

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS E MEIO AMBIENTE

Análise comparativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e indicadores fitossociológicos em um manguezal contaminado por petróleo: estudo de caso no manguezal do rio Iriri, canal de Bertiooga, Santos (SP)

VINICIUS MENDES VEIGA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro - SP
2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

VINICIUS MENDES VEIGA

**Análise comparativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI)
e indicadores fitossociológicos em um manguezal contaminado por petróleo:
estudo de caso no manguezal do rio Iiri, canal de Bertioga, Santos (SP)**

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

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Coorientador: Prof. Dr. Décio Semensatto

Coorientador: Dr. Flávio Henrique Rodrigues

Rio Claro - SP

2023

V426a	Veiga, Vinicius Mendes Análise comparativa do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e indicadores fitossociológicos em um manguezal contaminado por petróleo : estudo de caso no manguezal do rio Iriri, canal de Bertioga, Santos (SP) / Vinicius Mendes Veiga. -- Rio Claro, 2023 100 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis Coorientador: Décio Luis Semensatto Júnior e Flávio Henrique Rodrigues 1. Derramamento de óleo. 2. Manguezais. 3. Geotecnologias. 4. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). 5. Fitossociologia. I. Título.
-------	--

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

Essa ficha não pode ser modificada.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa tem o potencial de oferecer diversos benefícios à sociedade, cujos principais impactos estão apresentados a seguir:

- **Impacto Científico:** esta pesquisa contribui para a geração de novos conhecimentos na área da ecologia e conservação dos manguezais. A análise do NDVI e dos indicadores fitossociológicos proporciona informações valiosas sobre a saúde e a resiliência dos ecossistemas de manguezal em face de desafios como derramamentos de óleo. Essas descobertas servirão de base para futuros estudos acadêmicos e aplicações práticas relacionadas à proteção e restauração desses ecossistemas.
- **Impacto Econômico:** embora o impacto econômico direto dessa pesquisa possa não ser evidente, a conservação dos manguezais tem implicações econômicas significativas a longo prazo. Esses ecossistemas desempenham um papel vital na proteção costeira, no ciclo de nutrientes e na sustentabilidade da pesca. Manter a saúde dos manguezais contribui para a estabilidade econômica de comunidades locais dependentes desses recursos.
- **Impacto Social:** o impacto social desta pesquisa é substancial. Os manguezais desempenham um papel fundamental na qualidade de vida das comunidades costeiras, oferecendo serviços ecossistêmicos como proteção contra tempestades, sustento para pescadores e áreas de recreação para o público em geral. Ao analisar a resposta da vegetação e a estrutura da comunidade vegetal em áreas afetadas por derramamentos de óleo, essa pesquisa fornece informações valiosas para a tomada de decisões relacionadas à conservação e restauração dos manguezais. Isso, por sua vez, contribui para a melhoria do bem-estar social, segurança ambiental e resiliência de comunidades costeiras. Além disso, a pesquisa também tem o potencial de influenciar políticas de gestão ambiental e promover práticas de monitoramento mais eficazes para a preservação dos manguezais.

Esses impactos são essenciais para garantir a sustentabilidade desses ecossistemas críticos e o bem-estar das comunidades que dependem deles. Portanto, o estudo desempenha um papel fundamental na promoção do desenvolvimento sustentável e na proteção de recursos naturais valiosos.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research has the potential to offer several benefits to society, the main impacts of which are presented below:

- **Scientific Impact:** this research contributes to the generation of new knowledge in mangrove ecology and conservation. Analysis of NDVI and phytosociological indicators provides valuable information about the health and resilience of mangrove ecosystems in the face of challenges such as oil spills. These discoveries will serve as a basis for future academic studies and practical applications related to the protection and restoration of these ecosystems.
- **Economic Impact:** Although the direct economic impact of this research may not be evident, mangrove conservation has significant long-term economic implications. These ecosystems play a vital role in coastal protection, nutrient cycling and fisheries sustainability. Maintaining the health of mangroves contributes to the economic stability of local communities dependent on these resources.
- **Social Impact:** the social impact of this research is substantial. Mangroves play a fundamental role in the quality of life of coastal communities, providing ecosystem services such as protection from storms, livelihoods for fishermen and recreation areas for the public. By analyzing vegetation response and plant community structure in areas affected by oil spills, this research provides valuable information for decision-making related to mangrove conservation and restoration. This, in turn, contributes to improved social well-being, environmental security and resilience of coastal communities. Furthermore, the research also has the potential to influence environmental management policies and promote more effective monitoring practices for the preservation of mangroves.

These impacts are essential to ensuring the sustainability of these critical ecosystems and the well-being of the communities that depend on them. Therefore, the study plays a fundamental role in promoting sustainable development and protecting valuable natural resources.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

VINICIUS MENDES VEIGA

**ANÁLISE COMPARATIVA DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA
NORMALIZADA (NDVI) E INDICADORES FITOSSOCIOLÓGICOS EM UM
MANGUEZAL CONTAMINADO POR PETRÓLEO: ESTUDO DE CASO NO
MANGUEZAL DO RIO IRIRI, CANAL DE BERTIOGA, SANTOS (SP)**

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Gerson Araújo de Medeiros

ICTS/UNESP/Sorocaba (SP)

Dra. Claudia Vanessa dos Santos Corrêa

Pós-Doutoranda/IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro (SP), 26 de setembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio financeiro na forma de bolsa à Agência Nacional do Petróleo (ANP) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás (PRH-40.1). Agradeço, ainda, o financiamento da PETROBRAS e à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no âmbito do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Geoprocessamento e Cartas SAO da Bacia de Santos”, associado às Cláusulas de Investimento em P&D, e ao IBAMA pela condução do licenciamento ambiental federal da atividade de perfuração da área geográfica da Bacia de Santos.

Gostaria de agradecer a todos aqueles que deram sua contribuição no desenvolvimento deste trabalho: o barqueiro Clark pelos serviços prestados em campo; a equipe de servidores e técnicos da UNESP e do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente: Allan, André, Lauren, Rosângela, assim como o Prof. Didier. Agradeço aos professores e especialistas que contribuíram direta e indiretamente com a pesquisa: Zaine e Maricelma, Milanelli, Cláudia Lamparelli e Yara Schaeffer-Novelli.

Sou grato também a equipe do projeto “Geoprocessamento e Cartas SAO” que me instruíram durante todo o caminho: Profa. Dra. Paulina Setti Riedel, André De Andrade Kolya, Arthur Wieczorek, Claudia Vanessa Dos Santos Corrêa, Daiana Marques Costa, Flávia Ribeiro Tobias, Isadora Torres Gatto, João Alexandre Torres Gatto, Laila Milani Magalhães, Lorival Isler Junior, Lucilia Do Carmo Giordano, Mara Lúcia Marques, Rafaela Barberis Canjani e Sarah Felix Santos

Não poderia deixar de agradecer a todos os amigos que acompanharam essa trajetória, das diferentes repúblicas: Amada Foca, Tapa e Albergue e de diferentes lugares. Agradeço especialmente a Kênia pelo acesso a referências fundamentais na ESALQ (USP) e a Lais pela ajuda com o processamento das imagens do dossel e inestimável compreensão e suporte.

Finalmente, agradeço aos ilustres parceiros envolvidos no desenvolvimento desta pesquisa: o Dr. Flávio Henrique Rodrigues, o Prof. Dr. Décio Semensatto e ao Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, meu estimado orientador, a quem sou grato por acreditar no meu potencial como aluno, pesquisador e orientado para desenvolver essa desafiadora pesquisa.

EPIÍGRAFE

O Ouro e a Madeira

Não queria ser o mar,
Me bastava a fonte.
Muito menos ser a rosa,
Simplesmente o espinho.

Não queria ser caminho,
Porém o atalho.
Muito menos ser a chuva,
Apenas o orvalho.

Não queria ser o dia,
Só a alvorada.
Muito menos ser o campo,
Me bastava o grão.

Não queria ser a vida,
Porém o momento.
Muito menos ser concerto,
Apenas a canção.

O ouro afunda no mar,
Madeira fica por cima.
Ostra nasce do lodo,
Gerando pérolas finas.

Gentil, (1975).

RESUMO

Os manguezais são ecossistemas costeiros que oferecem inúmeros serviços ecossistêmicos imprescindíveis para a população. O petróleo transportado pelo mar e em dutos ameaça essas áreas em casos de derramamentos, sendo uma das principais ameaças a degradação desses ambientes. O monitoramento dessas áreas é uma peça-chave na conservação dos manguezais, que pode ser realizada *in-situ* nos bosques ou *ex-situ* com o auxílio de geotecnologias como o Sensoriamento Remoto, a Fotogrametria e o Geoprocessamento. Esta pesquisa buscou analisar e comparar duas áreas contaminadas por um derramamento de óleo bruto ocorrido em 1983 no manguezal do Rio Iriri, canal de Bertioga, Santos (SP). A abordagem multidisciplinar foi baseada na análise do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e dos indicadores fitossociológicos para sete parcelas montadas em campo, distribuídas em um sítio proximal e um sítio distal ao ponto do derramamento. O índice espectral foi processado a partir de imagens dos sensores *Landsat-8* e *Sentinel-2A* e com a coleta direta de dados fitossociológicos consistiu na mensuração do diâmetro à altura do peito (DAP) e altura dos indivíduos. Adicionalmente, foram coletados e descritos testemunhos dos sedimentos para complementar a investigação. Os resultados mostraram valores mais elevados de NDVI para as parcelas proximais em relação as parcelas distais, sugerindo uma diferença de vigor ou deficiência entre as áreas da vegetação. A análise dos indicadores fitossociológicos demonstrou maior abundância de indivíduos e plântulas na área distal em relação a proximal, apontando para a possibilidade de estressores no local. As décadas de persistência dos impactos de derramamentos de óleo em manguezais são evidenciados nesta pesquisa, assim como sugestões futuras para implementação de tecnologias aplicadas para o monitoramento e conservação desses ecossistemas.

Palavras-chave: Derramamento de óleo; Manguezais; Geotecnologias; Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI); Fitossociologia.

ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems that, when conserved, offer numerous essential ecosystem services for the population. Oil transported by sea and in pipelines threatens these areas in cases of spills, with one of the main threats being the degradation of these environments. Monitoring these areas is a key element in the conservation of mangroves, which can be conducted *in-situ* in the forests or *ex-situ* with the help of geotechnologies such as Remote Sensing, Photogrammetry and Geoprocessing. This research sought to analyze and compare two areas contaminated by a crude oil spill that occurred in 1983 in the Iri River mangrove, Bertioga channel, Santos (SP). The multidisciplinary approach was based on the analysis of the normalized difference vegetation index (NDVI) and phytosociological indicators for seven plots set up in the field, distributed in a site proximal and a site distal to the spill point. The spectral index was processed from images from the Landsat-8 and Sentinel-2A sensors and with the direct collection of phytosociological data it consisted of measuring the diameter at breast height (DBH) and height of the individuals. Additionally, sediment cores were collected and described to complement the investigation. The results showed higher NDVI values for proximal plots compared to distal plots, suggesting a difference in vigor or deficiency between vegetation areas. The analysis of phytosociological indicators demonstrated a greater abundance of individuals and seedlings in the distal area compared to the proximal area, pointing to the possibility of stressors at the site. The decades of persistent impacts of oil spills on mangroves are highlighted in this research, as well as future suggestions for the implementation of technologies applied to the monitoring and conservation of these ecosystems.

Keywords: Oil spill; Mangroves; Geotechnologies; Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Phytosociology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Enquadramento dos manguezais de acordo com a escala de trabalho...	24
Figura 2 – Exemplo de perfil esquemático da vegetação de manguezal na região de Itanhaém (SP) em sucessão topográfica.	28
Figura 3 - Composição falsa cor do Complexo estuarino de Santos e São Vicente..	36
Figura 4 - Séries histórica (1981 – 2010) e recente (2022) da precipitação observada na região da área de estudo.....	37
Figura 5 - Mapa de localização da área de estudo.....	39
Figura 6 - Estudos anteriores no manguezal do rio Iriri.....	41
Figura 7 – Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) DJI Phantom 4 Pro V2.0 (Drone).	50
Figura 8 – Montagem de parcelas (A) e mensuração de perímetro e altura dos indivíduos arbóreos (B).	52
Figura 9 - Gráfico da quantidade de artigos publicados no período de 1977 a 2022.	54
Figura 10 - Gráfico da quantidade de artigos publicados por cada país no período de 1977 a 2022.	55
Figura 11 – Bases cartográficas dos sítios estudados.	56
Figura 12 – Base cartográfica do sítio proximal (A).....	57
Figura 13 – Base cartográfica do sítio distal (B).....	58
Figura 14 - Variação do índice NDVI das parcelas nas médias obtidas a partir das imagens orbitais da plataforma <i>Landsat-8</i>	61
Figura 15 - Variação do índice NDVI das parcelas nas médias obtidas a partir das imagens orbitais da plataforma <i>Sentinel-2A</i>	62
Figura 16 - Valor do NDVI obtido pelo <i>Landsat-8</i> para as parcelas fitossociológicas.	63
Figura 17 - Valor do NDVI obtido pelo <i>Sentinel-2A</i> para as parcelas fitossociológicas.	64
Figura 18 - Imagens binárias da cobertura do dossel do sítio A.....	66
Figura 19 - Imagens binárias da cobertura do dossel do sítio B.....	66
Figura 20 - Imagens das parcelas nos sítios A e B.	72

Figura 21 - Testemunhos de solo dos sítios proximal (A) e distal (B) coletados durante a campanha 1.	73
Figura 22 - Detalhe da coloração e horizonte arenoso nos testemunhos de solo do sítio proximal (A) coletados durante a campanha 2.	74
Figura 23 - Testemunhos de solo dos sítios proximal (A) e distal (B) coletados durante a campanha 2.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do petróleo "Carmópolis", derramado no manguezal do rio Iriri em 1983.	40
Tabela 2 - Coordenadas dos pontos visitados nas atividades de campo.	42
Tabela 3 – Especificações dos sensores dos satélites <i>Landsat-8</i> e <i>Sentinel-2A</i>	47
Tabela 4 - Área percentual da cobertura do dossel baseada na contagem de <i>pixels</i> das imagens binárias.	65
Tabela 5 - Tabela estatística para as parcelas do sítio proximal (A) e distal (B), durante a primeira campanha.	67
Tabela 6 - Tabela fitossociológica da primeira campanha.	68
Tabela 7 - Tabela estatística para as parcelas do sítio proximal (A) durante a segunda campanha.	68
Tabela 8 - Tabela estatística e fitossociológica para as parcelas do sítio distal (B), durante a segunda campanha.	69
Tabela 9 - Tabela fitossociológica da segunda campanha.	70
Tabela 10 - Tabela fitossociológica de ambas as campanhas realizadas no manguezal do rio Iriri.	70
Tabela 11 - Comparação de dados estatísticos de diferentes estudos fitossociológicos em manguezais.	71

LISTA DE ABREVIATURAS

ALESP	Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
ARP	Aeronave remotamente pilotada
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVIRIS	<i>Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer</i>
AVNIR	<i>Advanced Visible and Near Infrared Radiometer</i>
Cartas SAO	Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DATAGEO	Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEE	Google Earth Engine
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IVI	Índice de Valor de Importância
LiDAR	<i>Light detection and ranging</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OBIA	Análise de imagem baseada em objeto
PVC	Policloreto de vinila
RPBC	Refinaria Presidente Bernardes (Cubatão, SP)
SciELO	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
SIG	Sistema de Informação geográfica
SIRGAS2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPOT	<i>Satellite Pour l'Observation de la Terre</i>
TEBAR	Terminal Marítimo Almirante Barroso (São Sebastião, SP)
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
USP	Universidade de São Paulo

UTM

Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área de amostragem
DAe	Densidade específica da espécie e
DAP	Diâmetro à altura do peito (h = 1,30 m)
DAt	Densidade de indivíduos arbóreos
CO ²	Dióxido de carbono
DoAe	Dominância absoluta da espécie e
DoAspp	Dominância absoluta de cada espécie
DoAt	Dominância absoluta total da comunidade
DoRe	Dominância relativa da espécie e
DRe	Densidade relativa da espécie e
FAe	Frequência absoluta da espécie e
FAspp	Frequência absoluta de cada uma das espécies
FAt	Frequência absoluta total da comunidade.
FRe	Frequência relativa da espécie e
g _e	Área basal da espécie e
g _i	Área basal
g _t	Área basal de todas as espécies
IVle	Índice de Valor de Importância da espécie e
N	Abundância de indivíduos arbóreos
n _e	Abundância de indivíduos da espécie e
PAP	Perímetro à altura do peito
Pe	Número de unidades amostrais (parcelas) com presença da espécie e

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	Manguezais.....	22
3.2	Sensibilidade ambiental	26
3.3	Fitossociologia	27
3.4	Sensoriamento remoto.....	32
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS	43
5.1	Pesquisa bibliográfica	43
5.2	Geoprocessamento.....	44
5.3	Sensoriamento Remoto	46
5.4	Cobertura do dossel.....	49
5.5	Fitossociologia	50
5.6	Testemunhos sedimentares.....	52
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
6.1	Pesquisa bibliográfica	54
6.2	Geoprocessamento.....	56
6.3	Sensoriamento Remoto	59
6.4	Cobertura do dossel.....	65
6.5	Fitossociologia	67
6.6	Testemunhos sedimentares.....	73
7	CONCLUSÕES.....	77
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE 1 – Tabelas fitossociológicas	90

1 INTRODUÇÃO

Mangue é o nome de um grupo florístico com diversos gêneros de plantas adaptadas para a colonização de ambientes salinos, com substratos lamosos e inundados (LUGO; SNEDAKER, 1974; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000). As florestas de mangues, ou manguezais, ocorrem nas zonas tropicais e subtropicais do planeta, com maior grau de desenvolvimento em áreas quentes e úmidas, sob a influência das marés (ALONGI, 2002; SRIKANTH; LUM; CHEN, 2016). Os manguezais são encontrados em 118 países incluindo o Brasil, que apresenta a terceira maior área desse ecossistema: 9626 km² ou 7,0% do total global (GIRI *et al.*, 2011).

Tal grupo é identificado como um ecossistema fundamental para a sobrevivência de espécies vegetais especialistas e para o desenvolvimento de diversos animais, incluindo insetos, esponjas, tunicados, crustáceos, répteis, aves e mamíferos (NAGELKERKEN *et al.*, 2008). Além disso, exerce um papel essencial para a subsistência de comunidades locais, que usufruem dos recursos providos no ambiente, como: alimento, mel, ervas medicinais, taninos, madeira para construção e lenha (BARBIER *et al.*, 2011). Os manguezais ainda oferecem serviços ecossistêmicos imprescindíveis, dentre eles, proteção costeira, sequestro de carbono, manutenção do estoque pesqueiro, e local para atividades de recreação, pesquisa científica e educação ambiental (LEE *et al.*, 2014; LUGO; SNEDAKER, 1974).

Todavia, as atividades antrópicas e seus consequentes impactos trazem ameaças de diferentes magnitudes aos manguezais. Localmente, esses ecossistemas vêm sofrendo modificação do *habitat* natural, através do desflorestamento, interrupção de ciclos hidrológicos, construção de lagoas de aquicultura e inserção de espécies exóticas. Ademais, elementos poluidores e contaminantes como efluentes, resíduos sólidos e derramamentos de petróleo podem ocorrer de forma pontual ou difusa (DAHDOUH-GUEBAS *et al.*, 2020; DE SANTANA LOPES; DE OLIVEIRA CHAVES; PEREIRA TOGNELLA, 2020).

As ameaças também ocorrem globalmente, segundo o resumo para formuladores de políticas elaborado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as mudanças climáticas geram alterações na temperatura média do ar e da água, na concentração de dióxido de carbono (CO²) atmosférico, no nível

médio do mar e em seus padrões de circulação (PÖRTNER *et al.*, 2023). Essas mudanças podem ser fatores de estresse para esses ecossistemas, que também estão submetidos a eventos extremos como: furacões, tsunamis, tempestades e ondas de calor, com mais intensidade e frequência (GILMAN *et al.*, 2008; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2016).

Dentre as diversas ameaças aos manguezais, a mais preocupante é o derramamento de petróleo, devido a sua permanência após décadas do acidente (BURNS; GARRITY; LEVINGS, 1993; GUNDLACH; HAYES, 1978; JERNELÖV, 2010; LASSALLE *et al.*, 2023). Distintas metodologias de avaliação da sensibilidade costeira consideram os manguezais como os ecossistemas mais sensíveis ao contato com o óleo, e recomendam seu isolamento com barreiras e proteção prioritária, evitando o contato com esta substância (ARAUJO; SILVA; MUEHE, 2002; D’AFFONSECA *et al.*, 2023; PETERSEN *et al.*, 2002, 2019; ZAMBONI *et al.*, 2004). Dependendo do volume e do tipo de óleo derramado em um manguezal, poucas contramedidas são ambientalmente viáveis para sua remoção do óleo além da limpeza natural. Esta alternativa pode levar décadas e deve ser acompanhada por monitoramento de longo prazo da área atingida (DUKE, 2016).

O monitoramento quantitativo da vegetação dos manguezais é realizado em parcelas, delimitando áreas para a mensuração do diâmetro e altura dos indivíduos. Nesse contexto, quanto maior a quantidade de parcelas, mais representativos são os dados. Devido às dificuldades logísticas encontradas em manguezais, o processo de monitoramento pode ser complexo, custoso e limitado. Nesse contexto, o Sensoriamento Remoto e as técnicas avançadas de processamento e classificação de imagens desempenham um papel fundamental, fornecendo informações de maneira eficiente em termos de custo-benefício e em diversas resoluções espaciais, temporais e espectrais (GREEN *et al.*, 1997; HEUMANN, 2011).

Adicionalmente, a aplicação de índices de vegetação possibilita a detecção de variações na resposta espectral das áreas de manguezal ao longo do tempo, que podem ser causadas por fatores ambientais, como chuvas torrenciais, ou antrópica, como a contaminação por petróleo (KUENZER *et al.*, 2011; LASSALLE *et al.*, 2023; LIMA *et al.*, 2023; PAVANELLI; LOCH, 2018). Além disso, a disponibilidade de dados provenientes de diversos sensores em plataformas *online*, como o *Google Earth Engine*, abre novas perspectivas para a análise espacial em estudos

ambientais de manguezais (CHEN *et al.*, 2017; GREEN *et al.*, 1997; HEUMANN, 2011; SANTOS; BITENCOURT, 2016).

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise comparativa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e de indicadores fitossociológicos de duas áreas de um manguezal em Santos (SP), atingido por petróleo bruto em 1983.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Manguezais

Mangue é um grupo de halófitas que ocorre no litoral das regiões tropicais e subtropicais e apresentam adaptações para a colonização de ambientes estressantes para a maior parte das plantas terrestres. As tais adaptações podem ser exibidas como viviparidade, raízes aéreas, lenticelas e aerênquimas, que possibilitam o desenvolvimento dessas comunidades vegetais em ambientes com substratos inconsolidados, salinos e inundados devido a influência de rios, ondas e principalmente marés. Esses ambientes recebem o nome de manguezal, termo que também incorpora o sentido ecossistêmico, compreendendo o conjunto de interações entre as populações de plantas, animais e microbiota do local (BLASCO; SAENGER; JANODET, 1996; GIRI *et al.*, 2011; LUGO; SNEDAKER, 1974; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000).

