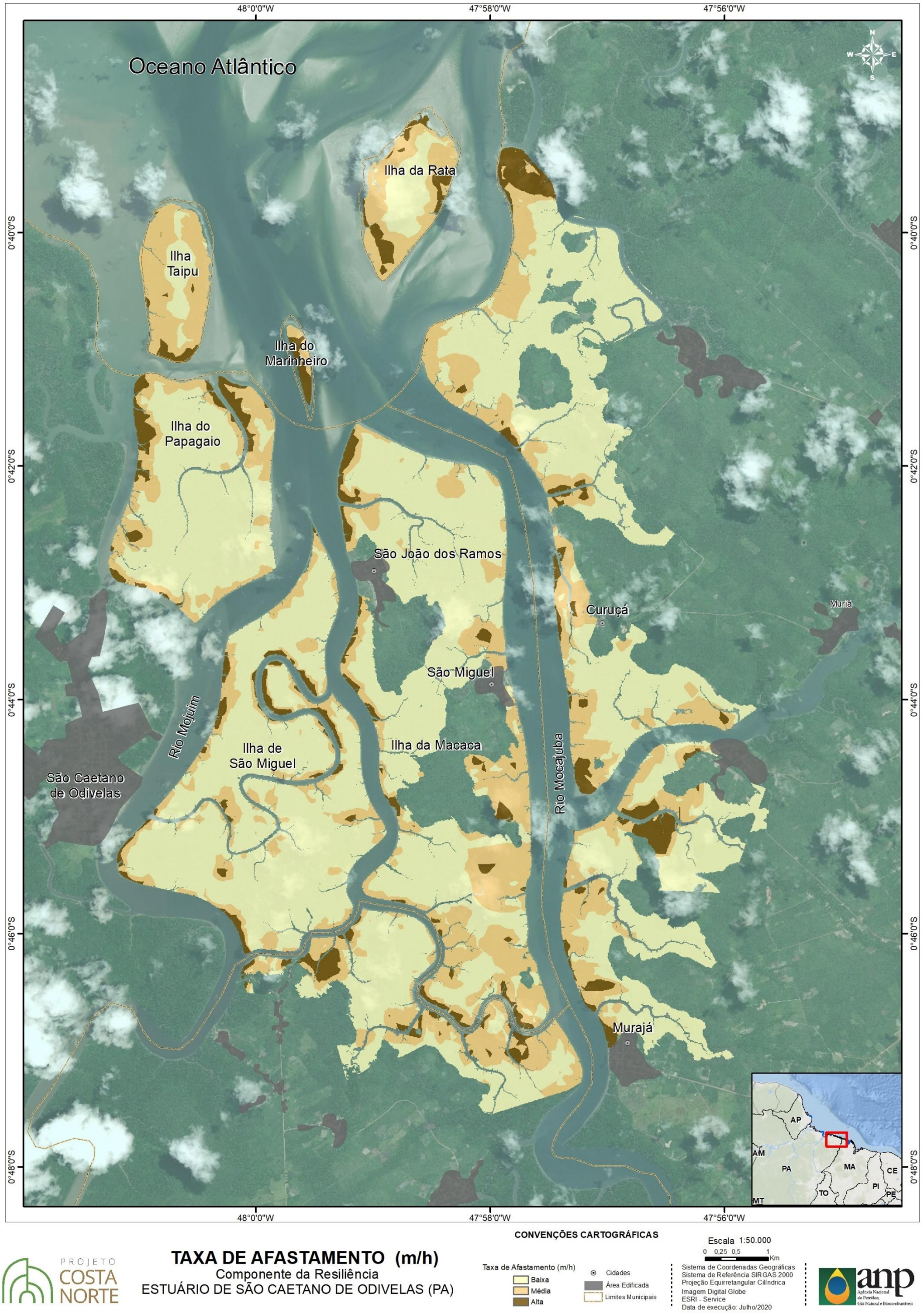


Figura 4-46: Trabalho (J), *proxy* da **resiliência**, do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).



TAXA DE AFASTAMENTO (m/h)
Componente da Resiliência
ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Taxa de Afastamento (m/h)
- Baixa
- Média
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-47: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, do estuário de São Caetano de Odivelas (PA).

4.2.4. Vulnerabilidade

Segundo a metodologia proposta no presente estudo, a **vulnerabilidade** é determinada pela integração de três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** em cada parcela da floresta de mangue, de acordo com a equação apresentada no Capítulo 3 - média ponderada das três componentes, onde a **suscetibilidade** tem peso 5, a **resiliência** tem peso 3 e a **sensibilidade**, peso 2 -, resultando em uma matriz de **vulnerabilidade**. É importante ressaltar que as regiões não suscetíveis ao óleo são classificadas como não vulneráveis, independente do seu grau de **resiliência** e **sensibilidade.**

A **vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas é predominantemente baixa ou não vulnerável, ocorrendo a classe de **vulnerabilidade** média em poucas regiões em todos os cenários analisados (Figura 4-48). Esse padrão é regido sobretudo pela predominância de florestas de mangue com baixa **suscetibilidade** - característica que determina níveis baixos e médios de **vulnerabilidade**, ou não suscetíveis, que determina regiões não vulneráveis.

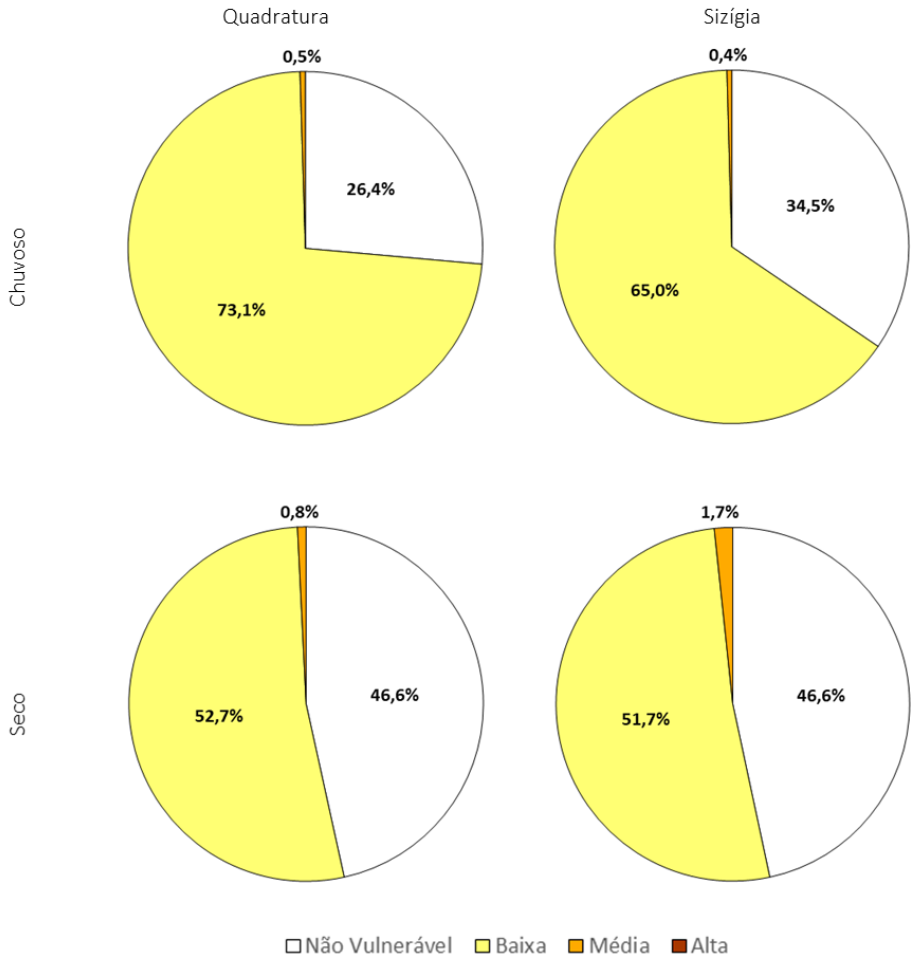


Figura 4-48:Distribuição geral das classes de **vulnerabilidade** nas florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

No período chuvoso, ocorrem mais áreas com **vulnerabilidade** baixa (73,1 e 65% em maré de quadratura e sizígia, respectivamente) e menos áreas não vulneráveis (26,4 e 34,5% em maré de quadratura e sizígia, respectivamente) do que no período seco – efeito da maior descarga fluvial no período chuvoso e

consequente aumento do nível médio da água. Porém é no período seco que se observam maiores áreas com **vulnerabilidade** média (0,8 e 1,7% em maré de quadratura e sizígia, respectivamente).

Pode-se analisar a **vulnerabilidade** de cada região com base no resultado de suas componentes. Por exemplo, a **vulnerabilidade** média de determinada parcela de manguezal pode ser resultado de uma baixa **suscetibilidade** (1) associada a uma **sensibilidade** extremamente alta (5) e uma baixa **resiliência** (2), ou então, pode ter alta **suscetibilidade** (5) porém uma **resiliência** muito alta (5) e uma **sensibilidade** alta (1).

Nas Tabela 4-7 a Tabela 4-10 são apresentadas as combinações entre as componentes que ocorrem no estuário de São Caetano de Odivelas e o percentual da área de mangue associada a cada combinação. Nota-se que de uma maneira geral, as ocorrências de **vulnerabilidade** baixa estão associadas predominantemente a baixa **suscetibilidade** com **sensibilidade** alta ou muito alta e **resiliência** baixa, média ou alta. Em pouquíssimos casos ocorre a **vulnerabilidade** baixa associada à **suscetibilidade** média (3), com **sensibilidade** alta e **resiliência** alta ou muito alta.

As poucas regiões de florestas de mangue que apresentam **vulnerabilidade** média no estuário de São Caetano de Odivelas estão associadas a duas configurações distintas: (i) Na primeira, em locais com média a alta **resiliência** e níveis de **sensibilidade** alto e muito alto, que nos cenários chuvoso/sizígia e seco/quadratura e sizígia apresentam **suscetibilidade** média; (ii) florestas com baixa **suscetibilidade** porém com **sensibilidade** extremamente alta e **resiliência** baixa ou muito baixa – essa configuração ocorre em todos os cenários analisados.

A partir dos **mapas de vulnerabilidade das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) à contaminação por óleo em evento acidental** (Figura 4-49 a Figura 4-52) podemos identificar espacialmente os locais de ocorrência de **vulnerabilidade** média nas duas configurações identificadas. A primeira configuração ocorre nas margens nordeste e leste das ilhas de Taipu, do Papagaio e do Marinheiro, onde as regiões de florestas de mangue, localizadas às margens do rio e dos canais, possuem um elevado grau de energia hidrodinâmica associada ao baixo nível topográfico e alta frequência de inundação pelas marés. Com essa configuração de moderada a alta capacidade de se recuperar perante à contaminação por óleo, assim como de bons níveis de circulação de água determinando boas condições de desenvolvimento, somente regiões com **suscetibilidade** média podem determinar níveis de **vulnerabilidade** média. Essa configuração ocorre na margem noroeste da ilha de Taipu, no período chuvoso com maré de sizígia e, no período seco em ambos cenários de maré. Nas ilhas do Papagaio e do Marinheiro essa configuração ocorre apenas no período seco com maré de sizígia.

A segunda configuração ocorre onde a **suscetibilidade** é baixa independente do cenário analisado e a **vulnerabilidade** média é determinada pelos níveis de **sensibilidade** muito alta ou extremamente alta, associado a **resiliência** muito baixa - como consequência da elevada topografia, baixo percentual de inundação pelas marés e baixa circulação. Considerando que essa associação entre a **sensibilidade** e **resiliência** ocorre predominantemente em regiões não suscetíveis, a única região que apresenta essa configuração em todos os cenários é o interior da ilha do Papagaio. No período chuvoso – quando aumenta o nível médio devido à maior descarga fluvial e, consequentemente, diminuem as áreas não suscetíveis no interior das florestas – essa configuração é observada em pequenos trechos da margem leste do rio Mocajuba e no interior da ilha da Macaca.

As florestas de mangue do estuário de São Caetano de Odivelas não vulneráveis – regiões com **suscetibilidade** zero - se concentram na margem leste do rio Mocajuba, e nos interiores das ilhas da Rata, do Papagaio, da Macaca e de São Miguel. Os padrões de ocorrência das regiões não suscetíveis encontram-se descritos no item 4.2.1.

Em resumo, o estuário de São Caetano de Odivelas apresenta predomínio de florestas de mangue com **vulnerabilidade** baixa ou não-vulneráveis, e não apresenta a classe de **vulnerabilidade** alta. A classe de **vulnerabilidade** média pode ocorrer em pequenas parcelas de florestas de mangue: regiões com **suscetibilidade** média nas franjas de algumas ilhas na entrada do estuário - situação que não ocorre apenas no período chuvoso com maré de quadratura - e regiões muito sensíveis e pouco resilientes no interior das ilhas – situação que ocorre em todos os cenários ambientais analisados.

Tabela 4-7: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			**Suscetibilidade** 3 (média)			**Suscetibilidade** 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)									0,59%
	4 (alta)						<0,005%		10,10%	19,11%
	3 (média)							<0,005%	16,11%	10,54%
	2 (baixa)							0,07%	15,71%	<0,005%
	1 (mto. baixa)							0,10%		

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-8: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidad**e. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			**Suscetibilidade** 3 (média)			**Suscetibilidade** 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)									0,43%
	4 (alta)					0,09%	0,05%		9,30%	15,83%
	3 (média)					0,02%	0,01%	<0,005%	15,00%	8,35%
	2 (baixa)							0,01%	15,19%	<0,005%
	1 (mto. baixa)							0,07%		

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-9: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (muito alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (muito alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)									0,35%
	4 (alta)					0,32%	0,21%		8,28%	13,34%
	3 (média)					0,04%	0,01%	<0,005%	12,55%	6,99%
	2 (baixa)							0,01%	11,40%	<0,005%
	1 (mto. baixa)							0,05%		

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-10: Matriz de **vulnerabilidade** para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de **vulnerabilidade** e as cores representam as classes de **vulnerabilidade**. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)						0,03%			0,32%
	4 (alta)					0,64%	0,82%		7,86%	12,11%
	3 (média)					0,11%	0,13%	<0,005%	12,10%	6,34%
	2 (baixa)					<0,005%		0,00%	11,94%	<0,005%
	1 (mto. baixa)							0,05%		

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

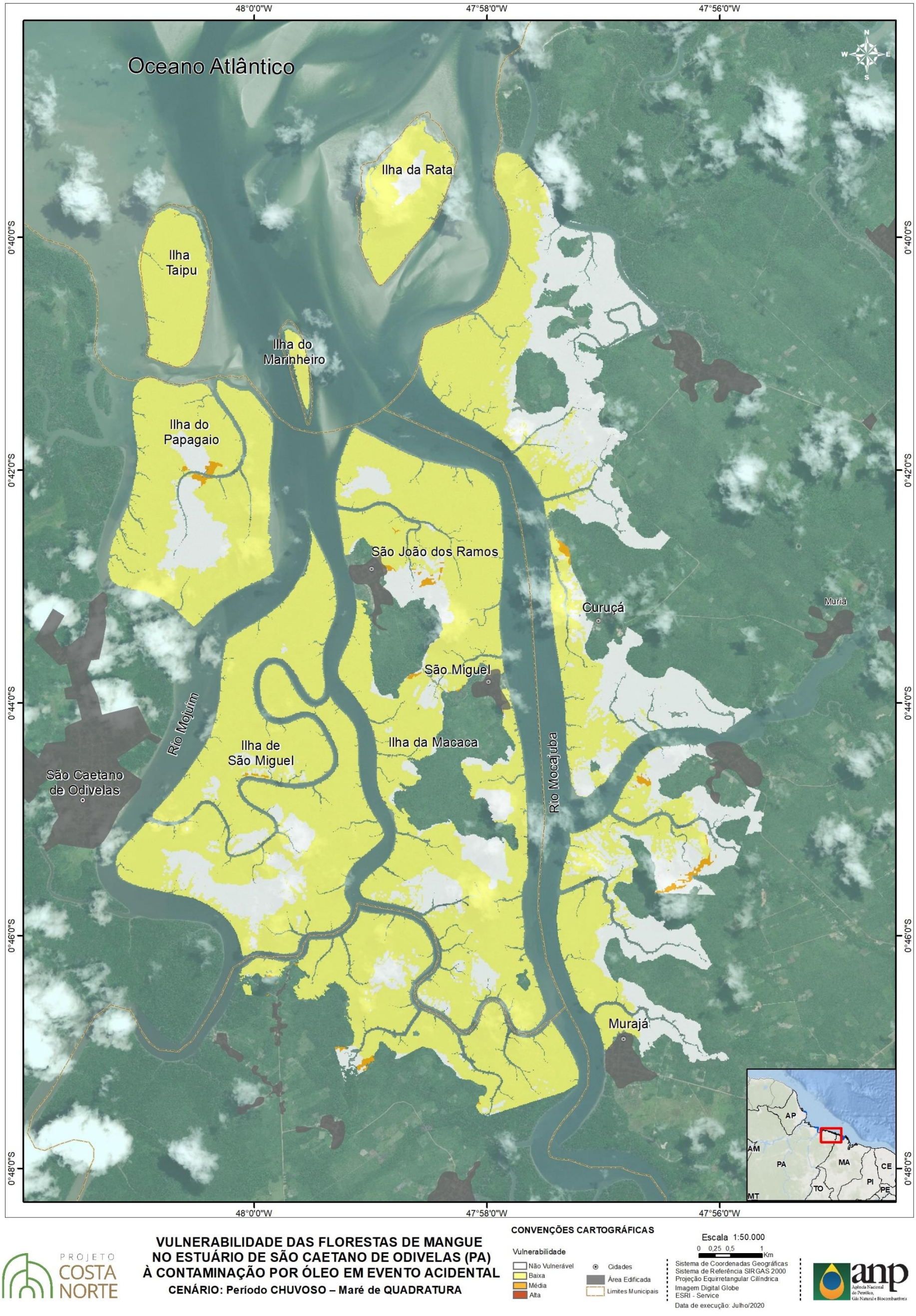


Figura 4-49: Vulnerabilidade das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura.

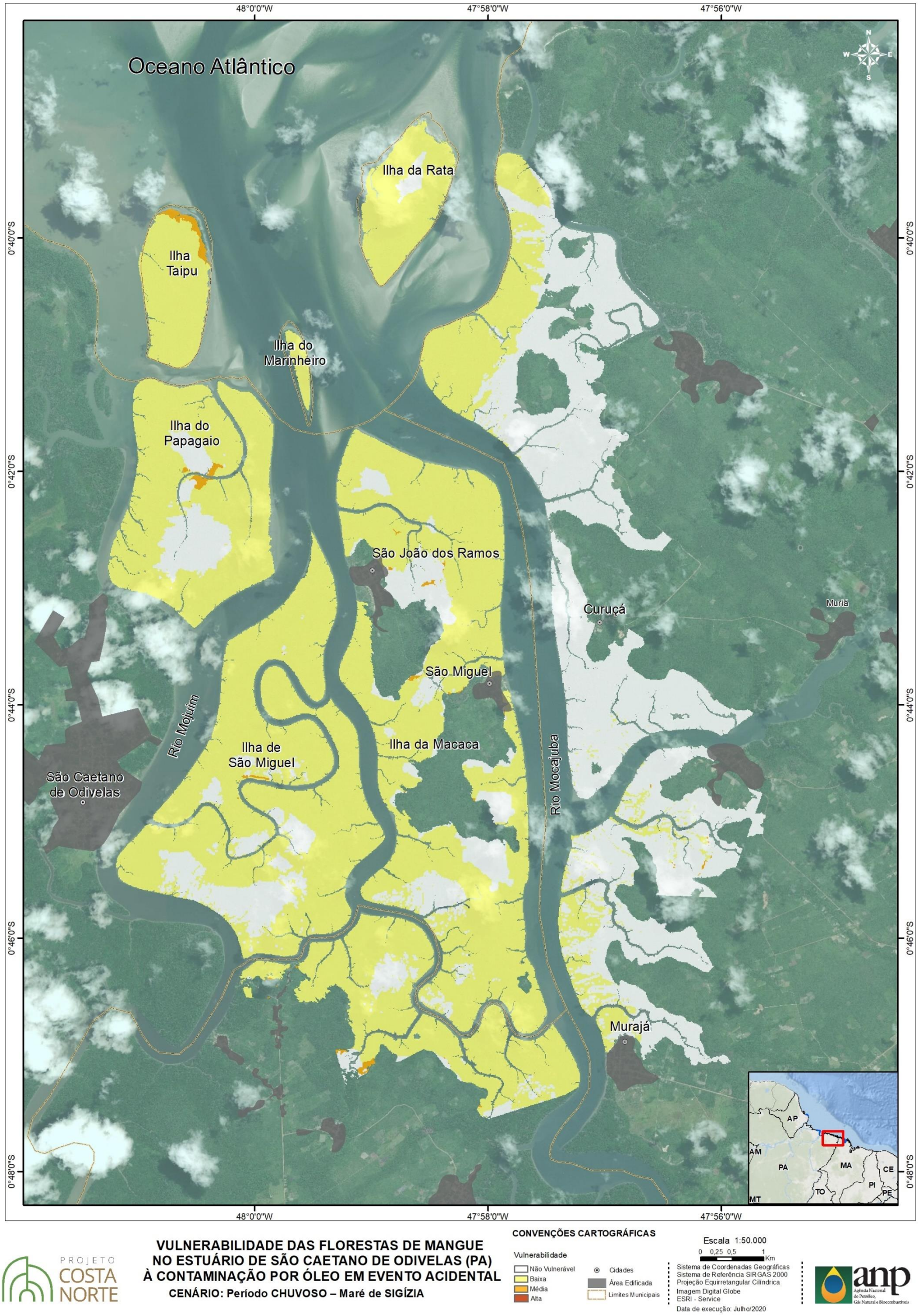
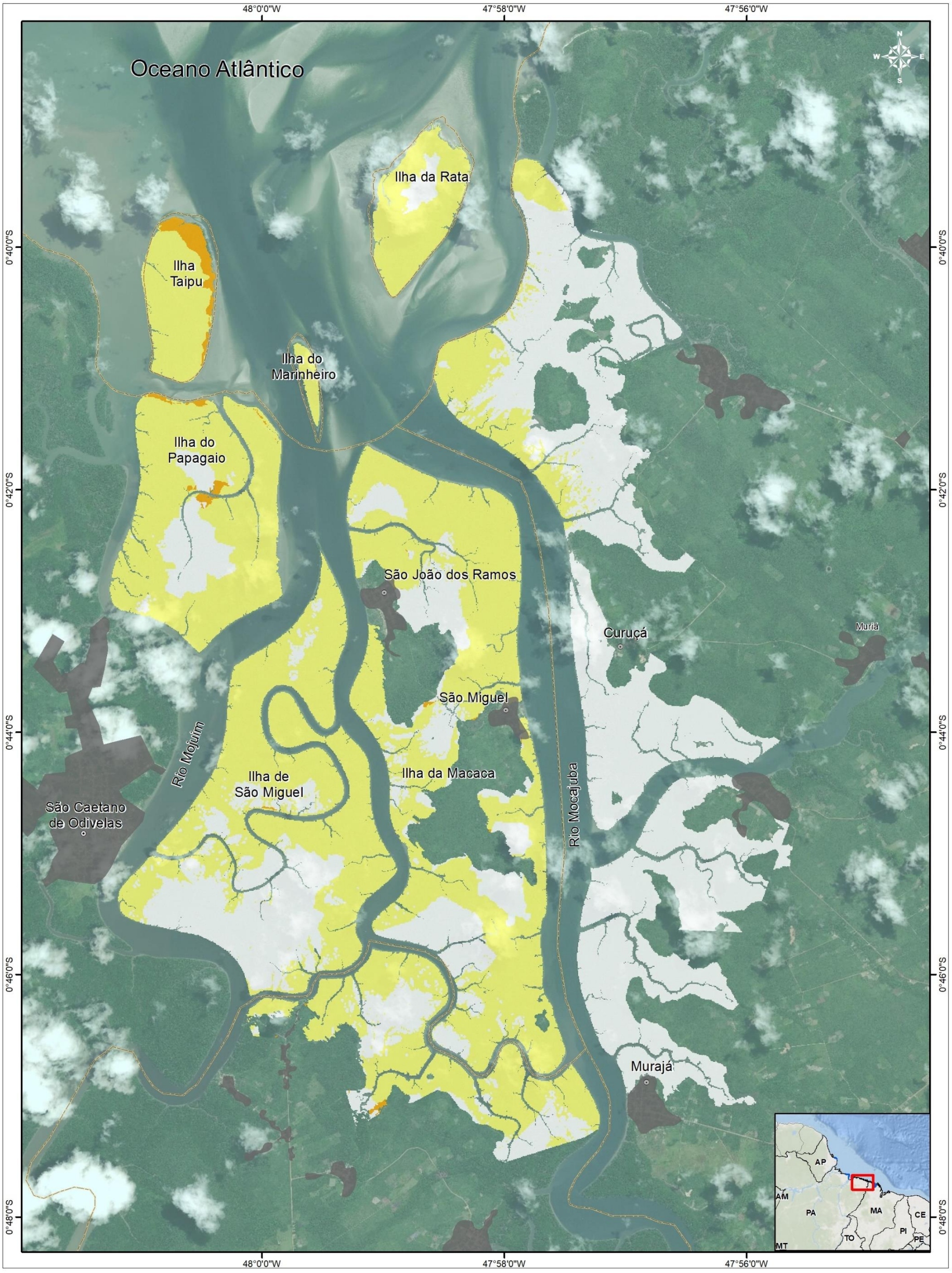


Figura 4-50: Vulnerabilidade das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período chuvoso e maré de sizígia.

