

David Domingues Pavanelli

**ALTERAÇÕES ESPECTRAIS EM ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DE
ACIDENTES AMBIENTAIS MONITORADAS ATRAVÉS DE IMAGENS
ORBITAIS.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Perícias Criminais
Ambientais do Centro de Ciências
Biológicas da Universidade Federal de
Santa Catarina para obtenção do Grau de
Mestre Profissional em Perícias Criminais
Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Carlos Loch

Florianópolis/SC
2013

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pavanelli, David Domingues

ALTERAÇÕES ESPECTRAIS EM ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DE
ACIDENTES AMBIENTAIS MONITORADAS ATRAVÉS DE
IMAGENS

ORBITAIS. / David Domingues Pavanelli ; orientador, Carlos
Loch - Florianópolis, SC, 2013.

78 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Biológicas.

Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais.

Inclui referências

1. Perícias Criminais Ambientais. 2. Acidentes
Ambientais. 3. Índices de Vegetação. 4. Poluição. I. Loch,
Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Perícias Criminais Ambientais.
III. Título.

David Domingues Pavanelli

**ALTERAÇÕES ESPECTRAIS EM ÁREAS DE ABRANGÊNCIA DE
ACIDENTES AMBIENTAIS MONITORADAS ATRAVÉS DE IMAGENS
ORBITAIS.**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre Profissional em Perícias Criminais Ambientais” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Perícias Criminais Ambientais do Centro de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de dezembro de 2013.

Profa. Dra. Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Everton da Silva
GCN/UFSC

Prof. Dr. Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida
IGC/USP

Prof. Dr. Jucilei Cordini
ECV/UFSC

Ao vô Edmur, entusiasta do aprendizado. Você sabia que já havia me ensinado muito, pai. Saiba que continuou ensinando...

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Karina e ao meu filho Vitor, pelo apoio, incentivo e compreensão durante todo o tempo dedicado a este Mestrado.

À vovó Martinha, ao vô Edmur (*in memoriam*) e demais familiares que permitiram que eu me ausentasse de casa em tranquilidade.

Aos amigos do SETEC/SC, em especial ao PCF Alexandre Bacellar Raupp, pela idealização e concretização deste Mestrado e pelo árduo trabalho realizado em prol deste curso.

Ao DPF Ademar Stocker (ex-Superintendente Regional em Santa Catarina), pelos esforços envidados em prol deste Mestrado.

Ao PCF Daniel Ferreira Domingues (ex-Chefe do NUCRIM/SETEC/SR/DPF/SP) e ao PCF Luiz Vanderlei Marasca (Chefe do SETEC/SR/DPF/SP) por apoiarem e valorizarem este Mestrado como forma de capacitação profissional.

Ao Prof. Dr. Carlos Loch, pela orientação deste trabalho.

Aos amigos de curso do IC/SC e do DPF, pelas proveitosas discussões sobre diversos temas periciais e afins.

Arpa *mf*

Viol.

Cadenza

riten.

Ob.

Fag.

Arpa

2 Viol. Solt.

1 Viol.

2 Viol.

Arco

Tutti V.C.

Tempo come I

Alla breve $\delta = 48$

Trechos finais da suíte sinfônica Sheherazade, Op.35, de Rimsky-Korsakov, 1888

RESUMO

A delimitação de áreas impactadas por acidentes ambientais com poluentes é um processo dinâmico. Seu cálculo baseado nos efeitos imediatos é considerado subdimensionado por desconsiderar efeitos de longo prazo que podem se manifestar não imediatamente após o acidente. Este trabalho apresenta alterações espectrais vegetacionais em áreas de abrangência de quatro distintos acidentes ambientais com poluentes, mensuradas pela diferença de índices de vegetação (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Infravermelho por Diferença Normalizada (NDII)) nessas áreas antes e após os acidentes. Os índices de vegetação foram calculados através de imagens do Landsat 5 e Landsat 7. Este trabalho demonstra que áreas de impacto do acidente podem ser indicadas por alterações dos índices de vegetação, com possibilidades de monitoramento de efeitos de longo prazo dos poluentes e de monitoramento de recuperação da vegetação afetada. Embora todas as áreas indicadas devam ser confirmadas em exames de campo, este trabalho indica áreas prioritárias de exames de campo, exames em geral de tempo e custo elevados.

Palavras-chave: acidentes ambientais, índices de vegetação, poluição.

ABSTRACT

The delimitation of an impacted area by pollution environmental accident is a dynamic process. Its calculation by the short term effects is considered undersized by neglecting long term effects that can be manifested long after the accident. This work points to vegetation spectra alterations after four pollution environmental accidents occurred in distinct areas, measured by difference in vegetation indexes (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Normalized Difference Infrared Index (NDII)), after and before the events. The indexes were calculated through Landsat 5 and Landsat 7 images. This work shows that impacted areas can be proposed after environmental accidents by changes in vegetation indexes values, with vegetation long term effects as well as vegetation recovering effects being able to be monitored. Although all proposed areas must be confirmed by field examinations, this work indicates priority areas to be examined, processes usually expensive and time-consuming.

Keywords: environmental accidents, vegetation indexes, pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeitos apresentados pela vegetação de mangue impactada por derramamento de óleo.	30
Figura 2 – Alterações espectrais oriundas do estresse de vegetação.	31
Figura 3 – Alterações espectrais de folhas de Eucalipto. Folha sadia (1) e com possíveis deficiências em nutrientes (2, 3, 4 e 5).	32
Figura 4 – Fluxograma básico do processamento das imagens.	36
Figura 5 – Área municipal de Nova Lima/MG abrangendo entorno da barragem de rejeitos rompida em 22/06/2001. A) Composição RGB 543 de 12/05/2001; B) Composição RGB 543 em 29/06/2001 e C) Imagem \neq NDVI _{29/06/2001-12/05/2001} .	40
Figura 6 – Detalhe da figura 5C. Em amarelo a delimitação da área de indicação de impacto.	41
Figura 7 – Área municipal de Miraf/MG e Muriaé/MG abrangendo entorno da barragem de rejeitos rompida em 10/01/2007. A) Composição RGB 543 de 21/12/2006; B) Composição RGB 543 em 11/03/2007 e C) Imagem \neq NDVI _{11/03/2007-21/12/2006} .	43
Figura 8 – Detalhe da figura 7C. A) Área próxima à barragem rompida; B) Início da área urbana de Muriaé/MG.	44
Figura 9 – Fotografias de áreas da baía de Guanabara obtidas em 27/01/2000. A) Foz do rio Surui; B) Mangue próximo à tubulação rompida.	46
Figura 10 – Limites da APA GUAPI-MIRIM em imagem Landsat 7 de janeiro de 2000.	47
Figura 11 – Áreas de mangue (linha branca) da baía da Guanabara monitoradas nesta seção, doravante denominadas Mangue Monitorado. As áreas numeradas de 1 a 6 são denominadas respectivamente: 1: Mangue Sul REDUC; 2: Mangue REDUC; 3: Mangue Suruí-Nova Orleans; 4: Mangue Piedade; 5: mangue APA Guapi-Mirim e; 6: Mangue Sul APA Guapi-Mirim.	49
Figura 12 – Nordeste (NE) da baía da Guanabara em imagem de composição RGB (543) do Landsat 7 datada de 11/01/2000. As elipses brancas indicam as áreas de vegetação de mangue amostradas na baía, que analisadas em conjunto são doravante denominadas Amostra Mangue (vide texto).	50
Figura 13 – Detalhes de algumas das áreas apresentadas na figura 12.	51
Figura 14 – Composições RGB 543 do Landsat 7 datadas de 11/01/2000 de mangue na APA Guapi-Mirim calibradas para: A) reflectância e B) reflectância com correção atmosférica via FLAASH. Os espectros do ponto central das imagens são apresentados ao lado das composições.	52
Figura 15 – Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDVI _{28/02/2000-11/01/2000} com média aritmética (<i>Amostra Mangue</i>) e desvio-padrão (σ) de $+0,081 \pm 0,036$.	53
Figura 16 – Diferentes áreas do Mangue Monitorado (delimitadas pela linha branca) em imagens \neq NDVI _{28/02/2000-11/01/2000} . Em amarelo, pixels que apresentaram valores inferiores à (<i>Amostra Mangue</i> - 3σ) (vide texto).	54
Figura 17 – Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDVI _{28/02/2000-11/01/2000} com média aritmética (<i>Amostra Mangue</i>) e desvio-padrão (σ) de $-0,009 \pm 0,029$.	56

- Figura 18 – Diferentes áreas do Mangue Monitorado (delimitadas pela linha branca) em imagens \neq NDVIs_{28/02/2000-11/01/2000}. Em amarelo, pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* – 3σ) (vide texto). **57**
- Figura 19 – Gráfico obtido com os valores de \neq NDVIs_{11/01/2000-17/02/1999} e \neq NDIIs_{11/01/2000-17/02/1999} de área de 564 pixels (50,76 ha) da Amostra Mangue dentro da APA Guapi-Mirim. **59**
- Figura 20 – Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDIIs_{28/02/2000-11/01/2000} com média aritmética (*Amostra Mangue*) e desvio-padrão (σ) de $0,047 \pm 0,022$. **60**
- Figura 21 – Áreas do Mangue Monitorado em imagens \neq NDIIs_{28/02/2000-11/01/2000} e \neq NDVIs_{28/02/2000-11/01/2000}: A) Mangue Sul REDUC (área 1); B) Mangue REDUC (área 2); C) Mangue Surrú-Nova Orleans (área 3); D) Mangue Piedade (área 4) e; E) Mangue Sul APA Guapi-Mirim (área 6). Pixels com valores inferiores à (*Amostra Mangue* – 3σ) nas imagens \neq NDIIs_{28/02/2000-11/01/2000} e \neq NDVIs_{28/02/2000-11/01/2000} foram evidenciados respectivamente em vermelho e em amarelo. **61**
- Figura 22 – Ilha das Peças e seu entorno próximo em imagem de composição RGB (543) do Landsat 5 datada de 30/08/2004. As áreas de mangue monitoradas, doravante denominadas Mangue Monitorado, encontram-se delimitadas pela linha branca. Os números 1, 2 e 3 indicam as áreas monitoradas nesta seção. **65**
- Figura 23 – Ilha das Peças em imagem de composição RGB (543) do Landsat 5 datada de 30/08/2004. As elipses brancas indicam as áreas de vegetação de mangue amostradas, que analisadas em conjunto são doravante denominadas Amostra Mangue (vide texto). **66**
- Figura 24 – Detalhes de algumas das áreas apresentadas na figura 23. **66**
- Figura 25 – Histogramas de valores da Amostra Mangue nas diferentes imagens \neq NDVIs com suas respectivas médias aritméticas (*Amostra Mangue*) e desvios-padrão (σ). **68**
- Figura 26 – Áreas 1 (A), 2 (B) e 3 (C) do Mangue Monitorado delimitadas pela linha branca. Em vermelho, pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* – 3δ) (vide texto). **69**
- Figura 27 – Histograma de valores da Amostra Mangue na imagem \neq NDVIs_{30/06/2005-04/12/2004} com média aritmética (*Amostra Mangue*) e desvio-padrão (σ) de $+0,085 \pm 0,090$. **72**
- Figura 28 – Delimitação da área 1 do Mangue Monitorado (linha negra) em imagens \neq NDVIs. A) Destaque em vermelho de pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* – 3σ) em imagem \neq NDVIs_{04/12/2004-30/08/2004}. B) Destaque em verde de pixels que apresentaram valores superiores à (*Amostra Mangue* + 3σ) em imagem \neq NDVIs_{30/06/2005-04/12/2004} (vide texto). **73**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Imagens orbitais do município de Nova Lima/MG, onde ocorreu o acidente em 22/06/2001.	39
Tabela 2 – Imagens orbitais do município de Miraf/MG, onde ocorreu o acidente em 10/01/2007.	42
Tabela 3 – Imagens orbitais da baía da Guanabara, onde ocorreu o acidente em 18/01/2000.	48
Tabela 4 – Altura aproximada das marés no Porto Ilha Fiscal na data e hora das imagens utilizadas na seção 6.3.	48
Tabela 5 – Imagens orbitais da baía de Paranaguá/PR, onde ocorreu o acidente em 15/11/2004.	64
Tabela 6 – Altura aproximada das marés no Porto Paranaguá na data e hora das imagens utilizadas na seção 6.4.	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NDII – Índice de Infravermelho por Diferença Normalizada
pH – Potencial Hidrogeniônico
Eh – Potencial Redox