As florestas de manguezais estão distribuídas pelas zonas costeiras 118 países, ocupando uma área entre 167.000 km² a 181.000 km². Os principais países em extensões de manguezais são a Indonésia, Austrália, Brasil, México, Nigéria e Malásia, que juntos representam mais da metade dos manguezais do planeta. O Brasil abriga 7,0% dos manguezais do globo, que ocupam uma área de 962.683 ha em quase todos os estados litorâneos do país, exceto o Rio Grande do Sul (GIRI *et al.*, 2011; KUENZER *et al.*, 2011; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000).

A vegetação de mangue apresenta características anatômicas e morfológicas que contemplam sistemas de remoção de sais e trocas gasosas espalhados pelas raízes e caules da planta. Essas características permitem o desenvolvimento em substratos caracterizados por sedimentos lamosos e argilosos, com níveis elevados de salinidade e umidade e com níveis baixos de oxigenação. Adicionalmente, a ocorrência de processos pedogenéticos de adição, translocação e transformação nos sedimentos após a colonização por plantas vasculares caracterizam esses sedimentos como solos (FERREIRA *et al.*, 2007; SRIKANTH; LUM; CHEN, 2016).

Os manguezais são ecossistemas altamente produtivos, com uma abundância de alimentos e abrigo para uma variedade de espécies terrestres e aquáticas, que se desenvolvem no ambiente durante toda a vida ou em parte(s) de seu ciclo de vida. As folhas caídas do mangue e os detritos superficiais são os

alimentos da base da teia trófica desse ecossistema (animais planctônicos, algas epifíticas e microfitobentos). O substrato e as raízes abrigam tunicados, esponjas, algas, bivalves, camarões, caranguejos e peixes. Os caules e o dossel das plantas servem como *habitat* para espécies de insetos, répteis, mamíferos e pássaros (JACOBI; SCHAEFFER-NOVELLI, 1990; NAGELKERKEN *et al.*, 2008).

A proposta de Junk *et al.* (2014) para as áreas úmidas brasileiras enquadra os manguezais como áreas úmidas costeiras influenciadas por fluxos previsíveis de maré. Além da maré, fatores ambientais como salinidade, luz, temperatura, concentração de dióxido de carbono (CO₂), textura do substrato, umidade, disponibilidade de nutrientes e as flutuações do nível do mar têm influência no desenvolvimento e produtividade desses ecossistemas (KRAUSS *et al.*, 2008).

A classificação hierárquica dos bosques de mangue é baseada na escala de trabalho, que pode abranger toda a linha costeira e apresentar maior detalhe nas florestas e parcelas até o nível dos indivíduos arbóreos maduros (SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2000). Em grandes áreas, o contexto geomorfológico da área é fundamental para o tipo de manguezal formado, em áreas de detalhe, a floresta apresenta diferentes características baseadas no contexto ecológico e topográfico. No nível das árvores, a fertilidade, salinidade, regimes de fluxo e estressores são importantes contextos na análise das áreas de trabalho (Figura 1) (KRAUSS *et al.*, 2008).

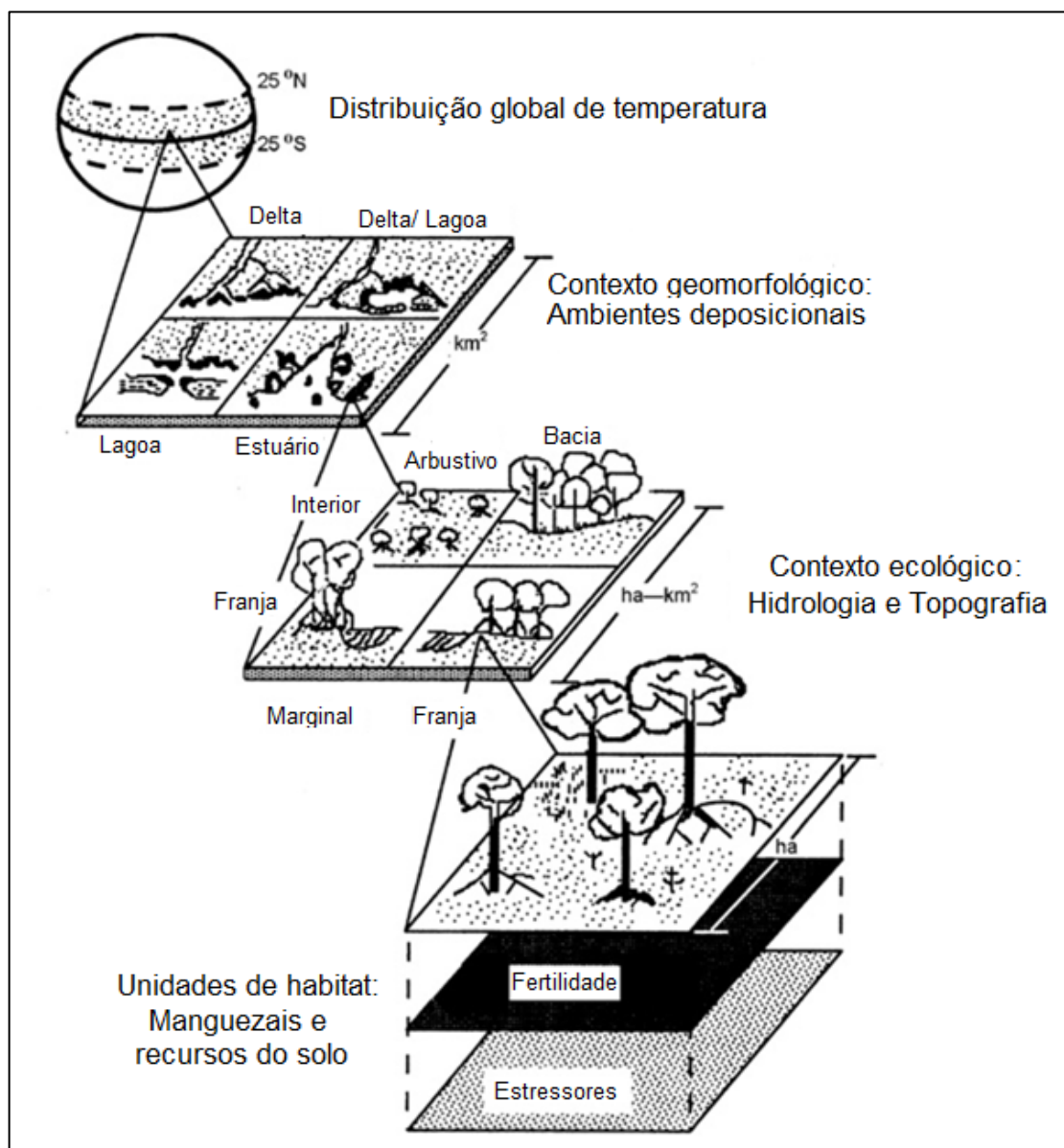
A importância desses ambientes pode ser avaliada pelos serviços ecossistêmicos que eles oferecem. Os manguezais auxiliam na proteção costeira, sequestro de carbono, redução e biorremediação da poluição, fornecendo alimentos, remédios, mel, madeira e lenha. São refúgios biológicos e disponibilizam nutrientes para os ecossistemas adjacentes. Estes *habitats* são também locais de atividades culturais, religiosas, recreativas, de ecoturismo e pesquisa científica (BARBIER *et al.*, 2011; COSTANZA *et al.*, 1997; MUKHERJEE *et al.*, 2014; TOGNELLA-DE-ROSA *et al.*, 2006).

Os serviços ecossistêmicos dos manguezais são complexos de serem valorados devido as variabilidades ambientais. Barbier *et al.* (2011) estimaram os seguintes valores anuais em dólares por hectare de vegetação:

- Sequestro de carbono: US\$ 30,50·ha⁻¹·ano⁻¹;
- Provisão de alimentos e matéria-prima: entre US\$ 484 a US\$ 585·ha⁻¹·ano⁻¹;

- Aumento da produção pesqueira: entre US\$ 708 a US\$ 987·ha⁻¹·ano⁻¹;
- Controle da erosão: US\$ 3.679·ha⁻¹·ano⁻¹;
- Proteção costeira: entre US\$ 8.966 a US\$10.821·ha⁻¹·ano⁻¹.

Figura 1 – Enquadramento dos manguezais de acordo com a escala de trabalho.



Fonte: Traduzido de Krauss *et al.* (2008).

A captura de carbono é bastante efetiva nos solos dos manguezais, tornando-os um dos principais compartimentos de armazenamento de carbono dos trópicos (DONATO *et al.*, 2011). O solo e a vegetação dos manguezais são eficientes compartimentos de sequestro e armazenamento de carbono e, quando mapeados e sistematizados, integram um recurso denominado “carbono azul”, que é aquele

capturado da atmosfera pelos ecossistemas marinhos e terrestres (ROVAL *et al.*, 2021). Ainda, serviços ecossistêmicos de provisionamento de alimentos, recursos genéticos, recursos medicinais, matérias primas, água; de regulação da qualidade do ar e da água, controle biológico, regulação climática, prevenção da erosão, manutenção da fertilidade e ciclagem de nutrientes do solo; e de valores estéticos, culturais, recreativos ou religiosos de valor inestimável (BARBIER *et al.*, 2011; HIMES-CORNELL; GROSE; PENDLETON, 2018). Embora o montante total valorado para os manguezais seja relativamente reduzido em função da área ocupada, esses ecossistemas fornecem um conjunto de serviços ecossistêmicos com maiores valores agregados por unidade de área (HIMES-CORNELL; GROSE; PENDLETON, 2018).

Nos últimos cinquenta anos, quase um terço das áreas de manguezais do planeta foi perdido e as áreas restantes são ameaçadas pelas mudanças climáticas e a elevação do nível do mar, que podem acarretar decréscimo de 10% a 15% das áreas no futuro. As mudanças climáticas representam alterações ambientais a nível global, como mudanças no nível médio, padrões de circulação e temperatura do mar; eventos extremos de temperatura ou precipitação, alterações da concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, e aumento de tsunamis ou furacões (GILMAN *et al.*, 2008; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2016).

As perdas alteram os fluxos de energia e matéria e as interações internas do ecossistema e aqueles adjacentes, reduzindo sua produtividade, biodiversidade e a qualidade dos serviços ecossistêmicos prestados à comunidade (ALONGI, 2002, 2008; SCHAEFFER-NOVELLI *et al.*, 2016). A conservação dos manguezais depende dos valores subjetivos dados pela sociedade a esse ecossistema, e a conscientização de sua importância é fundamental para fomentar o debate público em prol de sua conservação. As mudanças climáticas ocupam lugar secundário em relação à perda de áreas quando comparadas àquelas causada pelas atividades antrópicas. As altas taxas de desmatamento e conversão de manguezais representam um risco maior imediato para esses ecossistemas, assim como a poluição e a contaminação (ALONGI, 2008; DAHDOUH-GUEBAS *et al.*, 2020).

3.2 Sensibilidade ambiental

Uma das principais ameaças aos manguezais são as atividades do setor de óleo e gás na região costeira, como terminais, dutos, plataformas e refinarias, que podem ocasionar contaminações por petróleo e seus derivados (JERNELÖV, 2010). Embora o número de derramamentos acidentais de petróleo venha diminuindo, sabotagens, desgastes, desastres naturais e manutenção inadequada ou inexistente ainda ameaçam os ecossistemas costeiros de contaminação (LOPES; MILANELLI; POFFO, 2007).

Os impactos ambientais do óleo nos manguezais podem ser agudos ou crônicos, de acordo com o tempo passado desde o derramamento. Inicialmente ocorre grande mortandade da fauna atingida, recoberta e asfixiada pela camada oleosa (DUKE, 2016). Nos meses iniciais, os efeitos tóxicos vegetação afetam a sobrevivência da vegetação, causando a queda das folhas e substituição por novas folhas com manchas, perfurações, enrolamento, murchamento, amarelecimento e galhas (RODRIGUES; MOURA; LAMPARELLI, 1989). A longo prazo, porções do óleo ficam trapeadas nos sedimentos do manguezal, causando efeitos deletérios como a debilitação de árvores maduras e impedindo o desenvolvimento de indivíduos jovens e das plântulas (DUKE, 2016; LASSALLE *et al.*, 2023).

O mapeamento da sensibilidade dos ambientes costeiros a derramamentos de óleo é uma atividade de praxe em diversos países, que preventivamente identifica, delimita e classifica os ecossistemas previamente a um derramamento de óleo acontecer. As sistemáticas de classificação de sensibilidade que abrangem manguezais sempre consideram esses ecossistemas como os mais sensíveis aos impactos do óleo (ARAUJO; SILVA; MUEHE, 2002; PETERSEN *et al.*, 2002, 2019; ZAMBONI *et al.*, 2004).

A elevada sensibilidade ao óleo dos manguezais é atribuída a aspectos físicos como o substrato, a declividade e a hidrodinâmica, características que favorecem a deposição e a permanência do óleo nesses ambientes, causando sufocamento em plantas e animais. A sensibilidade desses ambientes também limita as operações de remoção ou limpeza do óleo, pois estas podem acarretar mais danos ambientais, como o pisoteamento da fauna e a compactação do substrato (GUNDLACH; HAYES, 1978; LOPES; MILANELLI; POFFO, 2007; OWENS; ROBILLIARD, 1981).

As intervenções aplicáveis em manguezais envolvem o uso de contenções, barreiras isolantes ou barreiras e travesseiros absorventes, remoção manual, remoção à vácuo, lavagem com água do mar, uso de limpadores e dispersantes, biorremediação, remoção dos detritos oleados e uso de absorventes granulados. Entretanto, algumas dessas técnicas não são legalmente permitidas no Brasil ou viáveis no interior dos manguezais sem causar mais impactos, sendo tecnicamente aceitável a não-intervenção e o monitoramento desses ecossistemas, que passam por processos de limpeza natural e biodegradação dos contaminantes durante décadas (DUKE, 2016; JACOBI; SCHAEFFER-NOVELLI, 1990).

3.3 Fitossociologia

O monitoramento *in loco* de manguezais é baseado na fitossociologia, metodologia quantitativa de análise dos atributos estruturais da vegetação, dentro de uma área definida denominada parcela, que permite sua comparação em áreas ou durante o tempo. A metodologia corresponde à coleta direta de dados como o diâmetro do caule à altura do peito (DAP) e altura do dossel, dados que possibilitam o cálculo da área basal, densidade, dominância, frequência, biomassa acima do solo e o índice de área foliar (FELFILI *et al.*, 2011; SNEDAKER; SNEDAKER, 1984).

A fitossociologia é aplicável aos diferentes tipos de fisionomia vegetal, e seus resultados são comparáveis somente com dados obtidos nos mesmos tipos de comunidades vegetais. No caso dos manguezais, a coleta dos dados esbarra em limitações causadas pelas dificuldades de acesso e trabalho no ambiente, que podem reduzir as amostras e parcelas montadas. A fisionomia vegetal em um bosque de mangue é influenciada por diferentes fatores, principalmente a elevação topográfica e frequência de inundação pelas marés, que resultam nas zonas de franja, intermediária e superior de bosque, com distintas características fitossociológicas (Figura 2).

A fitossociologia do conjunto vegetal estudado é uma maneira quantitativa de avaliar diretamente os indivíduos arbóreos dentro de uma parcela delimitada e de área conhecida. A fitossociologia baseia-se, principalmente, em medidas morfológicas, como altura, diâmetro de caule e área basal de cada uma das árvores dentro da parcela montada, além de dados de abundância (número de indivíduos), de riqueza e de composição de espécies. O diâmetro de cada indivíduo pode ser

representado tanto pelo perímetro à altura do peito (PAP) como pelo diâmetro à altura do peito (DAP) do caule. A conversão dos valores em diâmetro é dada pela divisão dos valores do perímetro pelo número pi (π), de acordo com a Equação 1 (FELFILI *et al.*, 2011).

$$DAP = \frac{PAP}{\pi}$$

Equação 1

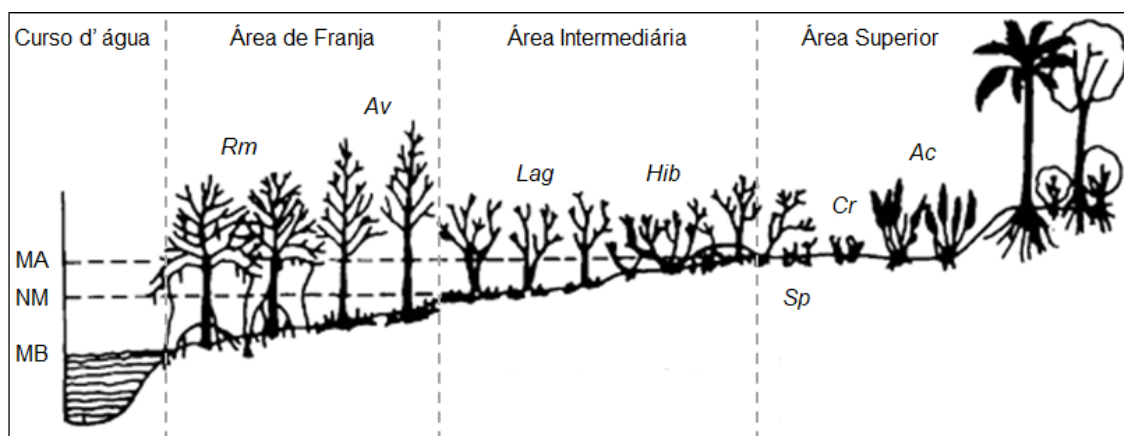
Onde:

DAP: Diâmetro à altura do peito ($h = 1,30$ m);

PAP: Perímetro à altura do peito.

Os valores obtidos são convertidos, para cada indivíduo, em sua área basal (g_i), segundo a Equação 2. A área basal corresponde à área ocupada por cada seção transversal mensurada na altura do peito. Para indivíduos com bifurcações no caule e múltiplos troncos, devem ser medidos todos os perímetros e convertidos em área basal e posteriormente somados, para evitar a superestimativa de valores pela soma dos perímetros (FELFILI *et al.*, 2011).

Figura 2 – Exemplo de perfil esquemático da vegetação de manguezal na região de Itanhaém (SP) em sucessão topográfica.



Legenda: MA: Maré alta; NM: Nível médio; MB: Maré baixa; Rh: *Rhizophora*; Av: *Avicennia*; Lag: *Laguncularia*; Hib: *Hibiscus*; Sp: *Spartina*; Cr: *Crinum*; Ac: *Acrostichum*. **Fonte:** Adaptado de Lamberti (1969) *apud* Snedaker e Snedaker (1984).

$$g_i = \frac{(PAP)^2}{4\pi} \text{ ou } g_i = \frac{\pi * (DAP)^2}{4} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

g_i : Área basal;

PAP: Perímetro à altura do peito;

DAP: Diâmetro à altura do peito.

A partir das mensurações, é possível calcular os seguintes parâmetros fitossociológicos: densidade, frequência e dominância, em valores absolutos e relativos, e o índice de valor de importância (IVI), baseado nos valores relativos anteriores. A densidade representa o número de indivíduos por unidade de área amostrada, seja específico (Equação 3) ou para toda a comunidade vegetal (Equação 4). A densidade relativa por espécie pode ser obtida dividindo-se o número de indivíduos de uma determinada espécie pelo número total de indivíduos amostrados (Equação 5) (FELFILI *et al.*, 2011).

$$DA_e = \frac{n_e}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

DA_e : Densidade específica da espécie e ;

n_e : Abundância de indivíduos da espécie e ;

A: Área de amostragem.

$$DA_t = \frac{N}{A} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

DA_t : Densidade de indivíduos arbóreos;

N: Abundância de indivíduos arbóreos;

A: Área de amostragem.

$$DR_e = 100 * \frac{n_e}{N} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

DR_e : Densidade relativa da espécie e ;

n_e : Abundância de indivíduos da espécie e ;

N: Abundância de indivíduos arbóreos.

Segundo Felfili *et al.* (2011), a frequência absoluta específica (FA_e) é a proporção do número de unidades amostrais com presença de uma dada espécie (P_e) em relação ao número total de unidades amostrais (P_t) (Equação 6). A frequência absoluta total da comunidade (FAt) é dada pela soma da frequência

absoluta específica de todas as espécies amostradas (FA_{spp}), de acordo com a Equação 7. A frequência relativa (FR) é a proporção percentual da frequência absoluta de uma espécie (FA_e) em relação à soma da frequência absoluta da comunidade (FA_t) (Equação 8).

$$FA_e = 100 * \frac{P_e}{P_t} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

FA_e : Frequência absoluta da espécie e ;

P_e : número de unidades amostrais (parcelas) com presença da espécie e ;

P_t : número total de parcelas.

$$FA_t = \sum FA_{spp} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

FA_t : Frequência absoluta total da comunidade;

FA_{spp} : Frequência absoluta de cada uma das espécies.

$$FR_e = 100 * \frac{FA_e}{FA_t} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

FR_e : Frequência relativa da espécie e ;

FA_e : Frequência absoluta da espécie e ;

FA_t : Frequência absoluta total da comunidade.

As variáveis fitossociológicas de dominância têm como objetivo o cálculo da área basal dos indivíduos de uma espécie em relação à área total amostrada na parcela. A dominância absoluta específica ($DoAe$) é dada pela soma de todas as áreas basais da mesma espécie, divididos pelo valor da área da parcela (Equação 9). A dominância relativa da espécie ($DoRe$) é dada percentualmente pela divisão da área basal da espécie em questão pela área basal de todas as espécies amostradas (Equação 10). A dominância absoluta em termos de comunidade é dada pela soma das áreas basais de todas as espécies, dividido pela área da parcela, ou simplesmente pela soma das dominâncias absolutas específicas (Equação 11) (FELFILI *et al.*, 2011).

$$DoA_e = \frac{\sum g_e}{A}$$

Equação 9

Onde:

DoA_e: Dominância absoluta da espécie e;

g_e: Área basal da espécie e;

A: Área da unidade de amostral (parcela).

$$DoR_e = 100 * \frac{g_e}{g_t}$$

Equação 10

Onde:

DoR_e: Dominância relativa da espécie e;

g_e: Área basal da espécie e;

g_t: Área basal de todas as espécies.

$$DoA_t = \frac{\sum g_i}{A} = \sum DoA_{spp}$$

Equação 11

Onde:

DoA_t: Dominância absoluta total da comunidade;

g_i: Área basal da espécie i;

A: Área da unidade de amostral (parcela);

DoA_{spp}: Dominância absoluta de cada espécie;

O Índice de Valor de Importância, ou IVI, é um índice gerado a partir da soma dos valores relativos de densidade, frequência e dominância específicos. Como a soma dos valores pode ultrapassar 100, costuma-se dividir o valor resultante da soma por 3, para obter resultados que proporcionais limitados a até 100%. A Equação 12 apresenta a fórmula de cálculo do IVI, já considerando a correção para os valores percentuais resultantes (FELFILI *et al.*, 2011).

$$IVI_e = \frac{DR_e + FR_e + DoR_e}{3}$$

Equação 12

Onde:

IVI_e: Índice de Valor de Importância da espécie e;

DR_e: Densidade relativa da espécie e;

FR_e: Frequência relativa da espécie e;

DoR_e: Dominância relativa da espécie e.

3.4 Sensoriamento remoto

O Sensoriamento Remoto é uma técnica complementar no monitoramento de manguezais. Os principais sensores utilizados são considerados de alta resolução e muito alta, e permitem detalhamentos na escala de 1:50.000 a 1:10.000. Os principais utilizados são *ASTER*, *Geoeye*, *Hyperion*, *IKONOS*, *Landsat TM* e *ETM+*, *WorldView* e *Sentinel 2A* e *2B*, entretanto alguns apresentam acesso limitado, mediante pagamento (THAKUR *et al.*, 2020).