.



VULNERABILIDADE DAS FLORESTAS DE MANGUE NO ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA) À CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO EM EVENTO ACIDENTAL

CENÁRIO: Período SECA – Maré de QUADRATURA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

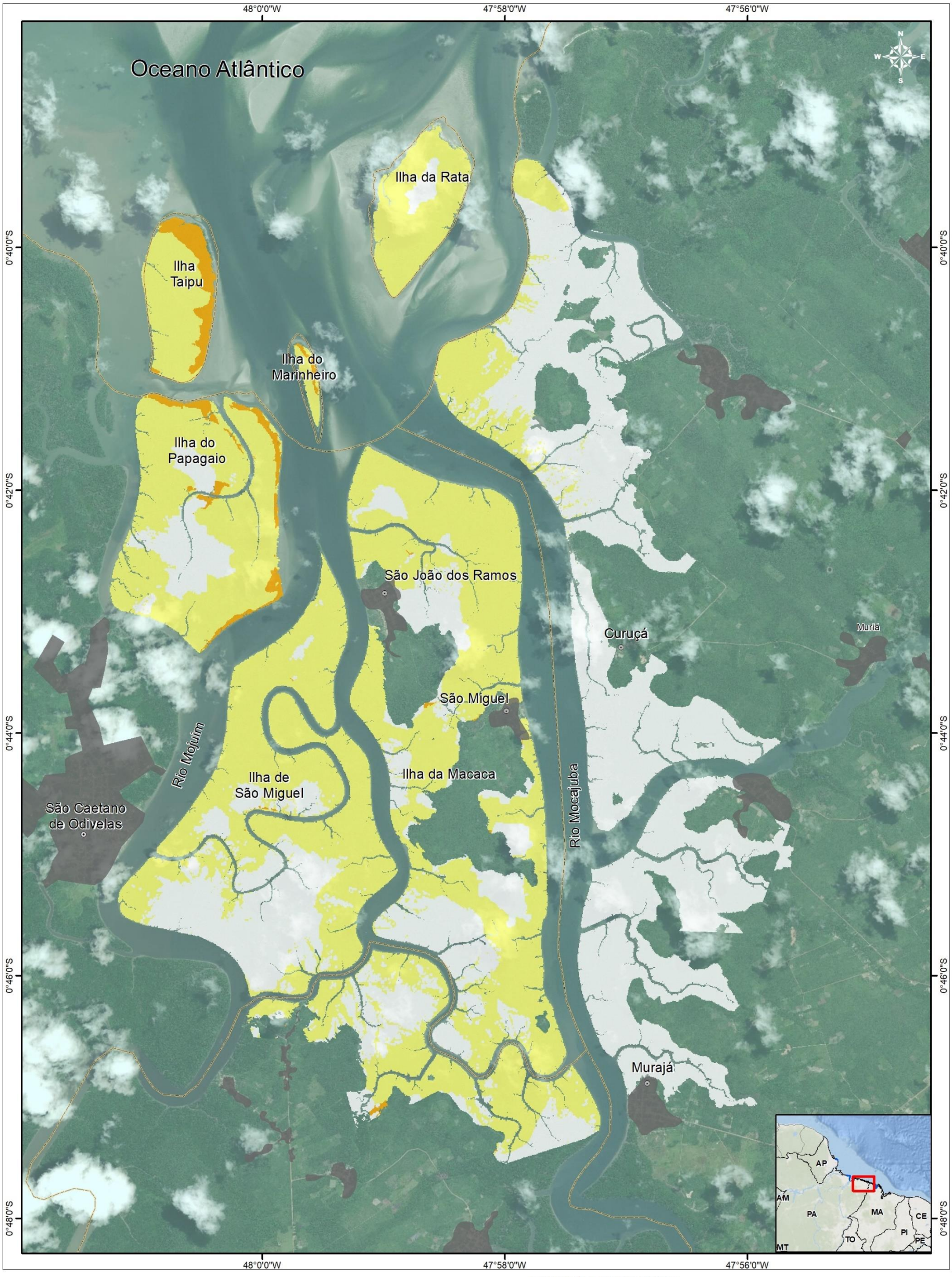
Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-51: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período seco e maré de quadratura.



VULNERABILIDADE DAS FLORESTAS DE MANGUE NO ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA) À CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO EM EVENTO ACIDENTAL

CENÁRIO: Período SECA – Maré de SIGÍZIA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta

- Cidades
- Área Edificada
- Limites Municipais

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-52: **Vulnerabilidade** das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas ao óleo. Período seco e maré de sizígia.

As fitofisionomias representam o detalhamento das florestas de mangue, e revelam a variabilidade que pode ser observada na vegetação desse ecossistema. A identificação das fitofisionomias abordadas no presente Capítulo considerou a combinação entre a composição de espécies e a altura do dossel, conforme descrito no Volume 2, Capítulo 10. Para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA), a composição pode ser de *Avicennia germinans* (Av); *Rhizophora* spp. (Rh); Mista (combinação entre as duas espécies citadas anteriormente). As classes de altura de dossel atribuídas a esse sistema são: até 10 m; de 10 a 17 m; de 17 a 23 m; e maior 23 m.

A partir da espacialização das fitofisionomias encontradas no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) (ver Volume 2, Capítulo 11), pôde-se obter uma análise de integração entre as fitofisionomias e as classes de **vulnerabilidade**. Dessa forma, a Tabela 4-11 e as **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam a distribuição percentual da área das fitofisionomias em cada classe de **vulnerabilidade** existente na área, nos quatro cenários ambientais analisados. A espacialização dos resultados pode ser observada nos mapas de **integração dos resultados de vulnerabilidade ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue**, conforme os cenários estabelecidos para o período chuvoso (Figura 4-57 e Figura 4-58) e seco (Figura 4-59 e Figura 4-60), nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente.

Como visto na análise dos mapas de **vulnerabilidade**, o aumento de regiões com **vulnerabilidade** média no período seco e no período chuvoso com cenário de maré de sizígia é devido à ocorrência de **suscetibilidade** média nas regiões das margens das ilhas de Taipu, do Papagaio e do Marinheiro. Portanto, as áreas de florestas de mangue expostas às zonas de **vulnerabilidade** média no período chuvoso em maré de quadratura são exclusivamente aquelas posicionadas em regiões com a segunda configuração de **vulnerabilidade** média descrita: baixa **suscetibilidade**, baixa **resiliência** e muito alta ou extremamente alta **sensibilidade** (regiões de topografia elevada e de baixa circulação). Vemos que nesse cenário (chuvoso/quadratura), as 3 fitofisionomias apresentam um percentual similar na classe média (em torno de 1% para alturas baixas e intermediárias).

No período seco, o aumento da exposição das áreas de franja das ilhas mencionadas à classe de **suscetibilidade** média mostra um impacto relativo maior nas florestas dominadas por *Avicennia germinans* (que passam de aproximadamente 1% para até 10% no cenário de sizígia para a classe menor que 10 m) do que nas florestas mistas (de aproximadamente 1% para até 5% no cenário de sizígia para a classe de 10-17 m) e nas florestas dominadas por *Rhizophora* spp. (de aproximadamente 1% para até 2% no cenário de sizígia para a classe de 10-17 m). Ainda assim, vê-se nos mapas de integração (Figura 4-57 a Figura 4-60) o predomínio de florestas mistas e de *Rhizophora* spp. nas regiões de **vulnerabilidade** média – o que reflete o predomínio geral destas fitofisionomias no estuário de São Caetano de Odivelas (florestas mistas e *Rhizophora* spp. representam 29,8% e 63,9% das florestas de mangue deste estuário, respectivamente).

Tendo em vista o predomínio geral das classes de baixa **vulnerabilidade** e não vulnerável em todos os cenários considerados para as florestas de São Caetano de Odivelas, não é possível, em linhas gerais, o estabelecimento de uma relação direta entre as diferentes fitofisionomias e o grau de **vulnerabilidade** à contaminação por óleo.

As florestas de *Avicennia germinans* com menor desenvolvimento estrutural (altura do dossel menor que 10 m) apresentam maior percentual exposto à classe de **vulnerabilidade** média. Esse aspecto é explicado pelo gradiente de desenvolvimento estrutural desde as florestas de franja para o interior. Observa-se que a

fitofisionomia mais representativa desse sistema, florestas dominadas por *Rhizophora* spp. com máximo desenvolvimento estrutural (altura do dossel superior a 23 m), que representa 19,5% das florestas de mangue desse estuário, possui menos de 1% de sua área sob condição de média **vulnerabilidade** em qualquer cenário ambiental.

Em todos os cenários analisados, as florestas dominadas por *Avicennia germinans* apresentam um percentual muito maior sob a condição de baixa vulnerabilidade do que sob a condição de não-vulnerável, o que não ocorre com as florestas mistas ou dominadas por *Rhizophora spp.*, que apresentam percentuais similares entre essas duas classes de **vulnerabilidade**.

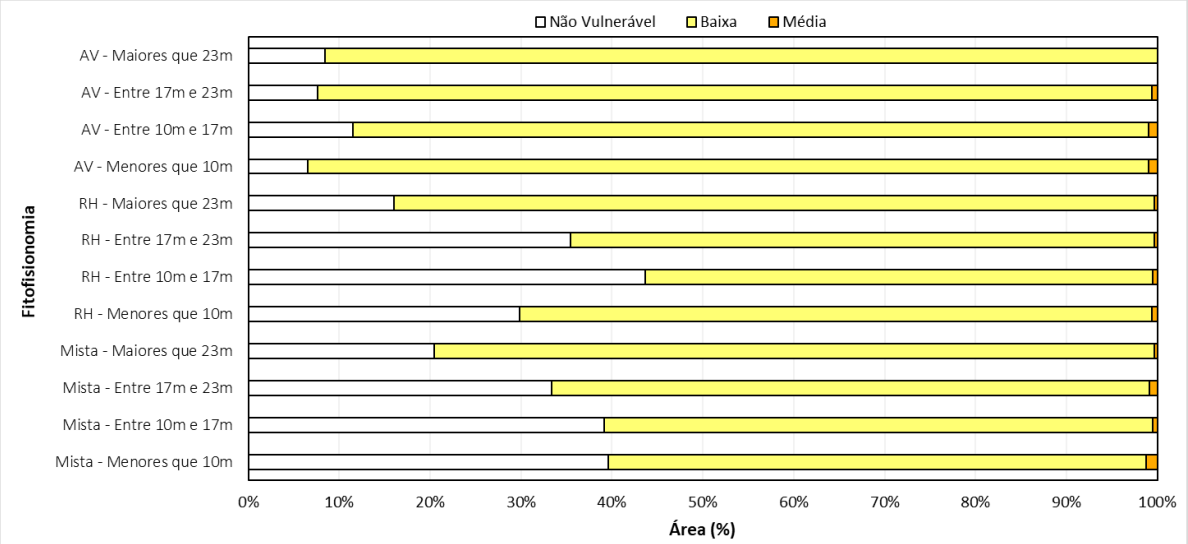


Figura 4-53: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período chuvoso e maré de quadratura

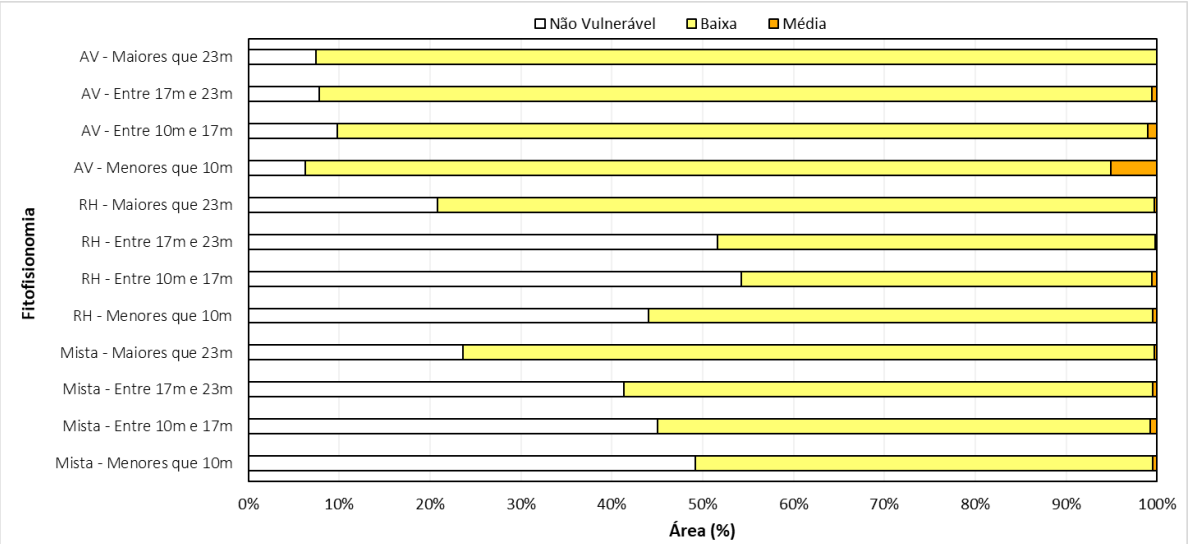


Figura 4-54: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período chuvoso e maré de sizígia.

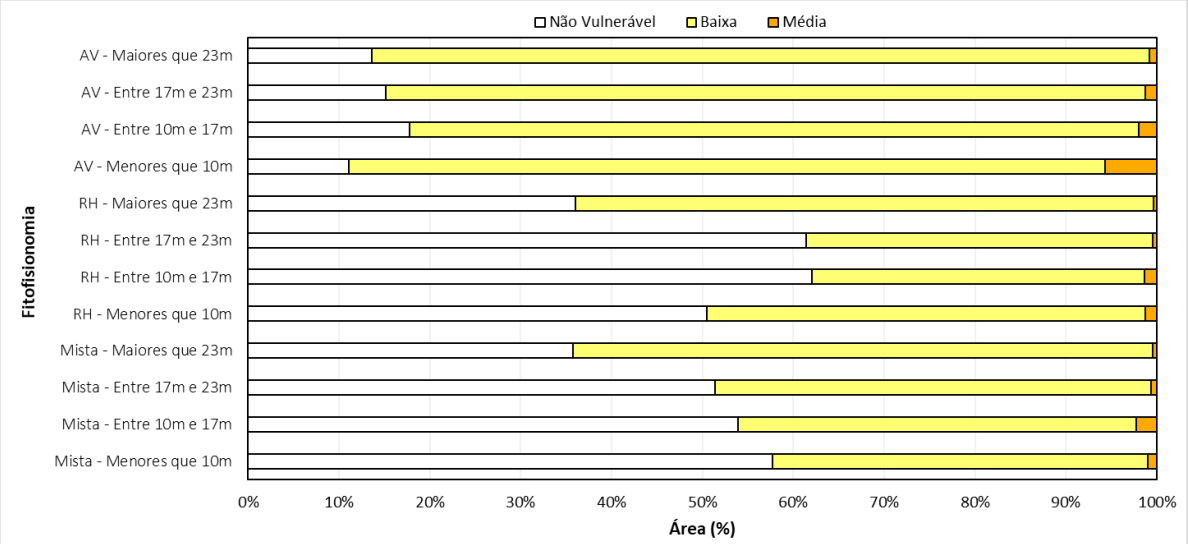


Figura 4-55: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período seco e maré de quadratura.

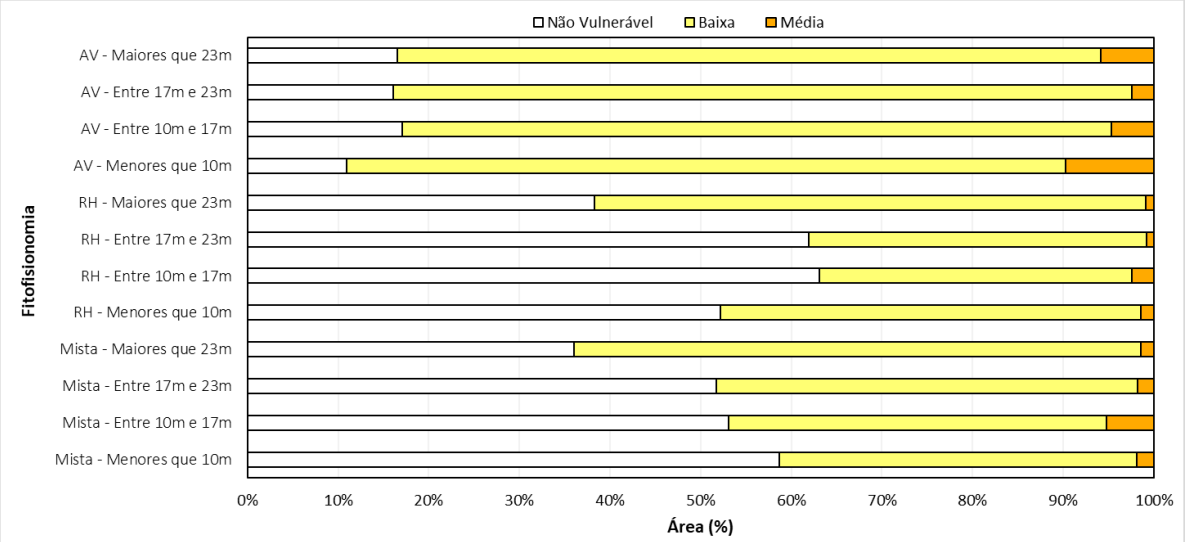


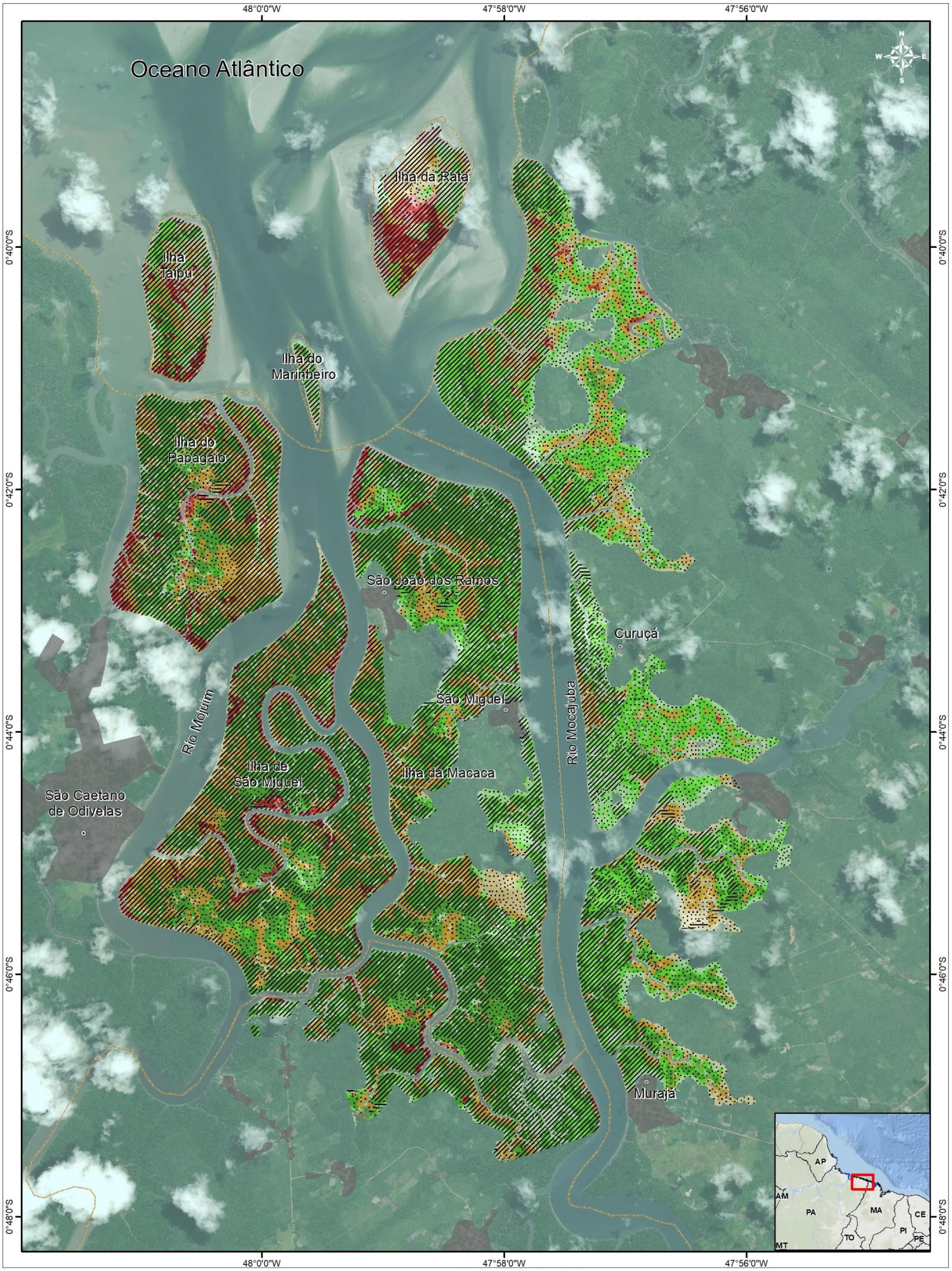
Figura 4-56: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), no período seco e maré de sizígia.

Tabela 4-11 Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não-vulnerável) em cada fitofisionomia no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), conforme os cenários analisados.

Percentual das fitofisionomias nas classes de vulnerabilidade												
Fitofisionomias	Chuvoso| Quadratura			Chuvoso | Sizígia			Seco | Quadratura			Seco | Sizígia		
	NV*	Baixa	Média	NV*	Baixa	Média	NV*	Baixa	Média	NV*	Baixa	Média
AV < 10m	6,6%	92,5%	1,0%	6,2%	88,7%	5,1%	11,1%	83,2%	5,7%	10,9%	79,3%	9,7%
AV 10-17 m	11,5%	87,5%	1,0%	9,8%	89,2%	1,0%	17,8%	80,3%	2,0%	17,0%	78,3%	4,7%
AV 17-23 m	7,6%	91,8%	0,6%	7,8%	91,6%	0,6%	15,1%	83,6%	1,2%	16,1%	81,5%	2,4%
AV > 23 m	8,4%	91,6%	0%	7,5%	92,5%	0%	13,6%	85,5%	0,9%	16,6%	77,6%	5,8%
Mista < 10 m	39,6%	59,2%	1,2%	49,2%	50,3%	0,5%	57,7%	41,4%	1,0%	58,7%	39,4%	1,9%
Mista 10-17 m	39,1%	60,4%	0,5%	45,1%	54,2%	0,7%	53,9%	43,8%	2,3%	53,1%	41,7%	5,2%
Mista 17-23 m	33,3%	65,8%	0,8%	41,4%	58,1%	0,5%	51,3%	48,0%	0,7%	51,7%	46,5%	1,8%
Mista > 23 m	20,5%	79,2%	0,3%	23,6%	76,1%	0,3%	35,7%	63,8%	0,4%	36,0%	62,6%	1,4%
RH < 10 m	29,9%	69,5%	0,6%	44,0%	55,5%	0,5%	50,5%	48,3%	1,2%	52,2%	46,4%	1,4%
RH 10-17 m	43,6%	55,8%	0,5%	54,2%	45,2%	0,6%	62,1%	36,6%	1,3%	63,1%	34,4%	2,5%
RH 17-23 m	35,5%	64,2%	0,3%	51,6%	48,1%	0,3%	61,4%	38,2%	0,4%	62,0%	37,3%	0,8%
RH > 23 m	16,0%	83,7%	0,3%	20,8%	78,9%	0,3%	36,1%	63,6%	0,4%	38,3%	60,7%	0,9%

AV = *Avicennia germinans*; Mista = Floresta com composição mista de espécies; RH = *Rhizophora* spp.