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	23
2.	OBJETIVOS.....	25
3.	JUSTIFICATIVA.....	27
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
6.1.	RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERADORA EM 22/06/2001, NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG.....	39
6.2.	RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERADORA EM 10/01/2007, NO MUNICÍPIO DE MIRAÍ/MG.....	42
6.3.	VAZAMENTO DE 1.293 M ³ DE ÓLEO NA BAÍA DA GUANABARA EM 18/01/2000.....	46
6.3.1.	Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens sem correção atmosférica.....	53
6.3.2.	Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens com correção atmosférica.....	56
6.3.3.	Correlação entre dados NDVI e NDII.....	59
6.4.	EXPLOÇÃO DO NAVIO VICUÑA NA BAÍA DE PARANAGUÁ EM 15/11/2004.....	64
6.4.1.	Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens com correção atmosférica.....	68
6.4.2.	Monitoramento da Recuperação da área impactada.....	72
7.	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

1. INTRODUÇÃO

A delimitação da área impactada por acidentes ambientais é um dos objetivos do laudo pericial. Esta etapa indicará os locais que deverão sofrer monitoramento posterior ao acidente, afetando diretamente na avaliação dos processos de recuperação do dano ambiental.

Esta delimitação realizada a partir dos efeitos agudos de poluentes é reconhecidamente subdimensionada por desconsiderar seus efeitos subcrônicos e crônicos nos diferentes compartimentos ambientais. Adicionalmente, mesmo os efeitos agudos de substâncias tóxicas se manifestam em diferentes tempos de acordo com os diferentes organismos.

Por esta razão, a abrangência dos impactos causados por acidentes não se restringe às respostas imediatas dos diferentes compartimentos ambientais possivelmente afetados: inicia-se pela identificação e monitoramento de áreas manifestando efeitos agudos e busca-se a identificação de áreas que apresentem efeitos subcrônicos e crônicos para posterior monitoramento, aguardando o tempo suficiente para a possível manifestação dos efeitos tóxicos nos diferentes organismos.

Este trabalho apresenta o resultado de processamentos digitais de imagens orbitais para a detecção de alterações espectrais na vegetação de áreas onde ocorreram acidentes ambientais, correlacionando tais alterações com os efeitos diretos, de longo prazo e de recuperação da vegetação impactada, com o intuito de auxiliar na delimitação da área impactada pelo acidente.

2. OBJETIVOS

Objetivo geral

- Correlacionar alterações espectrais vegetacionais com os efeitos diretos, de longo prazo e de recuperação em acidentes ambientais causados por poluentes.

Objetivo Específico

- Demonstrar a utilização do processamento de imagens orbitais na delimitação e monitoramento de áreas impactadas por acidentes ambientais.

3. JUSTIFICATIVA

A delimitação das áreas atingidas por acidentes ambientais é um processo dinâmico. Tal delimitação será função das características e do volume do contaminante, seu processo de solubilização e/ou espalhamento, sua toxicidade para os diferentes organismos nos diferentes compartimentos ambientais potencialmente afetados, sua taxa de degradação química, física e/ou biológica, as condições ambientais imediatamente anteriores e posteriores ao acidente, como chuva, vento, temperatura, entre outros.

Deste modo, quaisquer tecnologias que permitam análises temporais de grandes áreas, como o monitoramento por imagens orbitais, devem ser exauridas para a geração de informações que indiquem possíveis modificações nos compartimentos ambientais causadas pelo acidente.

Este trabalho apresenta o monitoramento da alteração da reflectância da vegetação de quatro diferentes áreas submetidas a acidentes ambientais: duas áreas onde ocorreram o rompimento de barragens de rejeitos de mineração e duas áreas estuarinas onde ocorreram derramamentos de óleo. Este monitoramento utilizou imagens orbitais produzidas pelos satélites Landsat 5 e Landsat 7, amplamente utilizadas na produção de dados científicos mundiais devido a características como estabilidades orbitais e contínuo monitoramento de suas imagens pela comunidade científica.

As áreas onde ocorreram os rompimentos das barragens apresentaram fortes alterações espectrais, muito evidentes através do índice NDVI. As áreas estuarinas onde ocorreram os derramamentos de óleo apresentaram variações espectrais sutis, mas monitoráveis através de variações dos índices NDVI e NDII, a partir de comparações com padrões espectrais de áreas consideradas não impactadas.

Este trabalho propõe que a metodologia aqui desenvolvida seja um dos dados a serem utilizados para a delimitação de áreas impactadas em acidentes ambientais e que, juntamente com outras metodologias complementares, possa auxiliar no processo de delimitação da área total impactada por determinado acidente ambiental.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As plantas podem responder a mudanças ambientais por aclimações rápidas como também por adaptações de longo termo como espessura e tamanho foliar, densidade de estômatos, estrutura e função de cloroplastos assim como níveis enzimáticos para condições de crescimento em alta ou baixa luminosidade. Dependendo do tipo e da natureza, tais adaptações podem ocorrer dentro de dias ou mesmo semanas. Com tais respostas adaptativas, as plantas podem evitar condições de estresse e se adaptar às novas condições de crescimento (LICHTENTHALER, 1996).

O sensoriamento remoto tem sido utilizado no monitoramento de alterações ambientais por disponibilizar um panorama conjunto de grandes áreas, com revisitas em intervalos temporais regulares. As possibilidades analíticas de cada sensor são condicionadas às suas resoluções espacial e espectral.

O intervalo espectral de 400-3200nm pode ser dividido em 3 regiões (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010):

- Região do visível (400-720nm): os pigmentos existentes nas folhas dominam a reflectância. São geralmente encontrados nos cloroplastos compostos por clorofilas, carotenos e xantofilas, com percentuais variando grandemente entre as diferentes espécies vegetais. Os pigmentos predominantes absorvem na região do azul (próximo a 445nm), mas somente a clorofila absorve na região do vermelho (645nm).
- Região do infravermelho próximo (720-1100nm): refletância nesta região é atribuída à estrutura do mesófilo. Quanto mais lacunosa for a estrutura interna foliar, maiores serão os valores de refletância. Fatores externos à folha, como a disponibilidade de água, podem causar alterações na relação água-ar do mesófilo, podendo alterar quantitativamente a refletância nesta região.
- Região do infravermelho médio (1100-3200nm): reflectância baixa em razão da alta absorção pela água líquida. A absorção da água se dá em 1100, 1450, 1950 e 2700nm. A diminuição de água nas folhas produz um aumento de reflectância foliar nessa região do espectro.

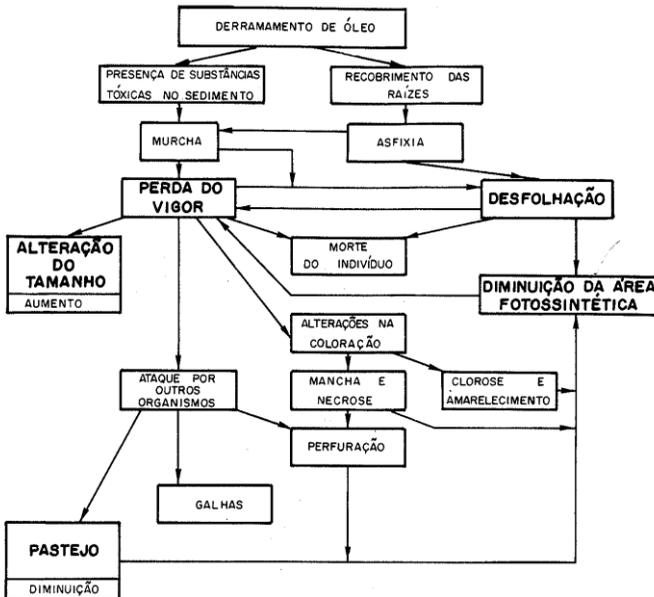
Vários fatores (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010) podem atuar na composição química ou estrutural das folhas, acarretando em alterações na reflectância nas diferentes regiões espectrais, tais como:

- No visível, pela modificação no conteúdo de pigmentos;
- No infravermelho próximo, pela ocorrência de necrose;
- No infravermelho médio, pela alteração no equilíbrio hídrico foliar.

Os efeitos agudos e crônicos apresentados pela vegetação de mangue exposta a substâncias tóxicas variam desde a perda de vigor da vegetação, expresso por necrose, perfuração, murchamento e alterações na coloração das folhas, até a desfolhação e morte do indivíduo (RODRIGUES et al., 1989).

Algumas condições do impacto por petróleo em vegetação de mangue, estudadas por Rodrigues e colaboradores (1989), são sintetizadas na figura 1.

Figura 1. Efeitos apresentados pela vegetação de mangue impactada por derramamento de óleo.



Extraído de Rodrigues et al., 1989

Segundo Rodrigues e colaboradores (1989), a resposta normal dos manguezais expostos a cobertura por petróleo parece ser a rápida queda das folhas, em como a consequente suscetibilidade das novas folhas a deformações, redução no tamanho, verificando-se também um maior ataque por insetos. O murchamento foi o primeiro sintoma observado, resultando numa modificação de textura. Manchas e perfurações foram observadas, além de amarelecimento, enrolamento e clorose.

O produto final de todos estes registros foi a redução da superfície foliar total do bosque, não só pela diminuição do número de folhas em função de sua queda como também pelo comprometimento da superfície foliar fotossintética devido a alterações como manchas, necroses e outros.

Segundo Teas e colaboradores (1987), o monitoramento do mangue após derramamento de óleo demonstrou que o percentual de mortalidade dos indivíduos atingidos após 6 meses, que já era superior aos indivíduos não atingidos pelo óleo, triplicou após 36 meses, demonstrando o efeito tardio do derramamento no ecossistema.