As técnicas de processamento das imagens obtidas remotamente são variadas e apresentam acurácia diretamente relacionada à resolução espacial da imagem. As principais técnicas são a interpretação visual, os índices de vegetação, as classificações supervisionada e não-supervisionada, o racionamento de bandas, a segmentação e análise de imagem baseada em objeto (OBIA) e o aprendizado de máquina (*machine learning*). Abordagens híbridas também são utilizadas, baseadas na combinação das diferentes técnicas desenvolvidas (SANTOS; BITENCOURT, 2016; THAKUR *et al.*, 2020).

A variedade de sensores tem sistemática de processamento similar sendo fundamental a coleta de dados em campo para validação dos dados remotamente coletados. O processamento das imagens remotas pode ser executado em um computador cliente (*desktop*), mas atualmente existem plataformas como o *Google Earth Engine* (GEE) e o *Microsoft Planetary Computer* que permitem o processamento em nuvens das imagens de satélite (CHEN *et al.*, 2017; SATYANARAYANA *et al.*, 2011; THAKUR *et al.*, 2020).

A composição dos pixels de um manguezal é baseada em solo, água e vegetação. Muitas vezes as informações ambientais de interesse desses componentes não são refletidas no espectro visível, sendo necessário utilizar sensores mais abrangentes, multiespectrais, que possam captar essas informações (THAKUR *et al.*, 2020).

Os sensores *Landsat-8* *SPOT-5* (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*), *Sentinel-2* e *WorldView* são utilizados para classificação de áreas de manguezais e apresentam acurácias que vão de 64% a 93%, respectivamente. O *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor utilizado em manguezais para obtenção de informações remotas temporais sobre a cobertura de árvores, índice de área foliar, taxa de produção primária, evapotranspiração e

índices de vegetação como NDVI, EVI, NDWI (ISHTIAQUE; MYINT; WANG, 2016; PASTOR-GUZMAN; DASH; ATKINSON, 2018; VALDERRAMA-LANDEROS *et al.*, 2018).

As acurácias obtidas na classificação das imagens estão diretamente relacionadas a resolução do sensor e a experiência do usuário. Imagens *Landsat* classificadas com abordagens híbridas apresentam acurácia entre 80% e 88% (MANNA *et al.*, 2013). A combinação de imagens do sensor *AVIRIS* (*Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer*) com imagens do sensor *ASTER* (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) e imagens aéreas apresentam acurácia entre 72% e 99% nas classificações (D'ORIO *et al.*, 2007) e *Sentinel* apresentam acurácias de 99% (THANH NOI; KAPPAS, 2017). A acurácia mais elevada dentre os sensores orbitais é da classificação de imagens *QuickBird* que apresentam acurácias de 100% devido sua resolução espacial de 2,5 m (CHATTERJEE; PORWAL; HUSSIN, 2008). Técnicas de *machine learning* aplicadas imagens obtidas com sensores do tipo *LiDAR* (*light detection and ranging*), embarcados em aeronaves remotamente pilotadas (ARP), apresentam acurácia entre 95,15% e 99,17% (CAMPOMANES; PADA; SILAPAN, 2016).

As dificuldades logísticas, de acesso e campo em áreas de manguezais torna o sensoriamento remoto um aliado fundamental para a análise desses ecossistemas. Um dos atributos comumente analisados é o Índice de Área Foliar (LAI), que fornece informações indiretas sobre a saúde do manguezal. As análises de LAI utilizam imagens *WorldView*, *ALOS* (*Advanced Land Observing Satellite*) *AVNIR-2* (*Advanced Visible and Near Infrared Radiometer*), *Landsat TM*, *IKONOS* e *SPOT*, com processamento de índices de vegetação, redes neurais artificiais e florestas aleatórias, combinadas com medidas em campo, inclusive utilizando equipamentos específicos para medição de área foliar no solo (GREEN *et al.*, 1997; KAMAL; PHINN; JOHANSEN, 2016; KOVACS *et al.*, 2004; KOVACS; WANG; FLORES-VERDUGO, 2005; ZHU *et al.*, 2017).

Os índices de vegetação são uma técnica de sensoriamento remoto utilizada desde a década de 1960, iniciada com o índice de Razão Simples (SR) utilizado para avaliar a saúde e o vigor da vegetação, identificar áreas desmatadas e monitorar mudanças na cobertura vegetal (JORDAN, 1969). Na década de 1970 o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Equação 13), foi

desenvolvido por Rouse *et al.* (1974) para estimar a cobertura vegetal e monitorar a saúde das plantas.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Equação 13

Onde:

NDVI: índice de vegetação por diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*);

NIR: banda no comprimento de onda do espectro infravermelho próximo;

RED: banda no comprimento de onda do espectro vermelho.

O NDVI permite diferenciar as áreas saudáveis daquelas deficientes a partir da classificação dos valores obtidos em intervalos entre o -1 e o 1. Valores negativos indicam áreas alvos não vegetais ou vegetais sem atividade. A partir de 0, indica vegetação sob diferentes níveis de estresse até as mais saudáveis que atingem o valor máximo (1). As quatro classes positivas utilizadas por Ruan *et al.* (2022) na análise do NDVI dos manguezais globais compreenderam de zero até 0,4; a partir de 0,4 até 0,6; a de 0,6 até 0,8; e de 0,8 até 1.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa está situada na Baixada Santista, trecho do litoral paulista, entre as porções litorâneas Norte e Sul do estado. Nesta região destaca-se o Complexo Estuarino de Santos e São Vicente (Figura 3), que abrange os municípios continentais de Bertioga, Cubatão e Praia Grande; bem como o município insular do Guarujá, localizado na Ilha de Santo Amaro; e os municípios de São Vicente e Santos, com porções continentais e insulares, essas situadas na Ilha de São Vicente (LAMPARELLI; MOURA, 1999).

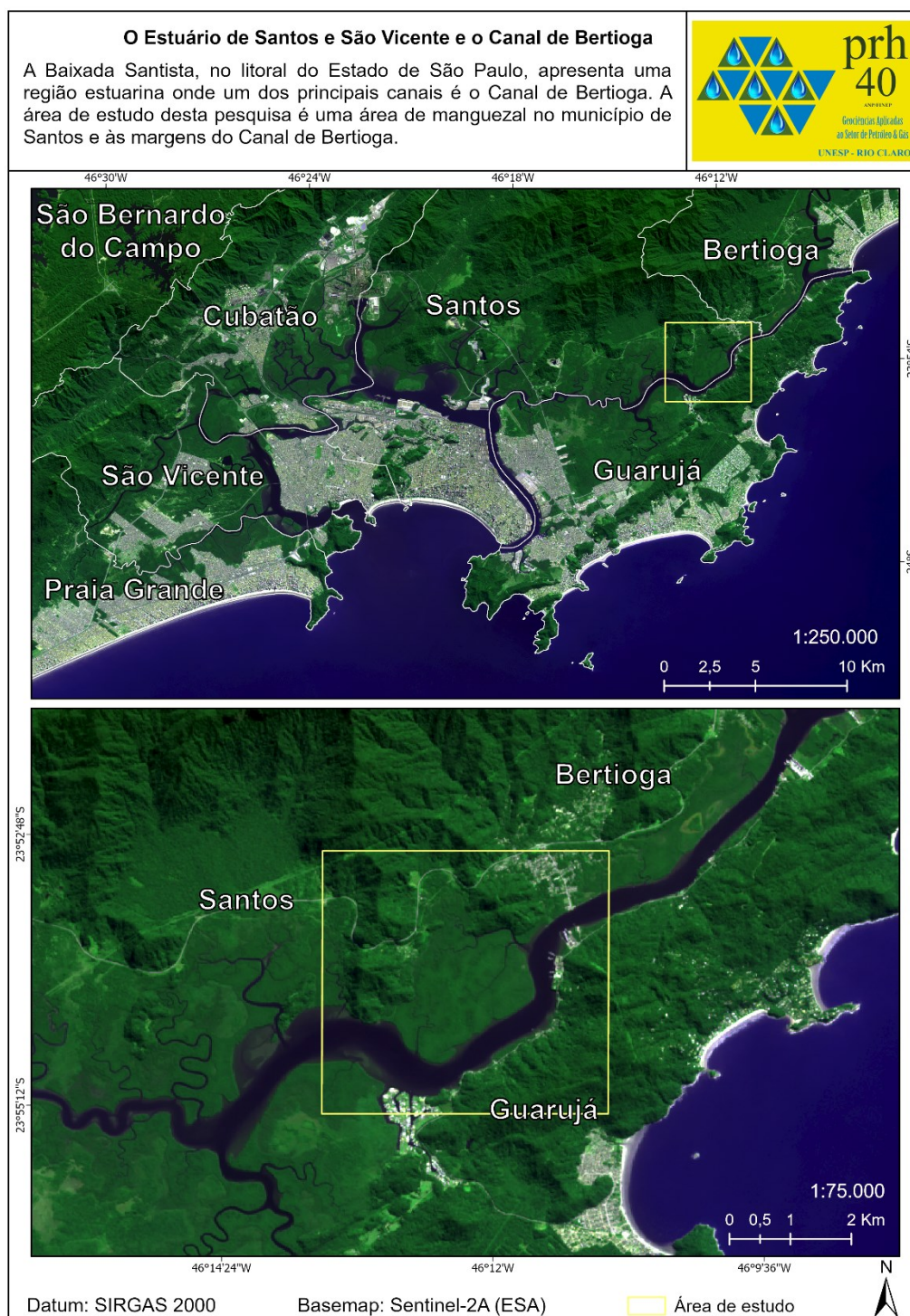
O litoral paulista encontra-se no compartimento litorâneo brasileiro denominado litoral das escarpas cristalinas (SILVEIRA, 1964 apud SUGUIO; MARTIN, 1987), zona da costa com influenciada pela borda oriental do Planalto Atlântico, disposto paralelamente à linha de costa. A região apresenta pontões de rochas do embasamento que vão em direção a linha de costa e que delimitam as baías, praias e planícies, essas preenchidas por depósitos sedimentares fluviomarinhas (RODRIGUES *et al.*, 1999; SUGUIO; MARTIN, 1987). Entre as regiões norte e sul do litoral paulista, encontra-se a Baixada Santista, uma região onde a forma de anfiteatro da serra colaborou no desenvolvimento dos estuários de Santos e São Vicente (AFONSO, 2006 apud PERINOTTO, 2010; PENTEADO, 1965 apud PERINOTTO, 2010).

Os principais rios contribuintes da Baixada Santista são: Aguapeú, Branco, Cubatão, Guaratuba, Guaraú, Itapanhaú, Jurubatuba, Mambú, Mogi, Preto e Quilombo (ALESP, 1994). O aporte fluvial desagua no Canal de Bertioga, principal corpo hídrico local, que separa o continente da Ilha de Santo Amaro e conecta o Estuário de Santos e o município de Bertioga em um percurso de 25 km, margeado por manguezais. O canal recebe influências mistas e semidiurnas das marés, principalmente na área mais próxima ao oceano, em Bertioga. A amplitude de maré de quadratura é de 0,9 m, e de maré de sizígia 1,4 m; a média é considerada 1,2 m com a amplitude máxima podendo chegar a até 3,0 m em alguns locais (FÚLFARO; PONÇANO, 1976 *apud* LAMPARELLI; RODRIGUES; MOURA, 1997).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger a região apresenta clima tropical quente e úmido, com umidade relativa do ar acima de 80% durante todo o ano, sem presença de uma estação seca pronunciada, apenas com

decréscimo da precipitação durante os meses de inverno (RODRIGUES; LAMPARELLI; DE MOURA, 1999).

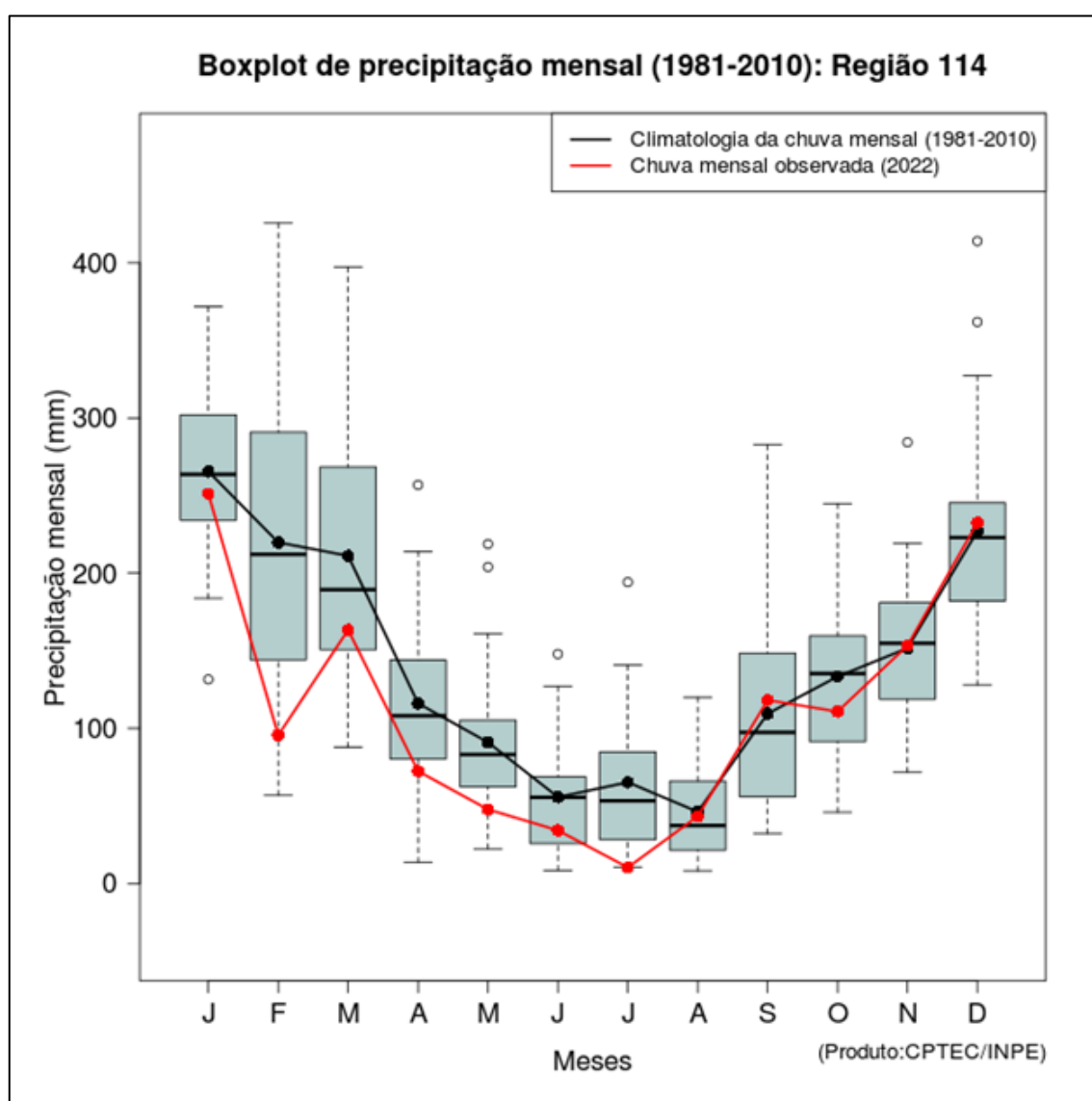
Figura 3 - Composição falsa cor do Complexo estuarino de Santos e São Vicente.



Legenda: Composição com espectro Vermelho(Red) /Infravermelho Próximo (NIR) /Azul (Blue) do Sentinel-2A. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Segundo dados do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (Agritempo) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), a amplitude térmica na região de Santos varia de 10°C a 28°C, com temperatura média anual em torno de 20°C. A precipitação anual acumulada fica entre 2000 e 2500 mm, distribuídos principalmente de janeiro a março (Figura 4) por influência de massas de ar polares (LAMPARELLI *et al.*, 2000; SANTA-CRUZ, 2004).

Figura 4 - Séries histórica (1981 – 2010) e recente (2022) da precipitação observada na região da área de estudo.



Legenda: Variação da precipitação mensal durante a série histórica representados pelo boxplot e linha preta e a variação para o ano de 2022 em vermelho. **Fonte:** Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As espécies de mangue encontradas no litoral paulista são a *Avicennia schaueriana* (mangue preto), *Laguncularia racemosa* (mangue branco) e *Rhizophora mangle* (mangue vermelho). Nos bosques de mangue também podem ser encontradas outras espécies arbustivas, como: *Hibiscus tiliaceus* e *Acrostichum aureum*, especialmente nas áreas a montante, com menor influência salina; (ANDRADE; LAMBERTI 1965 apud LAMPARELLI; MOURA, 1999).

O manguezal do rio Iriri está localizado na porção continental do município de Santos, no litoral do Estado de São Paulo, onde nascem os rios Iriri e Tia Maria, que desembocam no Canal de Bertioga (SANTA-CRUZ, 2004). As margens desses rios encontram-se aproximadamente 3km² de florestas de mangue, delimitadas entre coordenadas de latitude entre 23°53'S e 23°55'S, e longitude entre 46°11'W e 46°13'W (Figura 5) (LAMPARELLI; RODRIGUES; MOURA, 1997; SANTOS *et al.*, 2012).

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos da EMBRAPA, o solo do manguezal do rio Iriri é enquadrado como “Organossolo tiomórfico hêmico térrico” (OJy), na área de franja; “Organossolo tiomórfico fíbrico térrico” (OJy), no interior alagado do bosque; e “Gleissolo tiomórfico hístico sódico” (GJi), na zona de contato mangue-encosta. De maneira geral são solos que apresentam pH na faixa entre 6,40 e 7,45; com altos teores de matéria orgânica, sulfatos e salinidade; contendo cátions de Mg, Na, Ca e K, em sequência decrescente de concentração (FERREIRA *et al.*, 2007; PRADA-GAMERO; VIDAL-TORRADO; FERREIRA, 2004; SANTOS *et al.*, 2018).

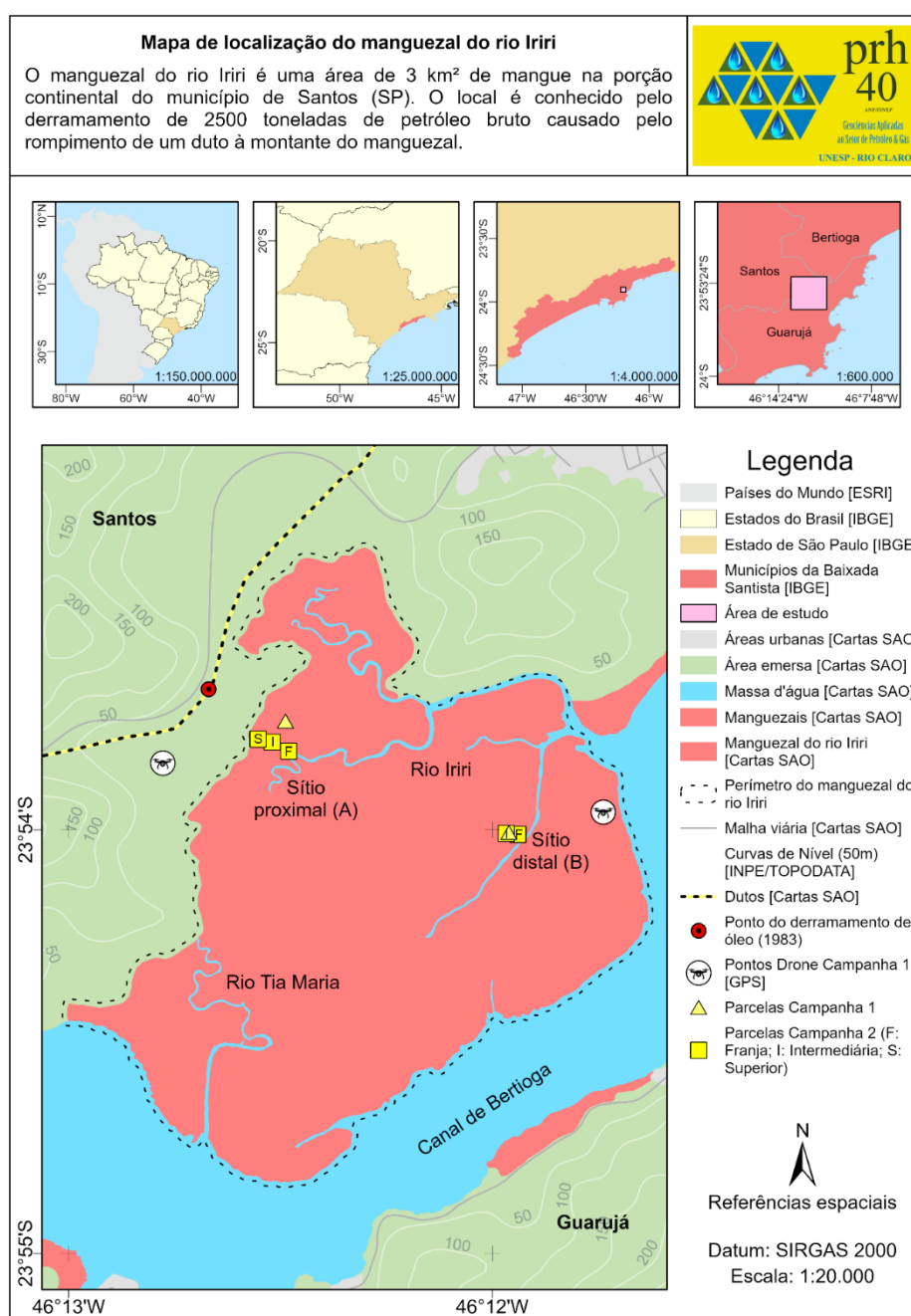
Segundo Santa-Cruz (2004), nos rios tia Maria e Iriri a temperatura da água é homogênea nas regiões internas do manguezal, com valores em torno de 24,4 °C . Já nas áreas de franja, mais próximas ao Canal de Bertioga, a temperatura da água é levemente elevada e atinge valores em torno de 26,8 °C (SANTA-CRUZ, 2004).

Na década de 1980, 120 km² de manguezais na Baixada Santista já eram considerados degradados, principalmente no Estuário de Santos. Os principais impactos envolviam despejos de resíduos sólidos, descartes de efluentes, aterramentos, contaminação com metais pesados e derramamentos de óleo (LAMPARELLI; MOURA, 1999; RODRIGUES; LAMPARELLI; DE MOURA, 1999).

No ano de 1992, a aprovação da Lei Complementar nº 54 em Santos, delimitou a área continental do município como área de proteção ambiental (APA), o que incluiu a proteção de diversas áreas de Mata Atlântica, assim como de

manguezais (SANTOS, 1992). A delimitação da APA de Santos descreve o oleoduto OSBAT dentro da área protegida, já que este iniciou suas operações anteriormente a promulgação da proteção, em 1968. O OSBAT tem 24 polegadas de diâmetro e faz um percurso de 121 km na ligação entre o Terminal Marítimo Almirante Barroso (TEBAR), em São Sebastião, e a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão (RPBC) (PETROBRAS).

Figura 5 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A ocorrência mais severa de derramamento de óleo do OSBAT, ocorreu em 14 de outubro de 1983, quando um bloco de rocha de 20 toneladas caiu sobre o oleoduto após a detonação de uma pedreira causando o derramamento de 2500 toneladas (3 milhões de litros) de petróleo bruto “Carmópolis” (Tabela 1) no rio Iriri e nos ecossistemas no entorno e à jusante, em direção ao Canal de Bertiooga. Na época foi considerado o maior derramamento de petróleo no país, espalhando-se por uma área de 100 km², e tornou-se o primeiro processo judicial brasileiro por danos ambientais (COIMBRA, 2007; CURY, 2002; LASSALLE *et al.*, 2023; MACHADO, 1992; RODRIGUES; MOURA; LAMPARELLI, 1989; SANTA-CRUZ, 2004).