*Não Vulnerável



INTEGRAÇÃO

FITOFISIONOMIAS E VULNERABILIDADE
ESTUÁRIO DE SÃO CAETANO DE ODIVELAS (PA)

Período CHUVOSO – Maré de QUADRATURA

CONVENÇÕES CARTOGRÁFICAS

Florestas dominadas por *Avicennia*
- Avicennia Menores que 10m
- Avicennia entre 10m e 17m
- Avicennia entre 17m e 23m
- Avicennia maiores que 23m

Florestas Mistas
- Mista menores que 10m
- Mista entre 10m e 17m
- Mista entre 17m e 23m
- Mista maiores de 23m

Florestas dominadas por *Rhizophora*
- Rhizophora menores que 10m
- Rhizophora entre 10m e 17m
- Rhizophora entre 17m e 23m
- Rhizophora maiores que 23m

Vulnerabilidade
- Não Vulnerável
- Baixa
- Média
- Alta
- Cidades
- Limites Municipais
- Área Edificada

Escala 1:50.000
0 0,25 0,5 1 Km

Sistema de Coordenadas Geográficas
Sistema de Referência SIRGAS 2000
Projeção Equirretangular Cilíndrica
Imagem Digital Globe
ESRI - Service
Data de execução: Julho/2020

Figura 4-57: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período chuvoso e maré de quadratura.

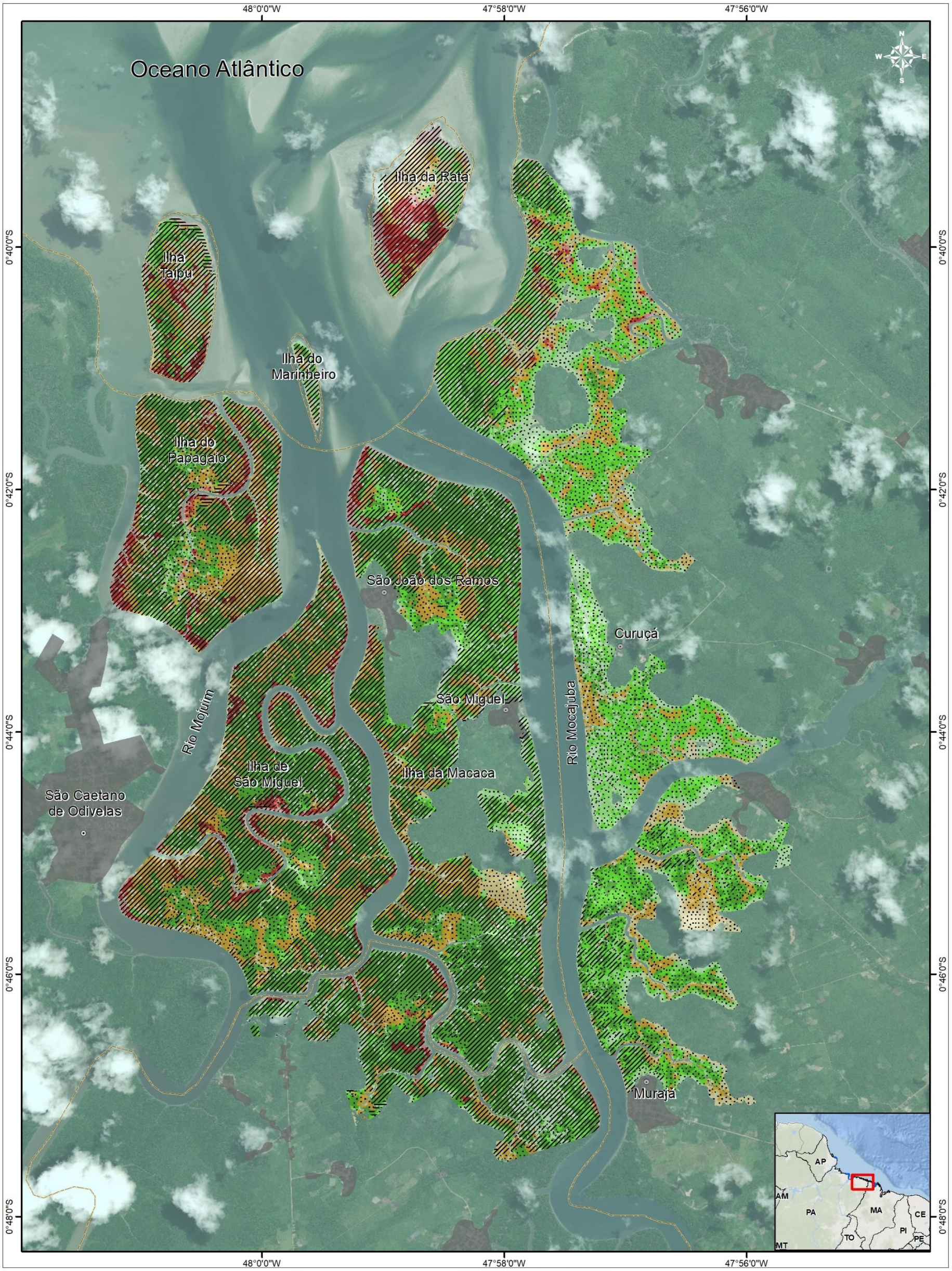


Figura 4-58: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período chuvoso e maré de sizígia.

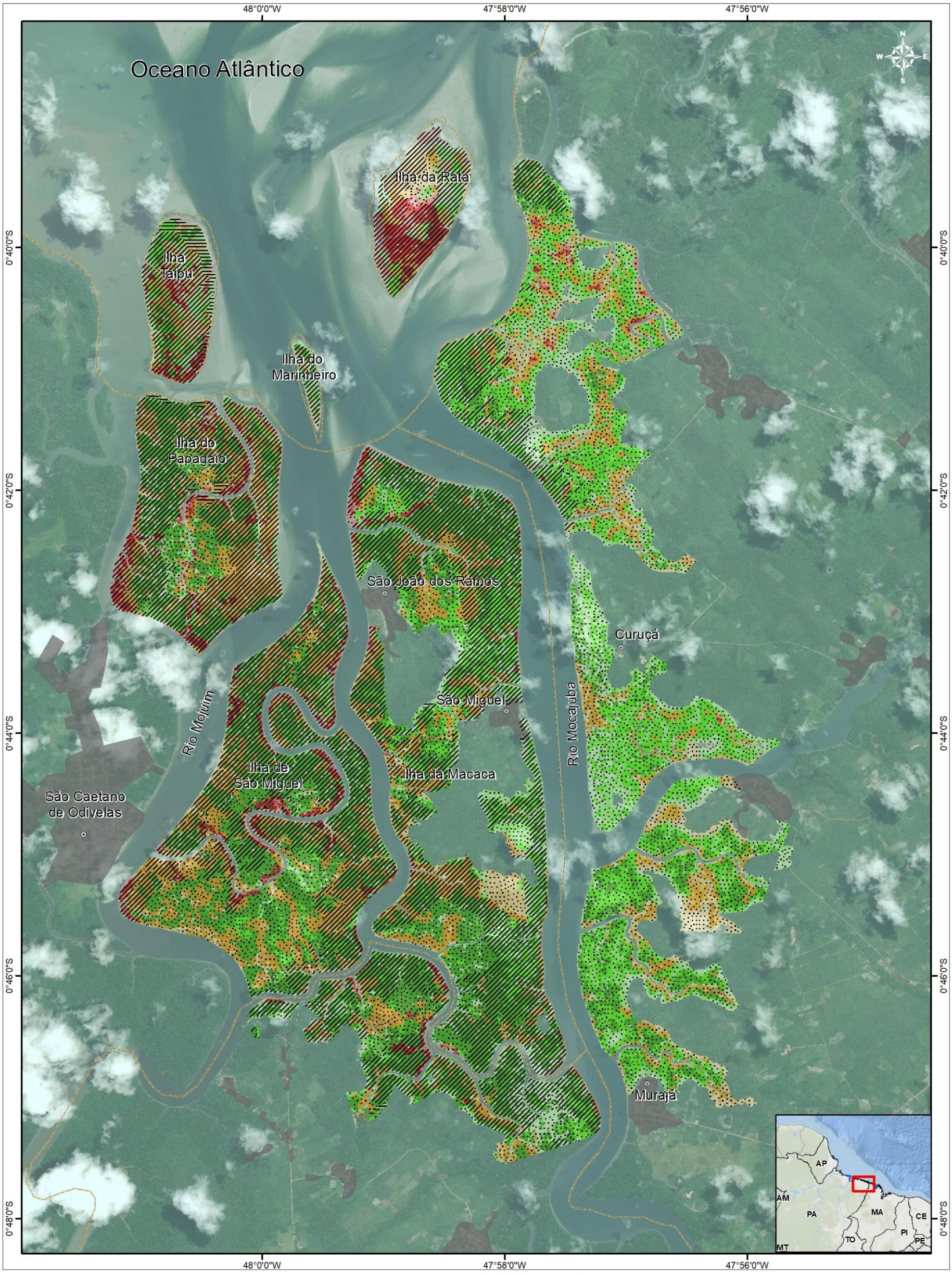


Figura 4-59: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período seco e maré de quadratura.

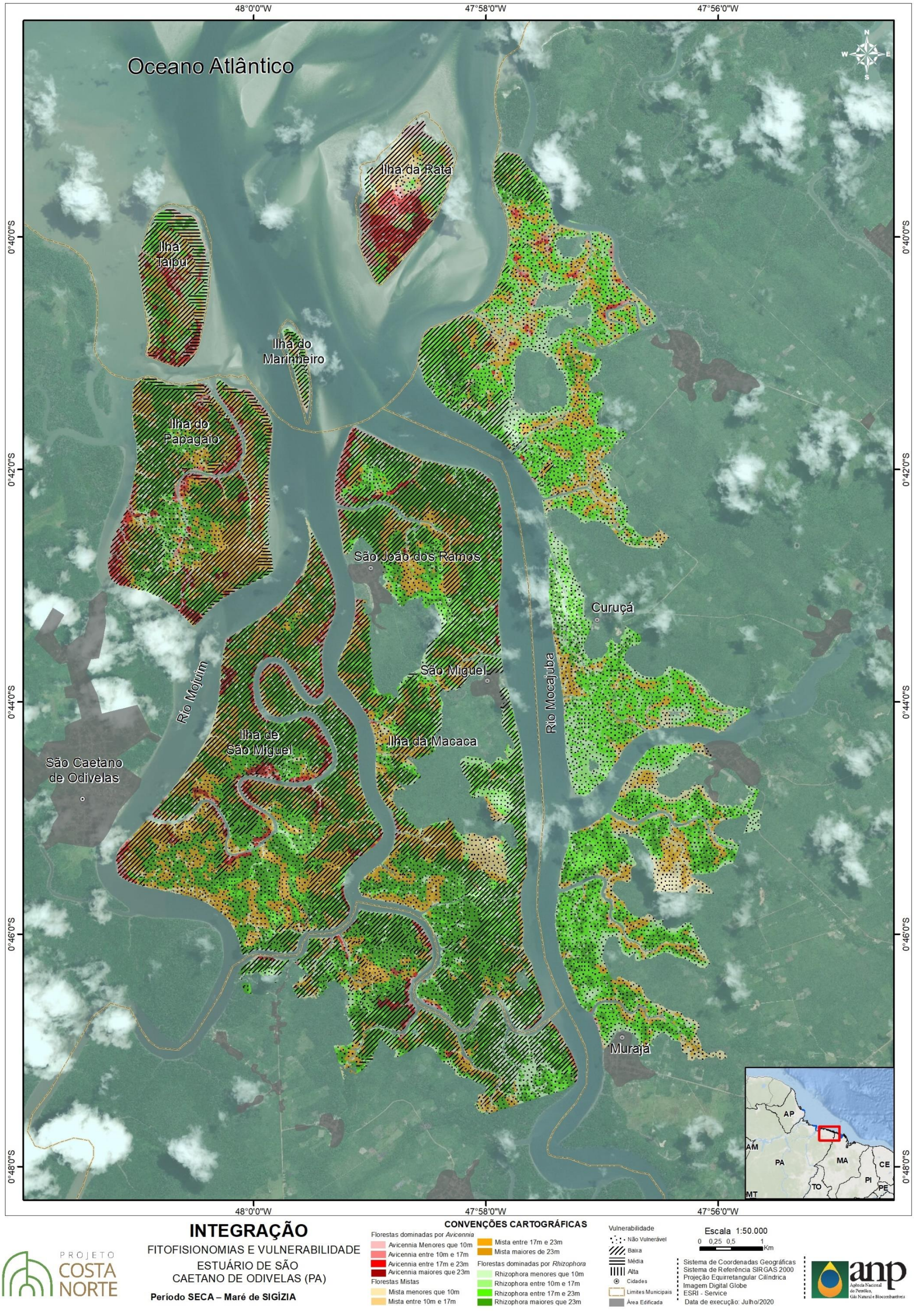


Figura 4-60: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no estuário de São Caetano de Odivelas (PA), período seco e maré de sizígia.

4.3. Sistema Costeiro de Soure (PA)

Neste item é apresentada a análise de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), considerando suas três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**. A análise nessa área de estudo foi realizada por trechos da costa (A, B, C e D) conforme a Figura 4-61, devido à variabilidade da resposta das componentes ao longo da costa dessa área de estudo. O trecho A representa a porção mais ao sul da costa leste da área de estudo; o trecho B refere-se à porção intermediária da costa leste enquanto o trecho C representa a porção ao norte da costa leste. Por fim, o trecho D representa a porção da costa norte.

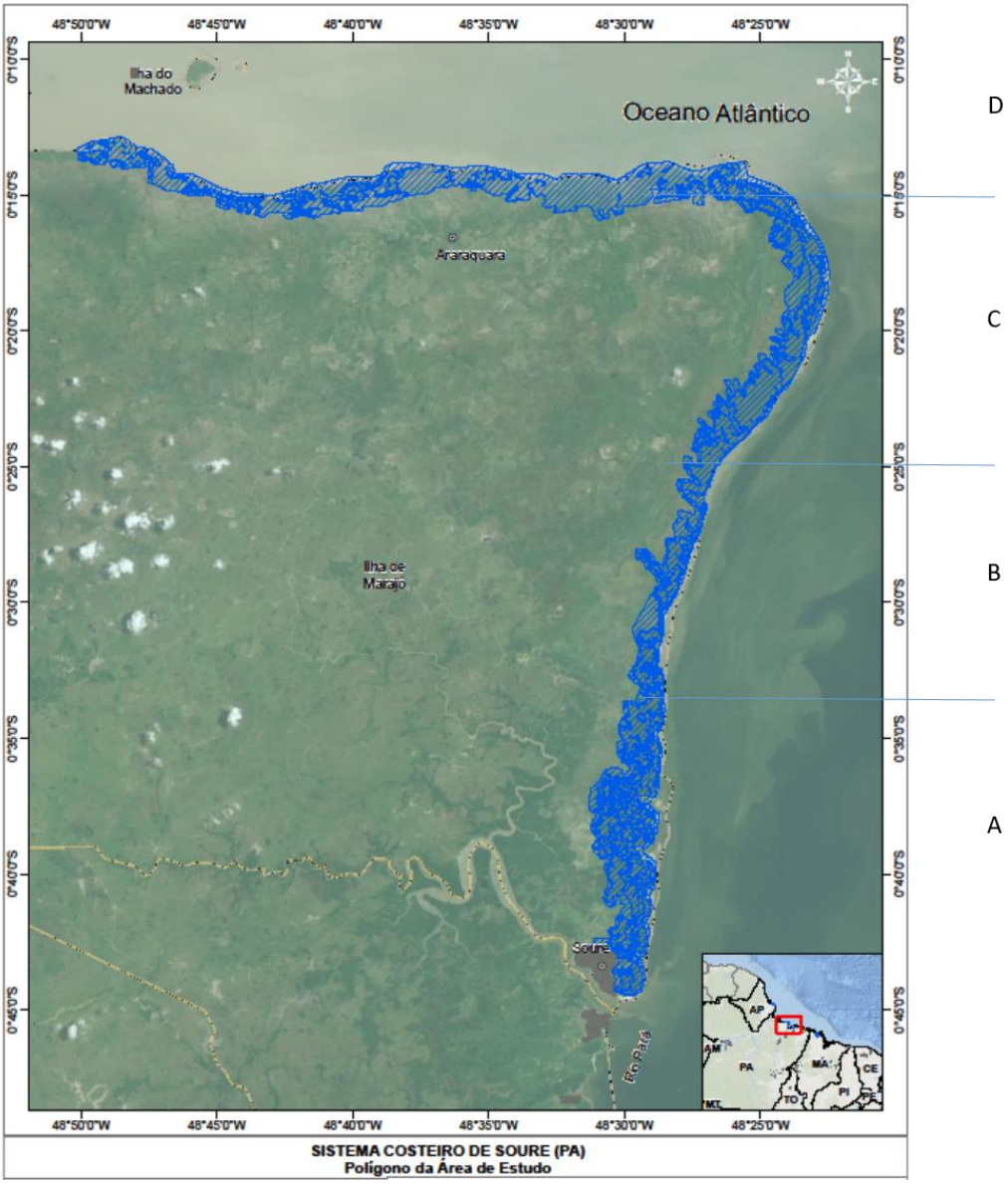


Figura 4-61: Área de estudo do sistema costeiro de Soure (PA) e os trechos de costa utilizados como referência da análise de vulnerabilidade e suas componentes. Trecho A - porção mais ao sul da costa leste; trecho B - porção intermediária da costa leste; trecho C - porção ao norte da costa leste; trecho D porção da costa norte.

4.3.1. Suscetibilidade

Neste item será analisada a **suscetibilidade** do sistema costeiro de Soure (PA) ao óleo oriundo de potenciais vazamentos distribuídos nas bacias efetivas da Margem Equatorial Brasileira (MEB). Ressalta-se que a

análise apresentada no item 4.2.1 para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA) na escala *offshore* pode ser estendida ao sistema costeiro de Soure (PA), devido à localização de ambas no estuário do rio Pará.

A suscetibilidade foi estudada a partir da análise inversa para identificação das fontes de vazamento de óleo que oferecem risco de toque para o sistema costeiro de Soure (PA), conforme apresentado na Figura 4-62; associada à probabilidade de toque de óleo no caso de um vazamento originado nessas fontes (Figura 4-63) e o tempo mínimo em que ocorre o toque de óleo originado de um vazamento nas fontes consideradas na MEB (Figura 4-64). A consolidação da abordagem da suscetibilidade é a probabilidade máxima de presença de óleo na região da MEB, considerando todas as fontes de vazamento para os cenários seco e chuvoso (Figura 4-65).

Grande parte dos padrões observados na análise inversa para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA) é válido para o sistema costeiro de Soure (PA), visto que se encontram em margens opostas do mesmo sistema estuarino, o do rio Pará. Dessa forma, as análises aqui apresentadas serão mais resumidas, focando nas diferenças observadas.

Devido a variabilidade sazonal na dispersão do óleo desde as fontes de vazamento até a zona costeira, as maiores probabilidades de presença de óleo na entrada do estuário do rio Pará são observadas no período seco (Figura 4-63).

Similar ao visto no item 4.2.1, a análise inversa revela que no período chuvoso existe um maior número de fontes de vazamento que oferecem risco para o sistema costeiro de Soure (PA) (ver Figura 4-62). Esse padrão é associado à maior variabilidade direcional do transporte de óleo no período chuvoso, aumentando o número de fontes que oferecem risco e diminuindo as probabilidades associadas de um vazamento originado nessas fontes atingir o sistema costeiro de Soure (PA). Em outras palavras, no período chuvoso a área de vazamento que representa risco para o sistema é maior, porém o risco da área ser atingida é menor; e no período seco, a área de vazamento que representa risco é menor, porém o risco da área ser atingida é maior.

No período seco, apenas fontes a leste oferecem risco à região – evidenciando a influência dos ventos alísios de sudeste –, enquanto no período chuvoso observamos também fontes a norte e noroeste – um pouco mais a noroeste do que no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) – estando esse padrão associado aos ventos alísios de nordeste, típicos do período chuvoso, e ao processo costeiro de transporte para leste, observado em trajetórias de derivadores coletadas no PCN (Volume 2, Capítulo 6). Os menores tempos de toque de óleo no sistema costeiro de Soure (abaixo de 60 horas) estão associados à essas fontes.

Observam-se que as fontes de vazamento com maiores probabilidades de atingirem o sistema costeiro de Soure encontram-se nas bacias de Pará-Maranhão e Barreirinhas, em ambos os cenários sazonais.

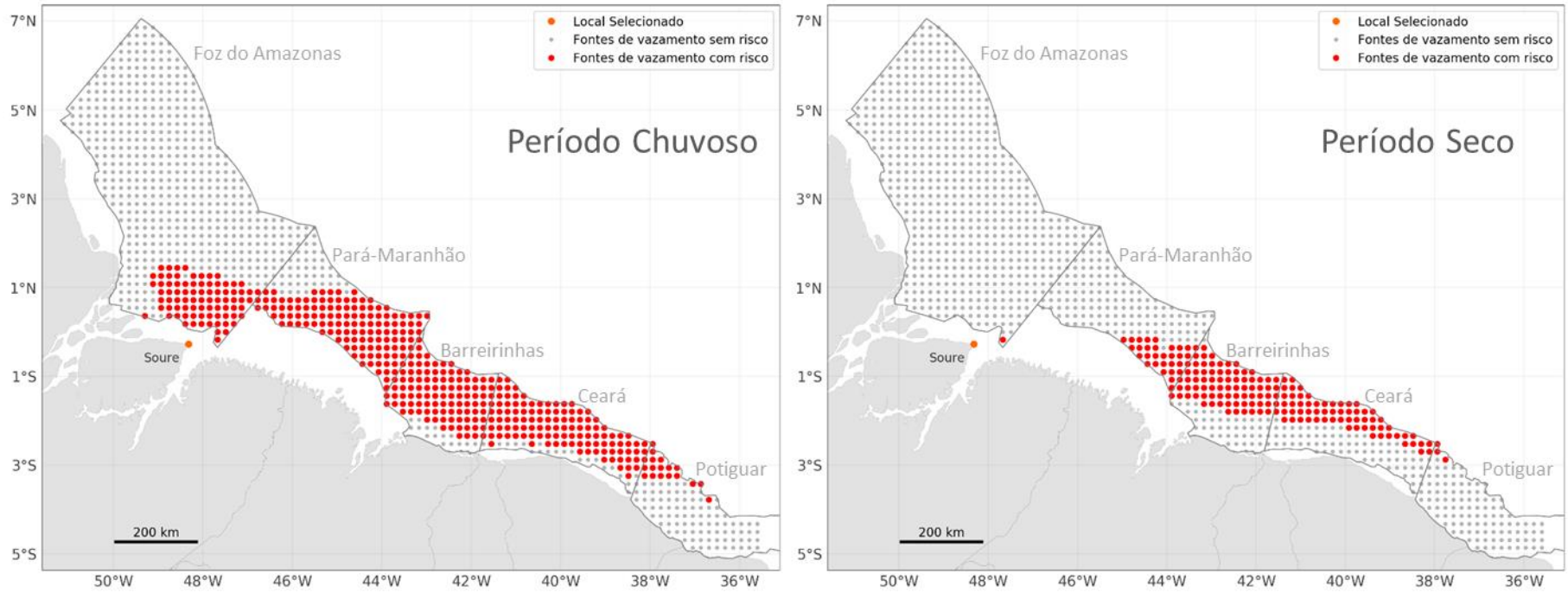


Figura 4-62: Fontes de vazamento que oferecem risco de toque de óleo ao sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda; e Seco (julho a dezembro), à direita.