Conforme compilação do MMA/CONAMA (2001), a vulnerabilidade dessa vegetação é devida ao recobrimento da região entremarés, áreas mais cruciais para a ventilação adequada do sistema radicular do mangue, onde as lenticelas (estruturas por onde se efetuam as trocas gasosas, situadas nas superfícies das raízes aéreas e dos pneumatóforos), são encontradas em maior concentração. Recobrimentos mais

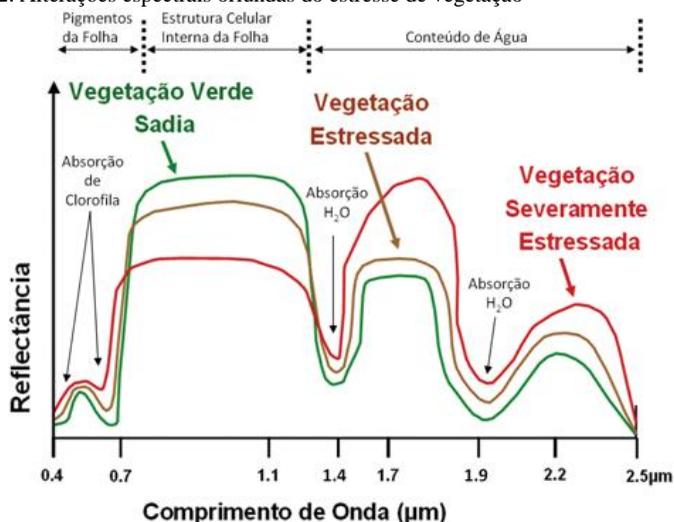
espessos das raízes, invariavelmente, levam as árvores à morte, mesmo que o processo seja gradual.

A literatura tem listado dezenas de sintomas de estresse de mangue consequências do derramamento de óleo. No monitoramento de vários desses efeitos de estresses, tais como expansão das lenticelas, necrose foliar, galhas, entre outros. GETTER e colaboradores (1985), descreveram uma medida consistentemente correlacionada com outros efeitos, dando uma boa indicação do nível de estresse: a razão entre o comprimento e a largura das folhas do mangue produzidas após o início do impacto. Várias espécies de mangue atingidas por óleo exibiram uma significativa diminuição no comprimento e na largura de suas folhas, sintoma apresentado consistentemente em estudos de laboratório e de campo.

Embora sejam esperadas alterações fisiológicas na vegetação submetida a substâncias com potenciais tóxicos, alguns efeitos indiretos de algumas substâncias como hidrocarbonetos, podem ser observados na vegetação, tais como: diminuição do oxigênio do solo por oxidação bacteriana dos hidrocarbonetos, aumento da concentração de CO_2 no solo, podendo causar a interrupção da respiração das raízes, alteração de pH e Eh do solo e de água subterrânea, com conseqüente alteração da disponibilidade de elementos-traço, entre outros (SOUZA FILHO et al., 2008).

A vegetação submetida a diferentes substâncias químicas apresenta alterações em seus espectros de reflectância na região do visível, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas (SOUZA FILHO et al., 2008), além de alterações na posição do *red-edge* (EMENGINI et al., 2010). Tais alterações já possibilitaram o mapeamento de áreas impactadas por poluentes a partir de estresses na vegetação identificados por sensores hiperespectrais aeroportados (LI et al., 2005; VAN DER WERFF et al., 2008). As principais alterações espectrais entre vegetação sadia e estressada são apresentadas nas figuras 2 e 3.

Figura 2. Alterações espectrais oriundas do estresse de vegetação



Extraído de Souza Filho et al., 2008

Figura 3. Alterações espectrais de folhas de Eucalipto. Folha sadia (1) e com possíveis deficiências em nutrientes (2, 3, 4 e 5).



Fonte: Souza Filho et al., 2008

A detecção das condições de estresse na vegetação pode ser monitorada pela redução da área foliar total exposta ao sensor (dossel). Essa redução pode surgir da perda direta de folhas, da mudança de sua orientação ou da interrupção de crescimento da planta. Nestes casos, a reflectância tende a ser alterada no infravermelho próximo, por causa da redução do mecanismo de camadas (soma da energia refletida das folhas inferiores e do topo) ou por um aumento da exposição do solo (SOUZA FILHO et al., 2008).

O vigor da vegetação pode ser um bom indicativo de áreas impactadas por acidentes ambientais. Essa propriedade foi explorada por Rouse *et al.* (1974) na proposição do Índice Normalizado de Diferença de Vegetação (NDVI) que, desde então, passou a ser amplamente utilizado para determinação de parâmetros como biomassa, vigor, estágio de crescimento, atividade fotossintética, percentagem de cobertura vegetal e outras propriedades biofísicas da vegetação. Este índice tende a realçar as diferenças entre o mínimo de reflexão no vermelho, correspondente ao máximo de absorção por pigmentos das plantas, e o máximo de reflexão no infravermelho próximo, devido à estrutura foliar. (SOUZA FILHO et al., 2008).

O conteúdo de água do dossel vegetal tem sido estimado por vários índices de vegetação. É bem compreendido que reflectância no infravermelho médio (SWIR) é negativamente correlacionada com o conteúdo de água da folha devido à grande absorção desse comprimento de onda pela água. Entretanto, a banda SWIR sozinha não é adequada e deve ser contrastada com bandas do infravermelho próximo (NIR) para estimar o conteúdo de água foliar, pois outros parâmetros foliares também podem afetar a reflectância no SWIR. Uma combinação de bandas no SWIR e no NIR, o Índice Normalizado de Diferença de Infravermelho (NDII) foi primeiramente definida por HARDISKY e colaboradores (1983) como indicador da água foliar.

Pesquisas indicaram que o NDII, baseado nas bandas Landsat TM no infravermelho próximo e médio, pode ser correlacionado com o conteúdo de água do dossel e monitorar mudanças na biomassa vegetal e no estresse de água das plantas de modo mais específico que o NDVI (AHAMED et al., 2011).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

As imagens e mapas apresentados foram produzidos pelos programas ENVI 4.6.1 e ArcGis 9.3.1., disponíveis no Grupo de Perícias em Meio Ambiente (GPEMA) do Setor Técnico-Científico (SETEC) da Superintendência de Polícia Federal em São Paulo (SR/DPF/SP).

Imagens orbitais (satélites Landsat 5 e Landsat 7) de períodos anteriores e posteriores aos acidentes foram adquiridas para os respectivos estudos. As imagens foram obtidas gratuitamente via Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE) no sítio eletrônico (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) ou via United States Geological Survey (USGS) pelo programa EarthExplorer (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

O processamento digital das imagens orbitais obedeceu a etapas de calibração, registro e execução da rotina *SPEAR Change Detection*, que efetuou a normalização entre as imagens, geração de imagens NDVI ou NDII e subtração das imagens dessas imagens (\neq NDVIs ou \neq NDIIs) entre os diferentes períodos.

O processamento digital gerou imagens de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (equação 1)

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_V)}{(\rho_{IVP} + \rho_V)} \quad (1)$$

onde:

ρ_{IVP} : fator de reflectância bidirecional no infravermelho próximo (considerada a banda 4 do Landsat 5 ou 7)

ρ_V : fator de reflectância bidirecional no vermelho (considerada a banda 3 do Landsat 5 ou 7)

e imagens da subtração dos NDVIs de diferentes períodos (equação 2)

$$\neq NDVIs = NDVI_{posterior} - NDVI_{anterior} \quad (2)$$

onde:

$NDVI_{anterior}$: imagem NDVI da área antes do acidente

$NDVI_{posterior}$: imagem NDVI da área após o acidente

O processamento digital também gerou imagens de Índice de Infravermelho da Diferença Normalizada (NDII) (equação 3)

$$NDII = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{IVM})}{(\rho_{IVP} + \rho_{IVM})} \quad (3)$$

onde:

ρ_{IVP} : fator de reflectância bidirecional no infravermelho próximo (considerada a banda 4 do Landsat 5 ou 7)

ρ_{IVM} : fator de reflectância bidirecional no infravermelho médio (considerada a banda 5 do Landsat 5 ou 7)

e imagens da subtração dos NDII de diferentes períodos (equação 4)

$$\neq NDII_s = NDII_{posterior} - NDII_{anterior} \quad (4)$$

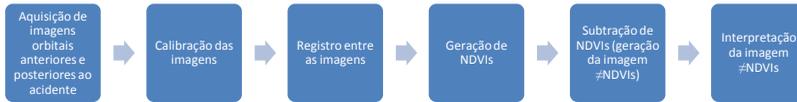
onde:

$NDII_{anterior}$: imagem NDII da área antes do acidente

$NDII_{posterior}$: imagem NDII da área após o acidente

A Figura 4 apresenta um fluxograma básico da metodologia apresentada.

Figura 4. Fluxograma básico do processamento das imagens.



As imagens $\neq NDVIs$ e $\neq NDII$ s foram interpretadas através dos valores apresentados por seus pixels. A partir dessas interpretações, pixels de determinados valores foram coloridos artificialmente de modo a ilustrar os resultados obtidos.

As rotinas de processamento digital das imagens executadas no ENVI são apresentadas a seguir:

Calibração das imagens

Basic Tools/ pré-processing/ calibration utilities/ landsat calibration/

Select input file (selecionar banda 1, 2, 3, 4, 5 ou 7)

Selecionar satélite, data de aquisição da imagem, ângulo de elevação solar (obtido via arquivo .mtl disponibilizado juntamente com os arquivos de imagens) e banda. Salvar arquivo banda calibrada.

Apresentação das bandas calibradas em conjunto

Layer Stacking:

Basic Tools/ Layer Stacking

Import File

Layer Stacking Input File (selecionar bandas calibradas)

Spatial Subset

Select Spatial Subset

Map

Spatial Subset by Map coordinates (adicionar coordenadas esquerda superior e direita inferior da cena)

Reorder files (ordenar arquivos na sequencia crescente)

Salvar arquivos em conjunto.

Informação do comprimento de onda médio das bandas

File/ Edit ENVI Header

Edit ENVI Header Input File

Select Input File

Edit Attributes

Wavelengths

Edit Wavelengths values (informar valores 485, 560, 660, 830, 1650 e 2150 respectivamente para bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 – informar *Nanometers* no campo *Wavelengths/FWHM units*)

Produção da imagem de subtração de NDVIs de diferentes datas (com normalização radiométrica e subtração de elemento negro)

Spectral/SPEAR Tools/Change Detection

Change Detection

Select Time #1 File

Select Time #1 Input File (selecionar cena)

Auto Tie Point Matching Band (selecionar banda 4)

Select Time #2 File

Select Time #2 Input File (selecionar cena)

Auto Tie Point Matching Band (selecionar banda 4)

Co-Registration Parameters

Images already co-registered

Change detection Methods

Subtractive

Perform Dark Objection Subtraction

Perform Radiometric Normalization

(a subtração do elemento negro atenua efeitos atmosféricos e a normalização radiométrica atenua a diferença de brilho entre as imagens)

Destaque de áreas alteradas (com a imagem aberta no display)

Overlay/Density Slice

Density Slice Band Choice (confirmar a imagem a ser destacada)

Density Slice

Defined Density Slices Ranges (selecionar Yellow)

Edit Range

Edit Density Slice Range (informar valores mínimos e máximos dos pixels a serem destacados)

Apply

Variação do sinal de NDVI na Amostra Mangue

Com a imagem de subtração de NDVI de diferentes datas no display:

Tools/Region of Interest/ROI Tool

ROI Tool

Stats (obter estatísticas da ROI Amostra Mangue)

ROI Statistics Results

Select Plot (obter média, desvio-padrão e histograma)

Delimitação da área de estudo (e.g., Mangue Monitorado)

Com a imagem no display:

Tools/Region of Interest/ROI Tool

*ROI Tool**New Region (window Zoom)*

Desenhar área de estudo

*File/Save ROIs***Correção atmosférica com o FLAASH***Spectral/FLAASH**Input Radiance Image* : carregar imagem calibrada para radiância em arquivo.bil*Radiance Scale Factor* : Use single scale factors for all bands: 10*Output Reflectance File* : nome do arquivo de saída*Output Directory for FLAASH Files*: indicar diretório*Rootnames for FLAASH Files*: indicar nome*Scene Center Location*: indicar coordenadas do centro da cena*Sensor Type*: TM5 ou TM7*Flight Date*: indicar data da cena*Flight Time*: indicar hora da cena*Atmospheric Model*: Tropical*Water Retrieval*: No*Water Column Multiplier*: 1.00*Aerosol Model*: Maritime*Aerosol Retrieval*: None ou 2-Band (K-T)*Initial Visibility*: 40.00*Multispectral Settings* (para Aerosol Retrieval: 2-Band (K-T))*Select Channel Definitions by GUI**Kaufman-Tanre Aerosol Retrieval**K-T Upper Channel*: banda 7 do L5 ou L7*K-T Lower Channel*: banda 3 do L5 ou L7*Maximum Upper Channel Reflectance*: 0.10*Reflectance Ratio*: 0.45*Cirrus Channel*: undefined*Filter Function File*: manter definição dada pelo tipo de sensor*Index to first band*: manter definição dada pelo tipo de sensor

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERADORA EM 22/06/2001, NO MUNICÍPIO DE NOVA LIMA/MG

No dia 22 de junho de 2001, sexta-feira, houve o rompimento da Cava 1 da Rio Verde Mineração (cujas atividades se concentram no minério de ferro) que estava sendo preenchida com material de rejeito de minério do processo de beneficiamento a úmido, o que provocou deslizamento de uma grande quantidade de rejeito (lama), atingindo o Córrego Taquaras. Cinco funcionários faleceram no momento do acidente, sendo que um dos corpos não foi localizado.