Tabela 1 - Propriedades do petróleo "Carmópolis", derramado no manguezal do rio Iriri em 1983.

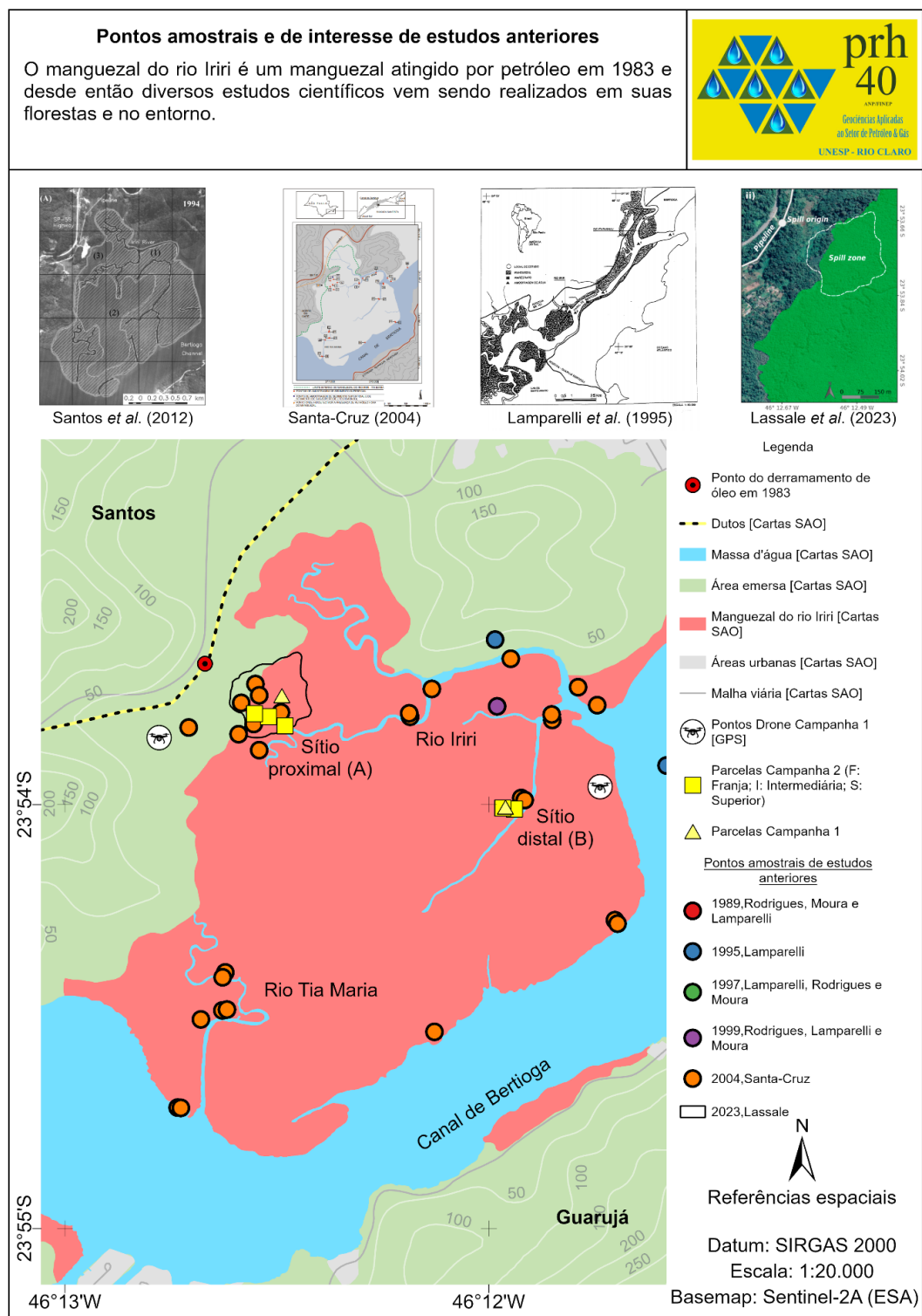
Propriedades	Valor
Densidade relativa (20,4°C)	0,8999 g·cm ³
Água por destilação (% do volume)	0,4%
Água e sedimento por centrifugação (% do volume)	0,4%
Salinidade (em mg·NaCl·L ⁻¹)	271,0 mg·NaCl·L ⁻¹
Enxofre total (% em peso)	0,325%
Ponto de fluidez	18° C
Resíduo de carbono <i>ramsbotton</i> (% em peso)	73,3%
Viscosidade (25° C)	177,5 CST
Viscosidade (37,8° C)	91,4 CST
Viscosidade (50° C)	50,1 CST
Acidez total	0,43 mg·KOH·g ⁻¹
Cobre	< 10 ppm
Ferro	< 02 ppm
Níquel	24 ppm
Vanádio	04 ppm

Fonte: Adaptado de (LAMPARELLI; RODRIGUES; MOURA, 1997; SANTA-CRUZ, 2004).

Desde então, o manguezal do rio Iriri tem sido um local constante de estudos científicos (Figura 6). Os trabalhos no local abordam distintas temáticas relacionadas ao derramamento em 1983, seus impactos ambientais e consequências posteriores. Análises realizadas por Coimbra (2007), Lassalle *et al.* (2023) e Santa-Cruz (2004) indicaram a presença de componentes de petróleo nos sedimentos do manguezal, caracterizando um impacto com permanência de quarenta anos no ambiente. Esta pesquisa busca contribuir com as pesquisas e o monitoramento realizado na área do Manguezal do rio Iriri, com uso de geotecnologias aliadas a avaliação de parâmetros

fitossociológicos do bosque. As coordenadas dos pontos visitados durante esta pesquisa estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 6 - Estudos anteriores no manguezal do rio Iiri



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Coordenadas dos pontos visitados nas atividades de campo.

Ponto	Identificação	Longitude	Latitude
1	ARP_A	46,212960000000W	23,897367001000S
2	ARP_B	46,195626000000W	23,899300001000S
3	C1_A_A	46,208138000000W	23,895679001000S
4	C1_B_B	46,199347000000W	23,900065001000S
5	C2_A_F	46,208013498000W	23,896903235000S
6	C2_A_I	46,208663999000W	23,896540001000S
7	C2_A_S	46,209215062000W	23,896422524000S
8	C2_B_F	46,198989663000W	23,900176799000S
9	C2_B_I	46,199444743000W	23,900133962000S

Legenda: ARP_A: Ponto de decolagem da ARP no sítio A. ARP_B: Ponto de decolagem da ARP no sítio B. C1_A_A: Centro da parcela do sítio A durante a primeira campanha. C1_B_BA: Centro da parcela do sítio B durante a primeira campanha. C2_A_F: Centro da parcela da franja do sítio A durante a segunda campanha. C2_A_I: Centro da parcela intermediária do sítio A durante a segunda campanha. C2_A_S: Centro da parcela superior do sítio A durante a segunda campanha. C2_B_F: Centro da parcela da franja do sítio B durante a segunda campanha. C2_B_I: Centro da parcela intermediária do sítio B durante a segunda campanha. **Fonte:** elaborado pelo autor.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de desenvolvimento desta pesquisa é baseada em atividades agrupadas em etapas. As atividades de cada etapa consistem na coleta de dados, tratamento e processamento, e a análise e discussão os resultados obtidos. As etapas foram designadas de acordo com os objetivos da pesquisa visando a obtenção de informações sobre a área de estudo, com uso de diferentes materiais e métodos. Foram definidas as seguintes etapas de desenvolvimento: pesquisa bibliográfica, geoprocessamento, sensoriamento remoto, cobertura do dossel, fitossociologia e testemunhos sedimentares.

A etapa de pesquisa bibliográfica levantou artigos científicos sobre o tema desta pesquisa, assim como demais pesquisas localizadas na área de estudo, o manguezal do rio Iriri. As etapas de geoprocessamento e sensoriamento remoto envolvem o desenvolvimento de uma base cartográfica e o processamento do NDVI, respectivamente. A etapa de cobertura do dossel visa a captura de imagens do dossel da vegetação, usando uma aeronave remotamente pilotada (ARP), para a parte superior, e a lente teleobjetiva de um celular, para a porção e inferior do dossel.

A etapa de fitossociologia corresponde a mensuração do diâmetro e altura dos indivíduos arbóreos dentro de parcelas montadas na área de estudo para o cálculo de alguns indicadores fitossociológicos. No interior dessas parcelas, durante a etapa de testemunhos sedimentares, os sedimentos do manguezal foram coletados com tubos de policloreto de vinila (PVC) em busca de indícios da contaminação e diferenças em relação às parcelas coletadas.

5.1 Pesquisa bibliográfica

A etapa de pesquisa bibliográfica contou com atividades de levantamento, processamento e compilação das contribuições anteriores de literatura científica, com objetivo de consolidar a fundamentação teórica e metodológica aplicadas nas etapas seguintes da pesquisa. Os resultados obtidos forneceram subsídios sobre a temática, metodologia, e área de estudo abordadas na pesquisa.

O levantamento de documentos para a revisão bibliográfica foi realizado a partir de artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares obtidos nas

bases de dados “*Elsevier Scopus*” e “*Clarivate Web of Science*”. A busca nas bases foi realizada utilizando a combinação de termos “índices de vegetação” e “manguezal” para busca nos campos de título, resumo ou palavras-chave das publicações indexadas.

Informações secundárias sobre a área de estudo e o acidente ocorrido em 1983 foram levantadas nas bases e bibliotecas de diferentes plataformas, repositórios e instituições, como a *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) e a Universidade de São Paulo (USP). Os termos utilizados na busca foram: “manguezal”, “Iriiri” e “rio Iriiri” considerando artigos científicos, relatórios técnicos, teses e dissertações.

Mapas e documentos cartográficos a respeito de pontos e áreas de interesse no manguezal do rio Iriiri, obtidos na pesquisa bibliográfica, passaram pelo processo de digitalização, georreferenciamento e vetorização, agregando essas informações na base cartográfica desenvolvida em Sistema de Informações Geográficas (SIG).

5.2 Geoprocessamento

A etapa de geoprocessamento consistiu em atividades voltadas ao desenvolvimento de uma base cartográfica e um banco de dados geográfico (*geodatabase*) com o Sistema de Informação Geográfica (SIG) *ESRI ArcGIS Pro*. Foi adotado o Sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) com referência ao *Datum* padrão brasileiro, o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas - SIRGAS2000.

O uso do SIG foi fundamental para delimitação, localização e caracterização da área de estudo, assim como, armazenamento, integração e manipulação dos arquivos do banco de dados com os ortomosaicos obtidos com drone e resultados exportados pelo *Google Earth Engine*.

Para o levantamento de arquivos vetoriais com limites administrativos, políticos e territoriais foram consultadas as fontes de dados espaciais abertas do Repositório de Geociências do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (DATAGEO). Para os arquivos matriciais altimétricos foi utilizada a plataforma TOPODATA, gerida pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Também

foram empregados dados restritos, oriundos dos bancos de dados espaciais das Cartas de Sensibilidade Ambiental a Derramamentos de Óleo (Cartas SAO) do Estuário de Santos. O acesso a esses dados faz parte da integração desta pesquisa ao projeto denominado “Geoprocessamento e Cartas SAO da Bacia de Santos”.

Os arquivos do banco de dados foram processados no SIG, para exibirem os atributos de interesse com a simbologia adequada, fornecendo os produtos cartográficos apresentados nesta pesquisa. As feições que compõem o banco de dados e suas fontes estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição das feições e fontes que compõem o banco de dados da pesquisa.

Fonte	Descrição	Feição
Cartas SAO	Dutos	Linha
Cartas SAO	Área emersa	Polígono
Cartas SAO	Áreas urbanas	Polígono
Cartas SAO	Malha viária	Polígono
Cartas SAO	Manguezais	Polígono
Cartas SAO	Manguezal do rio Iriri	Polígono
Fonte	Descrição	Feição
Cartas SAO	Massa d'água	Polígono
DATAGEO	UGRHIs do Estado de São Paulo (DAEE)	Polígono
ESRI	Países do Mundo	Polígono
GPS	Pontos Drone Campanha 1	Ponto
GPS	Pontos Parcelas Campanha 1	Ponto
GPS	Pontos Parcelas Campanha 2	Ponto
GPS	Pontos Parcelas Campanha 2 (Dia 22)	Ponto
GPS	Pontos Parcelas Campanha 2 (Dia 23)	Ponto
IBGE	Estados do Brasil	Polígono
IBGE	Municípios do Estado de São Paulo	Polígono
INPE/ TOPODATA	Curvas de nível (50m)	Linha

Legenda: DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. **Fonte:** elaborado pelo autor.

O SIG e as informações compiladas nesta atividade auxiliaram na delimitação da área de estudo, que foi realizada da seguinte maneira: os polígonos pertencentes ao manguezal do rio Iri foram agrupados e convertidos em um único polígono. A área delimitada no SIG foi exportada no formato vetorial (*shapefile*) e compactada para uso posterior na plataforma online de sensoriamento remoto.

Dentre os estudos mencionados na seção CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA, aqueles que apresentavam materiais cartográficos de interesse, passaram pelo processo de georreferenciamento seguido de vetorização, para sua integração ao banco de dados geográfico desta pesquisa. Este processo corresponde a sincronização das coordenadas dos pontos de interesse com o sistema de informação geográfica, para compatibilização com o banco de dados.

5.3 Sensoriamento Remoto

As atividades de sensoriamento remoto da pesquisa foram desenvolvidas na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que distribui e processa gratuitamente imagens de satélite usando serviços na nuvem. As interações na plataforma são realizadas a partir da linguagem de programação *Javascript*, cujo código-fonte utilizado encontra-se disponível online, na plataforma GEE, mediante requisição de acesso. Foram obtidas imagens das plataformas *Landsat-8*, do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), e *Sentinel 2-A*, da Agência Espacial Europeia (ESA), cujas configurações estão especificadas na Tabela 3.

No GEE foram desenvolvidos *scripts* para executarem as seguintes tarefas:

- Levantamento e filtragem das imagens orbitais;
- Descrição das informações do conjunto obtido e do período de mapeamento;
- Cálculo da imagem média para os períodos secos e úmidos anuais;
- Processamento do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) das médias;
- Visualização e exportação dos resultados.

O *script* de levantamento e filtragem contou com área de estudo delimitada na etapa anterior, que foi inserida na plataforma *Google Earth Engine* e utilizada como filtro espacial para imagens dos dois satélites mencionados, o perímetro do

manguezal também foi inserido na plataforma. As imagens dos satélites também foram filtradas para remoção de imagens com valores elevados de nuvens armazenados em seus metadados. O segundo *script* retornou informações de quantidade, mês e ano de captura das imagens dos conjuntos de cada satélite.

Tabela 3 – Especificações dos sensores dos satélites *Landsat-8* e *Sentinel-2A*.

Banda	Descrição	Comprimento de onda (nanômetros)		Resolução (m)
Landsat-8				
SR_B2	Blue	452,0	512,0	30
SR_B3	Green	533,0	590,0	30
SR_B4	Red	636,0	673,0	30
SR_B5	Near Infrared (NIR)	851,0	879,0	30
SR_B6	Shortwave Infrared (SWIR) 1	1556,0	1651,0	30
SR_B7	Shortwave Infrared (SWIR) 2	2107,0	2294,0	30
Sentinel-2A				
B2	Blue	492,1	496,6	10
B3	Green	559,0	560,0	10
B4	Red	664,5	665,0	10
B5	Red Edge 1	703,8	703,9	20
B6	Red Edge 2	739,1	740,2	20
B7	Red Edge 3	779,7	782,5	20
B8	Near Infrared (NIR)	833,0	835,1	10
B8A	Red Edge 4	864,0	864,8	20
B11	Shortwave Infrared (SWIR) 1	1610,4	1613,7	20
B12	Shortwave Infrared (SWIR) 2	2185,7	2202,4	20

Legenda: *Blue:* Azul; *Green:* Verde; *Red:* Vermelho; *Red Edge:* Borda Vermelha; *Near Infrared:* Infravermelho próximo; *Shortwave Infrared:* Infravermelho de Ondas Curtas. **Fonte:** Adaptado de Google Earth Engine Data Catalog.

A climatologia da área de estudo foi o critério utilizado para o agrupamento das imagens anuais (2014 a 2022), sendo delimitado como período seco de Abril a Setembro, e período úmido, de Janeiro a Março ou de Outubro a Dezembro. Para obter uma imagem representativa de cada período anual, as imagens agregadas de cada período foram processadas utilizando a operação média, que a partir do valor de todos os *pixels* de todas as imagens do conjunto agregado gera uma imagem resultante com o valor médio dos pixels em cada posição.

Os resultados foram analisados no espectro visível para identificação de nuvens ou falhas, descartando aqueles nessa situação. Imagens obtidas no ano

corrente também foram descartadas, pois o conjunto anual estaria incompleto. Os conjuntos de imagens estão expostos no Quadro 2, indicando como médias numeradas aqueles conjuntos de imagens que tiveram o NDVI processado.

Quadro 2 – Imagens e conjuntos agregados obtidas na plataforma GEE.

Ano	Período	<i>Landsat-8</i>	Observações	<i>Sentinel-2A</i>	Observações
2014	Seco	2	Média 1	0	Sem dados
	Úmido	1	Média 2	0	Sem dados
2015	Seco	1	Média 3	3	Média 1
	Úmido	0	Sem dados	0	Sem dados
2016	Seco	3	Média 4	4	Média 2
	Úmido	0	Sem dados	0	Sem dados
2017	Seco	1	Média 5	4	Média 3
	Úmido	0	Sem dados	0	Sem dados
2018	Seco	0	Sem dados	4	Média 4
	Úmido	0	Sem dados	0	Sem dados
2019	Seco	5	Média 6	6	Média 5
	Úmido	0	Sem dados	4	Ruido
2020	Seco	2	Média 7	11	Média 6
	Úmido	0	Sem dados	4	Média 7
2021	Seco	2	Ruído	9	Ruido
	Úmido	0	Sem dados	2	Média 8
2022	Seco	0	Sem dados	2	Ruído
	Úmido	0	Sem dados	1	Média 9
2023	Seco	3	Ano incompleto	5	Ano incompleto
	Úmido	0		1	

Fonte: Elaborado pelo autor.

O processamento do NDVI foi realizado segundo a Equação 13 utilizando as bandas dos espectros vermelho (*Red*) e infravermelho próximo (NIR). Para o satélite Landsat-8 as bandas utilizadas foram SR_B4 e SR_B5 e para o satélite Sentinel-2A foram utilizadas as bandas B4 e B8, respectivamente.

Onde NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada, NIR é a banda do infravermelho próximo e RED é a banda vermelha.

Esta atividade resultou em um aplicativo, com acesso aberto na plataforma GEE, que permite a alteração da área de interesse para o desenvolvimento da mesma metodologia aplicada neste estudo, assim como a consulta aos dados e códigos utilizados para o processamento das imagens.

5.4 Cobertura do dossel

A cobertura do dossel foi avaliada em suas porções superior e inferior, com emprego de métodos diferentes de análise. Para a porção superior, foram utilizadas imagens aéreas obtidas com drone, enquanto para a porção inferior, foram usadas imagens obtidas no manguezal, com uma câmera de celular com lente teleobjetiva.

O levantamento aéreo foi realizado com uma aeronave remotamente pilotada (ARP/ drone) para a geração do ortomosaico das áreas estudadas. Foram realizados dois voos com um drone da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro V.2.0 (Figura 7), planejados previamente com o software DroneDeploy, à 100 m de altitude. O drone é equipado com uma câmera que opera no espectro visível, com sensor CMOS de uma polegada e resolução de 20 megapixels. As imagens resultantes apresentaram Ground Sample Distance (GSD) de 2,3 cm/pixel.

Foram capturadas 900 imagens, processadas com auxílio do *software Agisoft Metashape*, que viabilizou o posicionamento geográfico e o alinhamento dos conjuntos de imagens, além de permitir correções e ajustes de qualidade. Após o alinhamento das imagens, foram processados, de maneira sequencial: a nuvem de pontos, o modelo tridimensional, a textura colorida, o Modelo Digital de Elevação (DEM) e o ortomosaico.

O registro da porção inferior do dossel foi realizado no centro das parcelas fitossociológicas montadas no manguezal, com uma câmera posicionada a 10 cm do solo, com visada de baixo para cima, para a estimativa da área proporcional de cobertura do dossel. As imagens do dossel foram processadas no computador com

o software *ImageJ* (National Institutes of Health), convertendo as imagens coloridas para o formato 8 *bits*, em escala de cinza. As imagens foram transformadas em binárias, com coloração preta para o dossel e branca para as áreas descobertas, sendo possível analisar pelo histograma a quantidade de *pixels* representativos da área de cobertura do dossel da vegetação e as áreas descobertas (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012).

Figura 7 – Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) DJI Phantom 4 Pro V2.0 (Drone).



Fonte: DJI.

5.5 Fitossociologia

O levantamento fitossociológico foi realizado com base na metodologia de parcelas múltiplas, alinhadas ao gradiente estrutural da floresta de manguezal, que vai da franja para o interior do bosque (SCHAEFFER-NOVELLI; CINTRÓN, 1986). Como referência para a localização dos sítios foi considerada a distância do antigo ponto de contaminação em direção ao Canal de Bertioga, tendo sido determinados o sítio A, proximal, nas imediações da área onde houve o derrame, e o sítio B, distal, contemplando um bosque mais distante do ponto de derrame.

Os sítios apresentavam bosques com diferentes características visuais, denominados superior (montante), intermediário e franja (jusante, junto ao canal), determinados pelos gradientes topográficos locais dentro da zona entremarés. No sítio distal (B), foram montadas parcelas apenas nos bosques intermediário e franja (jusante), pois não havia bosque superior devido à presença de curso d'água no sentido do transecto, caracterizando outro ambiente de franja (jusante ao bosque intermediário).

Foram montadas sete parcelas, totalizando um esforço amostral de 1300 m². Durante a primeira campanha de campo foram montadas duas parcelas com 20 m de lado em cada um dos sítios de estudo, enquanto na segunda campanha foram montadas cinco parcelas com 10 m de lado, sendo três no sítio proximal (A) e duas no sítio distal (B). A redução do tamanho da parcela na segunda campanha se deu pela constatação de que áreas de 100 m² seriam suficientemente representativas, ao analisar os dados da primeira campanha.

As parcelas foram medidas utilizando uma trena de fibra de vidro e delimitadas com uso de barbante (Figura 8A). A técnica de delimitação angular de “cateto/hipotenusa” foi adotada para garantir parcelas quadradas com vértices de 90°. Apenas indivíduos de porte arbóreo foram analisados, ou seja, aqueles em que era possível mensurar em seu caule principal o PAP ($h = 1,30$ m). As árvores posicionadas no limite da parcela também foram incorporadas na contagem. O PAP de cada indivíduo da vegetação foi mensurado utilizando uma fita métrica e a altura das árvores (h) foi mensurada com uso de instrumento linear e segmentado em módulos de 1 m, limitado a 8m, combinada com estimativa para indivíduos mais altos que o limite do instrumento (Figura 8B). Durante a segunda campanha também foram quantificados o banco de recrutas de cada uma das parcelas, considerando os indivíduos jovens que não atendiam os critérios de inclusão dos indivíduos arbóreos.