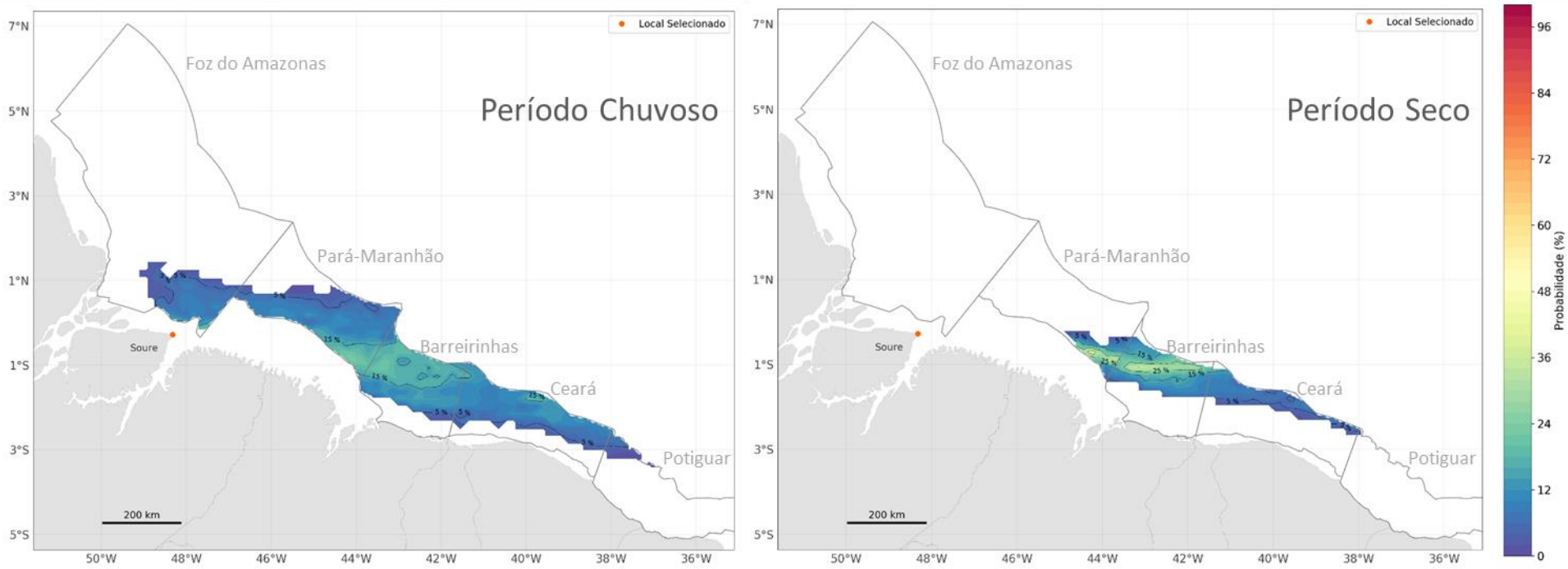


Figura 4-63: Distribuição da probabilidade de gerar toque de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

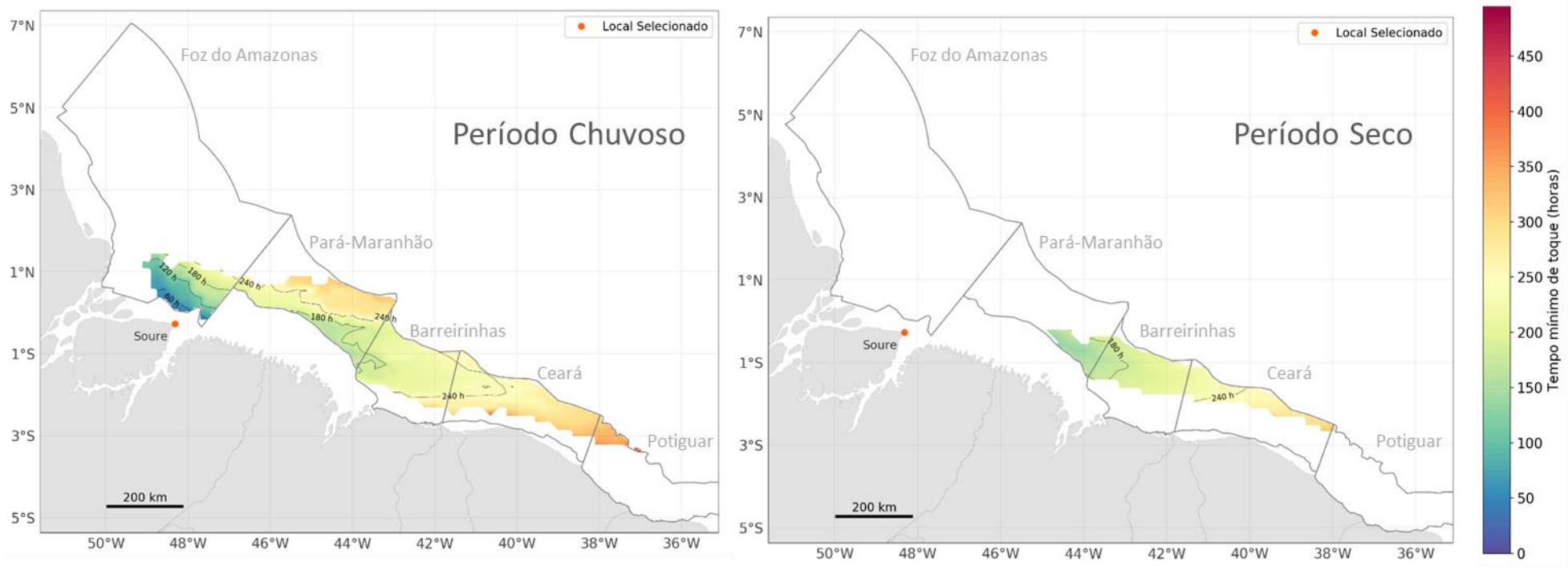


Figura 4-64: Distribuição do tempo mínimo de toque de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) a partir das fontes de vazamento de óleo nas bacias efetivas da MEB nos períodos Chuvoso (janeiro a junho), à esquerda, e Seco (julho a dezembro), à direita.

A Figura 4-65 apresenta o detalhamento da distribuição espacial da probabilidade de presença de óleo no estuário do rio Pará, onde o sistema costeiro de Soure (PA) localiza-se na costa oeste. Estes resultados representam a continuidade da dispersão de óleo desde as fontes de vazamento até esses sistemas estuarinos e, portanto, indicam a influência dos cenários sazonais da escala *offshore* descritos previamente conforme os cenários relativos ao período sazonal (chuvoso ou seco) e de maré (quadratura ou sizígia).

Conforme indicado para o estuário de São Caetano de Odivelas (PA) no item 4.2.1, há duas plumas de alta probabilidade de presença de óleo na plataforma adjacente à foz do estuário do rio Pará (Figura 4-65) que são reflexo da proximidade de duas fontes de vazamento (ver localização das fontes na Figura 4-62). Devido ao transporte preferencial para oeste, a fonte mais ao sul é a que ocasiona maior suscetibilidade para o sistema costeiro de Soure (PA) (Figura 4-63).

A probabilidade de presença de óleo gradualmente diminui em direção à porção interna do estuário do rio Pará, pois o transporte residual ocorre em direção à jusante ao longo de todo ano, com maior magnitude no período chuvoso e menor no período seco, conforme a sazonalidade da descarga do rio Tocantins (ver Capítulo 7.4.2.2 do Volume 2). Naturalmente, as maiores probabilidades de presença de óleo na entrada do estuário no período seco acarretam maiores probabilidades no interior do estuário. Nota-se a classe de 40-50% alcançando aproximadamente a latitude de Soure (0.8°S) no período seco, enquanto no período chuvoso observa-se, no máximo, a classe de 20-30% na mesma latitude. A extensão das classes de probabilidade para o interior do estuário varia pouco entre as condições de maré de quadratura e sizígia, porém durante a sizígia, as classes de maior probabilidade ocupam áreas um pouco maiores devido à maior amplitude de transporte do óleo nesta condição. É possível observar também classes de maior probabilidade na porção leste da entrada do estuário do rio Pará, estendendo-se em diagonal em direção à cidade de Soure (PA), padrão relacionado com o regime de vento, a morfologia do canal e a propagação da onda de maré.

Durante o período chuvoso, a maior probabilidade de chegada do óleo no sistema costeiro de Soure (PA) é de 10-20%, na costa leste, e de 40-50%, na costa norte, na maré de sizígia. Durante o período seco, a probabilidade se eleva tanto na costa leste quanto na costa norte, chegando às faixas de 30-40% e 60-70%, respectivamente, na maré de quadratura. Destaca-se o trecho norte da costa leste, que apresenta probabilidades reduzidas de ser atingido pelo óleo. Esse padrão pode ser explicado pela já citada morfologia do canal e propagação da onda de maré no estuário do rio Pará, que determina o canal principal de ligação com a plataforma continental adjacente. A região do entorno do trecho norte da costa leste do sistema costeiro de Soure (PA) está afastada do canal principal, e são observadas profundidades menores, reduzindo a sua suscetibilidade.

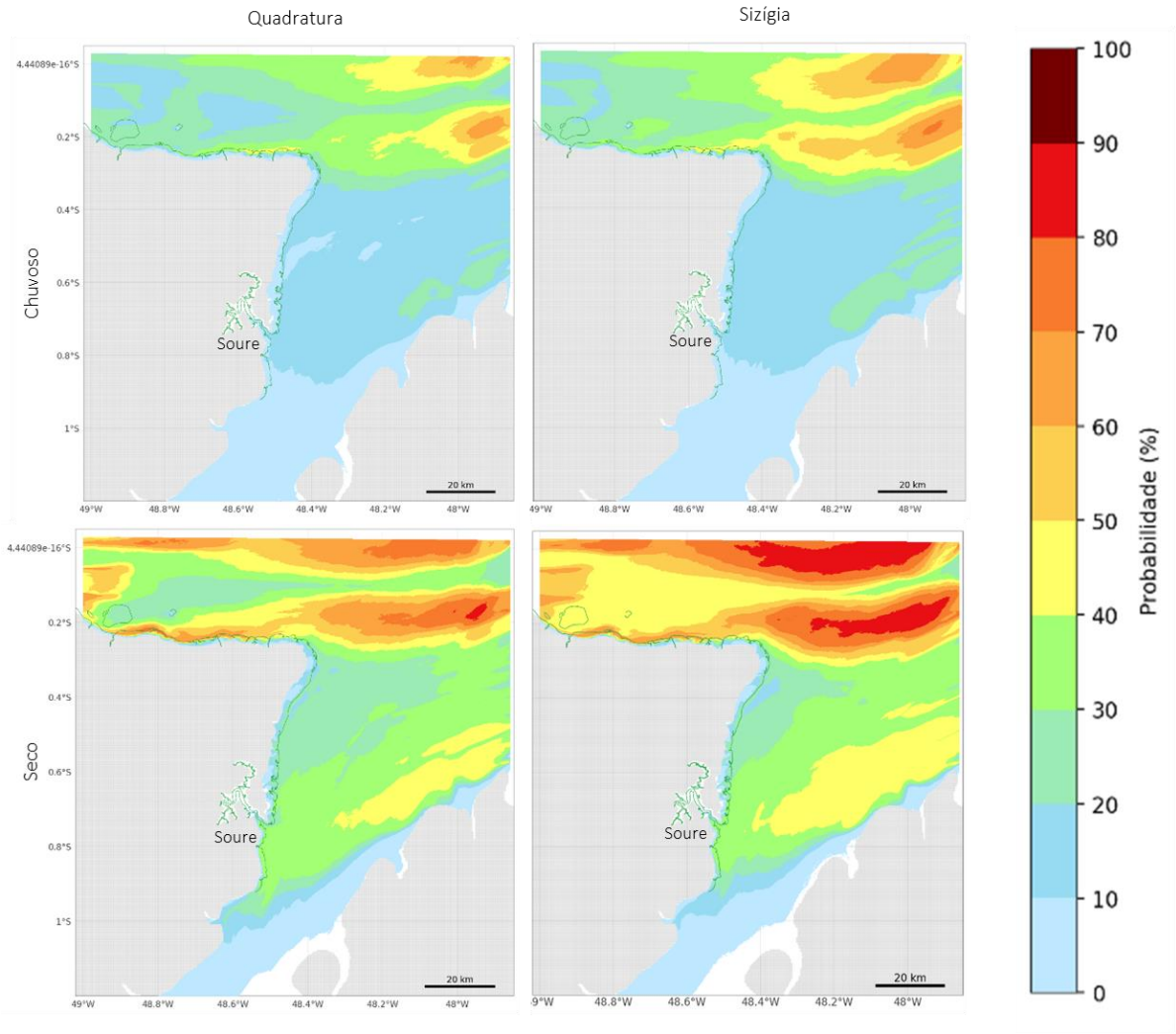


Figura 4-65: Probabilidade máxima de chegada de óleo no sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), com maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

Os mapas de **suscetibilidade** no sistema costeiro de Soure (PA) para os quatro cenários propostos são apresentados e comentados a seguir. Os cenários de marés de quadratura e sizígia no período chuvoso estão representados na Figura 4-67 e na Figura 4-68, respectivamente; e os cenários de marés de quadratura e sizígia no período seco estão representados na Figura 4-69 e na Figura 4-70, respectivamente. A **suscetibilidade** é classificada em não-suscetível (0%), baixa (maior que 0% e menor que 13%), média (maior ou igual a 13% e menor que 40%) e alta (maior ou igual a 40% e menor ou igual a 100%), conforme metodologia descrita no Capítulo 3.

A **suscetibilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) é predominantemente baixa no período chuvoso e predominantemente média no período seco, com a ocorrência das quatro classes em todos os cenários, embora a classe alta ocorra apenas pontualmente. A **suscetibilidade** apresenta variação espacial e entre os períodos sazonais (chuvoso ou seco), e pouca influência do tipo de maré (quadratura ou sizígia), conforme detalhado a seguir. Observa-se ainda que no sistema costeiro de Soure as áreas não suscetíveis (**suscetibilidade** zero) são pontuais e localizadas em áreas internas da área de estudo.

A **suscetibilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) é predominantemente baixa no período chuvoso (74,0 a 75,2%) e predominantemente média no período seco (60,4 a 54,8%) (Figura 4-66). Essa diferença bem marcada entre os períodos seco e chuvoso é uma característica dessa área de

estudo, pois não ocorreu em nenhuma das outras áreas. Na sequência, destacam-se as áreas de florestas classificadas com **suscetibilidade** média no período chuvoso (22,5 a 23,9%) e **suscetibilidade** baixa no período seco (31,9 a 37,0%). Áreas de floresta classificadas com **suscetibilidade** alta em percentuais relevantes aparecem apenas no período seco (5,9 a 6,0%), pois no período chuvoso esses percentuais são 1,1 e 1,3%. Nesta área de estudo tem destaque também as poucas áreas não suscetíveis (1,0 a 2,2%) nos quatro cenários analisados. Como observado nas demais áreas de estudo, também no sistema costeiro de Soure observa-se a baixa influência das condições de maré no resultado das classes de **suscetibilidade** nos cenários estudados, como pode ser observado na Figura 4-66.

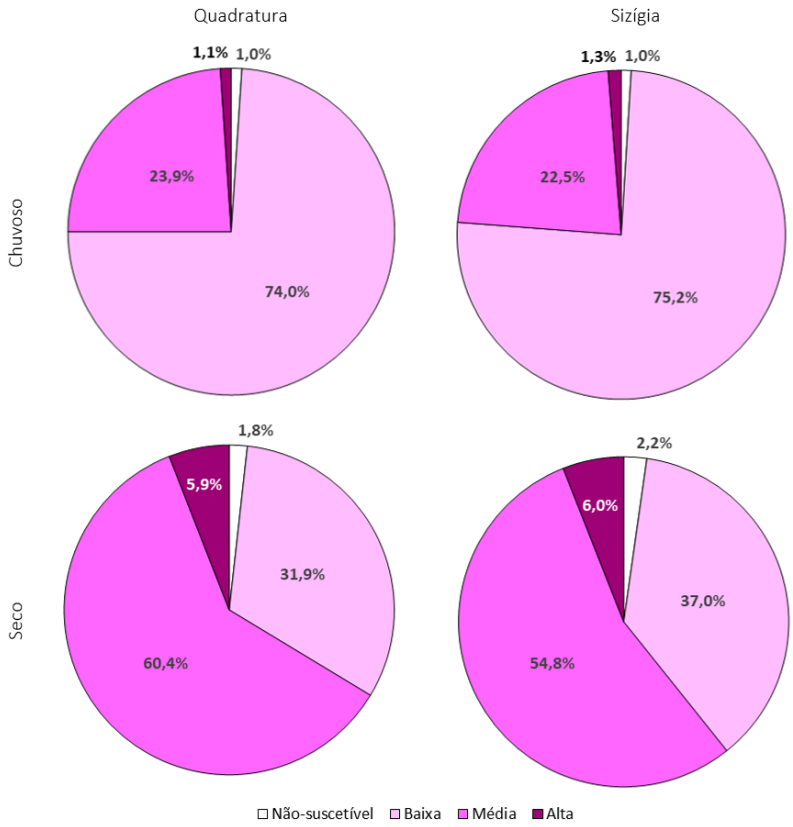


Figura 4-66: Distribuição geral das classes de **suscetibilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

Essa componente apresenta variações ao longo da costa leste, em que as áreas ao sul apresentam menor **suscetibilidade**, enquanto as áreas ao norte da costa leste são mais suscetíveis. As áreas classificadas como de alta **suscetibilidade** são encontradas apenas na costa norte dessa área de estudo, padrão explicado principalmente pela direção de chegada do óleo à costa, que ocorre no sentido leste-oeste, conforme explicado acima e ilustrado pela Figura 4-65.

O período sazonal (chuvoso ou seco) também influencia fortemente a **suscetibilidade**. No período chuvoso, predominam as áreas de **suscetibilidade** baixa enquanto que no período seco, predominam áreas com **suscetibilidade** média, conforme padrão geral de **suscetibilidade** descrito na introdução deste capítulo.

A **suscetibilidade** é pouco variável entre as condições de maré. Pode-se observar em algumas regiões uma ligeira tendência à maior **suscetibilidade** na maré de quadratura quando comparada à maré de sizígia. As razões para essa variação não são claras, mas podem estar relacionadas ao padrão de circulação no estuário do rio Pará que, em maré de quadratura tende a aumentar a probabilidade de conduzir o óleo às

regiões adjacentes às florestas de mangue, principalmente do trecho norte da costa leste do sistema costeiro de Soure (ver padrão de distribuição da probabilidade no estuário nas Figura 4-65).

No período chuvoso, a suscetibilidade no trecho A é predominantemente baixa. No trecho B, há áreas de baixa e média suscetibilidade. O trecho C apresenta as áreas mais extensas com suscetibilidade média, enquanto a suscetibilidade baixa é encontrada em áreas internas e ao sul. O trecho D apresenta predominantemente suscetibilidade média na costa, com áreas de baixa suscetibilidade no interior e de alta suscetibilidade em locais específicos da costa. Todos os trechos da costa leste apresentam pequenas áreas não suscetíveis, em especial o trecho mais ao sul (trecho A).

No período seco, há maior probabilidade de entrada de óleo no estuário do rio Pará, e consequentemente no sistema costeiro de Soure (PA), quando comparado ao período chuvoso. Assim, as áreas não-suscetíveis são raras e a maior parte da área de estudo apresenta suscetibilidade média. A suscetibilidade no trecho A é média e baixa; nos trechos B e C, é média, com algumas áreas internas e ao sul no trecho C com suscetibilidade baixa e algumas áreas ao norte com alta suscetibilidade. De todas os trechos analisados, o trecho D é o que apresenta a maior suscetibilidade nesse cenário, que é predominantemente alta neste trecho da costa, com áreas de média suscetibilidade nas porções intermediárias e baixa suscetibilidade apenas em locais específicos no interior.

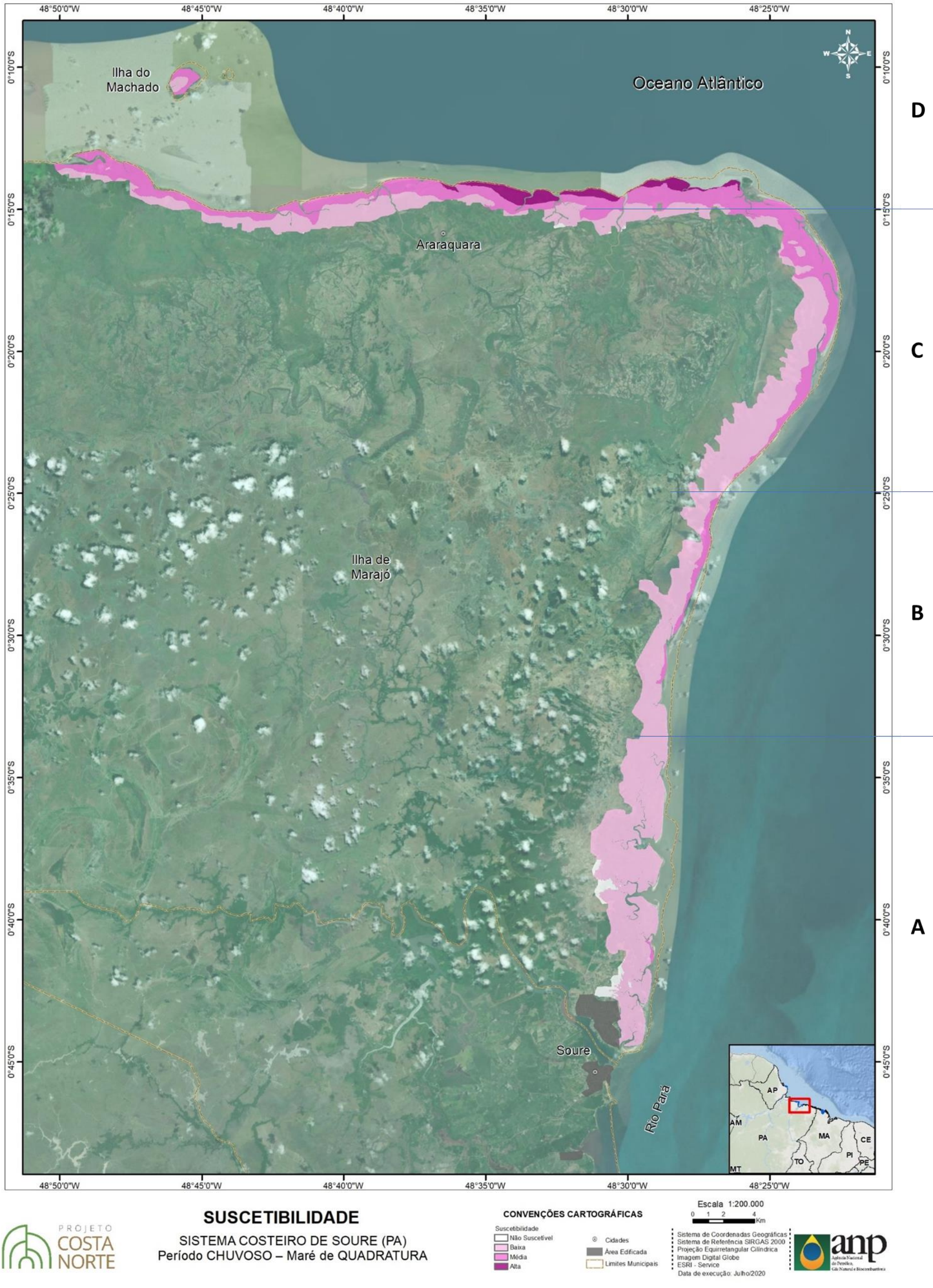


Figura 4-67: Resultados da suscetibilidade das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

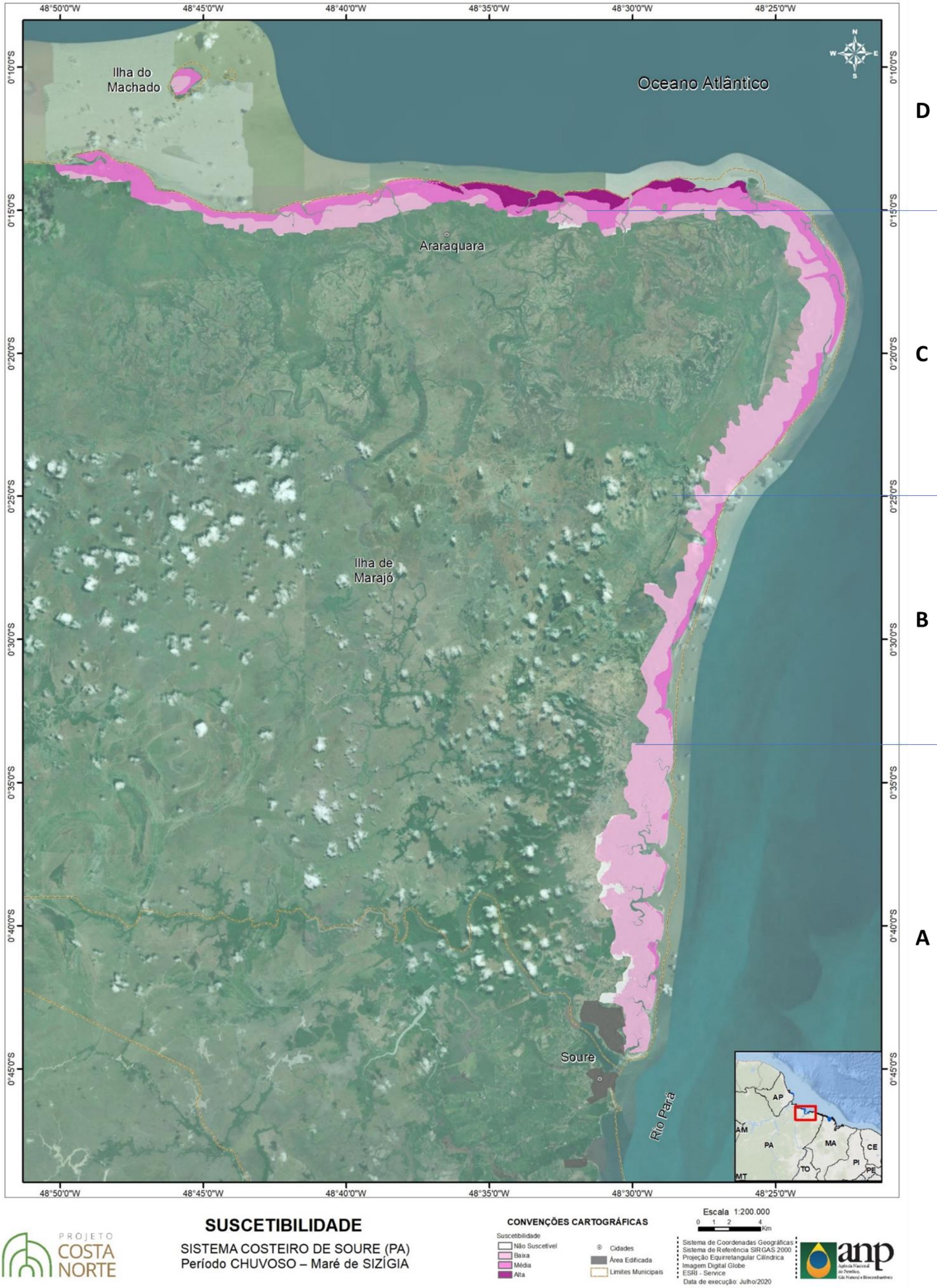


Figura 4-68: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período chuvoso e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