Pelo fato de a Cava 1 estar localizada em um terreno de cota mais elevada da área da empresa, o material que saiu de dentro da Cava 1 desceu pela área montanhosa da região por uma extensão, segundo parecer técnico da Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM –, de 5 quilômetros de extensão, provocando estragos ao meio ambiente, à fauna e à flora locais. O escorregamento do material da Cava 1 atingiu o Córrego Taquaras e parte do Córrego do Fecho, ambos localizados na bacia do Rio Das Velhas. Após descer cerca de 1 km, a força do material rompe uma adutora da Copasa 3, acentuando a gravidade do acidente (GONÇALVES, J.C., 2005).

O acidente analisado nesta seção promoveu uma alteração significativa no NDVI em áreas próximas às drenagens naturais que receberam os rejeitos após o rompimento da barragem. A Tabela 1 descreve as imagens orbitais utilizadas nas análises.

Tabela 1. Imagens orbitais do município de Nova Lima/MG, onde ocorreu o acidente em 22/06/2001.

<i>Data</i>	<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Órbita</i>	<i>Ponto</i>
12/05/2001	Landsat 7 / ETM	218	74
29/06/2001	Landsat 7 / ETM	218	74

A figura 5 apresenta a área municipal de Nova Lima/MG, compreendendo o entorno da barragem de rejeitos rompida em 22/06/2001 em composições RGB 543 e em imagem ≠NDVI.

Figura 5. Área municipal de Nova Lima/MG abrangendo entorno da barragem de rejeitos rompida em 22/06/2001. A) Composição RGB 543 de 12/05/2001; B) Composição RGB 543 em 29/06/2001 e C) Imagem \neq NDVI_{29/06/2001-12/05/2001}

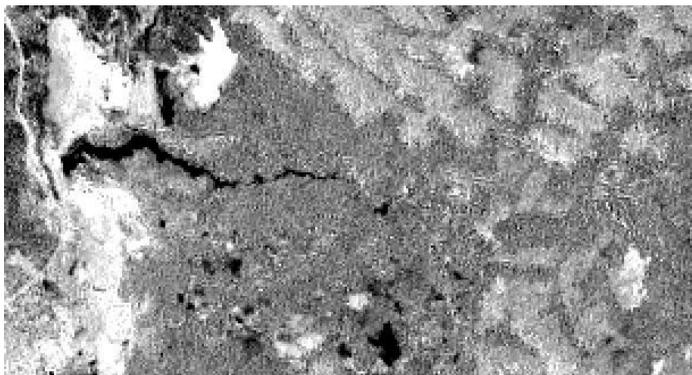
A)



B)



C)

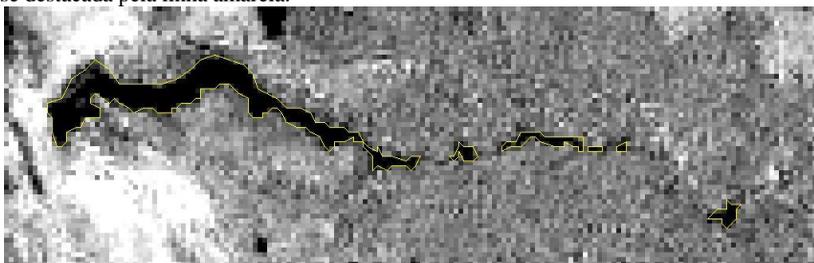


A Figura 5 ilustra a grande mudança no sinal atribuído à vegetação próxima às drenagens que receberam o impacto direto da barragem rompida.

A alteração do sinal atribuído à vegetação (grande mancha escura no entorno das drenagens) pode ser facilmente observada na Figura 5C. Dentre as possíveis causas dessa alteração encontram-se a remoção física da vegetação, recobrimento (assoreamento), grandes alterações no vigor e/ou morte por efeitos físicos ou tóxicos do material carreado, causas estas que são objetivo dos exames periciais de campo.

A figura 6 apresenta um detalhamento da figura 5C, com a delimitação e cálculo da área de indicação de impacto.

Figura 6. Detalhe da figura 5C. A delimitação da área de indicação de impacto encontra-se destacada pela linha amarela.



A figura 6 apresenta o entorno da drenagem principal da região, que recebeu os efeitos diretos do rompimento da barragem de rejeitos. É esperado que muito de suas margens tenham sido modificadas pelo material contido na barragem e pela onda causada pelo rompimento.

Quaisquer desses efeitos causariam uma diminuição do sinal de vegetação de suas margens, seja por assoreamento, recobrimento, retirada de vegetação ou morte por intoxicação. Esta diminuição do sinal de vegetação, na subtração de imagens NDVI, será identificada por valores negativos na imagem \neq NDVI.

A imagem \neq NDVI do entorno da região da barragem, em escala de cinzas, é apresentada na figura 6. Os valores negativos na imagem \neq NDVI são representados pelos pixels escuros, quando o valor do NDVI após o acidente (\neq NDVI_{posterior}) é menor que o valor do NDVI antes do acidente (\neq NDVI_{anterior}) (vide Material e Métodos).

A figura 6 ilustra, delimitada pela linha amarela, os pixels escuros relacionados com a imagem principal que recebeu os rejeitos. Estes pixels escuros indicam áreas que apresentaram grande variação negativa na imagem \neq NDVI, ou seja, áreas cujos sinais são compatíveis com os sinais de vegetação impactada pelo acidente. Estes pixels de grande variação negativa permitem o cálculo da área possivelmente impactada (44,19 ha), delimitada pela linha amarela na figura 6.

A figura 6 indica de forma bastante contrastada a possível área afetada pelo acidente, dado de grande importância para o direcionamento dos exames de campo.

6.2. RUPTURA DA BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERADORA EM 10/01/2007, NO MUNICÍPIO DE MIRAÍ/MG

Durante a madrugada do dia 10 de janeiro de 2007, a barragem de rejeitos do empreendimento denominado Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda., situada na Fazenda São Francisco, zona rural do Município de Mirai/MG, rompeu-se, causando sérios danos ambientais nos Municípios de Italva, Cardoso Moreira, Itaperuna e Lage do Muriaé, situados no Estado do Rio de Janeiro, e Mirai, Muriaé e Patrocínio do Muriaé, situados no Estado de Minas Gerais.

Os maiores danos ambientais e materiais ocorreram na Cidade de Mirai. O rompimento da barragem de rejeitos de bauxita causou o despejo de vários milhões de litros cúbicos de lama no rio Fubá, situado na zona rural de Mirai, destruindo por completo a ictiofauna do curso d'água citado, elevando o nível de turbidez da água e determinando a suspensão de seu abastecimento. Além disso, a violenta onda de lama causou enormes processos erosivos nas margens do Rio Fubá, criando áreas de risco nas propriedades rurais situadas ao longo das margens do curso d'água. Centenas de propriedades rurais de Mirai foram afetadas, com perda total de suas plantações, além da intedidação de estradas (adaptado de LARCHER, M.A., 2012).

Segundo a mineradora, o material existente na barragem era composto de finos de menos de 0,5mm e colóides de argilas e bauxita. Os técnicos do DNPM verificaram que a barragem de rejeito tinha aproximadamente 35m de altura e que cerca de 70% do material que estava retido havia vazado (GESTÃO MINERAL EM DESTAQUE, 2007).

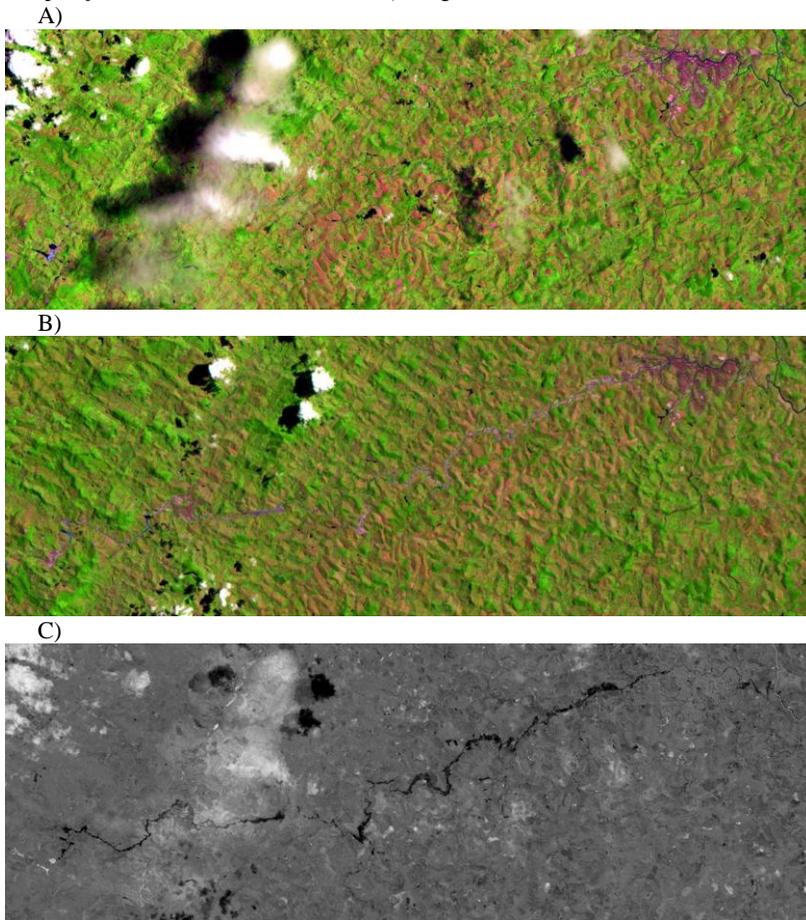
O acidente analisado nesta seção promoveu uma alteração significativa no NDVI em áreas próximas às drenagens naturais que receberam os rejeitos após o rompimento da barragem. A Tabela 2 descreve das imagens orbitais utilizadas nas análises.

Tabela 2. Imagens orbitais do município de Mirai/MG, onde ocorreu o acidente em 10/01/2007.