No levantamento fitossociológico foram incluídos todos os indivíduos vivos que atendessem cumulativamente os seguintes critérios: pelo menos 1,3 m de altura (h) e no mínimo 5 cm de (PAP). Para indivíduos que apresentavam mais de um caule, foram mensurados o perímetro de todos os caules e somados, para obtenção do PAP do indivíduo. Nestes casos, foi calculada a área basal do indivíduo (g_i), para evitar a superestimativa dos valores (FELFILI *et al.*, 2011).

Para caracterização da comunidade vegetal de cada parcela foram registrados para o DAP e a altura, os valores: mínimo (Min) e o máximo (Max), a média ($\bar{X}$) e o desvio padrão (DP); assim como a frequência absoluta (F_A), frequência relativa (F_R), densidade absoluta (D_A), densidade relativa (D_R), dominância absoluta (Do_A), dominância relativa (Do_R), e índice de valor de importância (IVI).

Figura 8 – Montagem de parcelas (A) e mensuração de perímetro e altura dos indivíduos arbóreos (B).



Fonte: A: Rodrigues, 2022. B: Semensatto, 2023.

5.6 Testemunhos sedimentares

Para a coleta de testemunhos foram utilizados tubos de policloreto de vinila (PVC) com 2,0 m de comprimento e 2,0 polegadas de diâmetro e tampões de mesmo material e diâmetro para o isolamento das extremidades do tubo.

Na primeira campanha foram coletados testemunhos em triplicata para cada parcela e na segunda campanha foram coletados testemunhos únicos para cada parcela. O procedimento consistiu em cravar o tubo e afundar cuidadosamente no solo, mantendo apenas um palmo acima do solo para o manuseio, em seguida isolar seu topo com um tampão e proceder com a remoção e selamento da base com outro tampão. Os tubos foram identificados, limpos e encaminhados na posição vertical até o laboratório, onde foram lateralmente abertos com auxílio de ferramenta de corte.

O conteúdo foi descrito, qualitativamente em busca de atributos relacionados a antiga contaminação, assim como para estudos em outros projetos associados, nomeadamente a caracterização da assembleia de foraminíferos em diferentes profundidades, contemplando a fase anterior e posterior ao derramamento de óleo.

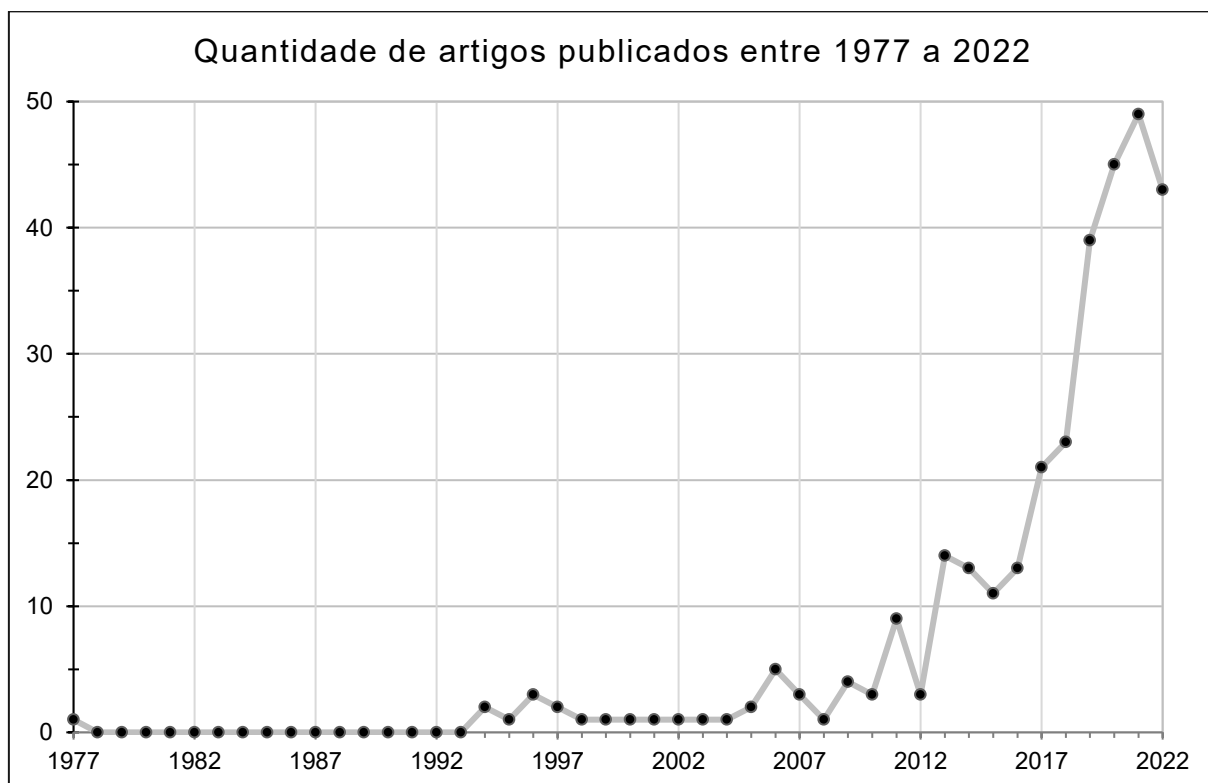
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Pesquisa bibliográfica

As bases de dados científicos apresentaram os seguintes resultados: *Clarivate Web of Science* recuperou 273 registros e a base *Elsevier Scopus* recuperou 405. A comparação das bases resultou em 208 registros duplicados em ambas as bases, que removidos combinaram em 470 registros únicos. Destes registros 347 representavam artigos científicos, dos quais 317 haviam sido publicados até 2022, sendo esse conjunto utilizado nas análises.

Os 317 artigos foram publicados no período de 1977 a 2022 (Figura 9), por 1157 autores diferentes em 170 periódicos distintos. A taxa de crescimento do tema está em torno de 8,72% ao ano, e a média de idade dos documentos é de 6,15 anos, apontando para um aumento da produção intelectual a partir de 2015.

Figura 9 - Gráfico da quantidade de artigos publicados no período de 1977 a 2022.

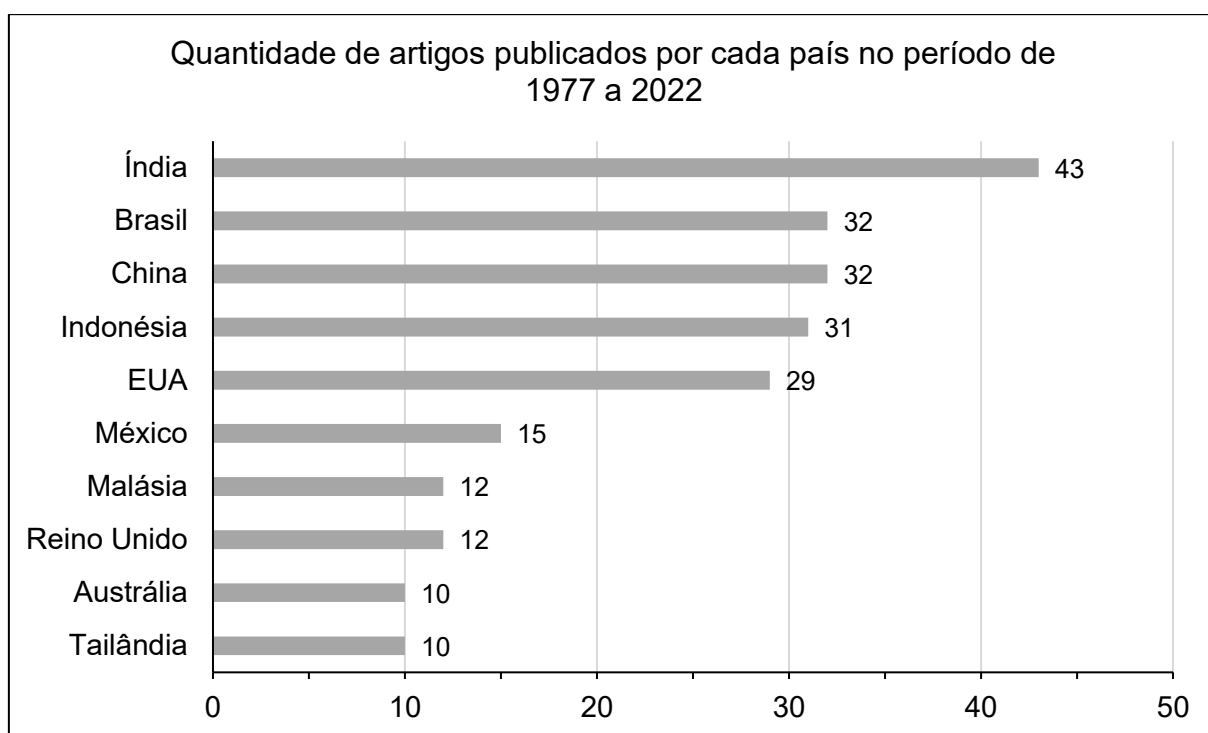


Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro artigo com o tema pesquisado foi publicado em 1977, depois, existe uma lacuna sem publicações até 1993. De 1994 em diante, a quantidade aumenta, variando de um a cinco artigos até 2011, com nove registros. A partir de 2012, a quantidade se eleva com mais intensidade com 14 artigos em 2014, 23 em 2018 e 49 em 2021, ápice da série analisada.

Os artigos encontrados na pesquisa bibliográfica são originários de 36 países distintos, com os dez principais ordenados na Figura 10. Dentre esses países, Indonésia, Austrália, Brasil, México, Malásia e Índia, apresentam grandes áreas de manguezais, que combinadas chegam a 48,5% do total global (GIRI *et al.*, 2011).

Figura 10 - Gráfico da quantidade de artigos publicados por cada país no período de 1977 a 2022.



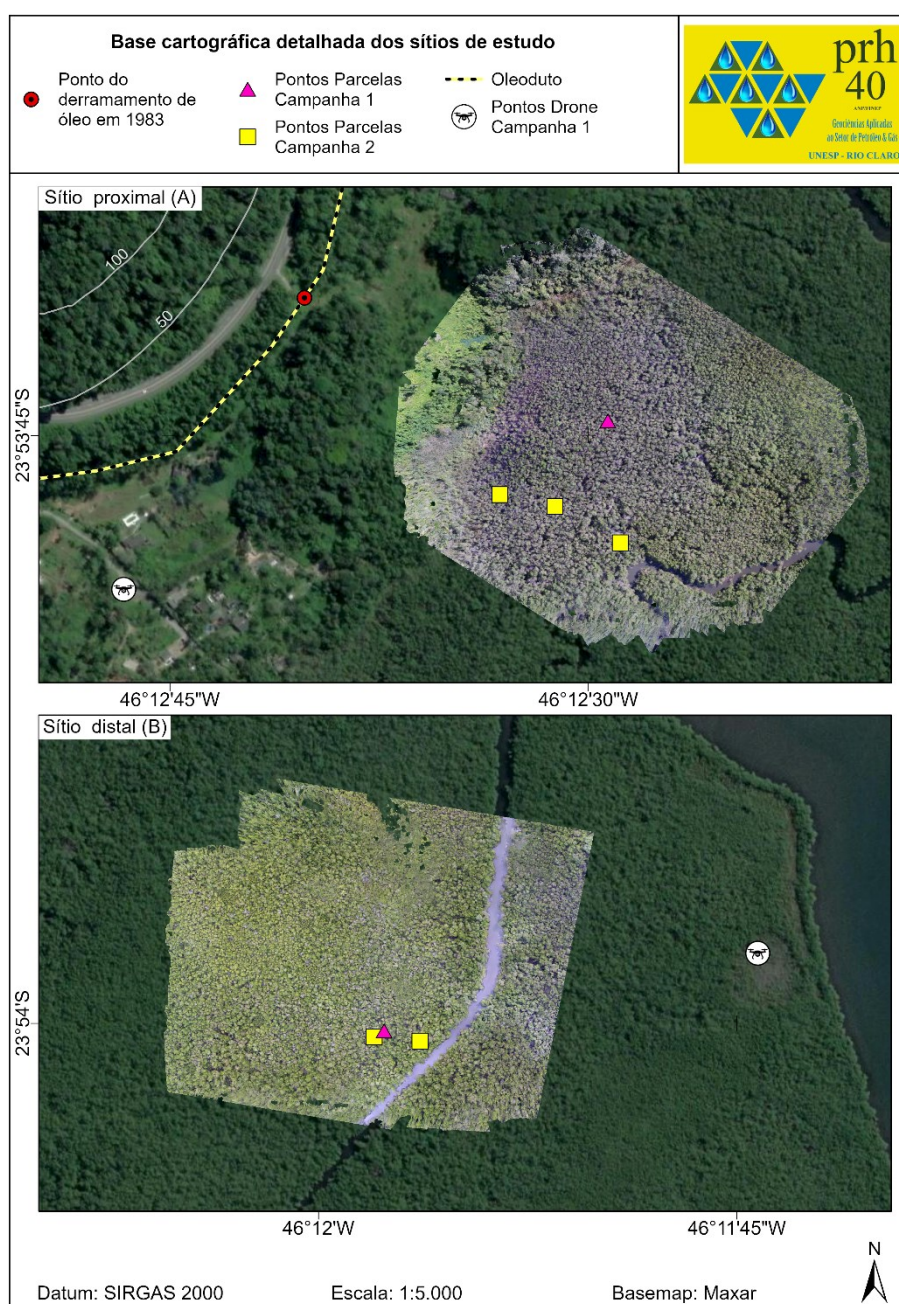
Fonte: Elaborado pelo autor.

A pesquisa bibliográfica voltada a área de estudo retornou 26 documentos entre dissertações, teses e relatórios técnicos relacionados ao manguezal do rio Iriri. Cada um deles com temáticas e abordagens distintas relacionadas a análise e monitoramento de uma área costeira sensível contaminada por petróleo.

6.2 Geoprocessamento

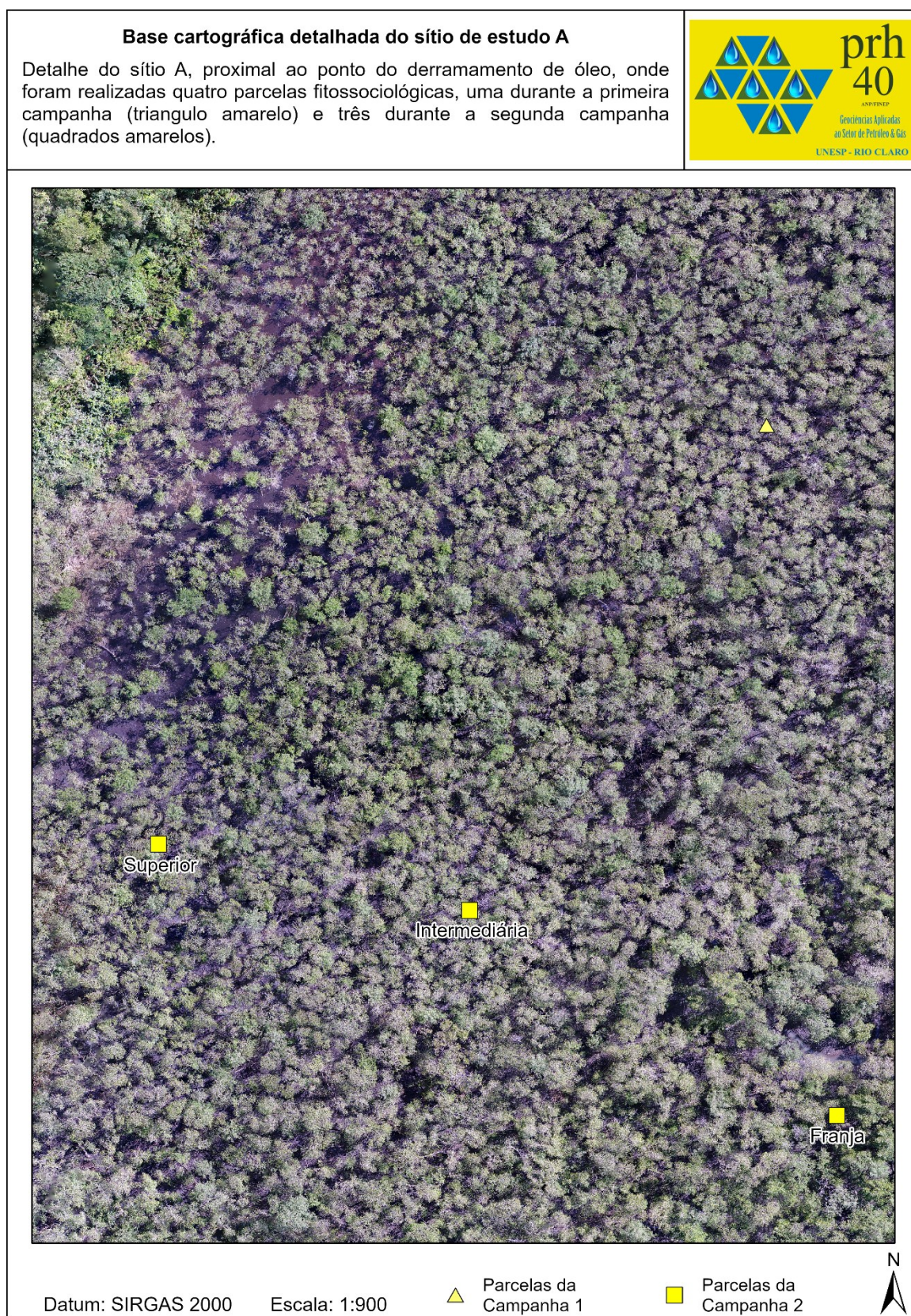
As bases cartográficas desenvolvidas com fotografias aéreas de *drone* na etapa de geoprocessamento estão apresentadas em conjunto na Figura 11, na escala 1:5.000, e separadamente, em escalas 1:900 para o sítio A (Figura 12) e 1:500 para o sítio B (Figura 13).

Figura 11 – Bases cartográficas dos sítios estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Base cartográfica do sítio proximal (A).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Base cartográfica do sítio distal (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 Sensoriamento Remoto

Os dados obtidos na plataforma *Google Earth Engine* (GEE) estão disponíveis e acessíveis *online*, com diversas opções dinâmicas desenvolvidas através do *app*, como a criação de imagens sequenciais animadas que permitem uma visualização espacial ao longo do tempo. Na sequência são apresentados os resultados estáticos obtidos com o GEE.

O cálculo das medias das imagens orbitais permitiu a aplicação do NDVI nos conjuntos, obtendo valores numéricos e representação visual em escala de cores para toda a região do manguezal. Para as parcelas fitossociológicas amostradas em campo, o valor do NDVI durante as médias analisadas está apresentado nos gráficos a seguir (Figura 14 e Figura 15).

A variação do NDVI ao longo do tempo, de acordo com as médias *Landsat-8* ficou entre 0,23 e 0,37 para todas as parcelas e campanhas. Destaca-se que todas as parcelas do sítio distal (B) apresentaram valores maiores de NDVI, entre 0,33 e 0,37, ao passo que as parcelas do sítio proximal apresentaram valores inferiores, entre 0,23 e 0,33. As parcelas de ambos os sítios apresentam comportamento similar entre si durante o período em que as médias foram analisadas, com os menores valores quase sempre apresentados no período seco de 2015.

As parcelas C1-B-B e C2-B-I apresentaram o mesmo comportamento, causado pela resolução espacial do sensor *Landsat-8*, que não distingue pontos tão próximos como *pixels* diferentes na imagem orbital. Devido à melhor resolução espacial do *Sentinel-2A*, o comportamento das parcelas mencionados foi detectado como distinto, apesar de próximo.

No caso dos resultados do *Sentinel-2A*, os valores do NDVI estão na faixa entre 0,55 e 0,71. Assim como nos resultados anteriores, os valores das parcelas do sítio distal apresentam valores sempre superiores aqueles das parcelas do sítio proximal.

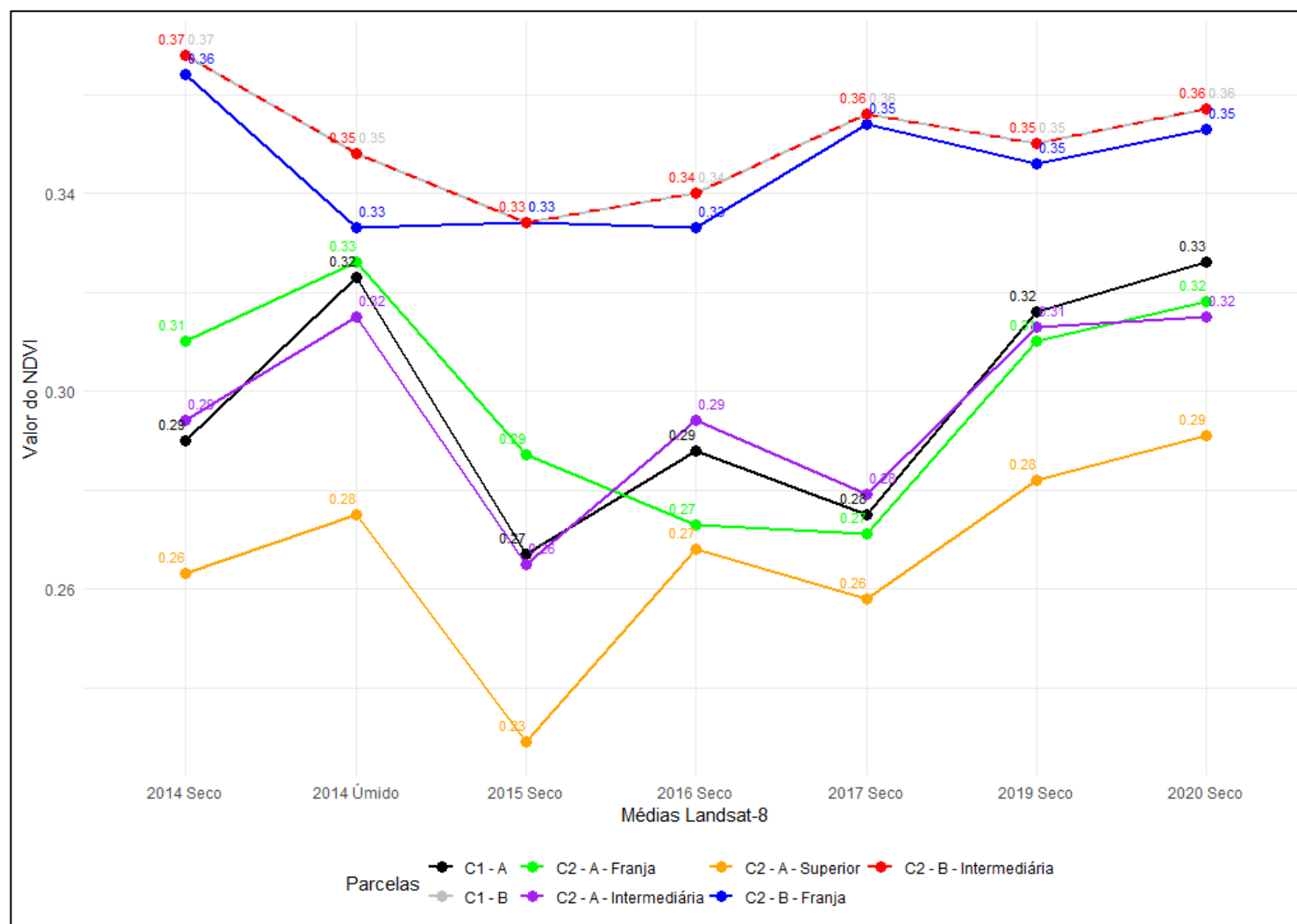
As parcelas C1-A-A e C2-A-I apresentaram resultado similar entre si e em relação ao outro sensor. Já as parcelas C2-A-F e C2-A-S apresentaram comportamento bastante distinto do observado no sensor *Landsat*.