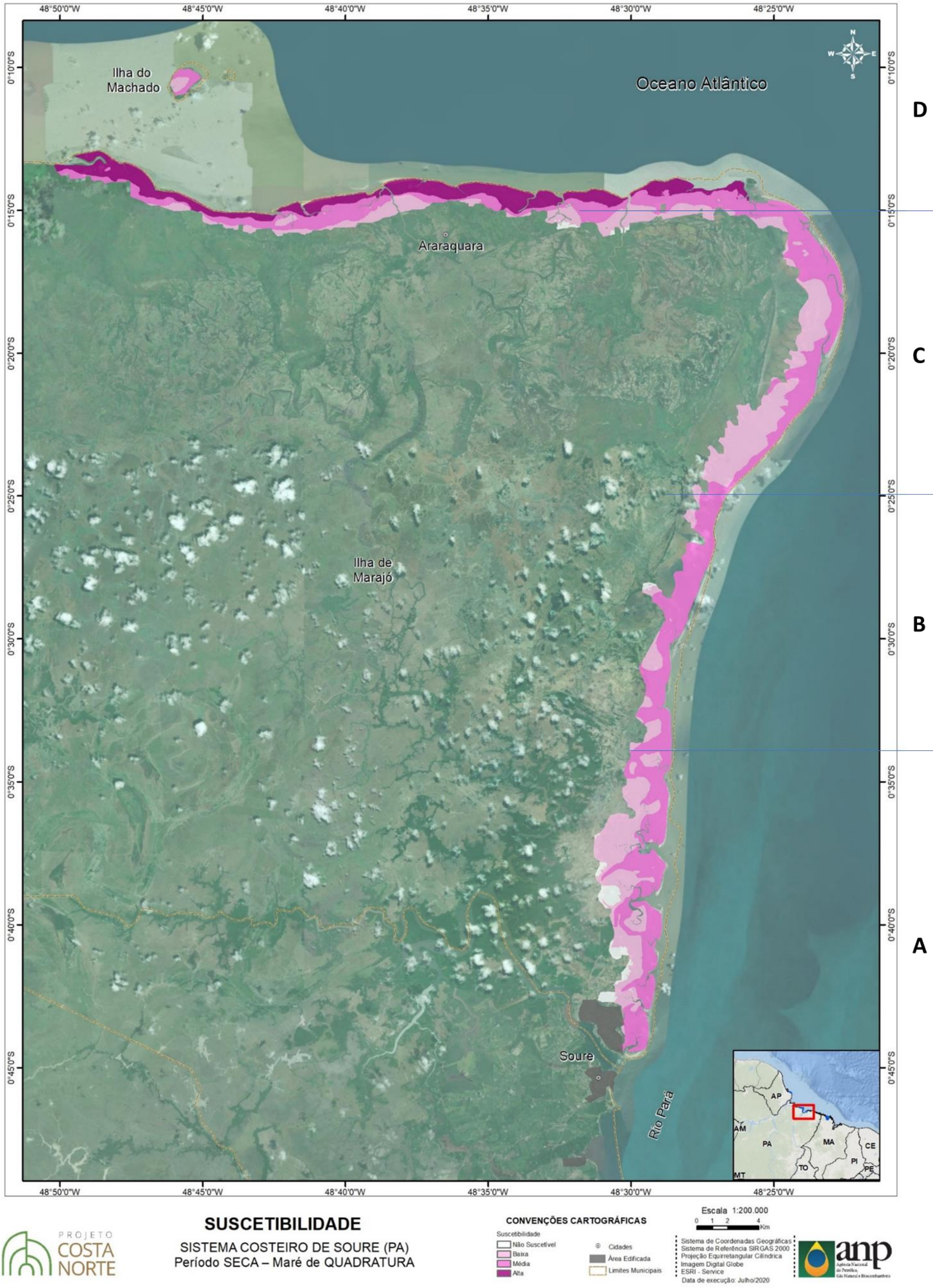


Figura 4-69: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período seco e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

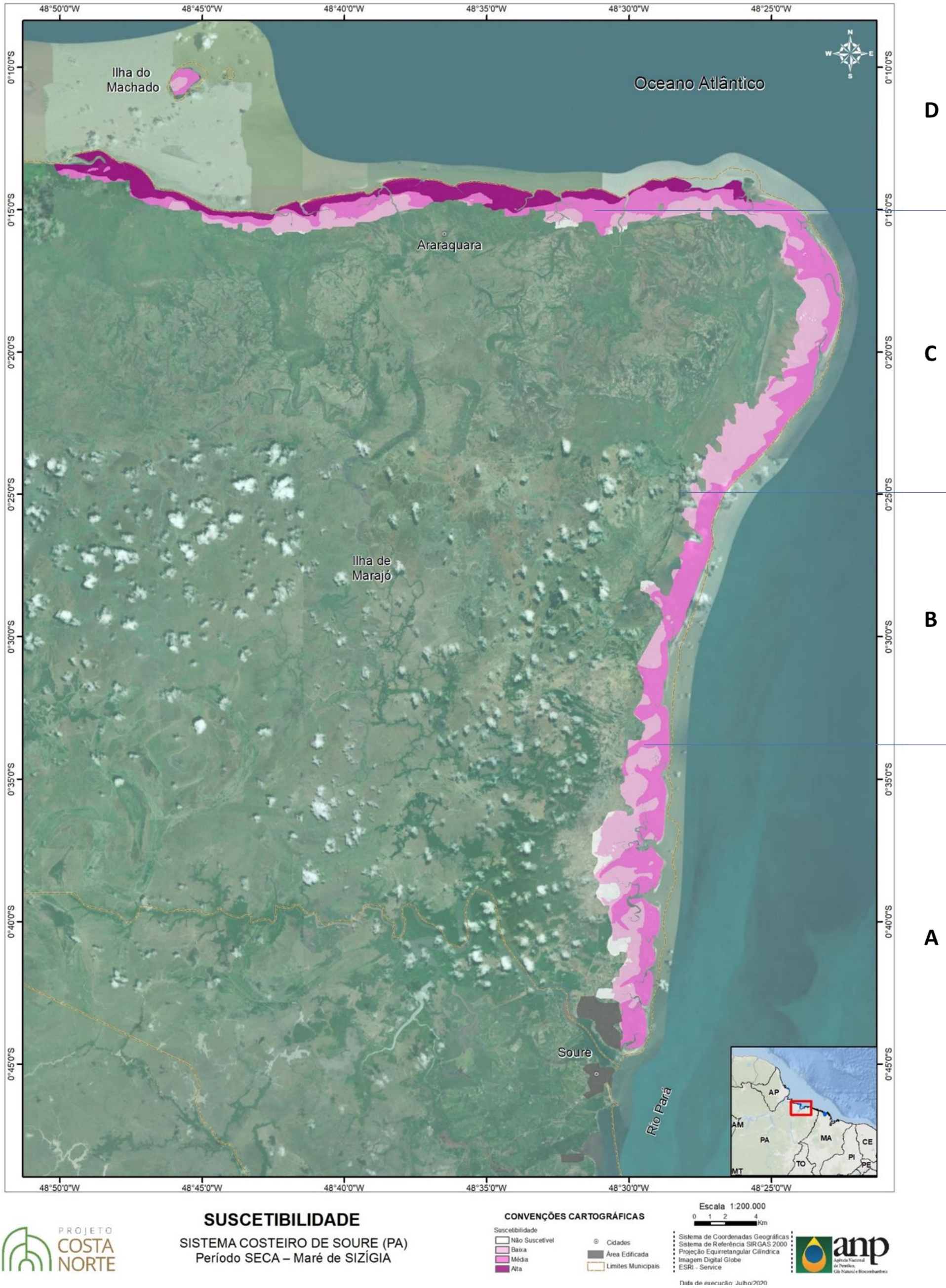


Figura 4-70: Resultados da **suscetibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure à contaminação por óleo. Período seco e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte. Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

4.3.2. Sensibilidade

De acordo com o pressuposto conceitual e metodológico adotado no Projeto Costa Norte (Capítulo 3) e relembrado no item 4.1.2, a **sensibilidade** das florestas de mangue à contaminação por óleo é inversamente proporcional ao nível da energia hidrodinâmica do sistema, mensurada pelo somatório anual da Energia Cinética (Ec), e classificada como alta, muito alta ou extremamente alta. Isso se deve ao fato de partirmos, na abordagem conceitual e metodológica adotada, conforme apresentado no Capítulo 3, do pressuposto de que todas as florestas de mangue possuem, dentre todos os sistemas costeiros, o maior nível de **sensibilidade** ao óleo.

No sistema costeiro de Soure (PA), entre as classes de **sensibilidade**, há predomínio da classe muito alta (69,4%), seguida da classe alta (28,0%), e pequenas áreas apresentando **sensibilidade** extremamente alta (2,5%), como pode ser observado na Figura 4-71.

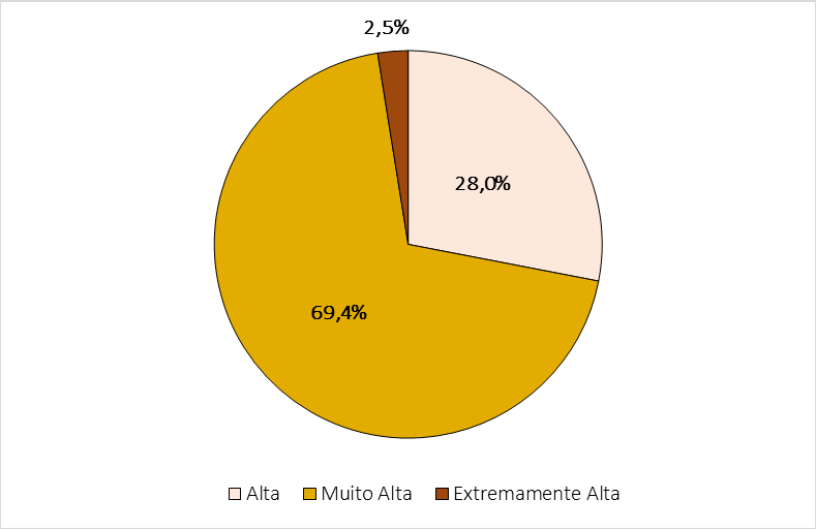


Figura 4-71: Distribuição geral das classes de **sensibilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA).

O mapa que espacializa os resultados de sensibilidade do sistema costeiro de Soure (PA) é apresentado na Figura 4-72, onde é possível observar a distribuição das três classes de sensibilidade. A análise do mapa revela a ocorrência de dois principais padrões de distribuição dos resultados de sensibilidade no sistema: a variação no sentido norte-sul e a variação no sentido costa-interior, conforme apresentado a seguir.

No trecho A, a **sensibilidade** é classificada principalmente como muito alta, e também há ocorrência de áreas de **sensibilidade** alta, principalmente nas proximidades da costa e no extremo sul desse trecho, perto de Soure. Esse é o único trecho que apresenta áreas relevantes com **sensibilidade** extremamente alta, que ocorrem principalmente em fundo de igarapés. Conforme ilustrado pelo mapa da energia cinética (ver Volume 2, Capítulo 7, Figura 7-146), o trecho A apresenta extensas áreas com baixa energia cinética, enquanto ao norte a energia cinética tende a ser mais elevada. A **sensibilidade** nos trechos B, C e D apresenta semelhanças entre si, com predomínio de **sensibilidade** muito alta no interior e alta na costa. Há a ocorrência pontual de **sensibilidade** extremamente alta na costa norte (trecho D), próxima à Araraquara.

A costa apresenta **sensibilidade** alta, enquanto o interior apresenta **sensibilidade** muito alta. Conforme ilustrado na figura 7-146 (Volume 2, Capítulo 7), a energia cinética é mais elevada na costa do que no interior do sistema costeiro de Soure (PA), especialmente nos trechos C e D. Assim, há um padrão geral de aumento da **sensibilidade** no sentido costa-interior, em que a **sensibilidade** acompanha o gradiente topográfico e, consequentemente, o gradiente da frequência de inundação pelas marés (ver Volume 2,

Capítulo 7, Figura 7-125) – ao diminuir a frequência de inundação, diminui também o somatório anual da energia cinética relativa às correntes locais. Destaca-se também a importância dos igarapés, que apresentam nível topográfico mais baixo, para a entrada da maré no sistema costeiro de Soure (PA).

Portanto, em linhas gerais a maior parte das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) apresenta **sensibilidade** muito alta à contaminação por óleo. Essa característica se relaciona ao predomínio de áreas de topografia intermediária que, portanto, são inundadas com frequência intermediária pelas marés. Poucas são as áreas com **sensibilidade** classificada como extremamente alta ao óleo. Estas estão restritas às florestas de mangue inundadas pelas marés com muito baixa frequência, localizadas na transição com a terra firme e, portanto, se desenvolvendo em ambiente mais estagnado devido à menor energia hidrodinâmica. Por fim, mesmo as florestas com maior energia hidrodinâmica, localizadas na costa e que apresentam condições mais favoráveis ao seu desenvolvimento, são classificadas com **sensibilidade** alta.

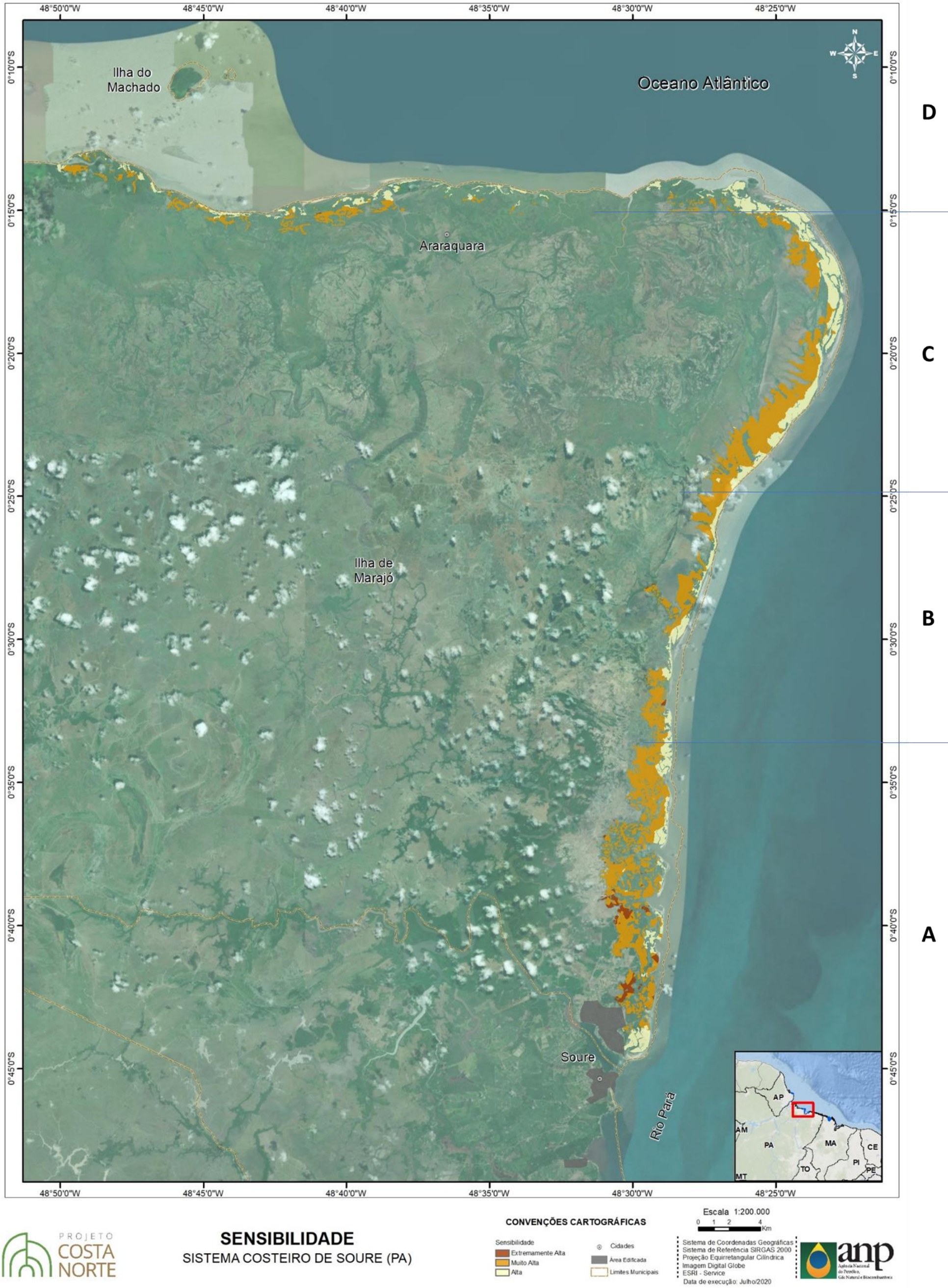


Figura 4-72: Resultados da **Sensibilidade** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

Figura 4-73: Modelo Digital de Terreno obtido por LiDAR do sistema costeiro de Soure (PA). Nota: Este mapeamento abrange toda a área de estudo.

4.3.3. Resiliência

Conforme a metodologia desenvolvida no Projeto Costa Norte e apresentada no Capítulo 3, a **resiliência** indica a capacidade de uma parcela de floresta de mangue se recuperar dos efeitos de um dado tensor. No caso da contaminação por óleo, essa capacidade está diretamente relacionada à capacidade de remoção do óleo por ação física e microbiológica. Segundo a metodologia proposta, a **resiliência** é função do Trabalho (velocidade do escoamento e da variação de altura da coluna d'água em determinada parcela de manguezal) e Taxa de Afastamento (velocidade média de afastamento do óleo removido). A **resiliência** é classificada como muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

A **resiliência** no sistema costeiro de Soure (PA) é predominantemente classificada como média (61,8%) seguida de alta (19,0%). As demais classes, muito alta (9,8%) e baixa (7,4%) apresentam menores contribuições enquanto a **resiliência** muito baixa (2,0%) apresenta uma contribuição muito pequena, como pode ser observado na Figura 4-74.

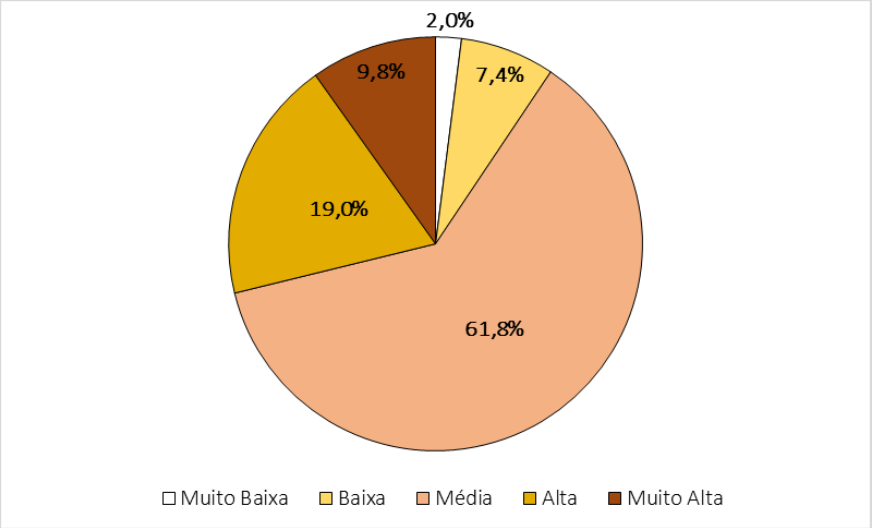


Figura 4-74: Distribuição geral das classes de **resiliência** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA).

O mapa de **resiliência** do sistema costeiro de Soure (PA) é apresentado na Figura 4-75, onde é possível observar a distribuição das 5 classes dessa componente (de muito baixa a muito alta). A análise do mapa revela a ocorrência da variação no sentido costa-interior conforme esperado e também observado na distribuição dos resultados da componente **sensibilidade**, onde observa-se um gradiente de classes de **resiliência** mais altas na costa para classes mais baixas nas áreas internas, além de diferenças entre as porções ao longo da costa do sistema costeiro de Soure, conforme detalhado a seguir.

O *proxy* de maior importância para a **resiliência** no sistema costeiro de Soure (PA) é o Trabalho (Figura 4-76), pois a Taxa de Afastamento (Figura 4-77) varia pouco nas áreas avaliadas desse sistema, e por ser alta em praticamente toda a área (com poucas exceções ao sul e áreas internas), interfere pouco no resultado final da **resiliência**.

A **resiliência** varia ao longo de toda a área de estudo, em que o sul apresenta áreas menos resilientes, enquanto a costa norte apresenta áreas mais resilientes, como pode ser exemplificado pela concentração das áreas de **resiliência** baixa e muito baixa ao sul, e constatado pela comparação entre os trechos da costa.

No trecho A, a **resiliência** é classificada principalmente como média, e também há ocorrência de áreas de **resiliência** alta e muito alta, especialmente na costa e no extremo sul desse trecho. Esse é o único trecho

com áreas com relevante extensão de **resiliência** muito baixa, que ocorrem principalmente em fundo de igarapés, padrão correspondente ao descrito para a **sensibilidade**. Nessa área, o Trabalho e Energia Cinética também são baixos (ver Capítulo 7, Figura 7-146 e Figura 7-147), indicando baixa circulação. A **resiliência** apresenta semelhanças nas porções intermediárias e norte (trechos B, C e D), onde há predomínio de **resiliência** média no interior e alta ou muito alta na costa. No trecho B, a **resiliência** varia entre média e muito alta, predominantemente; e no trecho C, entre alta e muito alta. Destaca-se que no trecho C, há a ocorrência pontual de **resiliência** baixa no interior. No trecho D, a **resiliência** é predominantemente média e alta, com trechos de **resiliência** muito alta na margem.

Observa-se que as áreas de **resiliência** muito alta concentram-se nas margens, enquanto no interior a **resiliência** chega a média ou baixa. Conforme ilustrado na Figura 7-147 (Volume 2, Capítulo 7), o Trabalho é mais elevado nas margens do que no interior do sistema costeiro de Soure (PA), especialmente nos trechos C e D. Assim, há um padrão geral de redução da **resiliência** no sentido costa-interior, em que a **resiliência** acompanha o gradiente topográfico e, consequentemente, o gradiente de frequência de inundação pelas marés (ver Volume 2, Capítulo 7, Figura 7-125) – ao diminuir a frequência de inundação, diminui também o Trabalho. Conforme descrito para a **sensibilidade**, destaca-se a importância dos igarapés para a **resiliência**, que por possuírem nível topográfico mais baixo, possibilitam a entrada da maré nas porções mais internas do sistema costeiro de Soure (PA). Nessas feições, a alta energia hidrodinâmica favorece a remoção física e biológica do óleo, e portanto, a resiliência.

A **resiliência** apresenta padrão oposto ao da **sensibilidade**, conforme esperado, já que respondem de formas opostas à circulação e frequência de inundação. Comparando essas duas componentes, observa-se que o resultado da **resiliência** no mapa é mais detalhado, pois as classes dessa componente apresentam maior discretização (cinco classes) quando comparada à **sensibilidade** (três classes).