<i>Data</i>	<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Órbita</i>	<i>Ponto</i>
21/12/2006	Landsat 5 / TM	217	75
11/03/2007	Landsat 5 / TM	217	75

A figura 7 apresenta a área municipal de Mirai/MG e Muriaé/MG, compreendendo o entorno da barragem de rejeitos rompida em 10/01/2007 em composições RGB 543 e em imagem ≠NDVI.

Figura 7. Área municipal de Miraf/MG e Muriaé/MG abrangendo entorno da barragem de rejeitos rompida em 10/01/2007. A) Composição RGB 543 de 21/12/2006; B) Composição RGB 543 em 11/03/2007 e; C) Imagem \neq NDVI_{11/03/2007-21/12/2006}.



As figuras 7A e 7B apresentam composições RGB 543 do Landsat 5 de 21/12/2006 e 11/03/2007. Uma comparação entre as composições dessas diferentes datas já indica uma mudança na feição das margens dos rios Fubá e Muriaé, observada pela alteração de um padrão de reflectância de vegetação nas margens desses rios (figura 7A) para um padrão de reflectância similar ao de solo exposto nas margens desses rios (figura 7B).

Essa alteração do padrão de reflectância das margens dos rios Fubá e Muriaé é bastante evidenciada na imagem \neq NDVI apresentada na figura 7C. Nesta figura, a alteração do padrão de reflectância anterior e posterior ao acidente pode ser

identificada pelas áreas escuras nas margens desses rios, oriundas da subtração dos NDVIs gerados a partir das imagens de 21/12/2006 e 11/03/2007.

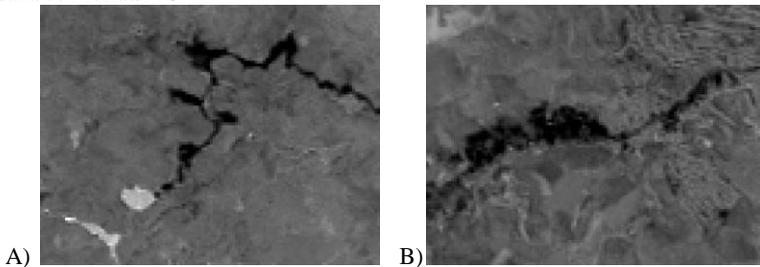
A Figura 7 ilustra a grande mudança no sinal atribuído à vegetação nas margens dos rios Fubá e Muriaé. Essa alteração pode ser observada desde o entorno da barragem rompida até o encontro com o rio Glória, a aproximadamente 50 km de distância através do rio Muriaé.

A alteração do sinal atribuído à vegetação (grande mancha escura no entorno das drenagens que receberam os rejeitos da barragem rompida) é bastante evidenciada na Figura 7C.

Dentre as possíveis causas das alterações espectrais observadas encontram-se a remoção física da vegetação, recobrimento (assoreamento), grandes alterações no vigor e/ou morte por efeitos físicos e/ou tóxicos do material carreado. A determinação das causas específicas das alterações espectrais identificadas na figura 7 deve ser objeto de exames de campo e não foram consideradas objeto da metodologia apresentada nesta seção.

A figura 8 apresenta um detalhamento da figura 7C, nas proximidades da barragem rompida e próximo à área urbana de Muriaé/MG, a aproximadamente 40 km de distância do local do acidente, pelo leito do rio Muriaé.

Figura 8. Detalhe da figura 7C. A) Área próxima à barragem rompida; B) Início da área urbana de Muriaé/MG.



A figura 8 evidencia a a localização exata e o cálculo da área possivelmente impactada, dados de grande valia para o direcionamento dos exames de campo.

O índice pluviométrico no verão de 2006/2007 nas bacias hidrográficas dos rios Fubá e Muriaé foi bastante elevado, sendo considerado uma das causas do rompimento da barragem estudada nesta seção. As alterações no padrão de reflectância nas margens desses rios, apresentadas nas figuras 7 e 8, foram constatadas entre as datas de 21/12/2006 e 11/03/2007, e alcançam extensões superiores à 50 km.

Espera-se que grandes cheias nos rios citados causem impactos em suas margens e várzeas, causando alteração do vigor da vegetação e/ou morte por assoreamento, submersão e supressão de vegetação por fluxo de água. Apesar do estudo desta seção utilizar imagens anterior e posterior, o período compreendido inicia-se mais de 20 dias antes do acidente e termina quase 60 dias após o acidente, extrapolando em muito os dias imediatamente anteriores e posteriores ao acidente.

Várias das modificações observadas pelas alterações de reflectância podem não ser contemporâneas à data do acidente, ou seja, podem não estar relacionadas com o rompimento da barragem e sim com eventos de elevação dos níveis de água desses rios pelo aumento do índice pluviométrico nas bacias hidrográficas.

A metodologia desta seção apresenta processamento digital de imagens orbitais para a indicação de áreas possivelmente impactadas. Esta metodologia não exige a necessidade dos exames de campo, apenas indica as áreas que necessitam ser examinadas para a comprovação das causas das alterações espectrais observadas e se tais alterações são contemporâneas e relacionadas especificamente com o acidente.

6.3. VAZAMENTO DE 1.293 M³ DE ÓLEO NA BAÍA DA GUANABARA EM 18/01/2000

Na madrugada de 18 de janeiro de 2000, o duto PE-II que transportava óleo combustível entre a Ilha D'água e Refinaria Duque de Caxias (REDUC), flambou, rompendo-se e acarretando em um vazamento de 1.293 m³ que afetou toda a Baía. Este duto era aquecido para tornar o óleo menos viscoso, e enterrado no fundo da Baía; ao longo do tempo ocorreu erosão deste fundo e parte do duto ficou solto (TERZIAN, R.L., 2005).

O acidente ocorreu durante a maré vazante e o óleo foi espalhado na baía. O óleo seguiu principalmente para o norte e leste, afetando a costa nordeste da baía desde a refinaria até aproximadamente 15 km para leste. Alguns dos pontos mais atingidos são próximo à fonte de vazamento e na área do rio Suruí (MICHEL, J., 2000).

Figura 9. Fotografias de áreas da baía de Guanabara obtidas em 27/01/2000. A) Foz do rio Suruí; B) Mangue próximo à tubulação rompida.



Fonte: (MICHEL, J., 2000).

Segundo Relatório Conjunto MMA/CONAMA (MMA/CONAMA, 2001), o óleo derramado por ocasião do acidente atingiu, primeiramente, os manguezais nas proximidades da REDUC, do Cabo do Brito, da Ilha do Morro Grande e as praias de Ipiranga, Limão, Olaria, São Francisco, Mauá e Ponta do Saco. Estendeu-se, posteriormente, até a foz do rio Suruí, já no interior da APA de Guapimirim, Unidade de Conservação Federal, em decorrência da ação dos ventos e das correntes de maré, impactando diversos ecossistemas, principalmente, praias, ilhas, manguezais e costões rochosos, sendo que as áreas mais impactadas foram, logo depois de Mauá e Anil, as Ilhas de Paquetá e de Brocoió.

O vazamento atingiu também o manguezal de Jequiá, na Ilha do Governador, cuja área é de 16 mil m², que foi revegetada após o acidente ocorrido em 1975, (navio-tanque Tarik, fretado pela PETROBRAS) quando ocorreu um derrame de 6 milhões de litros de óleo.

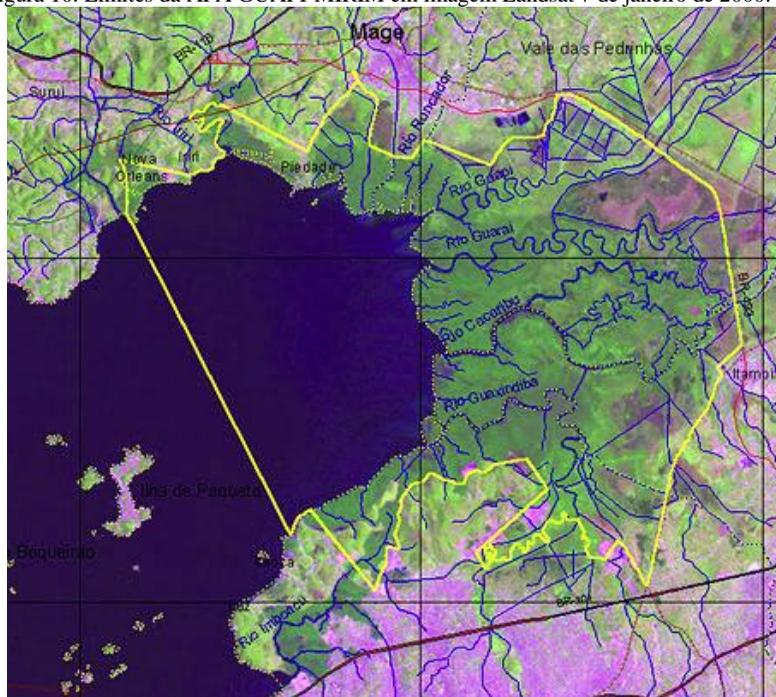
A APA de Guapimirim com uma área total de 14.340 ha, sendo 8.000 ha de mangue, teve cerca de 10% (1.434 ha) de área de mar atingida pelo derrame. O óleo atingiu dezessete rios da Baía da Guanabara, inclusive os três únicos, ainda considerados limpos na região: Guaxinduba, Guapi e Macacu que desembocam na APA de Guapimirim. Nos rios Suruí e Suruí-mirim, em Magé, foram encontradas marcas do vazamento do óleo a partir de sua foz e até cerca de 2,5 km rio acima.

Conforme estudo (FARIAS, C.O, 2006), 4 anos após o acidente ainda podia ser notada a presença de óleo no manguezal do Suruí, inclusive em camadas mais profundas.

Estudos dos manguezais da Guanabara (ARAÚJO e MACIEL,1979, apud PLANO DE MANEJO DA APA GUAPI-MIRIM) os caracterizam floristicamente pelas espécies arbóreas *Ryzophora mangle* Linnaeus. (mangue vermelho), *Avicennia schaueriana* Stapf & Leechm. ex Moldenke (mangue preto) e *Laguncularia racemosa* Gaertnf (mangue branco) que ocupam as áreas sem, contudo, apresentar vestígio de zonação característica. É também característica a presença de gramíneas, com destaque para *Spartina alterniflora* Loisel (*S.alterniflora*), normalmente ocupando a vasa lodosa, em faixas de 1 a 3 metros de largura à frente da vegetação lenhosa. Em áreas mais internas é comum serem encontradas invasoras, como a arbustiva *Hibiscus pernambucensis* Arruda (algodoeiro do brejo) e *Acrostichum aureum* Linnaeus. (samambaia do brejo), que ocupam seções do manguezal desmatado sob substrato alterado que não oferecem condições para o repovoamento das espécies originais.

Os limites da APA Guapi-Mirim, em imagem orbital de janeiro de 2000 extraído do PLANO DE MANEJO DA APA GUAPI-MIRIM, são apresentados na figura 10.

Figura 10. Limites da APA GUAPI-MIRIM em imagem Landsat 7 de janeiro de 2000.



Fonte: modificado a partir da figura 6.1.10 do Plano de Manejo da APA Guapi-Mirim.

A Tabela 3 descreve as imagens orbitais utilizadas nas análises desta seção. Tabela 3. Imagens orbitais da baía da Guanabara, onde ocorreu o acidente em 18/01/2000.