A análise da variação do NDVI para cada satélite também pode ser observada nas figuras que trazem os gráficos em caixa (*boxplot*) para o NDVI do *Landsat-8* (Figura 16) e para o NDVI do *Sentinel-2A* (Figura 17). Em ambos os sensores pode

ser notado que os valores do NDVI são superiores para a área distal em relação a área proximal, demonstrando maior vigor da vegetação na região mais distante ao derramamento.

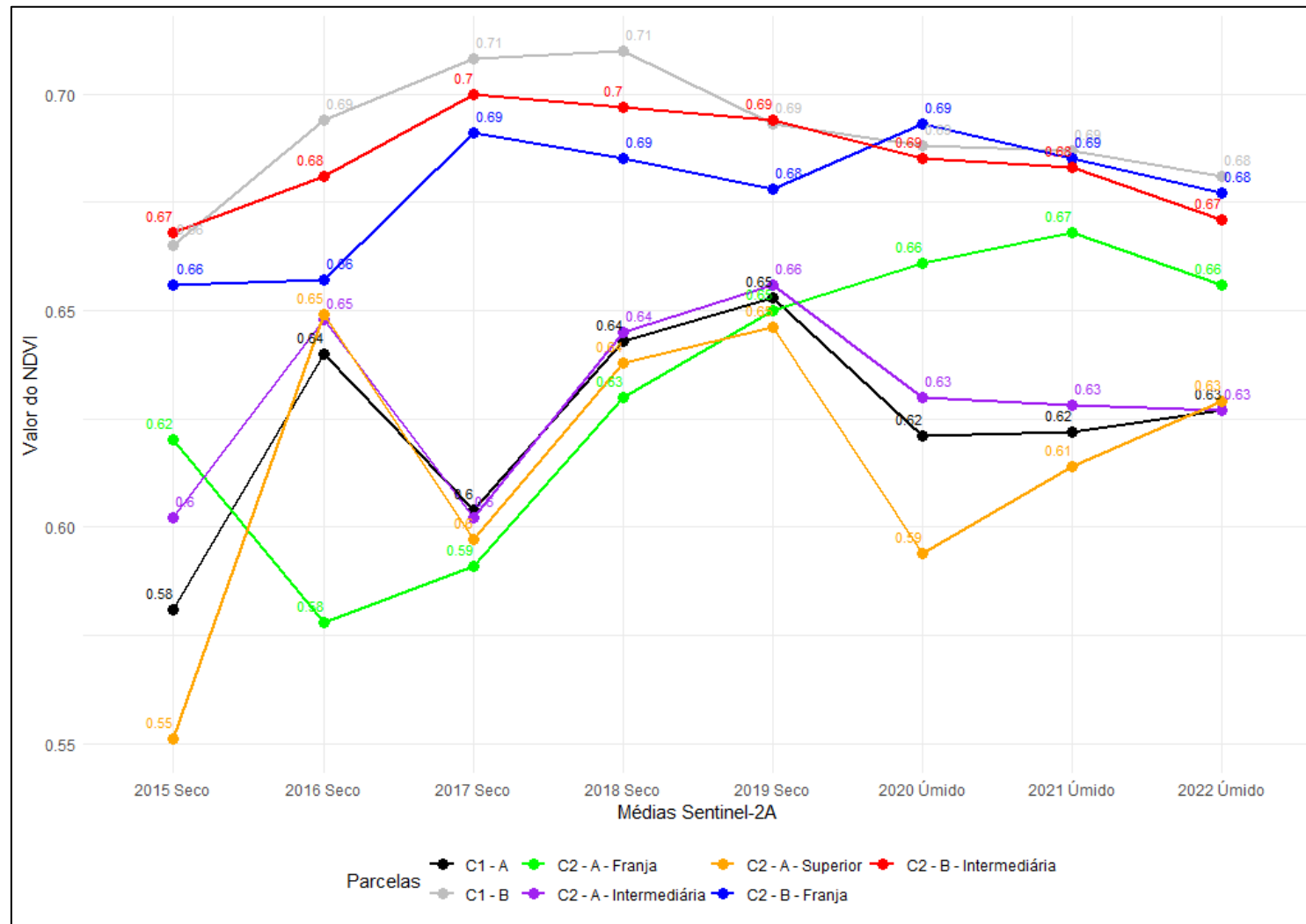
O NDVI indica a saúde da vegetação de acordo com os valores entre 0 e 1. Valores negativos, até -1, indicam áreas com água ou solo exposto, e a partir de 0, indica vegetações sob diferentes níveis de estresse. Considerando que os valores do sítio proximal (A) sempre estão inferiores aos valores do sítio distal (B), é possível inferir que a vegetação da área proximal está sob maior efeito estressante que o sítio distal.

Figura 14 - Variação do índice NDVI das parcelas nas médias obtidas a partir das imagens orbitais da plataforma *Landsat-8*.



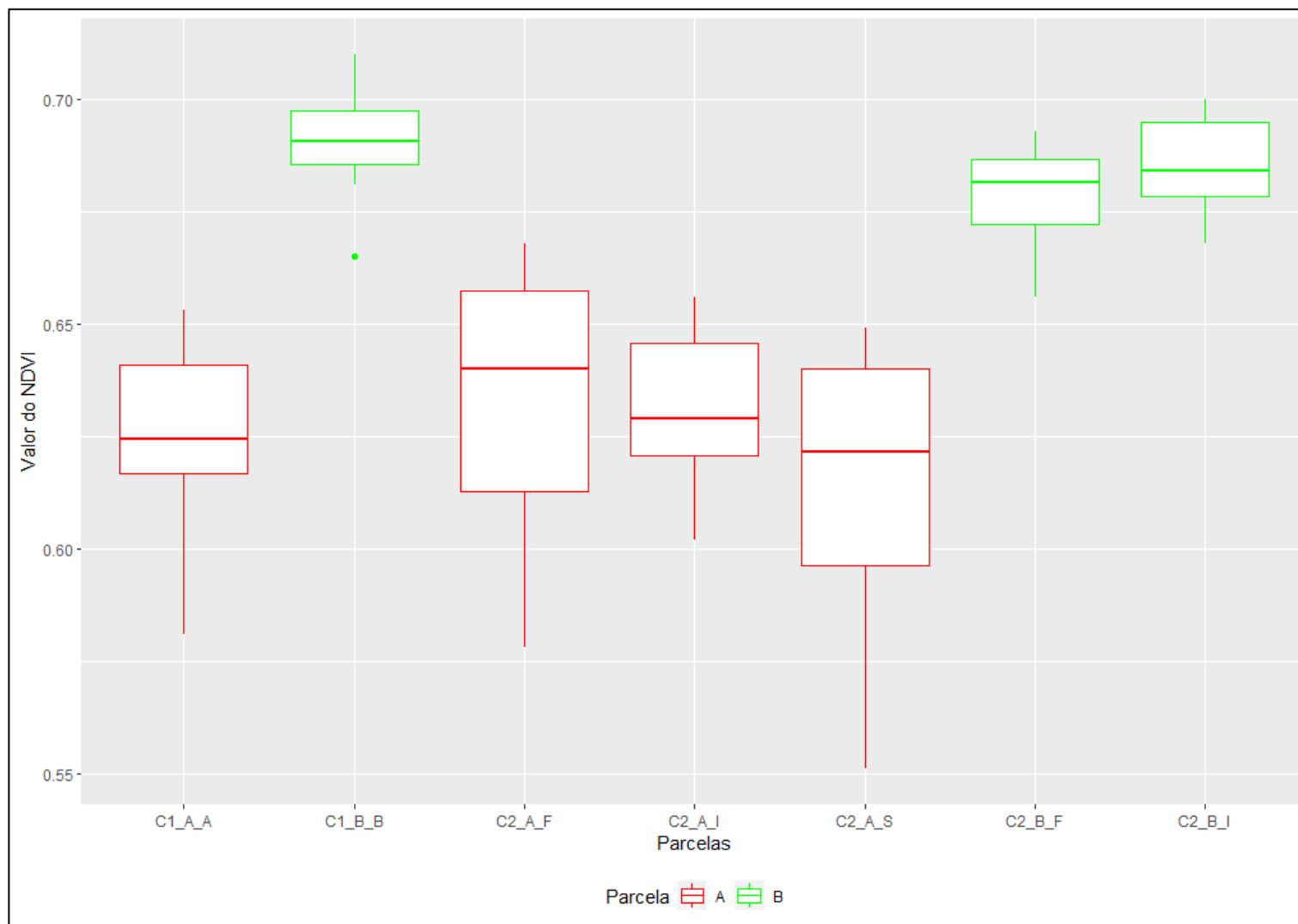
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 - Variação do índice NDVI das parcelas nas médias obtidas a partir das imagens orbitais da plataforma *Sentinel-2A*.



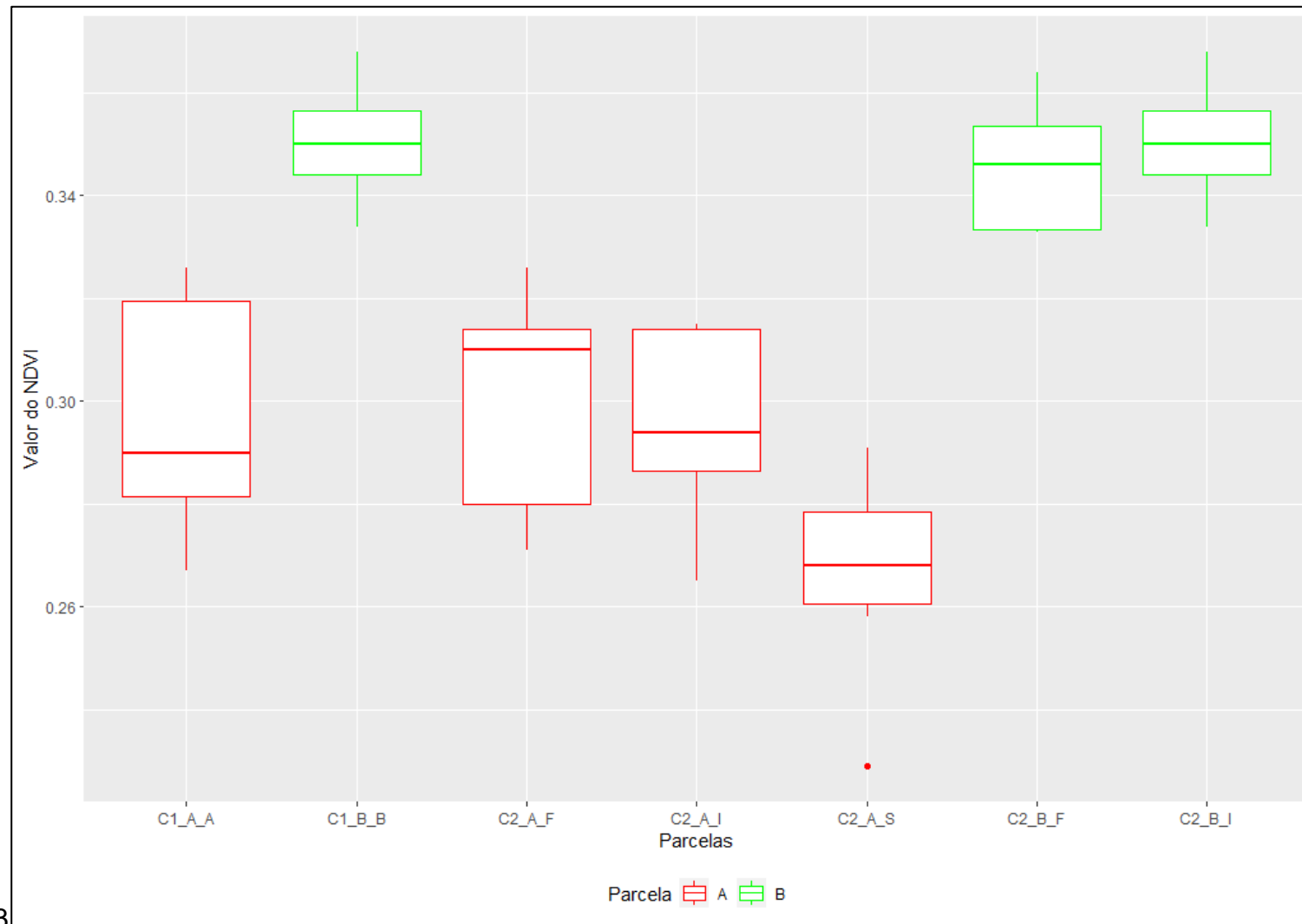
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Valor do NDVI obtido pelo *Landsat-8* para as parcelas fitossociológicas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Valor do NDVI obtido pelo *Sentinel-2A* para as parcelas fitossociológicas.



3

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.4 Cobertura do dossel

A análise da cobertura inferior do dossel foi realizada com base em *pixels* representativos das áreas com presença ou ausência da vegetação. Durante ambas as campanhas realizadas, o sítio distal apresentou uma cobertura superior do dossel em relação ao sítio proximal. Na primeira campanha a diferença foi de 8,7% enquanto na segunda campanha, a diferença foi de 3,3% para as parcelas da franja e 7,4% para as parcelas intermediárias. As imagens do dossel e os resultados completos estão apresentados nas imagens a seguir (Figura 18 e Figura 19) e os valores numéricos são apresentados na Tabela 4.

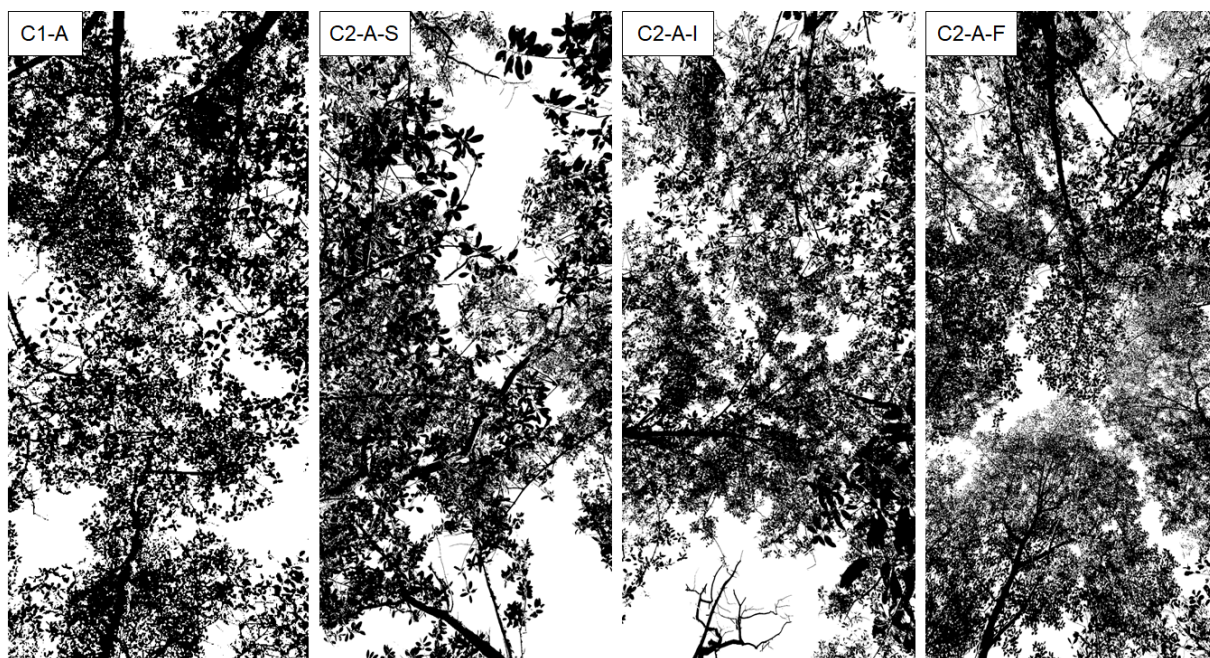
Tabela 4 - Área percentual da cobertura do dossel baseada na contagem de *pixels* das imagens binárias.

Campanha	Sítio	Resolução	Cobertura do dossel	Área descoberta
1	A	759040	44,8%	55,2%
1	B	759040	53,5%	46,5%
2	A (Fanja)	7322112	43,2%	56,8%
2	A (Intermediária)	7322112	51,4%	48,6%
2	A (Superior)	7322112	50,9%	49,1%
2	B (Fanja)	7322112	39,9%	60,1%
2	B (Intermediária)	7322112	44,0%	56,0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

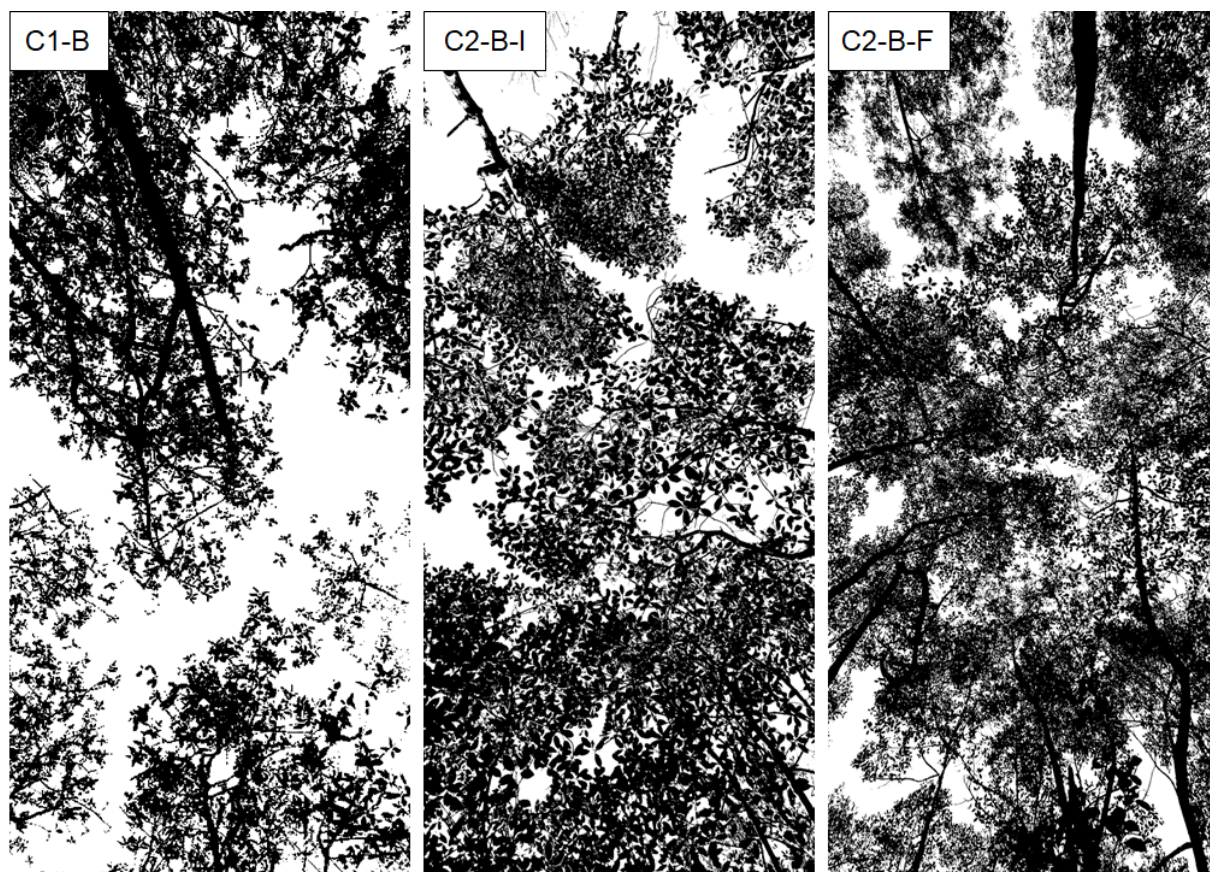
Em relação ao dossel da vegetação dos sítios estudados, os valores percentuais de cobertura observados durante a campanha 1 são maiores para o dossel no sítio distal em relação ao proximal. Apesar disso, esse comportamento não foi verificado durante a segunda campanha, onde os valores de cobertura das parcelas da franja e intermediária do sítio distal (B) foram inferiores aos valores do sítio proximal. O valor de cobertura para a parcela superior do sítio proximal apresentou cobertura de 50,9%, valor superior aos valores das demais parcelas da franja e intermediária do sítio distal.

Figura 18 - Imagens binárias da cobertura do dossel do sítio A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Imagens binárias da cobertura do dossel do sítio B.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 Fitossociologia

Os dados fitossociológicos a nível de indivíduo estão apresentados no APÊNDICE 1 – Tabelas fitossociológicas. Os resultados seguintes desta seção são apresentados a nível de parcelas. Os resultados do levantamento fitossociológico são apresentados em conjuntos de tabelas, que trazem dados estatísticos de cada parcela e dados fitossociológicos das campanhas.

Os dados estatísticos das parcelas durante a primeira campanha estão apresentados na Tabela 5, enquanto os dados fitossociológicos da campanha estão descritos na Tabela 6. Os dados estatísticos das parcelas durante a segunda campanha estão apresentados por sítio, na Tabela 7 para o sítio proximal (A) e na Tabela 8 para o sítio distal (B). Na Tabela 9 estão descritos os dados fitossociológicos da segunda campanha.

Dados comparativos entre as campanhas 1 e 2, sem levar em consideração as parcelas, é apresentada na Tabela 10.

Tabela 5 - Tabela estatística para as parcelas do sítio proximal (A) e distal (B), durante a primeira campanha.

Variável	C1-A-A		C1-B-B	
N	12		20	
Área total (ha)	0,04		0,04	
Espécie	Lr	Rm	Lr	Rm
n	0	12	2	18
DAP min	0	6,53	15,92	3,57
DAP médio	0	13,75	24,06	7,87
DAP máx.	0	29,95	32,21	26,87
Desvio Padrão (DAP)	0	7,30	11,52	5,84
g _i [cm ²]	0	1148,31	608,62	712,71

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; DAP min: Diâmetro na altura do peito mínimo; DAP médio: Diâmetro médio na altura do peito; DAP máx.: Diâmetro na altura do peito máximo; g_i: área basal do indivíduo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A partir da fitossociologia dos sítios estudados, foi possível observar, durante a primeira campanha, uma dominância da espécie *Rhizophora mangle* em relação a *Laguncularia racemosa*. Entretanto, esse cenário se inverte durante a segunda

campanha, com domínio do mangue branco e com algumas parcelas sem presença do mangue vermelho.

Tabela 6 - Tabela fitossociológica da primeira campanha.

Variável	Campanha 1	
N	32	
Área total (ha)	0,08	
Espécie	Lr	Rm
n	2	30
g _i [cm ²]	608,62	1861,02
DAe [ind./ha]	25	375
Dre [%]	6%	94%
FAe [%]	50%	100%
FRe [%]	33%	67%
DoA [m ² /ha]	9,51	29,08
DoRe [%]	25%	75%

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; g_i: área basal do indivíduo; DAe: Densidade absoluta da espécie; Dre: Densidade relativa da espécie; FAe: Frequência absoluta da espécie; FRe: Frequência relativa da espécie; DoA: Dominância absoluta da espécie; DoRe: Dominância relativa da espécie. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Tabela estatística para as parcelas do sítio proximal (A) durante a segunda campanha.