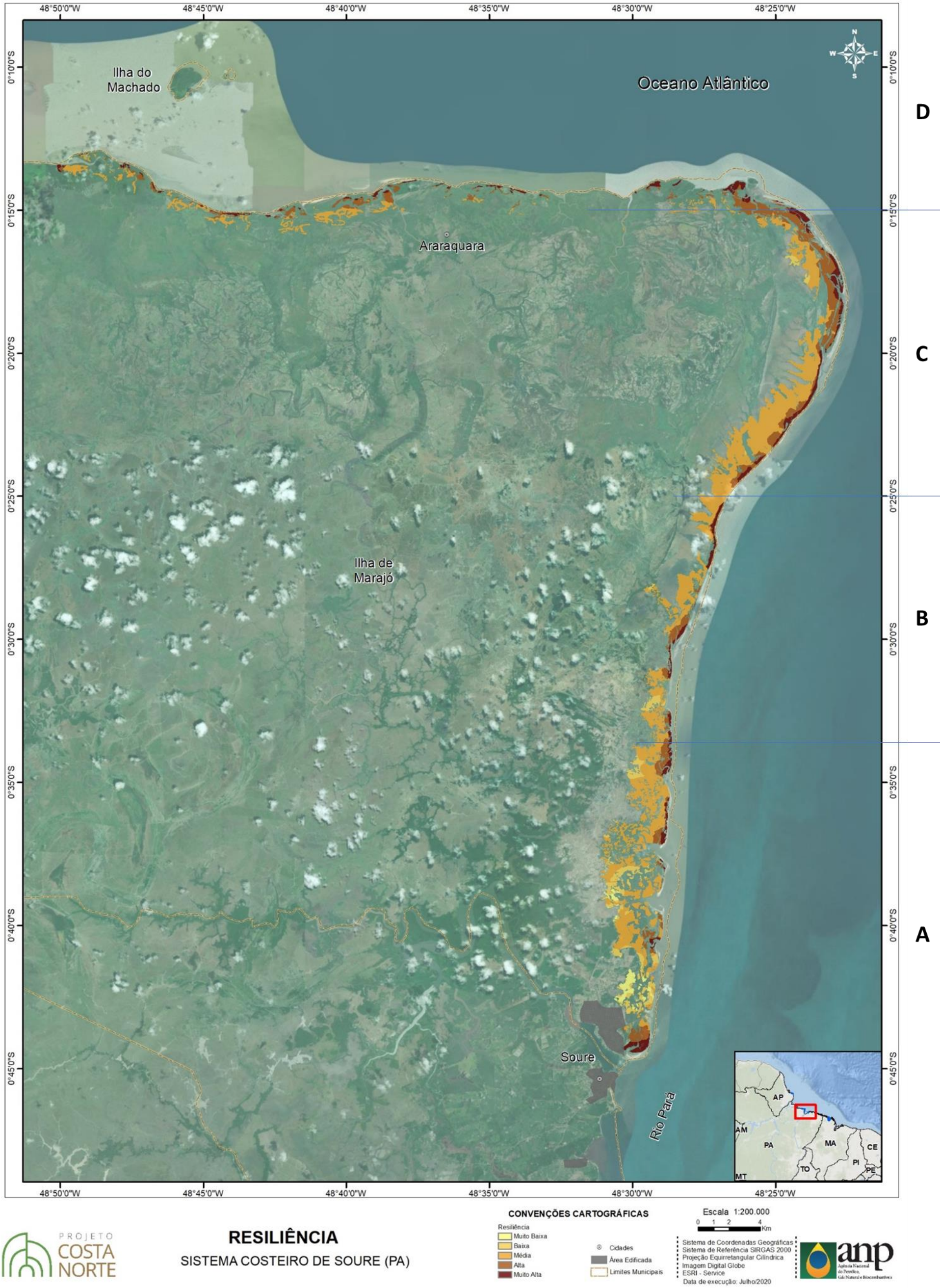


Figura 4-75: Resultados da **resiliência** das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

Figura 4-76: Trabalho (J), *proxy* da resiliência, do sistema costeiro de Soure (PA).

Figura 4-77: Taxa de Afastamento (m/h), *proxy* da **resiliência**, do sistema costeiro de Soure (PA).

4.3.4. Vulnerabilidade

Segundo a metodologia proposta no presente estudo, a **vulnerabilidade** é determinada pela integração de três componentes: **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência** em cada parcela das florestas de mangue, de acordo com a equação apresentada no Capítulo 3 - média ponderada das três componentes, onde **suscetibilidade** tem peso 5, a **resiliência** tem peso 3 e a **sensibilidade**, peso 2 -, resultando em uma matriz de **vulnerabilidade.** É importante ressaltar que as regiões não suscetíveis ao óleo são classificadas como não vulneráveis, independente do seu grau de **resiliência** e **sensibilidade.**

A **vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) é predominantemente baixa (52,9 a 87,8%) e média (10,9 a 42,6%), com baixa ocorrência de áreas não-vulneráveis (1,1 a 2,3%) nos quatro cenários analisados e ocorrência da classe alta em percentuais relevantes apenas no período seco (2,7 a 2,8%), pois no período chuvoso esses percentuais são 0,1 e 0,2%, como pode ser observado na Figura 4-78 para os quatro cenários estabelecidos.

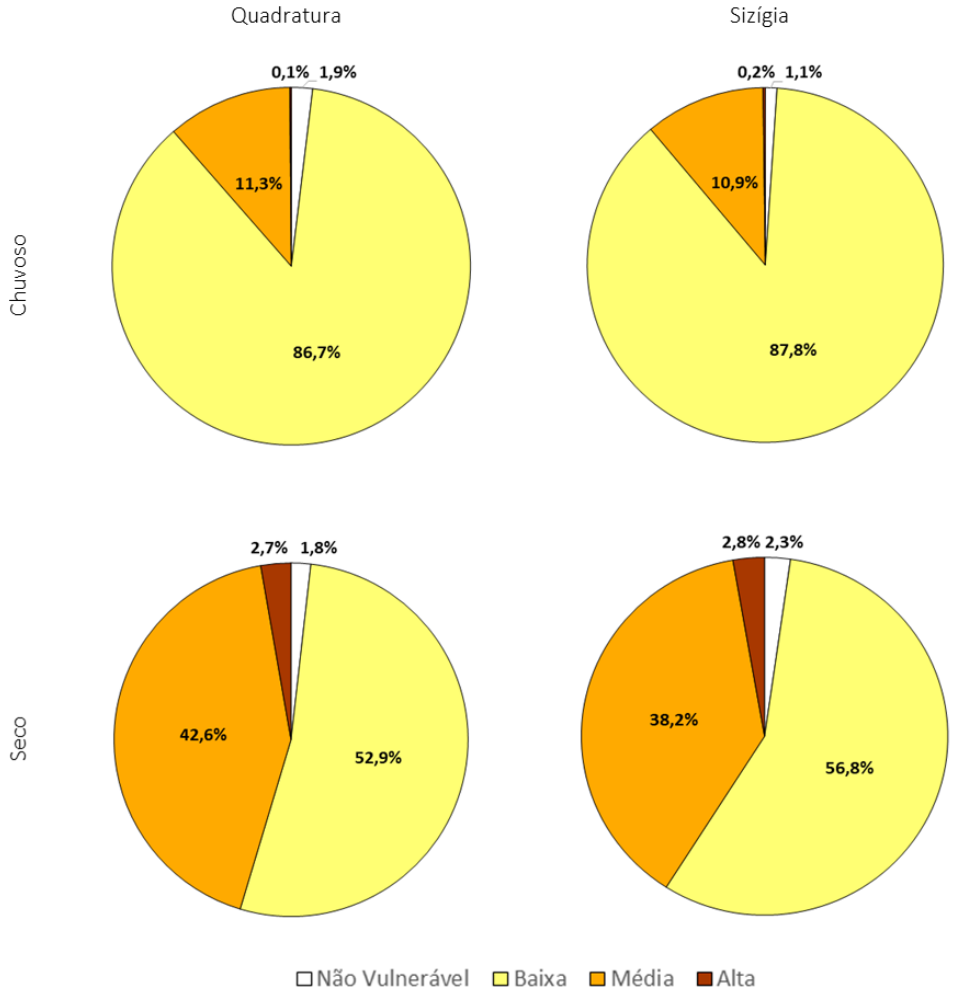


Figura 4-78: Distribuição geral das classes de **vulnerabilidade** nas florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) nos períodos chuvoso (acima) e seco (abaixo), nas condições de maré de quadratura (esquerda) e sizígia (direita).

A **vulnerabilidade** de cada região é analisada com base no resultado da combinação de suas componentes, conforme apresentado no Capítulo 3. Na Tabela 4-12, Tabela 4-13, Tabela 4-14 e Tabela 4-15 são apresentadas as combinações entre as componentes que ocorrem no sistema costeiro de Soure (PA) em cada um dos quatro cenários analisados e que resultam em determinada classe de vulnerabilidade, as quais

são indicadas pelas áreas da tabela nas diferentes cores. Os resultados menores que 0,005% foram desconsiderados e os resultados iguais ou maiores que 0,006%, foram arredondados para duas casas decimais, aparecendo como 0,01%.

O sistema costeiro de Soure (PA) apresentou múltiplas combinações entre as componentes, o que resultou em percentuais de ocorrência em diversas combinações entre as componentes de **vulnerabilidade**, evidenciando as muitas configurações existentes nesse sistema entra as componentes e a característica dinâmica desse sistema.

As configurações entre as componentes mais representativas para cada classe de **vulnerabilidade** – alta, média e baixa – estão destacadas a seguir.

A maior parte das florestas de mangue do sistema costeiro de Soure (PA) apresentam **vulnerabilidade** baixa principalmente no período chuvoso e estão associadas à duas configurações principais: (i) **suscetibilidade** baixa, **sensibilidade** muito alta e **resiliência** alta ou média; e (ii) **suscetibilidade** média, **sensibilidade** alta e **resiliência** alta, sendo essa última configuração mais comum no período chuvoso.

As áreas de florestas de mangue que apresentam **vulnerabilidade** média ocorrem em locais com **suscetibilidade** média, **sensibilidade** muito alta e **resiliência** alta ou média. Sua contribuição é mais relevante no período seco.

As poucas áreas de florestas de mangue que apresentam **vulnerabilidade** alta (até 3%) no sistema costeiro de Soure (PA) estão associadas à duas configurações principais entre as componentes: (i) locais com **suscetibilidade** alta e **sensibilidade** muito alta, mesmo que a **resiliência** seja alta; (ii) florestas com **suscetibilidade** média, porém com **sensibilidade** extremamente alta e **resiliência** baixa. Ocorrem em ambos os períodos sazonais, mas sua contribuição é mais relevante no período seco.

As áreas não vulneráveis correspondem a menos de 2,5% do total, considerando todos os cenários. A baixa ocorrência de áreas não vulneráveis é explicada pelas áreas de **não suscetíveis** serem raras, pontuais e localizadas apenas em áreas mais internas do sistema costeiro de Soure (PA). Conforme discutido para a **suscetibilidade**, esse padrão relaciona-se principalmente às condições meteoceanográficas e à topografia da área.

Tabela 4-12: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período chuvoso em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			0,84%			6,16%			2,68%
	4 (alta)		0,04%	0,15%		5,95%	9,64%		26,11%	7,93%
	3 (média)				0,02%	1,58%	0,16%	0,58%	28,84%	0,13%
	2 (baixa)				0,09%	0,25%	<0,005%	1,40%	6,27%	0,10%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,04%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-13: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período chuvoso em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			0,96%			6,23%			2,49%
	4 (alta)		0,04%	0,23%		5,60%	8,88%		26,45%	8,62%
	3 (média)				0,05%	1,41%	0,16%	0,54%	28,93%	0,13%
	2 (baixa)				0,16%	0,08%	0,01%	1,53%	6,43%	0,09%
	1 (mto. baixa)							0,03%	0,03%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-14: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período seco em maré de quadratura. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			2,13%			7,56%			
	4 (alta)		1,73%	1,77%		19,07%	15,07 %		11,28%	0,88%
	3 (média)	0,01%	0,09%		0,40%	14,19%	0,21%	0,14%	15,90%	0,08%
	2 (baixa)	<0,005%	<0,005%		0,67%	3,27%	0,07%	0,74%	2,90%	0,03%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,04%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

Tabela 4-15: Matriz de **vulnerabilidade** para o sistema costeiro de Soure (PA), cenário do período seco em maré de sizígia. Os valores representam o percentual de ocorrência de cada combinação entre as componentes que resultam em uma dada classe de vulnerabilidade e as cores representam as classes de vulnerabilidade. As células vazias representam as combinações que não ocorreram neste cenário.

		Suscetibilidade 5 (alta)			Suscetibilidade 3 (média)			Suscetibilidade 1 (baixa)		
	Sensibilidade	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)	5 (ext. alta)	3 (mto. alta)	1 (alta)
Resiliência	5 (mto. alta)			2,13%			7,55%			<0,005%
	4 (alta)		1,78%	1,75%		16,12%	14,11%		14,17%	1,86%
	3 (média)	0,01%	0,09%		0,40%	12,72%	0,22%	0,14%	16,83%	0,08%
	2 (baixa)	<0,005%	<0,005%		0,65%	2,77%	0,06%	0,80%	3,39%	0,03%
	1 (mto. baixa)							0,01%	0,04%	

Vulnerabilidade: Alta Média Baixa Não vulnerável

A análise da **vulnerabilidade** a partir de suas componentes pode ser considerada também espacialmente. A seguir, essa análise é abordada por trechos (A a D) e em um cenário, com o objetivo de facilitar o entendimento dos padrões encontrados. O cenário selecionado é o período seco na maré de quadratura, por ser esse o cenário em que o sistema costeiro de Soure (PA) encontra o maior risco.

O trecho A apresenta **suscetibilidade** intermediária (média e baixa), elevada **sensibilidade** (muito alta, alta e extremamente alta em igarapés) e **resiliência** intermediária (média), causadas pela baixa energia hidrodinâmica encontrada. A combinação entre essas condições colocam esse trecho entre os mais vulneráveis dessa área de estudo, onde a **vulnerabilidade** é predominantemente classificada como média e baixa, com locais de alta **vulnerabilidade**.

No trecho B, as componentes apresentam-se geralmente nas faixas intermediárias, como a **suscetibilidade** (média), a **sensibilidade** (muito alta e alta) e a **resiliência** (média e muito alta). Como resultado, a **vulnerabilidade** é classificada como média e baixa nesse trecho.

No trecho C, a combinação entre a **suscetibilidade** intermediária (média, com trechos de baixa e alta), a **sensibilidade** também intermediária (muito alta e alta) e a elevada **resiliência** (alta), levam à reduzida **vulnerabilidade** encontrada (baixa com áreas de média no interior). Assim, a **vulnerabilidade** no trecho C é a menor (baixa a média) dessa área de estudo.

O trecho D é o de maior **vulnerabilidade** dessa área de estudo, em que predominam as classes de **vulnerabilidade** alta e média. Esse é o resultado da elevada **suscetibilidade** (alta) e **sensibilidade** (muito alta) com **resiliência** intermediária (média), predominantemente.

Os **mapas de vulnerabilidade das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo em evento acidental** são apresentados conforme os quatro cenários de estudo propostos. Os cenários de marés de sizígia e quadratura no período chuvoso encontram-se na Figura 4-79 e na Figura 4-80, respectivamente; e os cenários de marés de quadratura e sizígia no período seco encontram-se na Figura 4-81 e na Figura 4-82, respectivamente.

A **vulnerabilidade** das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) à contaminação por óleo em evento acidental é predominantemente baixa no período chuvoso e predominantemente média e baixa no período seco, com a ocorrência das três classes em todos os cenários, embora a classe alta ocorra apenas pontualmente. A **vulnerabilidade** apresenta variação espacial entre os trechos da costa e entre os períodos sazonais (chuvoso ou seco), mas pouca influência é percebida em relação às condições de maré (quadratura ou sizígia) nos resultados da **vulnerabilidade**, conforme descrito a seguir.

A **vulnerabilidade** é variável ao longo da costa, resultado alinhado com os resultados observados para as componentes **suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**, conforme esperado. O sul da costa leste (trecho A) e a costa norte (trecho D) são as únicas áreas onde as classes com **vulnerabilidade** alta são encontradas e onde a classe média ocupa área maior quando comparados aos trechos B e C. Em comparação, os trechos intermediário e norte da costa leste (trechos B e C, respectivamente) são menos vulneráveis.

O período sazonal (chuvoso ou seco) influencia a **vulnerabilidade** devido ao seu efeito sobre a **suscetibilidade**. Conforme explicado na para a **suscetibilidade**, o padrão de dispersão distinto entre os períodos chuvoso e seco é influenciado pelas condições meteoceanográficas atuantes na Margem Equatorial. No período seco, a região encontra-se exposta aos ventos alísios do quadrante leste e sudeste, em geral mais intensos que no período chuvoso. Esse padrão de ventos contribui para que, no período seco, o óleo vazado nas bacias efetivas da MEB seja transportado com mais frequência para a plataforma

continental, aumentando assim a probabilidade de presença de óleo na zona costeira. Essas características, portanto, determinam que no período chuvoso, a vulnerabilidade é menor, quando comparado ao período seco.

No período chuvoso, a vulnerabilidade nos trechos A, B e C apresenta-se predominantemente baixa, com a ocorrência de vulnerabilidade média em áreas específicas, principalmente nas áreas interiores, apesar de haver algumas exceções. Entre esses, apenas no trecho A há um ponto específico onde a vulnerabilidade é alta. O trecho D também apresenta vulnerabilidade predominantemente baixa, no entanto essa classe ocorre no interior e as áreas de vulnerabilidade média são mais abundantes em comparação aos outros trechos e geralmente ocorrem próximos à costa.

No período seco, a suscetibilidade no sistema costeiro de Soure (PA) é maior quando comparada ao período chuvoso, o que aumenta também a vulnerabilidade do sistema nesse período, quando mais áreas apresentam vulnerabilidade média. A vulnerabilidade no trecho A é média e baixa, com a ocorrência de vulnerabilidade alta em locais específicos. No trecho B, a vulnerabilidade é predominantemente média, com áreas de vulnerabilidade baixa. O trecho C apresenta vulnerabilidade baixa, com áreas internas de vulnerabilidade média. O trecho D apresenta a vulnerabilidade mais alta dessa área de estudo, que é predominantemente alta na costa, com áreas de vulnerabilidade média nos trechos intermediários (no sentido costa-interior) e vulnerabilidade baixa apenas em locais específicos interior.

A vulnerabilidade é pouco variável entre os cenários de condições de maré – sizígia e quadratura, resultado alinhado com o comportamento da suscetibilidade nestes dois cenários. Pode-se observar em alguns trechos uma ligeira tendência à maior vulnerabilidade na maré de quadratura quando comparada à maré de sizígia.

Não há um padrão uniforme da vulnerabilidade no sentido costa-interior que caracterize toda a costa. O padrão no sentido costa-interior foi identificado nas componentes, mas para a vulnerabilidade, cada trecho apresenta particularidades de resposta, ora com vulnerabilidade alta na costa, ora no interior, dependendo do trecho. Isso acontece porque cada trecho responde de forma muito específica a cada uma das componentes, assim a combinação entre as componentes pode compensar ou reforçar determinado padrão, dependendo da área, amenizando o padrão no sentido costa-interior identificado para as componentes isoladamente.

Assim, destaca-se o sistema costeiro de Soure (PA) como muito dinâmico, em que os trechos da costa apresentam características diversas por estarem sujeitos a diferentes combinações entre as forçantes que atuam na determinação das componentes e, consequentemente, na vulnerabilidade desse sistema.

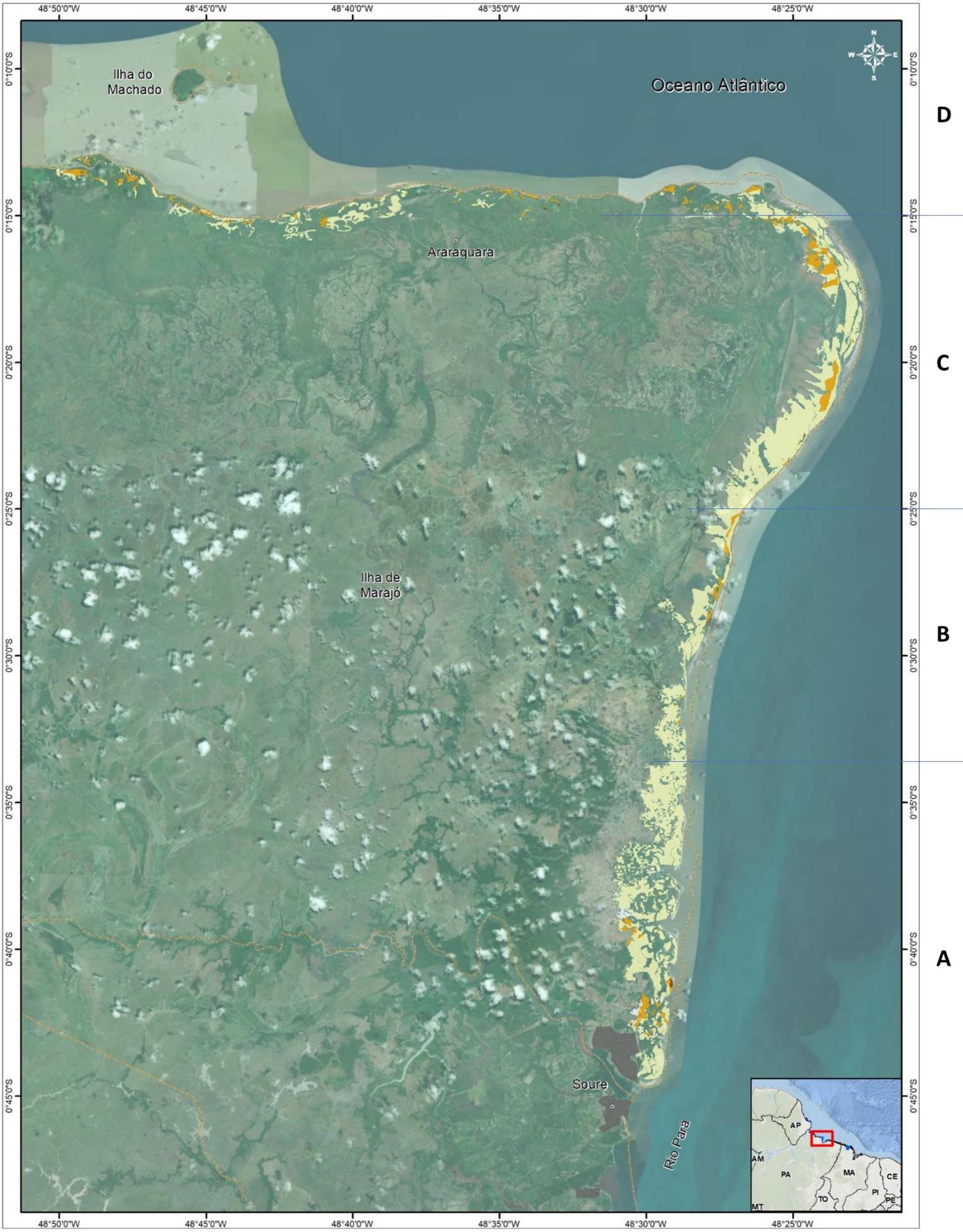


Figura 4-79: Vulnerabilidade das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período chuvoso e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

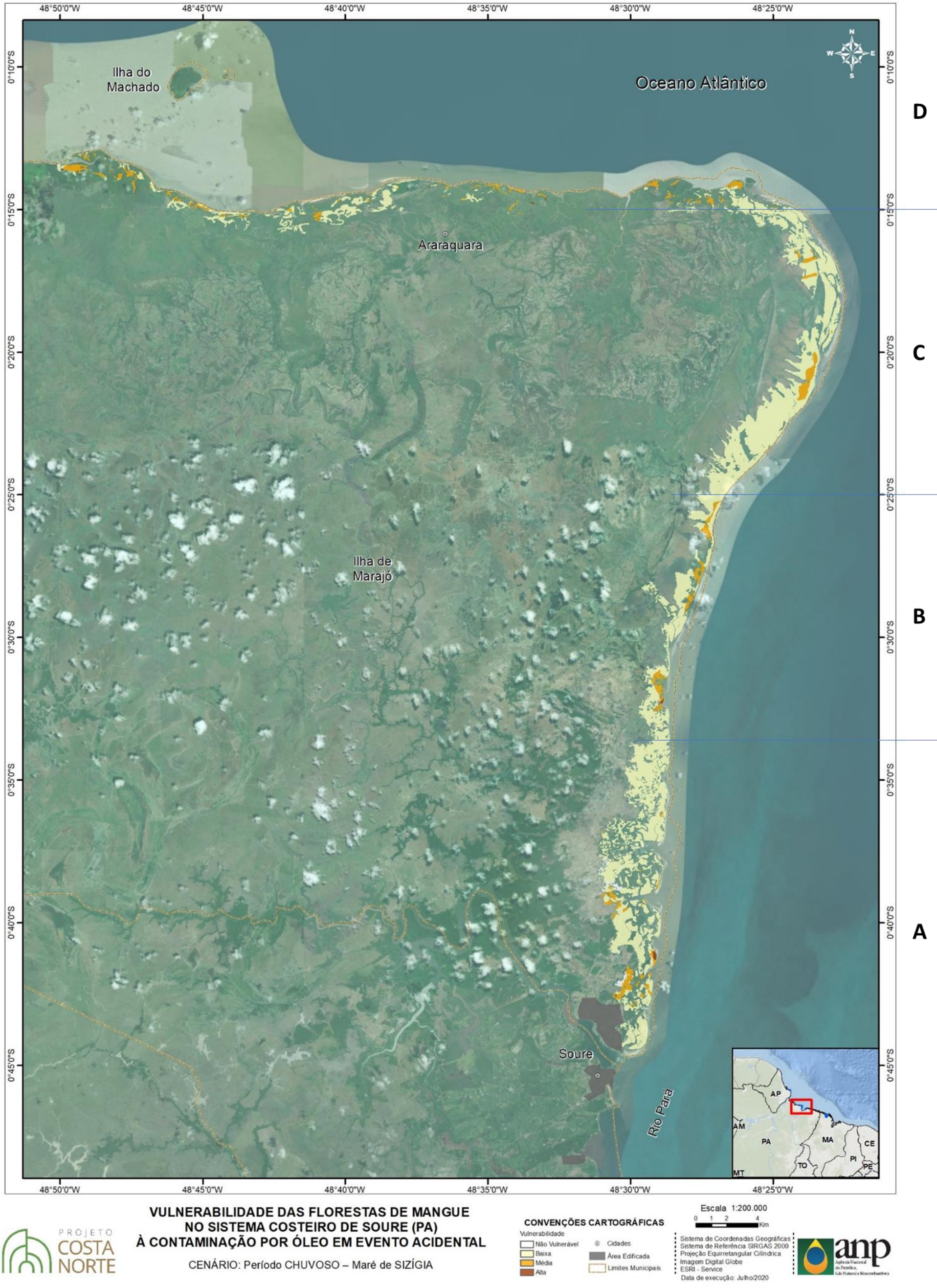


Figura 4-80: Vulnerabilidade das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período chuvoso e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