<i>Data</i>	<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Órbita</i>	<i>Ponto</i>
17/02/1999	Landsat 5 / TM	217	76
11/01/2000	Landsat 7 / ETM+	217	76
28/02/2000	Landsat 7 / ETM+	217	76

É esperado que a presença de água sob a vegetação estuarina alagável possa interferir na reflectância total dessas áreas. Essa reflectância total seria a somatória da reflectância da vegetação e do solo e água porventura expostos. Como a presença de água nessas áreas de vegetação alagável é função das marés, é esperado que os sinais de reflectância total devam variar com a altura das marés.

A Tabela 4 apresenta uma aproximação da altura das marés na data e hora das imagens utilizadas nesta seção.

Tabela 4. Altura aproximada das marés no Porto Ilha Fiscal na data e hora das imagens utilizadas na seção 6.3.

Data e hora da imagem (GMT -3h)		Tábua de Marés (Porto Ilha Fiscal) (GMT -3h)		Maré assumida
17/02/1999	09:31h	09:00h	200 cm	196 cm
		10:00h	192 cm	
11/01/2000	09:44h	09:00h	208 cm	200 cm
		10:00h	198 cm	
28/02/2000	09:44h	09:00h	205 cm	203 cm
		10:00h	202 cm	

Tabua de marés disponibilizada pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) pelo email bnodo@chm.mar.mil.br.

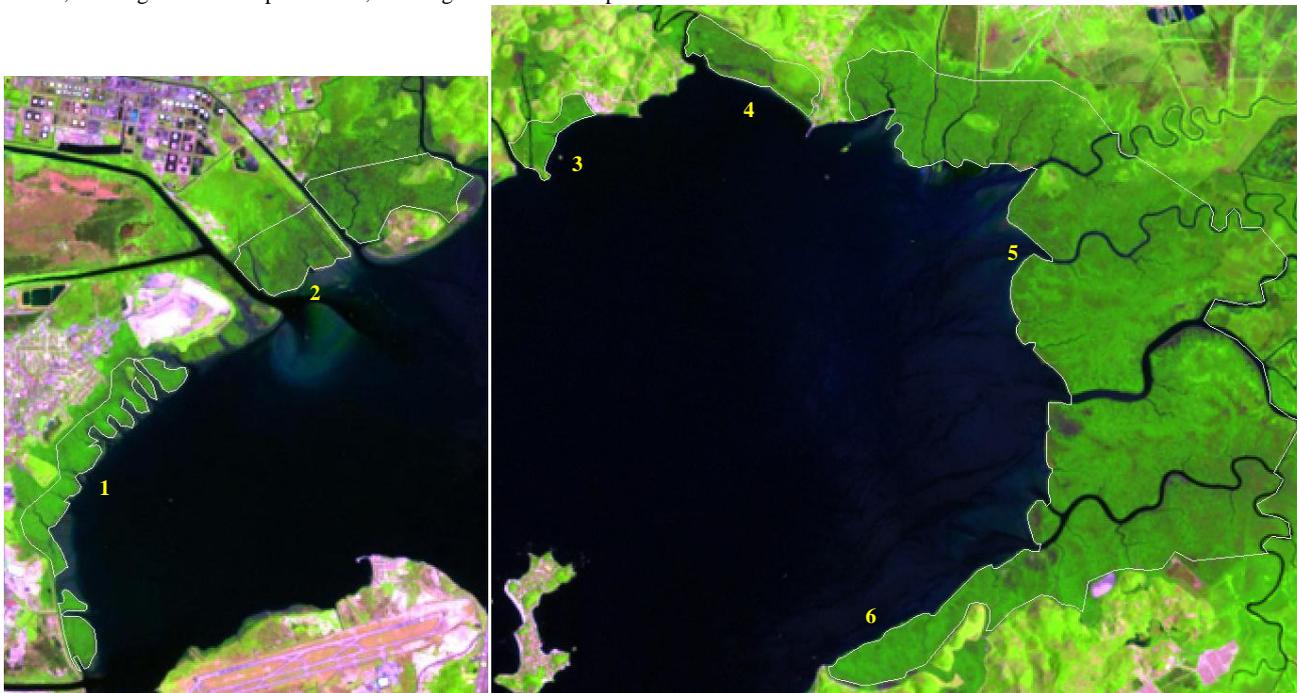
A Tabela 4 ilustra que as alturas das marés no Porto Ilha Fiscal (coordenadas geográficas 22° 53,8'S e 43° 10'W) são muito próximas entre as diferentes datas das imagens, encontrando-se nas 3 diferentes datas em vazante e com altura em torno de 200cm (não foi disponibilizado o nível de redução¹ da área). Desta forma, a influência das marés deve ser minimizada como causa das variações observadas nas reflectâncias entre as diferentes datas.

A partir de informações contidas no Plano de Manejo da APA Guapi-Mirim e de imagens de alta resolução espacial disponibilizadas no Google Earth foram delimitadas áreas de mangue na baía de Guanabara, doravante denominadas Mangue Monitorado.

O Mangue Monitorado e algumas áreas específicas numeradas de 1 a 6, em composição RGB 543 do Landsat 7 datada de 11/01/2000, são apresentadas na figura 11.

¹ Plano de referência ao qual todas as profundidades cartografadas estão relacionadas. É definido, segundo a Organização Hidrográfica Internacional, como "um plano tão baixo que a maré, em condições normais, não fique abaixo dele. (<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/infotmares2012.html#nivel>)

Figura 11. Áreas de mangue (linha branca) da baía da Guanabara monitoradas nesta seção, doravante denominadas Mangue Monitorado. As áreas numeradas de 1 a 6 são denominadas respectivamente: 1: Mangue Sul REDUC; 2: Mangue REDUC; 3: Mangue Suruí-Nova Orleans; 4: Mangue Piedade; 5: mangue APA Guapi-Mirim e; 6: Mangue Sul APA Guapi-Mirim.



Diversos fatores naturais podem alterar a reflectância de áreas vegetadas monitoradas por sensores orbitais, como períodos estacionais, fenologia da vegetação, índices pluviométricos, além de fatores artificiais como poluição de áreas vegetadas e/ou supressão de vegetação nessas áreas.

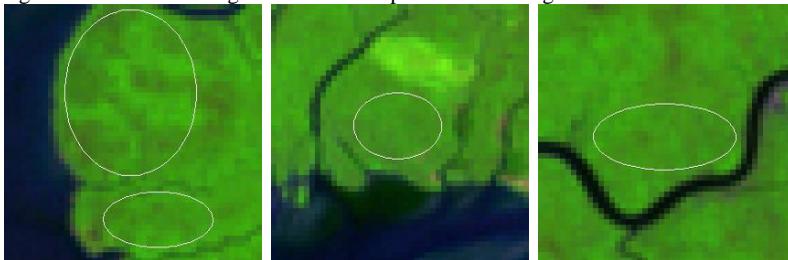
Com o objetivo de acompanhar a variação natural da reflectância entre as diferentes datas dos sinais de NDVI e NDII da vegetação de mangue da baía, 8 áreas representando vegetação de mangue foram delimitadas na APA de Guapi-Mirim. Essas 8 áreas de mangue preservado e mangue regenerado foram delimitadas a partir de informações constantes no Plano de Manejo da APA e de imagens de alta resolução espacial disponibilizadas no Google Earth.

Um padrão de reflectância do mangue da baía foi construído a partir da reflectância média das 8 áreas de mangue delimitadas acima mencionadas. Estas 8 áreas foram analisadas em conjunto, sendo doravante denominadas Amostra Mangue e apresentadas na figura 12.

Figura 12. Nordeste (NE) da baía da Guanabara em imagem de composição RGB (543) do Landsat 7 datada de 11/01/2000. As elipses brancas indicam as áreas de vegetação de mangue amostradas na baía, que analisadas em conjunto são doravante denominadas Amostra Mangue (vide texto).



Figura 13. Detalhes de algumas das áreas apresentadas na figura 12.



A variação natural da refletância do mangue da baía foi inferida através do histograma dos valores assumidos pela Amostra Mangue nas imagens \neq NDVIs. Valores médios positivos nestes histogramas indicam um aumento no sinal oriundo da vegetação, interpretado como um aumento no vigor da vegetação, enquanto valores médios negativos são interpretados como um decréscimo no vigor da vegetação amostrada.

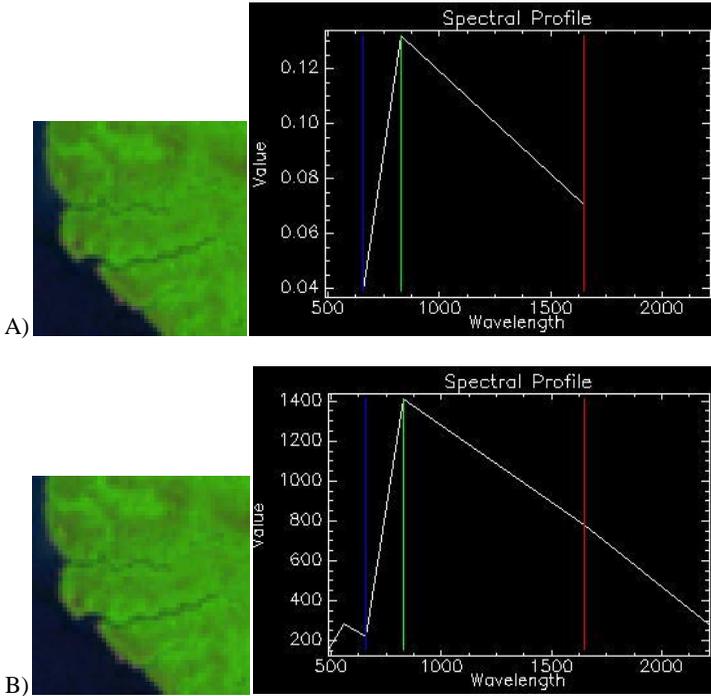
As variações observadas nos histogramas da Amostra Mangue definiram os limites para o monitoramento das áreas de Mangue Monitorado apresentadas na figura 11.

Com o intuito de destacar as áreas que sofreram um decréscimo no vigor da vegetação devido a efeitos do derramamento de óleo na baía, foram evidenciadas nas imagens \neq NDVIs somente os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética do histograma da Amostra Mangue subtraída de 3 vezes o desvio-padrão calculado ($\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\sigma$). Espera-se desta forma delimitar áreas (pixels) que sofreram variações extraordinárias nos sinais de NDVI, adicionais às variações naturais calculadas via histograma da Amostra Mangue.

As variações de NDVI das áreas de Mangue Monitorado foram calculadas por dois protocolos: primeiramente com as imagens orbitais sem correção atmosférica e posteriormente com as mesmas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos através do módulo FLAASH.

As diferenças dos efeitos atmosféricos em composições RGB são apresentadas na figura 14.

Figura 14. Composições RGB 543 do Landsat 7 datadas de 11/01/2000 de mangue na APA Guapi-Mirim calibradas para: A) reflectância e B) reflectância com correção atmosférica via FLAASH. Os espectros do ponto central das imagens são apresentados ao lado das composições.



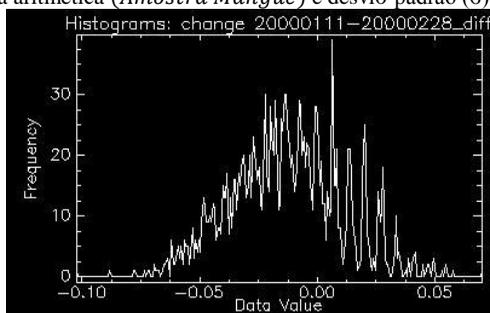
Como demonstrado na figura 14, embora os efeitos da correção atmosférica sejam de difícil visualização nas composições RGB, tais efeitos podem ser visualizados nos perfis espectrais e nas razões entre os valores assumidos pelos pixels nas diferentes bandas Landsat 7 (ex: $b4/b3$ em A) 3,44 e em B) 6,44).