Variável	C2-A-F		C2-A-I	C2-A-S
N	12		22	14
Área total (ha)	0,01		0,01	0,01
Espécie	Lr	Rm	Lr	Lr
n	11	1	22	14
DAP min	3,66	44,63	2,71	7,00
DAP médio	14,70	44,63	10,47	15,44
DAP máx.	44,63	44,63	24,19	42,65
Desvio Padrão (DAP)	11,07	-	5,45	10,81
h min	2,50	10	3,00	5,00
h médio	6,79	10	7,73	7,79
h máx.	10,0	10	12,0	10,0
Desvio Padrão (h)	2,62	-	2,75	1,53
g _i [cm ²]	929,89	276,73	1759,08	1794,63

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; DAP min: Diâmetro na altura do peito mínimo; DAP médio:

Diâmetro médio na altura do peito; DAP máx.: Diâmetro na altura do peito máximo; h min: Altura mínima; h médio: altura média; h máx.: Altura máxima; g_i: área basal do indivíduo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Tabela estatística e fitossociológica para as parcelas do sítio distal (B), durante a segunda campanha.

Variável	C2-B-F		C2-B-I	
N	11		29	
Área total (ha)	0,01		0,01	
Espécie	Lr	Rm	Lr	Rm
n	2	9	10	19
DAP min	13,69	12,10	7,96	6,37
DAP médio	14,64	20,98	14,32	15,28
DAP máx.	15,60	42,65	23,24	30,56
Desvio Padrão (DAP)	1,35	11,26	4,89	7,28
h min	6,50	5,50	5,00	4,50
h médio	6,75	8,11	8,75	7,71
h máx.	7,00	12,00	13,00	12,00
Desvio Padrão (h)	0,35	2,43	3,31	2,34
g _i [cm ²]	338,20	2146,29	1568,95	3177,09

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; DAP min: Diâmetro na altura do peito mínimo; DAP médio: Diâmetro médio na altura do peito; DAP máx.: Diâmetro na altura do peito máximo; h min: Altura mínima; h médio: altura média; h máx.: Altura máxima; g_i: área basal do indivíduo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Durante a segunda campanha, foi possível comparar os dados das parcelas da franja e intermediária entre os sítios A e B. A abundância das espécies se alterna entre os sítios, com predominância de *Laguncularia racemosa* (Lr) no sítio A e *Rhizophora mangle* (Rm) no sítio B, tanto para parcela da franja como para a parcela intermediária. A variação do DAP médio de cada espécie, em centímetros, nas parcelas de franja: foi entre 14,64 e 14,70 para Lr; e entre 20,98 e 44,63 para a Rm. Nas parcelas intermediárias a variação da Lr foi entre 10,47 cm e 14,32 cm. No caso da Rm, apenas uma foi contabilizada na parcela intermediária, com DAP médio de 44,63 cm.

Tabela 9 - Tabela fitossociológica da segunda campanha.

Variável	Campanha 2	
N	88	
Área total (ha)	0,07	
Espécie	Lr	Rm
n	59	29
g _i [cm ²]	6390,75	5600,11
DAe [ind./ha]	842,86	414,29
DRe [%]	67,05	32,95
FAe [%]	50,00	100,00
FRe [%]	33,33	66,67
DoAe [m ² /ha]	130,42	114,29
DoRe [%]	53,30	46,70

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; g_i: área basal do indivíduo; DAe: Densidade absoluta da espécie; DRe: Densidade relativa da espécie; FAe: Frequência absoluta da espécie; FRe: Frequência relativa da espécie; DoAe: Dominância absoluta da espécie; DoRe: Dominância relativa da espécie. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Tabela fitossociológica de ambas as campanhas realizadas no manguezal do rio Iriri.

Variáveis	Campanha 1		Campanha 2	
N	32		88	
Área total (ha)	0,08		0,07	
Espécie	Lr	Rm	Lr	Rm
n	2	30	59	29
DAP min	15,92	3,57	2,71	6,37
DAP médio	24,06	10,23	12,72	18,06
DAP máx.	32,21	29,95	42,65	44,63
g _i [cm ²]	608,62	1861,02	6390,75	5600,11
DAe [ind./ha]	25	375	842,86	414,29
Dre [%]	6,25	93,75	67,05	32,95
FAe [%]	50	100	50	100
FRe [%]	33,33	66,67	33,33	66,67
DoA [m ² /ha]	9,51	29,08	130,42	114,29
DoRe [%]	24,64	75,36	53,30	46,70

Legenda: N: número de indivíduos; Espécie: Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; n: número de indivíduos por espécie; DAP min: Diâmetro na altura do peito mínimo; DAP médio: Diâmetro médio na altura do peito; DAP máx.: Diâmetro na altura do peito máximo; g: área basal do indivíduo; DAe: Densidade absoluta da espécie; DRe: Densidade relativa da espécie; FAe: Frequência absoluta da espécie; FRe: Frequência relativa da espécie; DoAe: Dominância absoluta da espécie; DoRe: Dominância relativa da espécie. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

De acordo com Lamparelli e Moura (1999), o DAP médio de manguezais da área do Estuário de Santos tem variação entre 4,5 cm e 12,8 cm. Os valores obtidos nessa pesquisa para os sítios de estudo ultrapassam o valor obtido no passado, com DAP médio de 24,06 cm e 12,72 cm para o mangue branco (Lr) e 62,03 e 18,06 para o mangue vermelho (Rm), os valores correspondem a primeira e a segunda campanha, respectivamente. A comparação dos dados desta pesquisa com outros levantamentos fitossociológicos realizados no Brasil (Tabela 11), mostra que os valores obtidos estão dentro do esperado para manguezais.

Tabela 11 - Comparação de dados estatísticos de diferentes estudos fitossociológicos em manguezais.

Referência	Resultados	1	2	4	5
Estado	SP	RJ	ES	RJ	SE
Área amostrada (ha)	0,15	1,53	0,63	0,20	0,76
Sítios	2	17	20	2	1
DAP mínimo (cm)	2,71	2,6	4,7	3,1	3,95
DAP médio (cm)	29,22	13,05	16,0	4,6	23,69
DAP máximo (cm)	44,63	23,5	27,3	6,1	19,74
Altura mínima (m)	2,5	5,2	2,0	3,7	2,88
Altura média (m)	7,95	9,85	9,2	5,35	18,51
Altura máxima (m)	13,0	14,5	16,4	7,0	15,63

Legenda: 1: Bernini e Rezende (2011); 2: Petri *et al.* (2011); 3: Londe *et al.* (2013); 4: Calegario *et al.* (2015); 5: Oliveira *et al.* (2019). **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Análises qualitativas visuais entre os sítios, evidenciam um dos sítios, o proximal, como uma área sob maior estresse, sem novos indivíduos jovens, com árvores caídas e mortas (Figura 20A). Bastante distinto do sítio distal, com elevada exuberância da vegetação e novos e jovens indivíduos formando o banco de recrutas e plântulas (Figura 20B). As imagens da base cartográfica de detalhe

permitem ter uma noção qualitativa dessas áreas devido ao elevado espaçamento entre as árvores na área superior (montante) e mais próxima do derramamento de óleo. A contagem de plântulas nas parcelas corrobora essa teoria, com maior número de plântulas nas parcelas da área B, com exceção da parcela superior da área A, sem homóloga para comparação na área B. Na área distal a quantidade de plântulas é 229 na parcela da franja e 291 na parcela intermediária, com valores respectivos de 160 e 180 para a área A (proximal).

Figura 20 - Imagens das parcelas nos sítios A e B.



Fonte: Semensatto, 2023.

6.6 Testemunhos sedimentares

Os resultados dos testemunhos de solo (Figura 21) correspondem as descrições das amostras pontuais da subsuperfície do manguezal na região das parcelas fitossociológicas. Apesar de terem sido usados tubos com 2 m de comprimento para testemunhagem do solo, poucos deles apresentaram amostras completas, especialmente aqueles coletados no sítio distal (B). Os testemunhos dos sítios se mostraram distintos, sendo os do sítio distal bastante homogêneos, enquanto os do sítio proximal apresentaram diversas mudanças a partir de 30 cm de profundidade.

Figura 21 - Testemunhos de solo dos sítios proximal (A) e distal (B) coletados durante a campanha 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O T1, coletado na parcela da franja do manguezal, no sítio proximal (A), apresentou 38,5 cm de profundidade amostral, dos quais demonstraram boa coesão até os trinta primeiros centímetros, a partir desta profundidade o conteúdo se tornou menos coeso que a parte superior. A coloração também se alterou nessa mesma profundidade, passando de um tom marrom da porção superior para um tom acinzentado da porção inferior. Foi constatada a presença de raízes e elementos fibrosos finos, com espessura menor que 1 mm.

Na parcela intermediária do sítio proximal (A), o testemunho (T2) obteve 71 cm de profundidade amostral, dos quais apresentaram uma lama coesa até os primeiros 25 cm de profundidade, com presença de horizonte arenoso entre 10 e 13 cm de profundidade. A coloração é similar ao T1, se alterando de marrom para cinza na profundidade do horizonte arenoso (Figura 22).

O terceiro testemunho (T3), coletado na parcela superior do sítio proximal (A), apresentou 31 cm de profundidade amostral, com coesão da lama amarronzada até 18 cm de profundidade, devido a presença de raízes. A partir disso, o sedimento se tornou mais arenoso e menos coeso, e sem raízes, o que provavelmente resultou na menor quantidade amostrada por este testemunho.

Figura 22 - Detalhe da coloração e horizonte arenoso nos testemunhos de solo do sítio proximal (A) coletados durante a campanha 2.

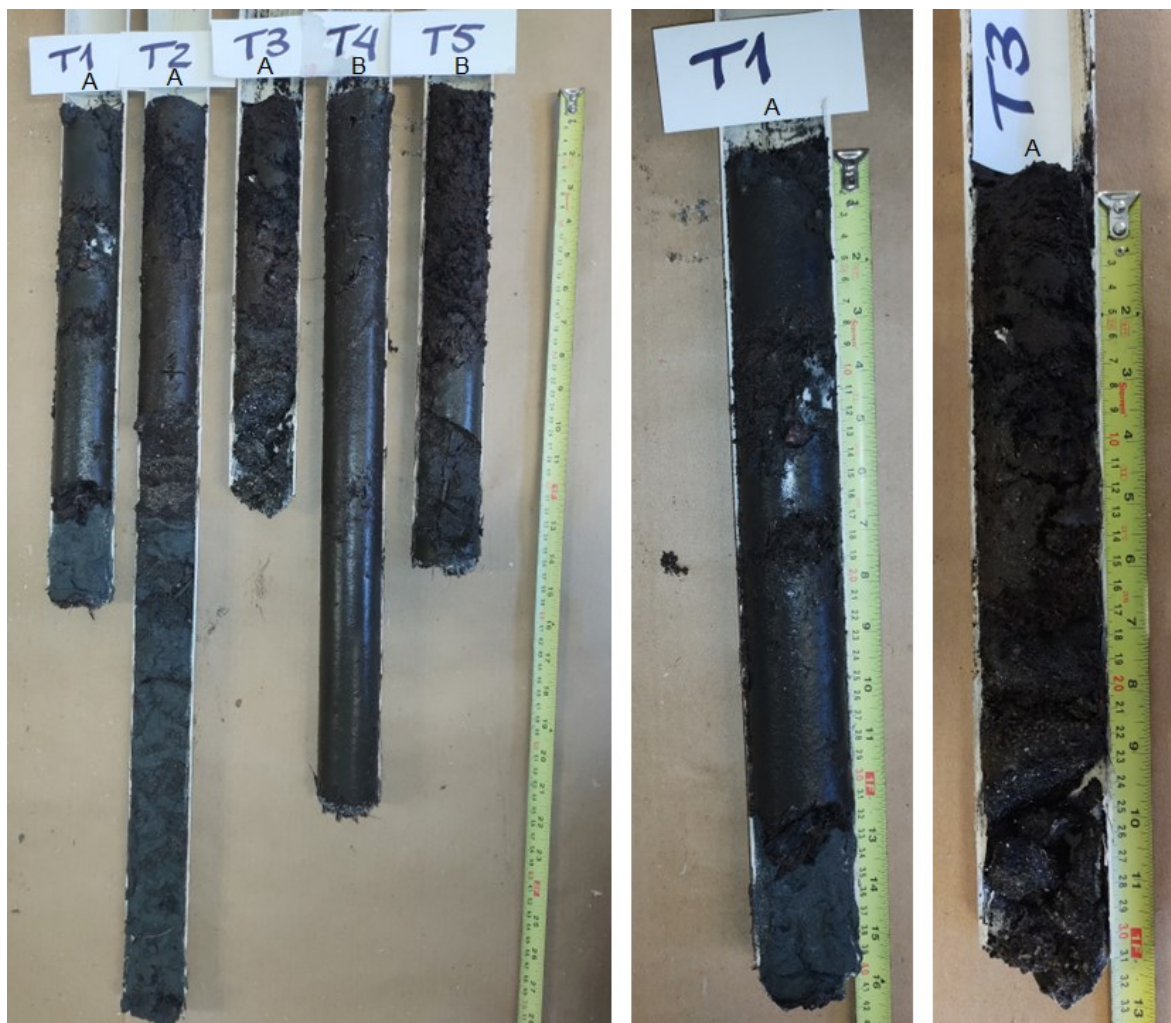


Fonte: Elaborado pelo autor.

O testemunho T4, coletado na franja do manguezal do sítio distal (B), apresentou 53 cm de profundidade e um conteúdo homogêneo. A coloração marrom predomina por toda a amostra que não apresenta alterações visuais ou texturais, que delimitem camadas, apenas o topo do testemunho que apresentou um aspecto menos consolidado. Neste testemunho, foi constatada elevada presença de raízes finas, menores que 1mm distribuídas pela coluna sedimentar.

Na parte intermediária do sítio distal (B), o testemunho coletado (T5) apresentou 35 cm de profundidade, com características similares ao T4, mas a concentração de raízes finas se mantém principalmente na região de 0 a 22 cm de profundidade (Figura 23).

Figura 23 - Testemunhos de solo dos sítios proximal (A) e distal (B) coletados durante a campanha 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que Santa-Cruz (2004), vinte anos após o derramamento, encontrou petróleo a 12 cm de profundidade, é possível inferir uma taxa aproximada de sedimentação de 0,6 cm/ano. Adotando esta taxa para esta pesquisa, realizada quarenta anos depois, a profundidade esperada para encontrar sedimentos oleosos seria em torno de 24 cm. Com base nos testemunhos coletados no sítio A, proximal ao acidente, essa inferência se corrobora com as possíveis mudanças nos aspectos de cor e granulometria dos sedimentos a partir de 29 cm de profundidade. Além disso, propriedades organolépticas observadas durante as coletas de campo permitiram distinguir odores distintos dos característicos de manguezais (sulfurosos),

com fortes indícios de produtos derivados de petróleo, que poderiam ser frações pesadas permanentes nos sedimentos. Estudos recentes na área de estudo, executados por Lassalle *et al.* (2023) delimitaram a região do sítio A como contaminada com frações pesadas e permanentes do óleo no local, a partir de análises químicas que corroboram os dados obtidos em campo.

7 CONCLUSÕES

Esta pesquisa buscou compreender a situação atual de duas áreas de um manguezal em Santos (SP) atingido por petróleo bruto em 1983, a partir de diferentes etapas multidisciplinares de investigação. A variedade de métodos aplicados permitiu uma investigação baseada no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), fitossociologia e descrição de testemunhos dos sedimentos.

O NDVI apresentou resultados similares entre os dois satélites utilizados, com todas as parcelas do sítio distal apresentando valores superiores as parcelas do sítio proximal.

A estatística fitossociológica demonstrou valores mais elevados e variados para a área distal (B) em relação a proximal. Valores como o DAP médio, o valor da área basal e os valores de dominância foram superiores com a dominância da espécie *Laguncularia racemosa* (Lr). Apesar disso, a área de cobertura do dossel avaliada, se mostrou mais abrangente na área proximal ao derramamento que na área distal. Este fenômeno pode ser explicado devido ao aumento da área foliar, observado na área de estudo após o derramamento, daqueles indivíduos já estabelecidos, em busca da compensação pelas deficiências apresentadas em novas folhas após a contaminação.

A maior abundância de plântulas e indivíduos jovens na área distal (520 indivíduos), apresenta forte contraste visual com a área proximal (340 indivíduos), com poucos indivíduos jovens e elevada presença de indivíduos maduros mortos ou senescentes, demonstrando outra diferença vegetativa entre as áreas avaliadas.

As imagens da base cartográfica detalhada demonstram diferenças entre os bosques na região proximal (A) e na região distal (B), detalhes de indivíduos mortos, o espaçamento entre as árvores e o solo exposto, entretanto esses resultados necessitam de maior exploração quantitativa, como a classificação das imagens. Sensores mais robustos e precisos, como *LiDAR* podem auxiliar mais precisamente na avaliação do manguezal, estimando indiretamente a biomassa aérea da vegetação.

Os testemunhos das áreas se mostraram distintos, sendo os da área distal bastante homogêneos, enquanto os da área proximal apresentaram diversas mudanças a partir de 30 cm de profundidade. As mudanças em profundidades similares podem ter relação com a presença do óleo nos horizontes mais profundos

do solo, corroborados pelos valores de sedimentação anuais da área de estudo (0,6 cm/ano aproximadamente) e sugeridos por propriedades organolépticas vinculadas a óleo e seus derivados percebidas em amostras da subsuperfície nas atividades de campo. A avaliação laboratorial é sugerida em amostras de sedimentos contaminados, garantindo a detecção de componentes pesados do óleo ainda presentes no local.

A investigação comparativa entre os sítios proximal e distal da antiga fonte poluidora, demonstrou diferenças entre os resultados obtidos para cada um desses locais. As diferenças encontradas podem ser atribuídas a variável intensidade dos estressores permanentes do petróleo a qual esses ambientes ainda estão submetidos. O estudo também apresenta algumas limitações dado o tamanho das amostras utilizadas nas etapas, que podem enviesar e generalizar alguns resultados, mas as possibilidades de novas investigações, nesse ou em outros locais, pode ser realizado e melhorado a partir do acesso aberto aos dados e códigos fonte utilizados nesta pesquisa.

Essas informações validam premissas sobre a permanência dos impactos do petróleo em manguezais durante décadas, mesmo após quarenta anos do derramamento, justificando a sensibilidade desses ambientes. Adicionalmente, demonstram que uma das bases da classificação de sensibilidade costeira, a ação hidrodinâmica, é fundamental até mesmo nos manguezais, onde áreas de franja, com maior exposição, tendem a regeneração de forma mais acelerada que outros ambientes, como o interior dos bosques. Os resultados também se abrem à continua exploração, em busca de outras possibilidades de análises, como a investigação e detecção de áreas contaminadas em manguezais.

REFERÊNCIAS

ALESP. **Lei nº 9.034**. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei n. 7.663, de 30/12/91, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. São Paulo (SP), 27 dez. 1994. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/1994/lei-9034-27.12.1994.html>. Acesso em: 12 set. 2023.

ALONGI, D. M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 76, n. 1, p. 1–13, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771407003915>.

ALONGI, D. M. Present state and future of the world's mangrove forests. **Environmental Conservation**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 331–349, 2002. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0376892902000231/type/journal_article.

ARAUJO, S. I. de; SILVA, G. H.; MUEHE, D. C. E. H. **Manual básico para elaboração de mapas de sensibilidade ambiental a derrames de óleo no sistema Petrobras: ambientes costeiros e estuarinos**. book. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2002. *E-book*. Disponível em: https://unesp.primo.exlibrisgroup.com/permalink/55UNESP_INST/niq1ua/alma990004697590206341. Acesso em: 12 mar. 2023.

BARBIER, E. B. *et al.* The value of estuarine and coastal ecosystem services. **Ecological Monographs**, [s. l.], v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1890/10-1510.1>.

BERNINI, E.; REZENDE, C. E. Vegetation structure in a mangrove forest in Southeastern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 193–209, 2011. Disponível em: Acesso em: 18 abr. 2023.

BLASCO, F.; SAENGER, P.; JANODET, E. Mangroves as indicators of coastal change. **CATENA**, [s. l.], v. 27, n. 3–4, p. 167–178, 1996. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0341816296000136>.

BURNS, K. A.; GARRITY, S. D.; LEVINGS, S. C. How many years until mangrove ecosystems recover from catastrophic oil spills?. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 239–248, 1993. Disponível em: Acesso em: 29 out. 2023.

CALEGARIO, G. *et al.* Mangrove Forest Structure in the São João River Estuary, Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00067.1>, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 653–660, 2015. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-31/issue-3/JCOASTRES-D-13-00067.1/Mangrove-Forest-Structure-in-the-S%c3%a3o-Jo%c3%a3o-River-Estuary-Rio/10.2112/JCOASTRES-D-13-00067.1.full>. Acesso em: 18 abr. 2023.

CAMPOMANES, F.; PADA, A. V.; SILAPAN, J. Mangrove classification using support vector machines and random forest algorithm: a comparative study. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://research.utwente.nl/en/publications/mangrove-classification-using-support-vector-machines-and-random->. Acesso em: 29 out. 2023.

CHATTERJEE, B.; PORWAL, M. C.; HUSSIN, Y. A. Assessment of Tsunami damage to mangrove in India using remote sensing and GIS. *Em: , 2008. XXI congress : Silk road for information from imagery.* [S. l.]: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2008. p. 283–288. Disponível em: <https://research.utwente.nl/en/publications/assessment-of-tsunami-damage-to-mangrove-in-india-using-remote-se>. Acesso em: 29 out. 2023.

CHEN, B. *et al.* A mangrove forest map of China in 2015: Analysis of time series Landsat 7/8 and Sentinel-1A imagery in Google Earth Engine cloud computing platform. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [s. l.], v. 131, p. 104–120, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092427161730285X>.

COIMBRA, M. A. C. **Avaliação dos resultados analíticos de hidrocarbonetos como instrumento jurídico em caso de derrames de petróleo: mangue de Bertioaga.** 2007. - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/21/21133/tde-05042007-170210/>.

COSTANZA, R. *et al.* The value of world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, [s. l.], v. 387, p. 253–260, 1997.

CURY, J. de C. **Atividade microbiana e diversidades metabólica e genética em solo de mangue contaminado com petróleo.** 2002. - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-05052003-140335/>. Acesso em: 19 mar. 2023.

D’AFFONSECA, F. M. *et al.* Environmental sensitivity index maps to manage oil spill risks: A review and perspectives. **Ocean & Coastal Management**, [s. l.], v. 239, p.

106590, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0964569123001151>. Acesso em: 14 abr. 2023.

DAHDOUH-GUEBAS, F. *et al.* Public Perceptions of Mangrove Forests Matter for Their Conservation. **Frontiers in Marine Science**, [s. l.], v. 7, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2020.603651/full>.

D'IORIO, M. *et al.* Optimizing Remote Sensing and GIS Tools for Mapping and Managing the Distribution of an Invasive Mangrove (*Rhizophora mangle*) on South Molokai, Hawaii. **Marine Geodesy**, [s. l.], v. 30, n. 1–2, p. 125–144, 2007. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01490410701296663>.

DONATO, D. C. *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. **Nature Geoscience**, [s. l.], v. 4, n. 5, p. 293–297, 2011. Disponível em: <http://www.nature.com/articles/ngeo1123>.

DUKE, N. C. Oil spill impacts on mangroves: Recommendations for operational planning and action based on a global review. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 109, n. 2, p. 700–715, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0025326X16304866>.

FELFILI, J. M. *et al.* **Fitossociologia no Brasil : métodos e estudos de casos**. book. Viçosa: Ed. UFV, 2011.

FERREIRA, T. O. *et al.* Are mangrove forest substrates sediments or soils? A case study in southeastern Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 70, n. 1, p. 79–91, 2007. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816206001561>.