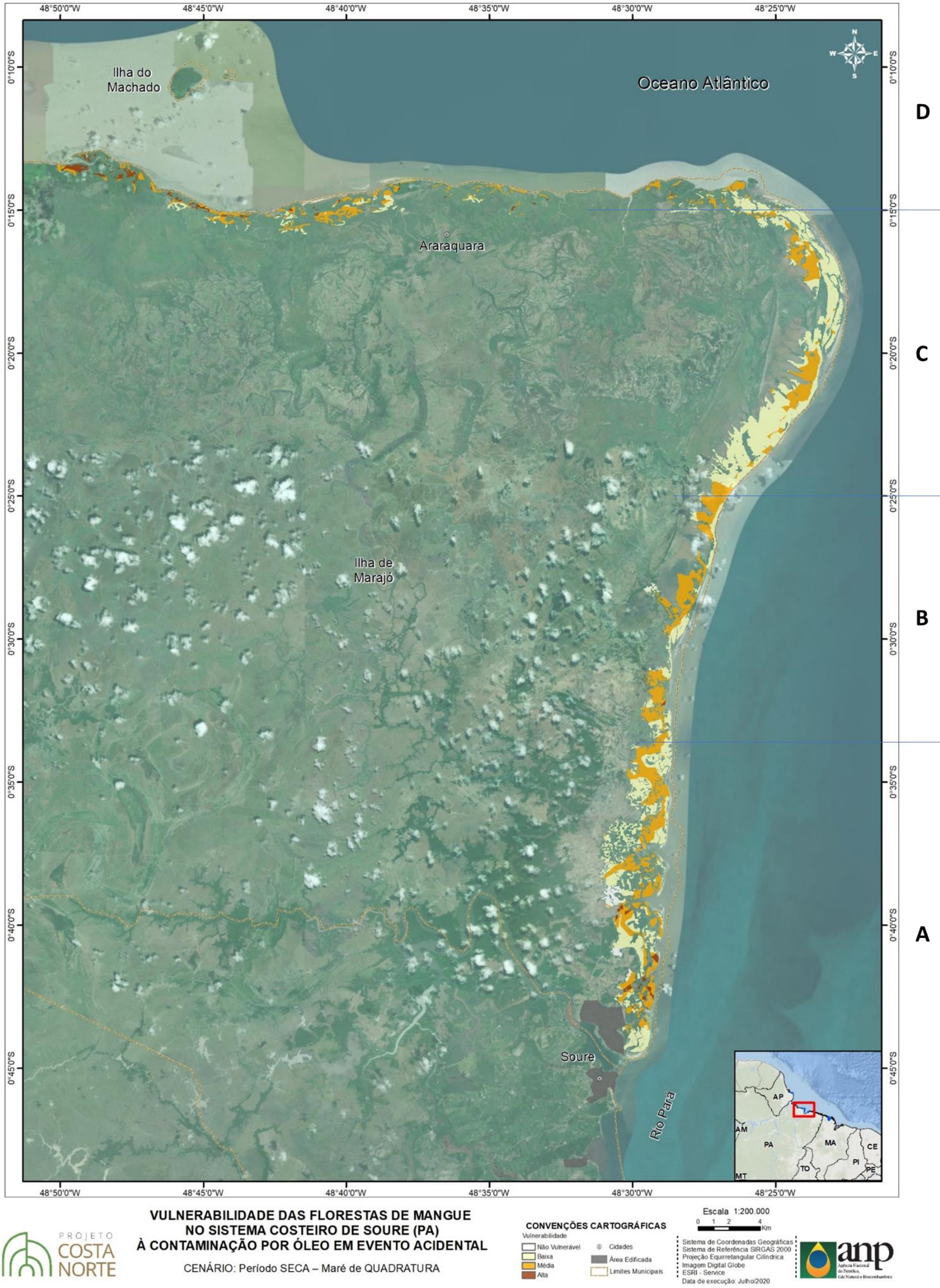


Figura 4-81: Vulnerabilidade das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período seco e maré de quadratura. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

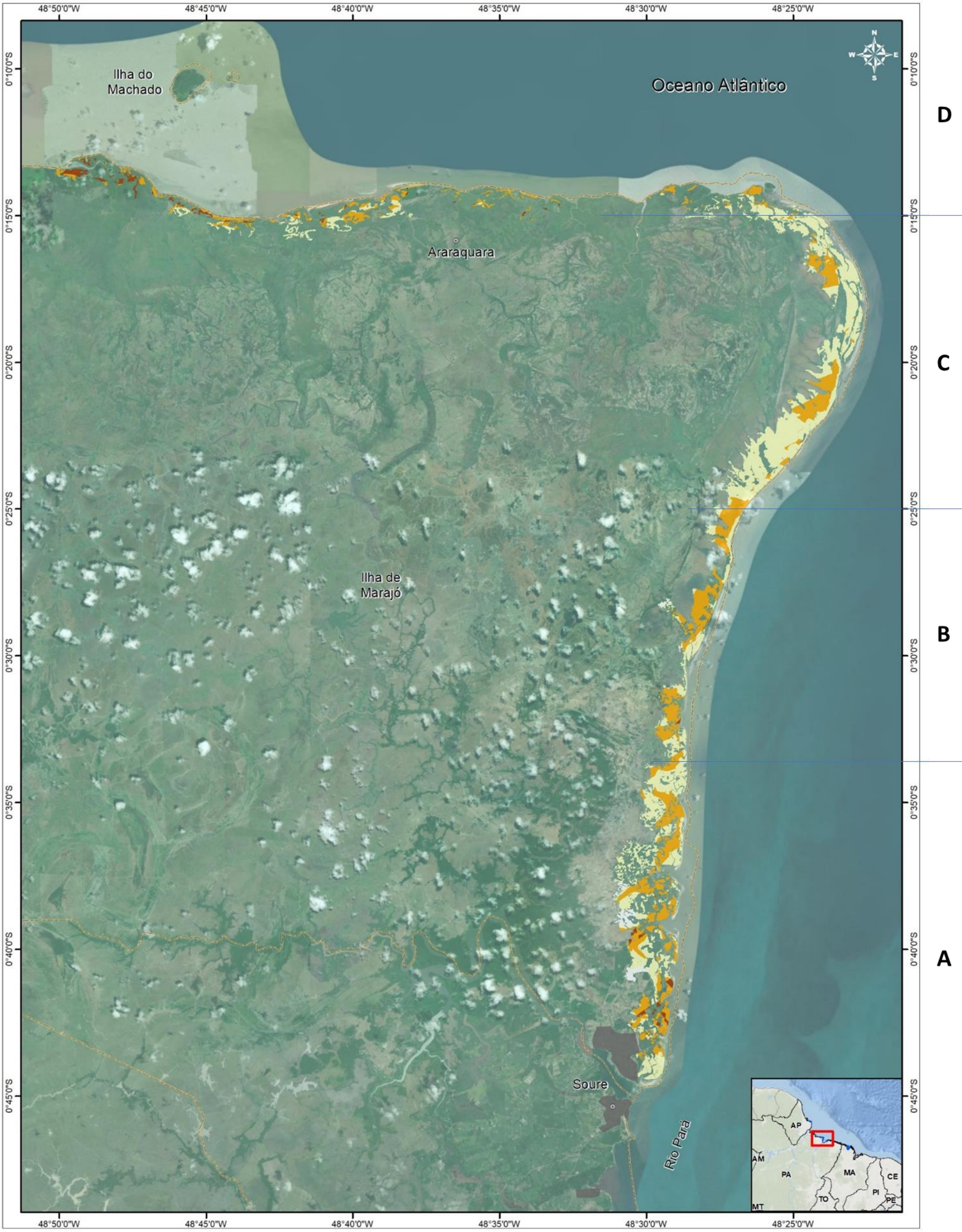


Figura 4-82: Vulnerabilidade das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA) representativo do período seco e maré de sizígia. A - porção mais ao sul da costa leste; B - porção intermediária da costa leste; C - porção ao norte da costa leste; D - costa norte.

As fitofisionomias representam o detalhamento das florestas de mangue, e revelam a variabilidade que pode ser observada na vegetação desse ecossistema. A identificação das fitofisionomias abordadas no presente Capítulo considerou a combinação entre a composição de espécies e a altura do dossel, conforme descrito no Volume 2, Capítulo 10. Para o sistema costeiro de Soure (PA), a composição pode ser de *Avicennia germinans* (Av); *Rhizophora* spp. (Rh); Mista (combinação entre as duas espécies citadas anteriormente) e Espécies Associadas (Ass). As classes de altura de dossel atribuídas a esse sistema são: até 7 m; de 7 a 17 m; de 17 a 25 m; e maior 25 m.

A partir da espacialização das fitofisionomias encontradas no sistema costeiro de Soure (PA), apresenta-se a análise de integração entre as fitofisionomias e as classes de vulnerabilidade. Na Tabela 4-16, o percentual de cada fitofisionomia nas classes de vulnerabilidade baixa, média e alta é apresentado. A espacialização dos resultados pode ser observada nos mapas de integração dos resultados de vulnerabilidade ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue, conforme os cenários estabelecidos para o período chuvoso (Figura 4-87 e Figura 4-88) e seco (Figura 4-89 e Figura 4-90), nas marés de quadratura e sizígia, respectivamente.

Não é possível, em linhas gerais, estabelecer uma relação direta entre as diferentes fitofisionomias e o grau de vulnerabilidade à contaminação por óleo no sistema costeiro de Soure (PA). Em cada um dos cenários, os percentuais em cada classe de vulnerabilidade são semelhantes entre as florestas com diferentes composições de espécies. Por exemplo, no cenário chuvoso em condição de maré de quadratura, as florestas com vulnerabilidade média correspondem a 1,4 a 14,9% das florestas dominadas por *Avicennia germinans* e espécies associadas, respectivamente. No cenário seco em condição de maré de sizígia, as florestas com vulnerabilidade média correspondem a 27,4 a 57,1% das florestas dominadas por *Avicennia germinans.*

No período chuvoso, a vulnerabilidade da maior parte das florestas foi classificada como baixa, sem distinção clara entre as espécies ou classes de altura (Erro! Fonte de referência não encontrada., REF _Ref46483210 \h Erro! Fonte de referência não encontrada. e Tabela 4-16). Nesse cenário, as florestas com vulnerabilidade baixa correspondem entre 81,0% (Mista 7-17m) e 98,6% (Av > 25 m) do total. O percentual das florestas com vulnerabilidade média variou entre 1,2% (Av 7-17m) e 17,6% (Ass < 7 m). Entre as florestas com vulnerabilidade alta, o percentual variou entre 0,1% (fitofisionomias de variadas alturas de *Rhizophora* spp., espécies associadas e mistas) e 0,9% (Mista 7-17 m).

No período seco, a vulnerabilidade da maior parte das florestas divide-se entre baixa e média, sem distinção entre as espécies ou classes de altura (Erro! Fonte de referência não encontrada., Erro! Fonte de referência não encontrada. e Tabela 4-16). Nesse cenário, as florestas com vulnerabilidade baixa correspondem entre 41,3% (Av > 25 m) e 67,7% (Av < 7 m) das florestas. O percentual das florestas com vulnerabilidade média variou entre 27,4% (Av < 7 m) e 57,3 (Av > 25 m). Entre as florestas com vulnerabilidade alta, o percentual variou entre 1,2% (Mista 17 – 23 m) e 6,3% (Ass 17-25 m).

Assim, podemos dizer que a faixa de variação da vulnerabilidade entre as florestas com diferentes composições é bastante semelhante, como ocorre também entre as faixas de altura encontradas para tais florestas. Conclui-se que não há uma fitofisionomia que se destaque como mais ou menos vulnerável em comparação com as demais. Esse resultado pode estar relacionado às características do sistema costeiro, que é aberto e muito dinâmico, em que a as componentes da vulnerabilidade

atuam de maneiras distintas, podendo compensar ou reforçar determinado padrão, dependendo da área.

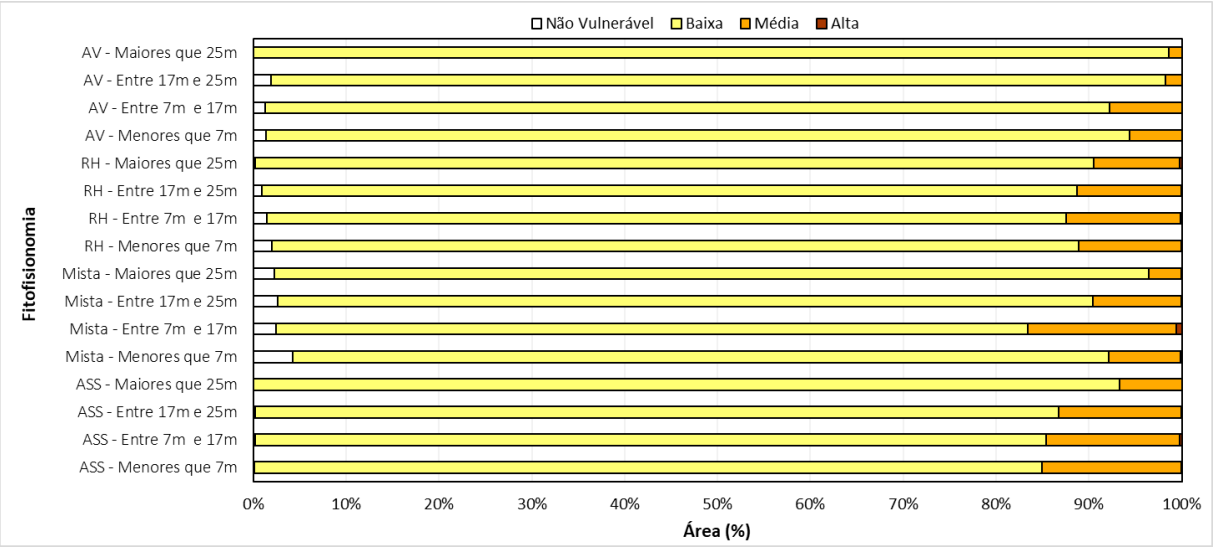


Figura 4-83: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período chuvoso e maré de quadratura.

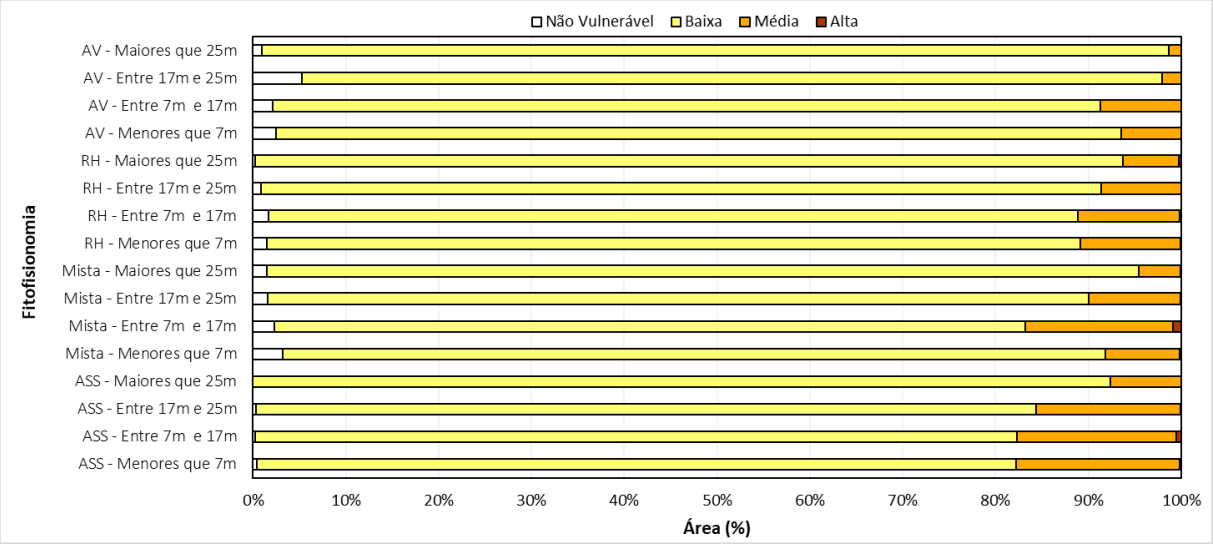


Figura 4-84: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período chuvoso e maré de sizígia.

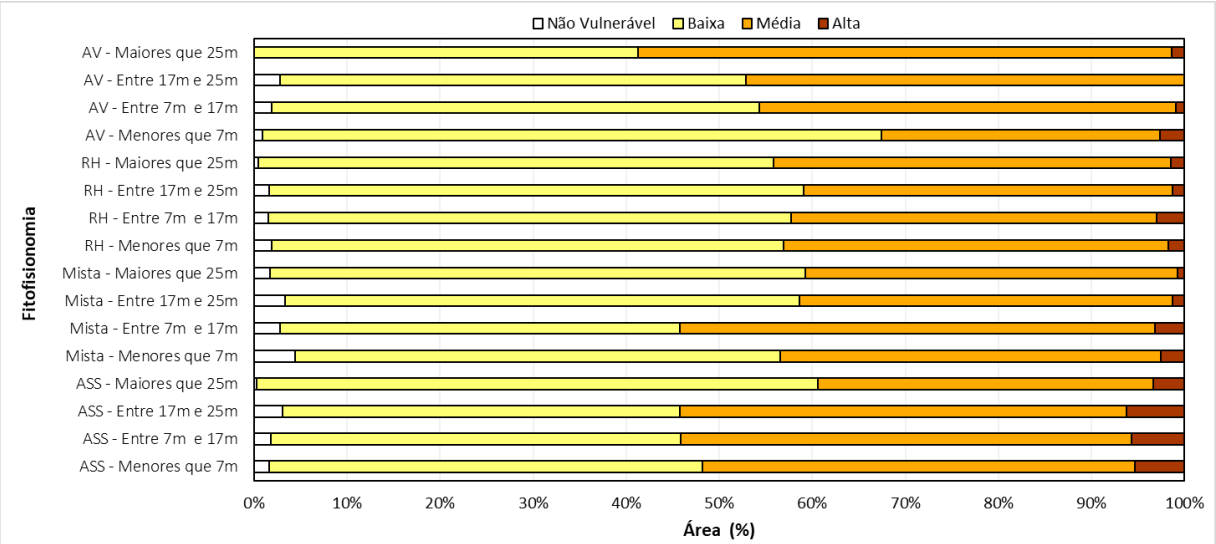


Figura 4-85: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período seco e maré de quadratura.

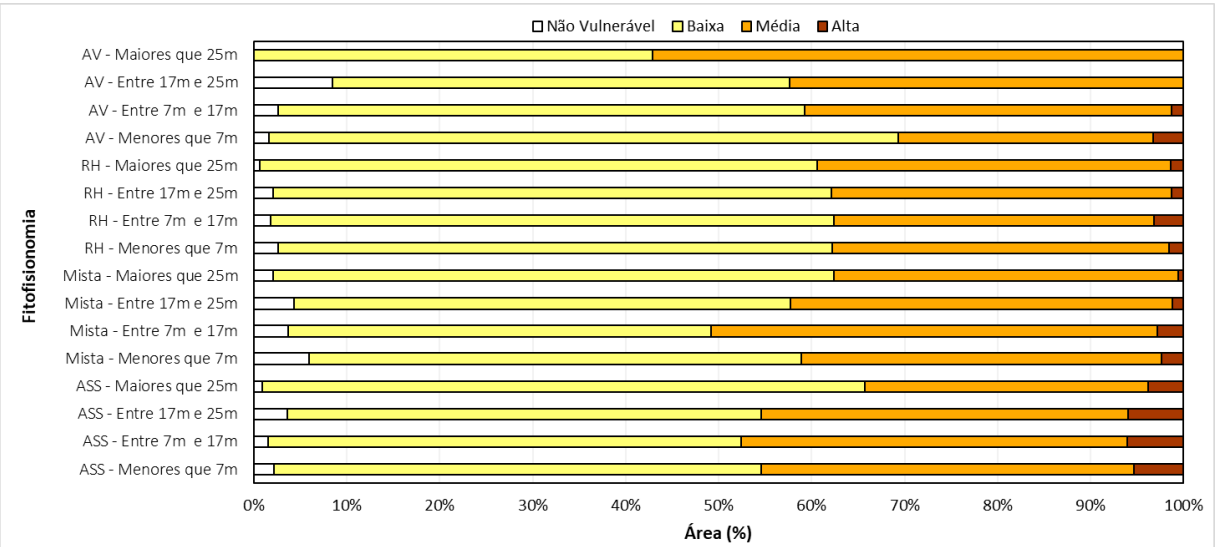


Figura 4-86: Distribuição em área relativa (%) das classes de **vulnerabilidade** – não-vulnerável, baixa, média e alta – por fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), no período seco e maré de sizígia.

Tabela 4-16: Percentual das classes de **vulnerabilidade** (baixa, média, alta e não vulnerável) em cada fitofisionomia no sistema costeiro de Soure (PA), conforme os cenários analisados.