As seções 6.3.1 e 6.3.2 apresentam os resultados da variação de NDVI das áreas de Mangue Monitorado em imagens sem correção atmosférica e com as mesmas imagens corrigidas via FLAASH.

Seção 6.3.1. Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens sem correção atmosférica

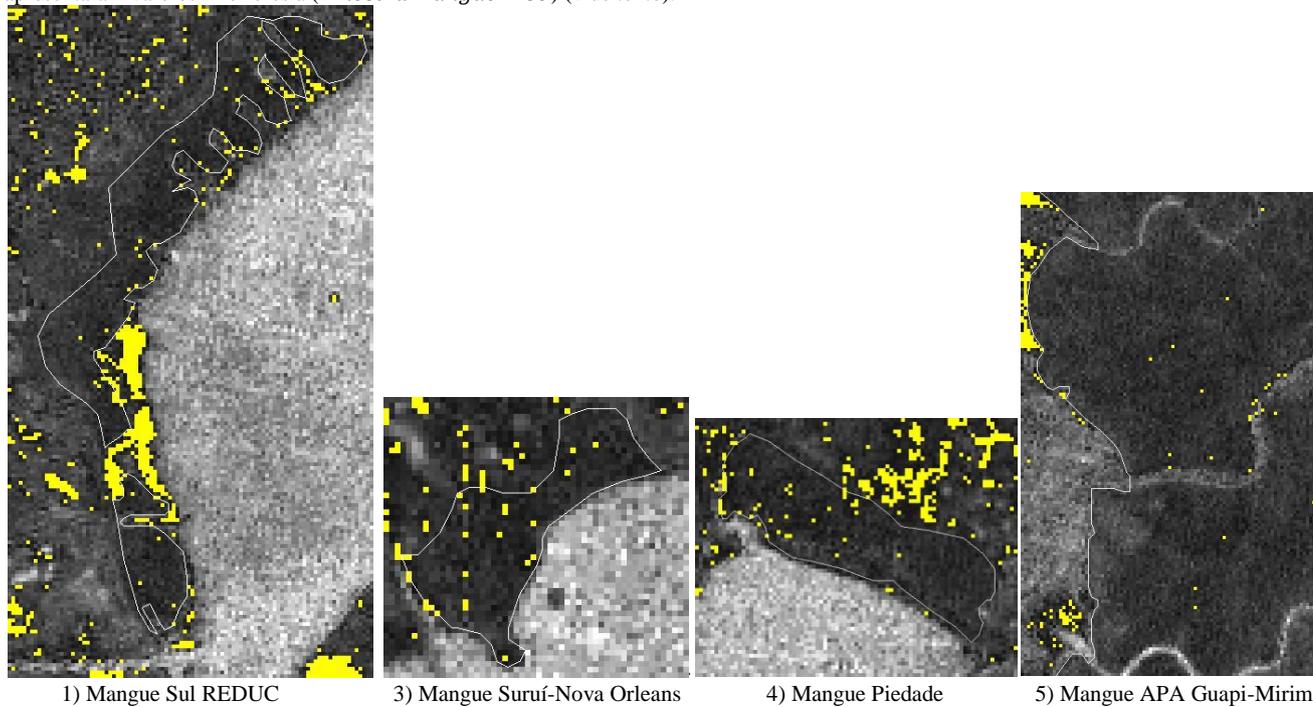
A figura 15 apresenta o histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000}.

Figura 15. Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000} com média aritmética (*Amostra Mangue*) e desvio-padrão (σ) de $-0,012 \pm 0,023$.



A figura 16 apresenta quatro diferentes áreas do Mangue Monitorado em imagens \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000}. Os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética da Amostra Mangue subtraída de 3 desvios-padrão ($\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\sigma$) foram destacados em amarelo.

Figura 16. Diferentes áreas do Mangue Monitorado (delimitadas pela linha branca) em imagens \neq NDVIs_{28/02/2000-11/01/2000}. Em amarelo, pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* - 3σ) (vide texto).



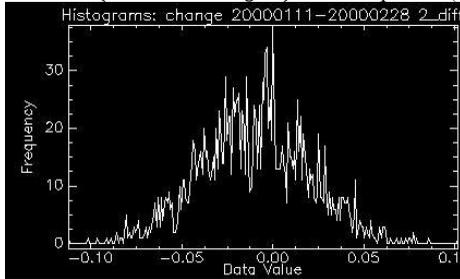
Pode ser observado na figura 16 que pontos dispersos no interior dos limites da área de Mangue Monitorado (linha branca) assumiram valores inferiores à $(\overline{Amostra\ Mangue} - 3\sigma)$ nas áreas 1, 3 e 4. Esses pontos indicam pixels com variações negativas de NDVI superiores às variações da Amostra Mangue. Tais pontos seriam, em tese, áreas sujeitas aos exames de campo para a constatação contemporânea aos dados de eventual decréscimo do vigor vegetacional nessas áreas, assim como se tais alterações foram conseqüências do acidente na baía.

A existência de vários pontos destacados nas áreas 1, 3 e 4 é concordante com os resultados de monitoramento que indicaram terem essas áreas sido bastante atingidas pelo acidente. A existência de poucos pixels demarcados na região da APA Guapi-Mirim (área 5) é concordante com resultados posteriores de monitoramentos que indicaram não ter sido esta área fortemente impactada pelo acidente.

Seção 6.3.2. Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens com correção atmosférica

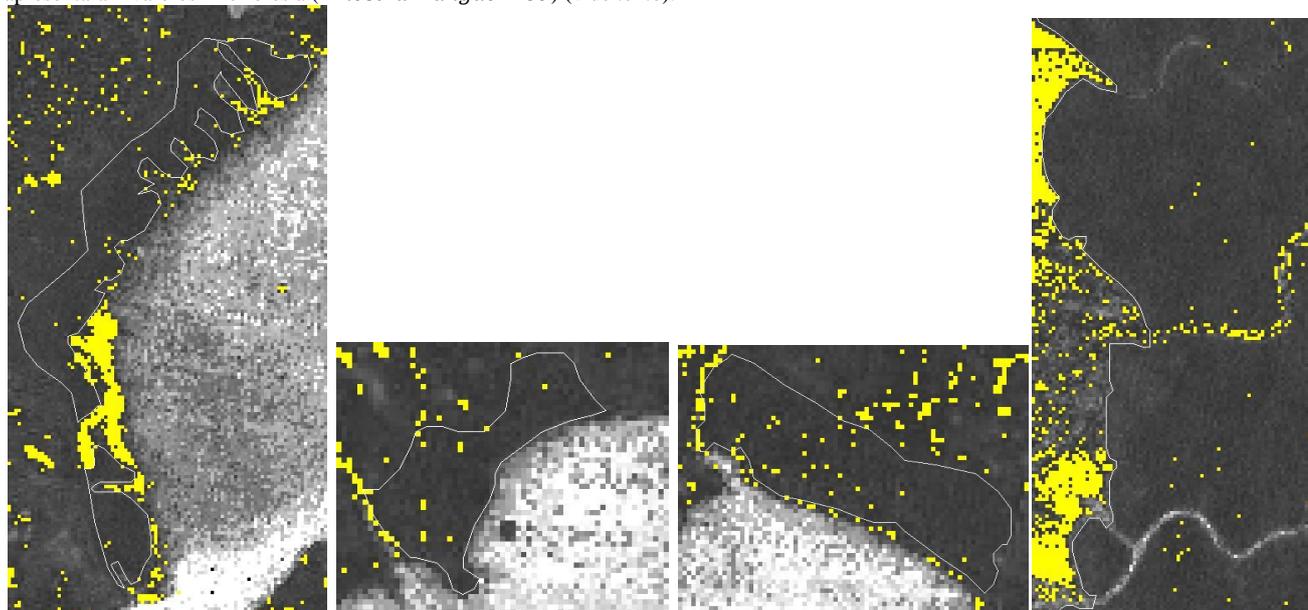
A figura 17 apresenta o histograma de valores da Amostra Mangue em imagem $\neq\text{NDVIS}_{28/02/2000-11/01/2000}$.

Figura 17. Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem $\neq\text{NDVIS}_{28/02/2000-11/01/2000}$ com média aritmética (*Amostra Mangue*) e desvio-padrão (σ) de $-0,009 \pm 0,029$.



A figura 18 apresenta quatro diferentes áreas do Mangue Monitorado em imagens $\neq\text{NDVIS}_{28/02/2000-11/01/2000}$. Os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética da Amostra Mangue subtraída de 3 desvios-padrão (*Amostra Mangue* $- 3\sigma$) foram destacados em amarelo.

Figura 18. Diferentes áreas do Mangue Monitorado (delimitadas pela linha branca) em imagens $\#NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000}$. Em amarelo, pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* - 3σ) (vide texto).



1) Mangue Sul REDUC

3) Mangue Suruí-Nova Orleans

4) Mangue Piedade

5) Mangue APA Guapi-Mirim

Os resultados apresentados na figura 18 são qualitativamente muito similares aos produzidos com imagens sem correção atmosférica, apresentados na figura 16.

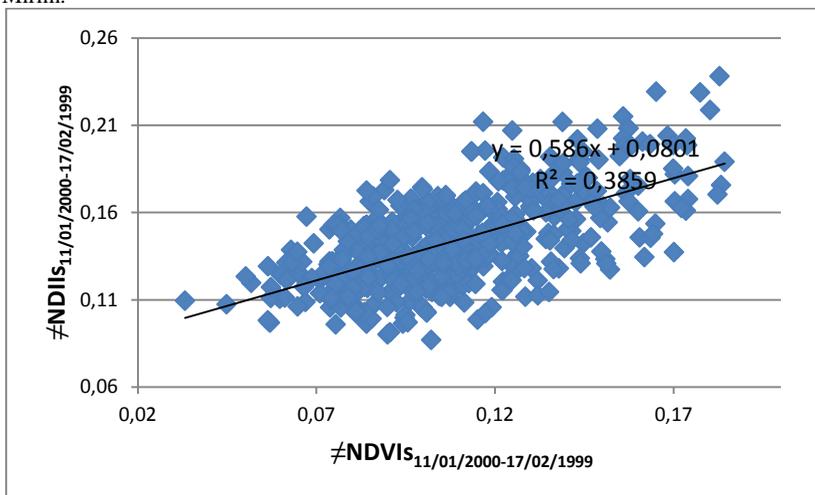
Os dados ilustram que mesmo com a diferença espectral entre as imagens sem e com correção atmosférica, os resultados gerados pela metodologia apresentam alta correlação, sugerindo que as correções atmosféricas não são indispensáveis para a aplicação do método.

Seção 6.3.3. Correlação entre dados NDVI e NDII

Com o objetivo de identificar variações espectrais relacionáveis com os efeitos do acidente nas áreas de Mangue Monitorado da baía, foi realizado o cálculo de NDII no Mangue Monitorado, seguindo metodologia análoga ao cálculo do NDVI (vide Materiais e Métodos).

A figura 19 ilustra a correlação entre os valores (sem correção atmosférica) de $\#NDVIs_{11/01/2000-17/02/1999}$ e $\#NDIIs_{11/01/2000-17/02/1999}$ em área de 564 pixels da Amostra Mangue dentro da APA Guapi-Mirim de datas anteriores ao acidente de 18/01/2000. Ressalta-se que as imagens $\#NDVIs$ e $\#NDIIs$ foram geradas por imagens anteriores ao acidente.