GILMAN, E. L. *et al.* Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 237–250, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030437700800003X>.

GIRI, C. *et al.* Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 20, n. 1, p. 154–159, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>.

GOOGLE EARTH ENGINE. **Earth Engine Data Catalog: Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em:

https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED. Acesso em: 11 mar. 2023 a.

GOOGLE EARTH ENGINE. **Earth Engine Data Catalog: USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2. Acesso em: 15 jul. 2023 b.

GREEN, E. P. *et al.* Estimating leaf area index of mangroves from satellite data. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 11–19, 1997. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377097000132>.

GUNDLACH, E. R.; HAYES, M. O. Vulnerability of Coastal Environments to Oil Spill Impacts. **Marine Technology Society**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 18–27, 1978.

HEUMANN, B. W. Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 87–108, 2011. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0309133310385371>. Acesso em: 7 jul. 2023.

HIMES-CORNELL, A.; GROSE, S. O.; PENDLETON, L. Mangrove Ecosystem Service Values and Methodological Approaches to Valuation: Where Do We Stand?. **Frontiers in Marine Science**, [s. l.], v. 5, n. OCT, p. 409061, 2018. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmars.2018.00376/full>. Acesso em: 29 out. 2023.

ISHTIAQUE, A.; MYINT, S. W.; WANG, C. Examining the ecosystem health and sustainability of the world's largest mangrove forest using multi-temporal MODIS products. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 569–570, p. 1241–1254, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716313870>.

JACOBI, C. M.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Oil spills in mangroves: a conceptual model based on long-term field observations. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 52, p. 53–59, 1990.

JERNELÖV, A. The Threats from Oil Spills: Now, Then, and in the Future. **AMBIO**, [s. l.], v. 39, n. 5–6, p. 353–366, 2010. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13280-010-0085-5>.

JORDAN, C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. **Ecology**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 663–666, 1969. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2307/1936256>. Acesso em: 29 out. 2023.

JUNK, W. J. *et al.* Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 5–22, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aqc.2386>.

KAMAL, M.; PHINN, S.; JOHANSEN, K. Assessment of multi-resolution image data for mangrove leaf area index mapping. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 176, p. 242–254, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425716300414>.

KOVACS, J. M. *et al.* Estimating leaf area index of a degraded mangrove forest using high spatial resolution satellite data. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 80, n. 1, p. 13–22, 2004. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377004000841>.

KOVACS, J. M.; WANG, J.; FLORES-VERDUGO, F. Mapping mangrove leaf area index at the species level using IKONOS and LAI-2000 sensors for the Agua Brava Lagoon, Mexican Pacific. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [s. l.], v. 62, n. 1–2, p. 377–384, 2005. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272771404002604>.

KRAUSS, K. W. *et al.* Environmental drivers in mangrove establishment and early development: A review. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 105–127, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377008000089>.

KUENZER, C. *et al.* Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 3, n. 5, p. 878–928, 2011. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/3/5/878>.

LAMPARELLI, C. C. *et al.* Structure and Productivity in a mangrove forest in Bertioga region of southern Brazil. *Em*: , 2000, Recife. **International Conference Sustainable use of estuaries and mangroves: challenges and prospects**. Recife: [s. n.], 2000. p. 14.

LAMPARELLI, C. Condé.; MOURA, D. O. de. **Mapeamento dos ecossistemas costeiros do Estado de São Paulo**. book. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente, 1999.

LAMPARELLI, C. C.; RODRIGUES, F. O.; MOURA, D. O. de. Long-term assessment of an oil spill in a mangrove forest in São Paulo, Brazil. *Em: [S. l.: s. n.]*, 1997. p. 191–203. *E-book*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/312526559>.

LASSALLE, G. *et al.* Remote sensing reveals unprecedented sublethal impacts of a 40-year-old oil spill on mangroves. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 331, p. 121859, 2023. Disponível em: Acesso em: 26 jul. 2023.

LEE, S. Y. *et al.* Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. **Global Ecology and Biogeography**, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 726–743, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/geb.12155>.

LIMA, N. *et al.* Impacts of Extreme Weather Event in Southeast Brazilian Mangrove Forest. **Atmosphere**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 1195, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/8/1195>. Acesso em: 29 out. 2023.

LONDE, V. *et al.* Estrutura da vegetação de mangue associada ao gradiente de inundação no litoral norte do Espírito Santo, Brasil. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 629–637, 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rarv/a/NZTFkdqtv8mVRm63wN9byHR/?lang=pt>. Acesso em: 18 abr. 2023.

DE SANTANA LOPES, D. M.; DE OLIVEIRA CHAVES, F.; PEREIRA TOGNELLA, M. M. Mangrove Mortality: Analyses of Natural and Anthropic Causes and their Effects on Forest Dynamics. **Journal of Coastal Research**, [s. l.], v. 95, n. sp1, p. 102, 2020. Disponível em: <https://bioone.org/journals/journal-of-coastal-research/volume-95/issue-sp1/SI95-020.1/Mangrove-Mortality--Analyses-of-Natural-and-Anthropic-Causes-and/10.2112/SI95-020.1.full>.

LOPES, C. F.; MILANELLI, J. C. C.; POFFO, Í. R. F. **Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza - manual de orientação**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007. *E-book*. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br.

LUGO, A. E.; SNEDAKER, S. C. The Ecology of Mangroves. **Source: Annual Review of Ecology and Systematics**, [s. l.], v. 5, p. 39–64, 1974. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2096879>. Acesso em: 11 mar. 2023.

MACHADO, A. L. **Análise da cobertura vegetal de um manguezal impactado por óleo, canal da Bertioga, estado de São Paulo**. 1992. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1992.

MANNA, S. *et al.* Vegetation cover change analysis from multi-temporal satellite data in Jharkhali Island, Sundarbans, India. **Indian Journal of Geo-Marine Sciences (IJMS)**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 331–342, 2013. Disponível em: <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/19662>. Acesso em: 29 out. 2023.

MUKHERJEE, N. *et al.* Ecosystem Service Valuations of Mangrove Ecosystems to Inform Decision Making and Future Valuation Exercises. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. e107706, 2014. Disponível em: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0107706>.

NAGELKERKEN, I. *et al.* The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. **Aquatic Botany**, [s. l.], v. 89, n. 2, p. 155–185, 2008. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304377007001830>.

OLIVEIRA, T. S. *et al.* Floristic and structural characterization of the mangrove forests in the estuary of the São Francisco river. **FLORESTA**, [s. l.], v. 49, n. 2, p. 163–170, 2019. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/51884>. Acesso em: 18 abr. 2023.

O Ouro e a Madeira. Intérprete: Ederaldo Gentil. Compositor: E. Gentil. *In*: SAMBA, Canto Livre de Um Povo. São Paulo: Chantecler, 1975. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZpBwuyxGFog>. Acesso em: 31 out. 2023.

OWENS, E. H.; ROBILLIARD, G. A. Shoreline Sensitivity and Oil Spills - a re-evaluation for the 1980's. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 75–78, 1981.

PASTOR-GUZMAN, J.; DASH, J.; ATKINSON, P. M. Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. **Remote Sensing of Environment**, [s. l.], v. 205, p. 71–84, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425717305333>.

PAVANELLI, D. D.; LOCH, C. Mangrove spectra changes induced by oil spills monitored by image differencing of normalised indices: Tools to assist delimitation of impacted areas. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, [s. l.], v. 12, p. 78–88, 2018. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235293851830017X>.

PERINOTTO, R. R. Costa. **Mapeamento de sensibilidade ao derrame de óleo dos ambientes costeiros dos municípios de São Vicente, Santos e Guarujá - SP**. Rio Claro: [s.n.], 2010. dissertation.

PETERSEN, J. *et al.* **Environmental Sensitivity Index Guidelines, Version 3.0**. Columbia: [s. n.], 2002. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/311924018>.

PETERSEN, J. *et al.* **Environmental Sensitivity Index Guidelines, Version 4.0**. Seattle: [s. n.], 2019.

PETRI, D. J. C. *et al.* Species distribution and structure of mangrove of the Benevente River, Anchieta, ES. **Biota Neotropica**, [s. l.], v. 11, n. 3, 2011. Disponível em: <https://www.biotaneotropica.org.br/BN/article/view/840>. Acesso em: 18 abr. 2023.

PETROBRAS. **Terminal São Sebastião**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-sao-sebastiao.htm>. Acesso em: 12 set. 2023.

PÖRTNER, H. O. *et al.* Summary for Policymakers. *Em*: CLIMATE CHANGE 2022 – IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY. [S. l.]: Cambridge University Press, 2023. p. 3–34. *E-book*. Disponível em: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9781009325844%23pre2/type/book_part.

PRADA-GAMERO, R. M.; VIDAL-TORRADO, P.; FERREIRA, T. O. Mineralogia e físico-química dos solos de mangue do rio Iiri no canal de Bertioga (Santos, SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 233–243, 2004. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832004000200002&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 19 mar. 2023.

RODRIGUES, M. *et al.* Uma revisão histórica acerca do conhecimento sobre a sedimentação atual, em ambientes marinhos submersos, do Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 91–106, 1999.

Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rboce/a/fFHPBMxvKqJfxwX9kZdPNpx/?lang=pt>. Acesso em:
 28 jul. 2023.

RODRIGUES, F. D. O.; LAMPARELLI, C. C.; DE MOURA, D. O. Environmental Impact in Mangrove Ecosystems: São Paulo, Brazil. *Em*: YÁÑEZ-ARANCIBIA, A.; LARA-DOMÍNGUEZ, A. L. (org.). **Ecosistemas de Manglar en América Tropical**. [S. l.: s. n.], 1999. p. 175–197.

RODRIGUES, F. de O.; MOURA, D. O. de; LAMPARELLI, C. C. Efeito do óleo nas folhas de mangue. **Revista Ambiente**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 36–45, 1989. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/revista-ambiente/>. Acesso em: 13 mar. 2023.

ROUSE, J. W. , Jr. *et al.* Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A**, [s. l.], 1974. Disponível em: Acesso em: 29 out. 2023.

ROVAL, A. S. *et al.* Ecosystem-level carbon stocks and sequestration rates in mangroves in the Cananéia-Iguape lagoon estuarine system, southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, [s. l.], v. 479, p. 118553, 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378112720313220>. Acesso em: 29 out. 2023.

RUAN, L. *et al.* Spatial-temporal NDVI pattern of global mangroves: A growing trend during 2000–2018. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 844, p. 157075, 2022. Disponível em:
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722041729>.

SANTA-CRUZ, Joana. **Foraminíferos atuais em um manguezal impactado por petróleo 20 anos atrás : o Rio Iriri, canal de Bertioga, Santos-SP**. 2004. Rio Claro, 2004. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/92833>. Acesso em: 18 mar. 2023.

SANTOS. **Lei Complementar nº 54**. Brasil: Câmara Municipal, 9 jun. 1992. Disponível em: <http://leismunicipa.is/xmgwl>. Acesso em: 29 out. 2023.

SANTOS, L. C. M. *et al.* Long-term effects of oil pollution in mangrove forests (Baixada Santista, Southeast Brazil) detected using a GIS-based multitemporal analysis of aerial photographs. **Brazilian Journal of Oceanography**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 159–170, 2012. Disponível em:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-87592012000200006&lng=en&tlng=en.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, L. C. M.; BITENCOURT, M. D. Remote sensing in the study of Brazilian mangroves: review, gaps in the knowledge, new perspectives and contributions for management. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 245–261, 2016. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/rgci662.html>.

SATYANARAYANA, B. *et al.* Assessment of mangrove vegetation based on remote sensing and ground-truth measurements at Tumpat, Kelantan Delta, East Coast of Peninsular Malaysia. **International Journal of Remote Sensing**, [s. l.], v. 32, n. 6, p. 1635–1650, 2011. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431160903586781>.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *et al.* Brazilian mangroves. **Aquatic Ecosystem Health & Management**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 561–570, 2000. Disponível em: <https://scholarlypublishingcollective.org/ae/m/article/3/4/561/169911/Brazilian-mangroves>.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *et al.* Climate changes in mangrove forests and salt marshes. **Brazilian Journal of Oceanography**, [s. l.], v. 64, n. spe2, p. 37–52, 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-87592016000600037&lng=en&tlng=en.

SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; CINTRÓN, G. **Guia para estudo de áreas de manguezal: estrutura, função e flora**. book. São Paulo: Caribbean Ecological Research, 1986.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature Methods** 2012 9:7, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 671–675, 2012. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nmeth.2089>. Acesso em: 12 set. 2023.

SNEDAKER, S. C.; SNEDAKER, J. G. **Monographs on oceanographic methodology: the mangrove ecosystem: research methods**. Bungay: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1984. v. 8

SRIKANTH, S.; LUM, S. K. Y.; CHEN, Z. Mangrove root: adaptations and ecological importance. **Trees**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 451–465, 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00468-015-1233-0>.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. Classificação de costas e evolução geológica das planícies litorâneas quaternárias do sudeste e sul do Brasil. *Em*: , 1987. **Simposio sobre Ecossistemas da Costa Sul e Sudeste Brasileira. Síntese dos Conhecimentos**. [S. l.]: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1987.

THAKUR, S. *et al.* A review of the application of multispectral remote sensing in the study of mangrove ecosystems with special emphasis on image processing techniques. **Spatial Information Research**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 39–51, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s41324-019-00268-y>.

THANH NOI, P.; KAPPAS, M. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. **Sensors**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 18, 2017. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/1/18>.

TOGNETTA-DE-ROSA, M. M. P. *et al.* Mangrove Evaluation-An Essay. **Journal of Coastal Research**, [s. l.], v. II, n. 39, p. 1219–1224, 2006. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25741780?seq=1&cid=pdf->.

VALDERRAMA-LANDEROS, L. *et al.* An assessment of commonly employed satellite-based remote sensors for mapping mangrove species in Mexico using an NDVI-based classification scheme. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 190, n. 1, p. 23, 2018. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10661-017-6399-z>.

ZAMBONI, A. *et al.* **Especificações e normas técnicas para elaboração de cartas de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2004.

ZHU, Y. *et al.* Exploring the Potential of WorldView-2 Red-Edge Band-Based Vegetation Indices for Estimation of Mangrove Leaf Area Index with Machine Learning Algorithms. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 1060, 2017. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2072-4292/9/10/1060>.

APÊNDICE 1 – Tabelas fitossociológicas

Tabela Fitossociológica 1 – Campanha 1, Sítio Proximal, Parcela C1_A_A

N	Spp	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Rm	9,7	11,0								20,70	6,59	17,12
2	Rm	40,9	17,8								58,70	18,68	158,33
3	Rm	28,8	8,8	14,6	36,9	5,0					94,10	29,95	199,47
4	Rm	9,1	33,4								42,50	13,53	95,36
5	Rm	19,3	17,3								36,60	11,65	53,46
6	Rm	29,0									29,00	9,23	66,92
7	Rm	18,5	8,0								26,50	8,44	32,33
8	Rm	33,0	31,0								64,00	20,37	163,13
9	Rm	25,1									25,10	7,99	50,13
10	Rm	25,9	41,0								66,90	21,29	187,15
11	Rm	20,5									20,50	6,53	33,44
12	Rm	33,9									33,90	10,79	91,45

Legenda: N: número do indivíduo; Spp: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 2 – Campanha 1, Sítio Distal, Parcela C1_B_B

N	Spp	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Rm	13,4									13,40	4,27	14,29
2	Rm	26,3									26,30	8,37	55,04
3	Rm	24,2									24,20	7,70	46,60
4	Rm	15									15,00	4,77	17,90
5	Rm	18,2	21	13,3							52,50	16,71	75,53
6	Rm	34,2									34,20	10,89	93,08
7	Rm	19,2	21,3	8,2	9,3	9	6,2	6	5,2		84,40	26,87	92,19
8	Rm	13,2									13,20	4,20	13,87
9	Rm	38,4									38,40	12,22	117,34
10	Lr	50									50,00	15,92	198,94
11	Rm	11,2									11,20	3,57	9,98
12	Rm	15,3									15,30	4,87	18,63

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 2 – Campanha 1, Sítio Distal, Parcela C1_B_B (cont.)

N	Spp	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9			
13	Rm	17,9									17,90	5,70	25,50
14	Rm	16									16,00	5,09	20,37
15	Rm	15,2									15,20	4,84	18,39
16	Rm	19,9									19,90	6,33	31,51
17	Rm	17,2									17,20	5,47	23,54
18	Rm	13									13,00	4,14	13,45
19	Lr	46,9	54,3								101,20	32,21	409,67
20	Rm	17,9									17,90	5,70	25,50

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 3 – Campanha 2, Sítio Proximal, Bosque de Franja, Parcela C2_A_F

N	Spp	h (m)	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Lr	4,5	4,5	8,2	14	13,2						39,90	12,70	36,42
2	Lr	2,5	5,5	6								11,50	3,66	5,27
3	Lr	5,5	15									15,00	4,77	17,90
4	Lr	10	46									46,00	14,64	168,39
5	Lr	10	53									53,00	16,87	223,53
6	Lr	4,5	8,3	11,6								19,90	6,33	16,19
7	Lr	5	13,7	7								20,70	6,59	18,84
8	Lr	10	30	11,7	10,5							52,20	16,62	91,29
9	Lr	7	30,5	9	7,5	5,5						52,50	16,71	87,36
10	Lr	6,5	49,1	15	6,5							70,60	22,47	213,11
11	Lr	6	8,5	24								32,50	10,35	51,59
12	Rm	10	47	9,5	10,2	19	14	19	8	7,5	6	140,20	44,63	276,73

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 4 – Campanha 2, Sítio Proximal, Bosque Intermediário, Parcela C2_A_I

N	Spp	h (m)	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Lr	7	25									25,00	7,96	49,74
2	Lr	11	25	44								69,00	21,96	203,80
3	Lr	3	8,5									8,50	2,71	5,75
4	Lr	11	33,5									33,50	10,66	89,31
5	Lr	5	21									21,00	6,68	35,09
6	Lr	5,5	25									25,00	7,96	49,74
7	Lr	10	47									47,00	14,96	175,79
8	Lr	7	20									20,00	6,37	31,83
9	Lr	11	49									49,00	15,60	191,07
10	Lr	6	29	6								35,00	11,14	69,79
11	Lr	9	21									21,00	6,68	35,09
12	Lr	7	40	8,5								48,50	15,44	133,07

Tabela Fitossociológica 4 – Campanha 2, Sítio Proximal, Bosque Intermediário, Parcela C2_A_I (cont.)

N	Spp	h (m)	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	g _i (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
13	Lr	5,5	16	12,5	5,5	10,5	23,5	8				76,00	24,19	93,03
14	Lr	3,5	11,5									11,50	3,66	10,52
15	Lr	10	32									32,00	10,19	81,49
16	Lr	6	21,5									21,50	6,84	36,78
17	Lr	10	36,5									36,50	11,62	106,02
18	Lr	12	41									41,00	13,05	133,77
19	Lr	6,5	15,5									15,50	4,93	19,12
20	Lr	12	36,5									36,50	11,62	106,02
21	Lr	6	27,5									27,50	8,75	60,18
22	Lr	6	23									23,00	7,32	42,10

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; g_i: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 5 – Campanha 2, Sítio Proximal, Bosque Superior, Parcela C2_A_S

N	Spp	h (m)	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Lr	9	39	28	12	5,5						84,50	26,90	197,29
2	Lr	8	36									36,00	11,46	103,13
3	Lr	8	32,5									32,50	10,35	84,05
4	Lr	6	22									22,00	7,00	38,52
5	Lr	9	35	25								60,00	19,10	147,22
6	Lr	9	44									44,00	14,01	154,06
7	Lr	9	46,5	17,5	10,5	46,5	13					134,00	42,65	390,73
8	Lr	10	53	10,5	34,5							98,00	31,19	327,02
9	Lr	6	22									22,00	7,00	38,52
10	Lr	7	22,5	9,5								32,00	10,19	47,47

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 5 – Campanha 2, Sítio Proximal, Bosque Superior, Parcela C2_A_S (cont.)

N	Spp	h (m)	Perímetro dos troncos múltiplos (cm)									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
11	Lr	8	30,5									30,50	9,71	74,03
12	Lr	9	35,5									35,50	11,30	100,29
13	Lr	6	26									26,00	8,28	53,79
14	Lr	5	22									22,00	7,00	38,52

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 6 – Campanha 2, Sítio Distal, Bosque de Franja, Parcela C2_B_F

N	Spp	h	Perímetro dos troncos múltiplos									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Rm	12	49	40	29							118,00	37,56	385,31
2	Rm	5,5	56									56,00	17,83	249,55
3	Rm	6,5	61									61,00	19,42	296,11
4	Rm	6	41									41,00	13,05	133,77
5	Rm	8,5	38									38,00	12,10	114,91
6	Rm	6,5	43	17								60,00	19,10	170,14
7	Rm	12	45,2									45,20	14,39	162,58
8	Rm	7,5	30	10								40,00	12,73	79,58
9	Rm	8,5	70	35	29							134,00	42,65	554,34
10	Lr	6,5	43									43,00	13,69	147,14
11	Lr	7	49									49,00	15,60	191,07

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 7 – Campanha 2, Sítio Distal, Bosque Intermediário, Parcela C2_B_I

N	Spp	h	Perímetro dos troncos múltiplos									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	Lr	5	39									39,00	12,41	121,04
2	Lr	10	50									50,00	15,92	198,94
3	Lr	5	29									29,00	9,23	66,92
4	Lr	5	25									25,00	7,96	49,74
5	Lr	9	50									50,00	15,92	198,94
6	Lr	6	45									45,00	14,32	161,14
7	Lr	12	43									43,00	13,69	147,14
8	Lr	13	65									65,00	20,69	336,21
9	Lr	9,5	31									31,00	9,87	76,47
10	Lr	13	35	38								73,00	23,24	212,39
11	Rm	5	28									28,00	8,91	62,39
12	Rm	5	33									33,00	10,50	86,66

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 7 – Campanha 2, Sítio Distal, Bosque Intermediário, Parcela C2_B_I (cont.)

N	Spp	h	Perímetro dos troncos múltiplos									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
13	Rm	5	33									33,00	10,50	86,66
14	Rm	6,5	38									38,00	12,10	114,91
15	Rm	8	66	23								89,00	28,33	388,74
16	Rm	7	20									20,00	6,37	31,83
17	Rm	6,5	43									43,00	13,69	147,14
18	Rm	7	22									22,00	7,00	38,52
19	Rm	10	62									62,00	19,74	305,90
20	Rm	8	51									51,00	16,23	206,98
21	Rm	11	66	18								84,00	26,74	372,42
22	Rm	9	23	7,5	12,5							43,00	13,69	59,01
23	Rm	11	51	20								71,00	22,60	238,81
24	Rm	12	63	18	15							96,00	30,56	359,53

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.

Tabela Fitossociológica 7 – Campanha 2, Sítio Distal, Bosque Intermediário, Parcela C2_B_I (cont.)

N	Spp	h	Perímetro dos troncos múltiplos									PAPt	DAPt	gi (cm ²)
			1	2	3	4	5	6	7	8	9			
25	Rm	7	50									50,00	15,92	198,94
26	Rm	4,5	23									23,00	7,32	42,10
27	Rm	7	45									45,00	14,32	161,14
28	Rm	11	50									50,00	15,92	198,94
29	Rm	6	31									31,00	9,87	76,47

Legenda: N: número do indivíduo; SP: Espécie; Lr: *Laguncularia racemosa*; Rm: *Rhizophora mangle*; h: Altura; PAPt: perímetro à altura do peito total; DAPt: diâmetro à altura do peito total; gi: área basal do indivíduo.