Classes de Vulnerabilidade no sistema costeiro de Soure (PA) (%)																
Fitofisionomias	Chuvoso | Quadratura				Chuvoso | Sizígia				Seco | Quadratura				Seco | Sizígia			
	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta	NV*	Baixa	Média	Alta
ASS < 07	0,1	84,9	14,9	0,1	0,4	81,8	17,6	0,2	1,7	46,6	46,5	5,3	2,2	52,4	40,0	5,4
ASS 07-17	0,2	85,2	14,4	0,2	0,2	82,1	17,1	0,6	1,8	44,1	48,5	5,7	1,5	50,9	41,5	6,1
ASS 17-25	0,2	86,5	13,2	0,1	0,3	84,0	15,6	0,1	3,0	42,7	48,0	6,3	3,7	50,9	39,4	6,0
ASS > 25	0,0	93,3	6,7	0	0,0	92,4	7,6	0	0,2	60,3	37,0	3,4	1,0	64,8	30,5	3,8
Mista < 07	4,3	87,9	7,7	0,1	3,2	88,6	8,0	0,2	4,5	52,1	40,9	2,5	5,9	53,0	38,7	2,4
Mista 07-17	2,4	81,0	16,0	0,6	2,3	80,9	16,0	0,9	2,8	43,0	51,1	3,2	3,7	45,5	48,0	2,8
Mista 17-25	2,7	87,8	9,4	0,1	1,6	88,5	9,8	0,1	3,3	55,3	40,1	1,3	4,3	53,4	41,2	1,2
Mista > 25	2,3	94,2	3,5	0,1	1,5	94,0	4,5	0,1	1,7	57,6	40	0,7	2,1	60,3	37,0	0,6
RH < 07	2,0	86,9	11,0	0,1	1,4	87,6	10,8	0,1	1,9	55	41,4	1,7	2,6	59,6	36,2	1,6
RH 07-17	1,4	86,1	12,4	0,1	1,6	87,3	11,0	0,1	1,6	56,2	39,2	3	1,8	60,6	34,4	3,2
RH 17-25	0,9	87,8	11,2	0	0,9	90,5	8,6	0	1,6	57,5	39,6	1,3	2,1	60,0	36,6	1,3
RH > 25	0,2	90,3	9,2	0,3	0,2	93,5	6,0	0,3	0,4	55,4	42,7	1,5	0,6	60,0	38,0	1,4
AV < 07	1,3	93,0	5,6	0	2,5	91	6,5	0	0,9	66,5	29,9	2,6	1,6	67,7	27,4	3,2
AV 07-17	1,3	91,3	7,8	0	2,1	89,1	8,7	0	1,9	52,4	44,8	0,9	2,6	56,6	39,5	1,3
AV 17-25	1,9	96,4	1,7	0	5,3	92,7	2,0	0	2,8	50,1	47,1	0	8,5	49,2	42,4	0
AV > 25	0,0	98,6	1,4	0	1,0	97,7	1,4	0	0,0	41,3	57,3	1,4	0,0	42,9	57,1	0

ASS = Espécies Associadas; Mista = Floresta com composição mista de espécies; RH = *Rhizophora spp.*; AV = *Avicennia germinans*.
*Não Vulnerável

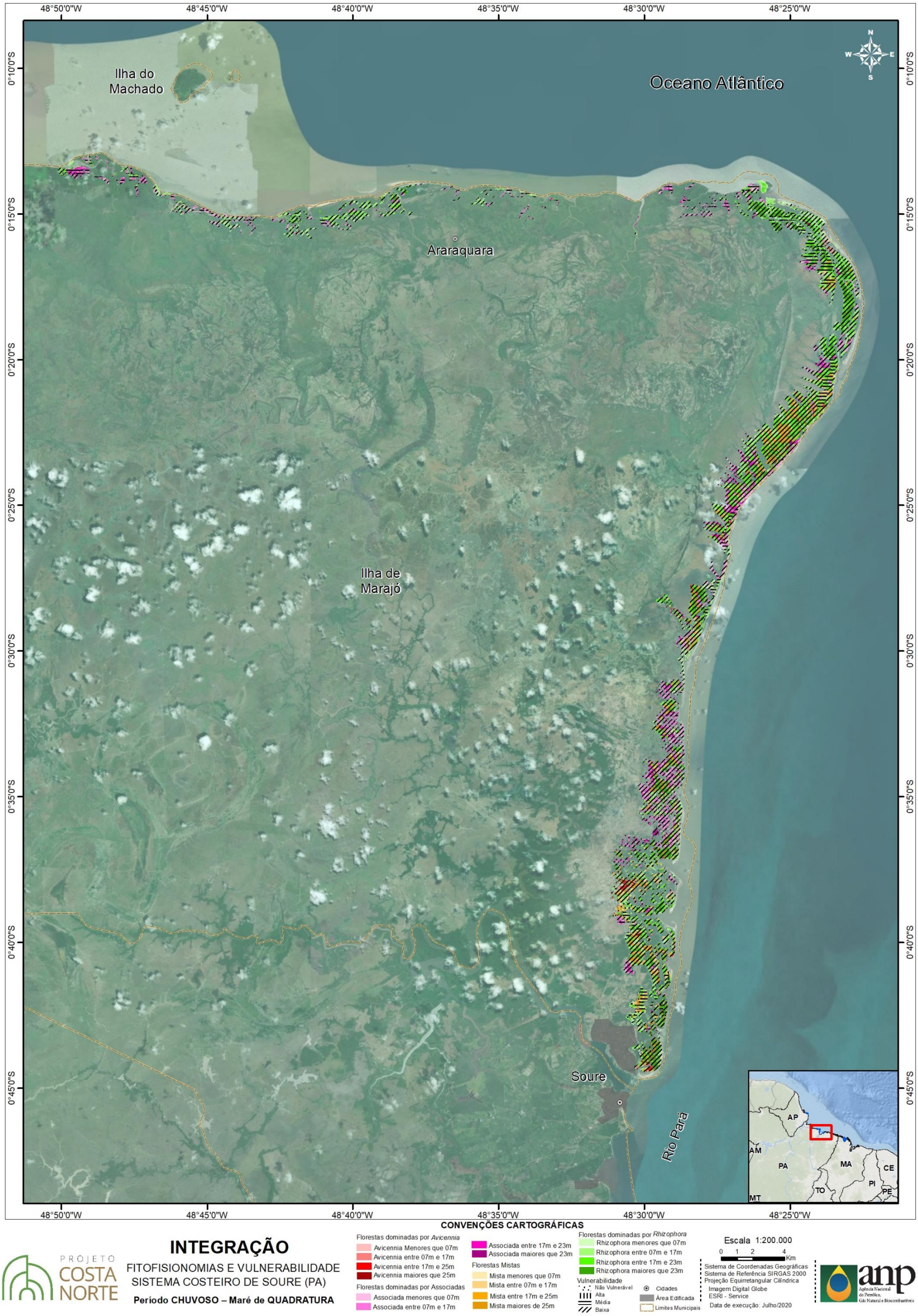


Figura 4-87: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período chuvoso e maré de quadratura.

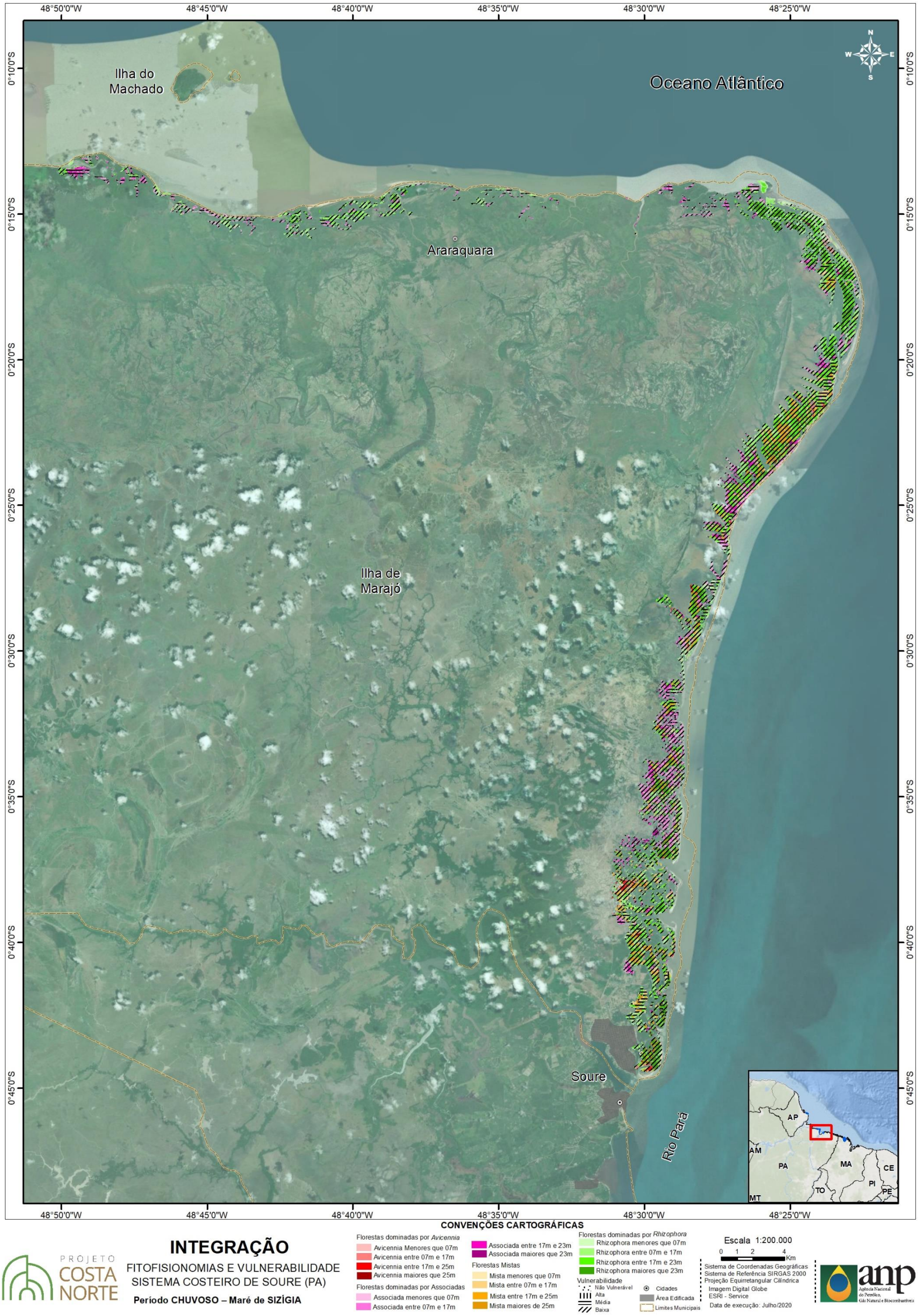


Figura 4-88: Integração dos resultados de **vulnerabilidade** ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período chuvoso e maré de sizígia.

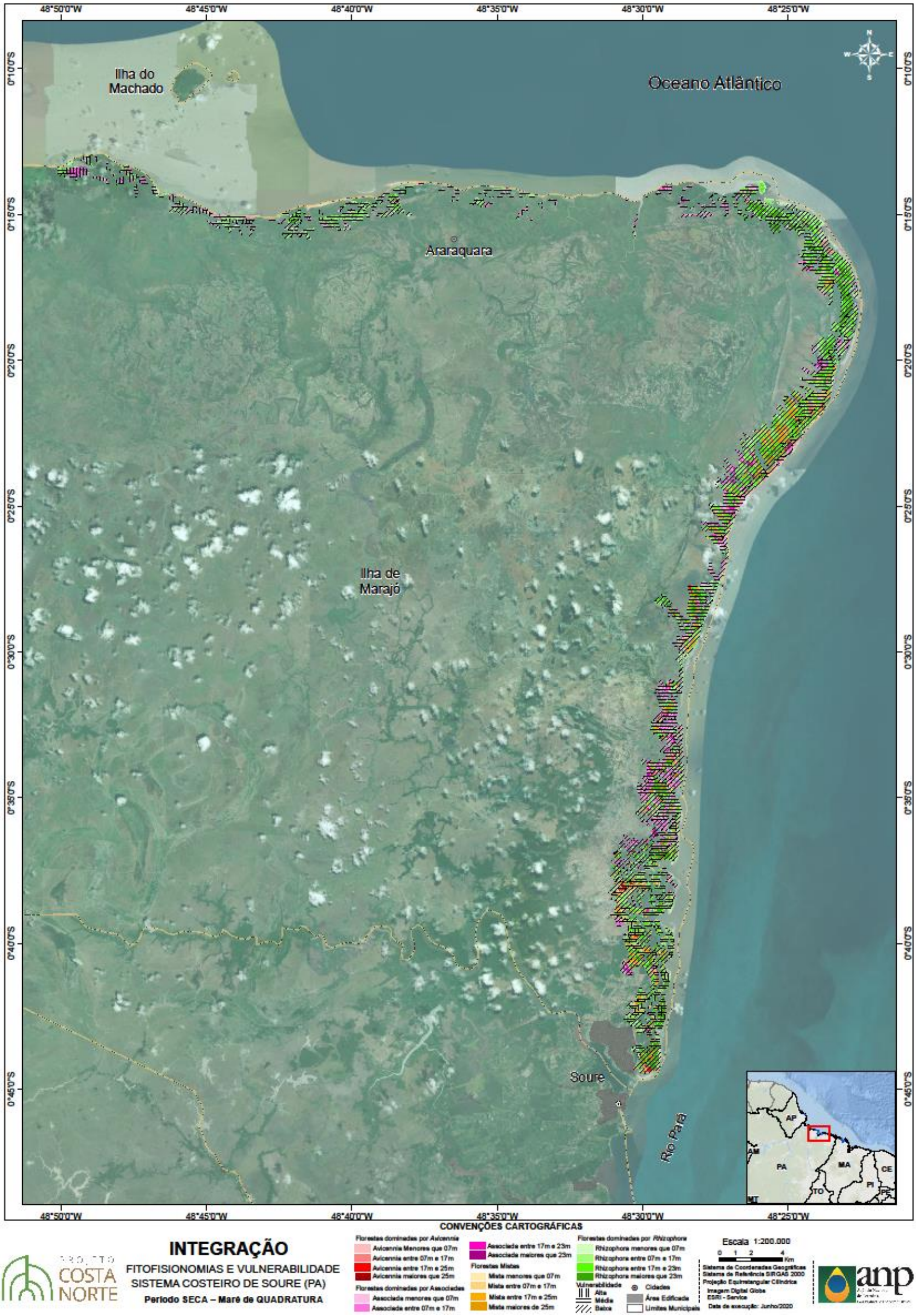


Figura 4-89: Integração dos resultados de vulnerabilidade ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período seco e maré de quadratura.

Figura 4-90: Integração dos resultados de vulnerabilidade ao mapeamento das fitofisionomias das florestas de mangue no sistema costeiro de Soure (PA), período seco e maré de sizígia.

4.4. Síntese da Análise de Vulnerabilidade nas Florestas de Mangue da MEB

A **vulnerabilidade** das florestas de mangue na Margem Equatorial Brasileira (MEB) a um vazamento acidental de óleo no mar foi analisada pelo Projeto Costa Norte através da aplicação da metodologia desenvolvida ao longo de quase 4 anos de atividades do projeto e buscou abranger as variações ambientais a que o ecossistema manguezal está sujeito nesse trecho da costa brasileira.

As análises de **vulnerabilidade** realizadas até então utilizam abordagens baseadas na probabilidade de toque de óleo na costa (**suscetibilidade**) e na **sensibilidade**, conforme exposto no Capítulo 3. No âmbito da **sensibilidade**, as Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (**Cartas SAO**), ressaltam a importância da abordagem baseada na **sensibilidade** dos diferentes ecossistemas costeiros. Dentre estes, os manguezais apresentam-se muito sensíveis, sendo classificados com o nível máximo de **sensibilidade**.

Os resultados alcançados pela metodologia desenvolvida no Projeto Costa Norte utilizaram o limite da tecnologia disponível atualmente e expandiram a abordagem da análise de **vulnerabilidade** para incluir a **resiliência** – não utilizada nas abordagens vigentes. A integração dessas três componentes (**suscetibilidade**, **sensibilidade** e **resiliência**) na análise de **vulnerabilidade** permite melhor avaliar e decidir sobre as medidas necessárias para proteção dos ecossistemas. As contribuições do presente projeto se destacam ainda pelas informações e conhecimento gerado sobre as florestas de mangue da MEB e o ambiente físico onde se desenvolvem e, com isso, adquirem a função de importante instrumento norteador do planejamento de medidas de contingência e respostas à emergência em caso de vazamento acidental de óleo e derivados no mar. O mapeamento final da **vulnerabilidade** das florestas de mangue é o resultado da integração das três componentes citadas e fornecem importantes informações para a tomada de decisão, considerando as características naturais peculiares a cada uma das três diferentes áreas de estudo onde a **vulnerabilidade** foi determinada. Adicionalmente, possibilita inserir nessa avaliação o detalhamento das florestas de mangue segundo as diferentes fitofisionomias identificadas na composição vegetal das florestas de mangue estudadas. Dessa maneira, o inédito material produzido poderá ser utilizado de forma consistente e robusta no auxílio da prevenção e mitigação dos impactos ambientais decorrentes de eventos acidentais com vazamento de óleo e derivados para o mar.

A probabilidade máxima de presença de óleo na região da MEB apresenta um comportamento sazonal bem marcado na dispersão do óleo desde as fontes em regiões *offshore* até a zona costeira e estuarina. Os resultados obtidos nas áreas de estudo contempladas pela análise da componente **suscetibilidade** mostram que há maiores probabilidades de presença de óleo no período seco (40 a 50% nas três áreas estudadas) quando comparadas ao período chuvoso (20 a 30% no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e sistema costeiro de Soure (PA); 30 a 40% na Baía de Turiaçu (MA). Esse padrão de dispersão, distinto entre os períodos chuvoso e seco, é influenciado pelas condições meteoceanográficas da MEB e apresenta efeitos específicos em cada área de estudo. Considerando os resultados da **vulnerabilidade**, destaca-se que as variações de resultados observadas entre os cenários – seco e chuvoso, marés de quadratura e sizígia – são determinadas pela combinação dos diferentes resultados da **suscetibilidade** nos diferentes cenários com as classificações de **resiliência** e **sensibilidade**.

No período seco, a influência dos ventos alísios de leste e sudeste, mais intensos neste período do que no período chuvoso, favorece que as fontes localizadas nas bacias efetivas da MEB ofereçam maior risco à zona costeira, aumentando as probabilidades de toque de óleo na zona. No período chuvoso, o padrão de transporte apresenta maior variabilidade direcional e, portanto, as fontes de vazamento apresentam uma área com probabilidade de toque maior, porém com menores probabilidades associadas. Com isso, nesse período, as probabilidades do óleo atingir a zona costeira são menores.

Nas baías e estuários das áreas de estudo, como padrão geral, nota-se um gradiente de maiores probabilidades de toque por óleo nas porções externas dessas feições costeiras quando comparado às porções estuarinas mais internas, como observado principalmente no estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e na Baía de Turiaçu (MA) e, de forma mais branda, no sistema costeiro de Soure (PA). Esse padrão pode ser explicado pela maior proximidade dessas áreas com as fontes de vazamento – favorecendo maiores probabilidades de toque nas porções externas – e pela descarga fluvial dos rios, que determinam um transporte residual para fora do estuário ou baía – diminuindo as probabilidades de toque nas porções mais internas. No sistema costeiro de Soure (PA), observam-se menores probabilidades de toque de óleo nos trechos mais ao sul da costa leste enquanto que a costa norte, mais exposta, apresenta as maiores probabilidades de toque. Isso ocorre por esse sistema apresentar-se com conformação menos entrecortada e mais aberta, às margens do rio Pará, próximo a sua foz.

A tendência geral de dispersão do óleo na MEB no sentido leste-oeste tem como principal consequência a maior exposição dos trechos da costa expostos para leste enquanto os trechos da costa expostos para oeste tendem a menor probabilidade de toque de óleo. Esse efeito pode ser notado na distribuição das classes de vulnerabilidade em cada área de estudo. No estuário de São Caetano de Odivelas (PA) e na Baía de Turiaçu (MA), por exemplo, a maior parte das áreas não vulneráveis encontram-se no eixo leste dos sistemas (expostos para oeste). O sistema costeiro de Soure, por sua conformação, desenvolvendo-se no sentido sul-norte, tem boa parte de sua face exposta para leste e, consequentemente, muito poucas áreas classificadas como não vulneráveis.

As florestas de mangue da MEB estão, ainda, sujeitas às intensas e dinâmicas alterações geomorfológicas impostas principalmente pelo regime climático – padrão de ventos – e a ocorrência de macromarés – gerando correntes de maré de grande intensidade, características que influenciam na formação de feições costeiras peculiares, como extensas planícies de lama ou areia, e em intensas modificações nos limites entre os ambientes erosivos e deposicionais. As rápidas variações da geomorfologia local influenciam diretamente os resultados obtidos nas análises de vulnerabilidade realizadas nas áreas de estudo. A formação de bancos de sedimentos que se configuram como áreas passíveis de colonização por espécies de mangue em locais mais baixos e suscetíveis é um exemplo. Essa característica de intensa dinâmica sedimentar em áreas estuarinas da MEB não foi analisada durante esse estudo, no entanto, sua ocorrência foi percebida em diferentes locais durante as atividades de campo e na análise das imagens de satélites realizadas no âmbito do projeto.

As características gerais citadas quanto à probabilidade de toque de óleo na zona costeira e estuarina, aos padrões de dispersão do óleo a partir das fontes de simulação de vazamentos localizadas ao longo das bacias efetivas da MEB e a geomorfologia costeira determinam que as análises de vulnerabilidade apresentem diferentes resultados nas áreas de estudo. Na Baía de

Turiaçu (MA), a **vulnerabilidade** é predominantemente baixa (entre 54% e 78% da área de florestas de mangue, conforme o cenário analisado). Observa-se, em menor proporção, florestas localizadas em áreas classificadas com **vulnerabilidade** média (oscilando entre 2% e 13% segundo o cenário analisado). A classe **vulnerabilidade** alta ocorre apenas nos cenários de período seco e ainda assim em pequenas áreas no interior das florestas assim como nas transições com as planícies hipersalinas. Destaca-se ainda que grande parcela das florestas de mangue da Baía de Turiaçu (MA) (20% a 33%) encontram-se localizadas em áreas classificadas como não vulnerável à contaminação por óleo.

O estuário de São Caetano de Odivelas (PA) apresenta predomínio de florestas de mangue localizadas em áreas classificadas com **vulnerabilidade** baixa (51,7 a 73,1%) ou não-vulneráveis (26,4 a 46,6%), padrão regido, sobretudo, pela predominância de florestas de mangue localizadas em áreas classificadas como **suscetibilidade** baixa ou não-suscetivel. A classe de **vulnerabilidade** média ocorre em pequenas áreas de florestas de mangue (0,4 a 1,7%), em duas configurações: em regiões internas onde a **suscetibilidade** é baixa em todos os cenários analisados, e a **resiliência** é baixa e a **sensibilidade** é muito ou extremamente alta; e em locais que nos cenários chuvoso/sizígia e seco/quadratura ou sizígia apresentam **suscetibilidade** média. Cabe destacar que nesta área de estudo, não ocorre a classe de **vulnerabilidade** alta.

No sistema costeiro de Soure (PA), a **vulnerabilidade** das florestas de mangue é predominantemente baixa (52,9 a 87,8%) e média (10,9 a 42,6%), com baixa ocorrência de áreas não vulneráveis (1,1 a 2,3%) nos quatro cenários analisados. A ocorrência da classe de **vulnerabilidade** alta é restrita ao período seco e em baixo percentual (2,7 a 2,8%). Nessa área de estudo, há variação espacial das classes de **vulnerabilidade** ao longo da costa e entre os períodos sazonais (chuvoso ou seco), mas a influência do cenário de maré (quadratura ou sizígia) é pouca. O sul da costa leste e a face norte da Ilha de Marajó apresentam maior **vulnerabilidade**, e as áreas classificadas como **vulnerabilidade** alta são encontradas nessas porções mais ao norte dessa área estudo.

O percentual de cada uma das fitofisionomias nas classes de **vulnerabilidade** baixa, média e alta nas respectivas áreas de estudo foi avaliado de forma a indicar se existem fitofisionomias com tendência à maior vulnerabilidade que outras em decorrência de sua localização na área de estudo (para detalhamento, ver itens anteriores desse capítulo).

Na Baía de Turiaçu (MA), os percentuais em cada classe de **vulnerabilidade** são bastante semelhantes entre as florestas com diferentes fitofisionomias. Podemos destacar apenas ligeiras tendências, exemplificadas a seguir, como i) o maior percentual de áreas não vulneráveis entre as florestas de *Rhizophora* spp. e mistas com alto desenvolvimento estrutural; ii) em áreas de **vulnerabilidade** baixa não há distinção expressiva entre os percentuais das fitofisionomias, apenas ligeiro destaque da maior presença dessa classe em florestas de *Avicennia* spp.; iii) as áreas de **vulnerabilidade** média ocorrem pontualmente no estuário e, em geral, os percentuais dessa classe destacam-se em florestas de *Rhizophora* spp. e mistas com desenvolvimento intermediária e alto; iv) as áreas de **vulnerabilidade** alta ocorrem raramente, e seu percentual é ligeiramente maior nas florestas mistas.

No estuário de São Caetano de Odivelas (PA), os percentuais em cada classe de **vulnerabilidade** variam entre as fitofisionomias. Destaca-se o maior percentual de áreas não vulneráveis principalmente entre as florestas de *Rhizophora* spp. com médio desenvolvimento estrutural. Entre os percentuais das fitofisionomias em áreas de **vulnerabilidade** baixa, destacam-se as florestas de

Avicennia germinans. A vulnerabilidade média ocorre pontualmente no estuário e, em geral, os percentuais dessa classe destacam-se em florestas de *Avicennia germinans*.

No sistema costeiro de Soure (PA), não se observam fitofisionomias que se destaquem de acordo com a distribuição das classes de vulnerabilidade nesse sistema, ou seja, os percentuais em cada classe de vulnerabilidade são semelhantes entre as florestas com diferentes composições de espécies. Esse resultado pode estar relacionado às características do sistema costeiro de Soure (PA), que é aberto e muito dinâmico. Ressalta-se também a importância da diversidade de ambientes e de vegetação nessa área de estudo, combinada à variada distribuição das classes de vulnerabilidade. Esse sistema é o único a apresentar a ocorrência de vegetação de várzea ou terrestre associada aos manguezais, onde a maior influência de água doce leva à ocorrência de florestas de composição mista, composta por vegetações como a corticeira (*Pterocarpus officinalis*), a taboca (*Olyra* spp.), a aninga (*Montrichardia arborescens*), entre outras. Há também grande variedade de ambientes ocupados pelos manguezais e pelas espécies associadas, como trechos de praias, igarapés, canais e transição para os campos internos. Assim, as áreas vulneráveis não estão associadas a um tipo específico de vegetação, estão associadas a todas as fitofisionomias conforme sua distribuição no sistema.

As relações analíticas entre as variações de suscetibilidade, sensibilidade e resiliência contempladas na metodologia para determinação da vulnerabilidade dos manguezais da MEB à contaminação por óleo no caso de um evento acidental foram desenvolvidas com foco na sua aplicação prática. Assim, ressaltamos a importância da utilização da análise de vulnerabilidade apresentada como instrumento de gestão pública e privada, que tenha como meta e foco a proteção e conservação da maior área contínua de manguezais do Brasil, que se apresentam hoje em excelente estado de conservação. Permitir o acesso aos resultados dessas análises e ao conhecimento integrado produzido por diversas instâncias, tanto públicas quanto privadas, podem ser de grande relevância e importância na conservação desse prevalente ecossistema da MEB, considerando os serviços ecossistêmicos dos manguezais e o aspecto socioeconômico associado aos seus diferentes usos, principalmente aqueles relacionados às comunidades dele dependentes. No Capítulo 6, apresenta-se uma análise das aplicações possíveis dos resultados e metodologias desenvolvidas no âmbito do Projeto Costa Norte e que estão aprofundam as considerações aqui apresentadas.