Figura 19. Gráfico obtido com os valores de $\#NDVIs_{11/01/2000-17/02/1999}$ e $\#NDIIs_{11/01/2000-17/02/1999}$ de área de 564 pixels (50,76 ha) da Amostra Mangue dentro da APA Guapi-Mirim.

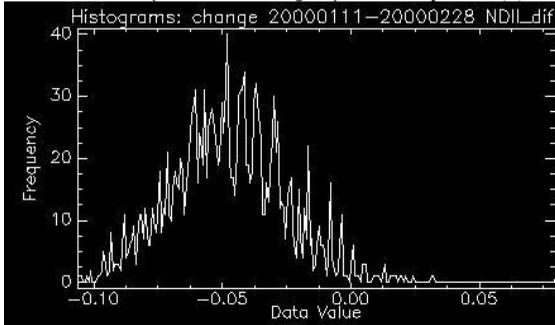


A figura 19 apresenta implicitamente a variação natural nas reflectâncias das bandas 3, 4 e 5 do Landsat 5 e 7 nessa área de mangue e ilustra como, embora seja possível observar uma correlação entre os valores médios de $\#NDVIs$ e $\#NDIIs$, áreas (pixels) com mesmos valores de $\#NDVIs$ podem assumir valores bastante diferentes de $\#NDIIs$, assim como áreas (pixels) com valores idênticos de $\#NDIIs$ podem apresentar grande amplitude nos valores de $\#NDVIs$.

Este modelo de correlação não unívoca habilita a exploração dos dados de $\#NDIIs$ de modo análogo aos dados de $\#NDVIs$, ou seja, o cálculo do histograma de distribuição dos dados de $\#NDIIs$ na Amostra Mangue e utilização dos limites definidos nesse histograma (média aritmética e desvio-padrão) na detecção de áreas (pixels) no Mangue Monitorado que apresentem valores representativamente inferiores (média aritmética subtraída de 3 desvios-padrão) à variação natural de $\#NDIIs$ na vegetação de mangue.

A figura 20 apresenta o histograma de valores da Amostra Mangue em imagens \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000}

Figura 20. Histograma de valores da Amostra Mangue em imagem \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000} com média aritmética (*Amostra Mangue*) e desvio-padrão (σ) de $-0,047 \pm 0,022$.



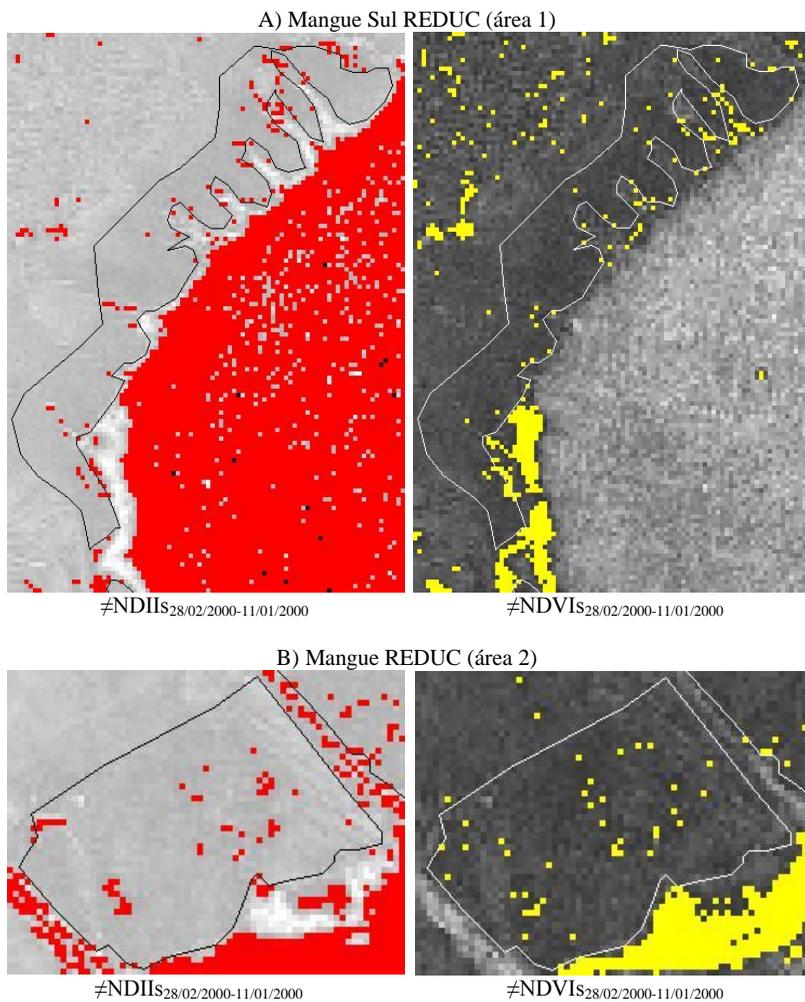
A figura 20 apresenta os valores assumidos por todos os pixels da Amostra Mangue na imagem \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000}. De maneira análoga à determinação de pixels com variações negativas extraordinárias de NDVI entre as diferentes datas, a determinação de pixels com variações negativas extraordinárias de NDII entre as diferentes datas foi realizada tendo como limites definidos a média aritmética dos valores de NDII da Amostra Mangue e seu respectivo desvio-padrão.

Assumindo que em uma distribuição normal 99,7% dos resultados encontram-se em até 3 desvios-padrão da média da distribuição, foi definido nesta metodologia que os valores inferiores ao valor de 3 desvios-padrão da média dos valores de NDII da Amostra Mangue seriam considerados variações negativas extraordinárias de NDII.

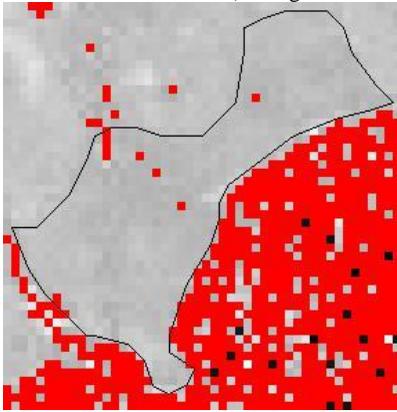
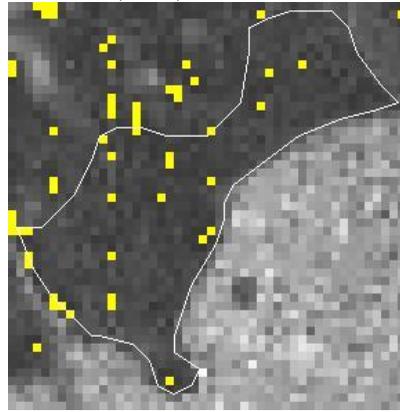
A figura 20 apresentou a distribuição dos valores de NDII da Amostra Mangue, sua média ($-0,047$) e seu desvio-padrão ($\pm 0,022$) calculado. Logo, foram considerados como variações negativas extraordinárias de NDII os pixels cujos valores foram iguais ou inferiores à $-0,113$ na imagem \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000}.

A figura 21 apresenta uma comparação de áreas do Mangue Monitorado contendo pixels com variações negativas extraordinárias de NDII (*Amostra Mangue* -3σ) em imagem \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000 e as mesmas áreas contendo pixels com variações negativas extraordinárias de NDVI (*Amostra Mangue* -3σ) em imagem \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000}, já apresentadas na seção 3.3.1.}

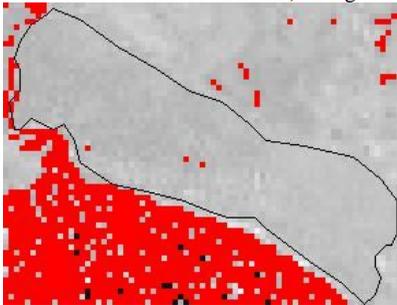
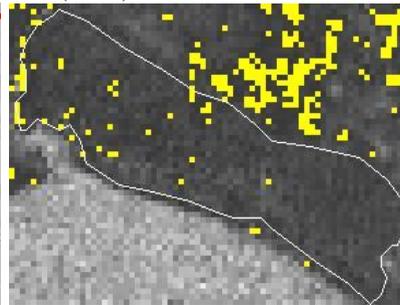
Figura 21. Áreas do Mangue Monitorado em imagens \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000 e \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000: A) Mangue Sul REDUC (área 1); B) Mangue REDUC (área 2); C) Mangue Suruí-Nova Orleans (área 3); D) Mangue Piedade (área 4) e; E) Mangue Sul APA Guapi-Mirim (área 6). Pixels com valores inferiores à ($\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\sigma$) nas imagens \neq NDIIS_{28/02/2000-11/01/2000 e \neq NDVIS_{28/02/2000-11/01/2000 foram evidenciados respectivamente em vermelho e em amarelo.}}}}



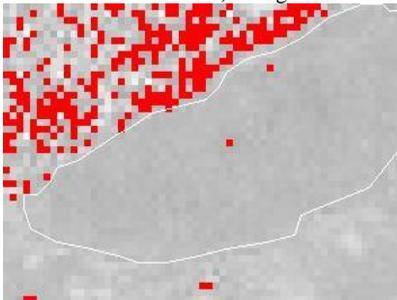
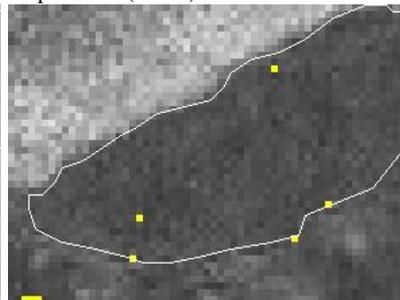
C) Mangue Suruí-Nova Orleans (área 3)


 $\neq \text{NDII}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

 $\neq \text{NDVI}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

D) Mangue Piedade (área 4)


 $\neq \text{NDII}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

 $\neq \text{NDVI}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

E) Mangue Sul APA Guapi-Mirim (área 6)


 $\neq \text{NDII}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

 $\neq \text{NDVI}_{s_{28/02/2000-11/01/2000}}$

A figura 21 apresenta comparações entre imagens destacando pixels com variações negativas extraordinárias de NDII (imagens à esquerda, com pixels destacados em vermelho) e pixels com variações negativas extraordinárias de NDVI (imagens à direita, com pixels destacados em amarelo – imagens já apresentadas na seção 6.3.1).

A figura 21 ilustra que, embora muitos dos pixels destacados nas imagens \neq NDIIs sejam geograficamente os mesmos pixels destacados nas imagens \neq NDVIs, foram muitos os pixels destacados somente nas imagens \neq NDIIs ou nas imagens \neq NDVIs.

Tendo em vista os resultados apresentados na figura 19, demonstrando poder haver uma variação de NDII sem a correspondente variação de NDVI e, sendo o NDII um índice marcador de estresse vegetacional, a figura 21 sugere que as áreas delimitadas via NDII também sejam consideradas como indicadoras de possíveis impactos causados pelo acidente.

6.4. EXPLOSÃO DO NAVIO VICUÑA NA BAÍA DE PARANAGUÁ EM 15/11/2004

A explosão, em 15 de novembro de 2004, do navio tanque chileno Vicuña de oito mil toneladas, no Porto de Paranaguá, provocou o maior vazamento de óleo dos últimos 20 anos no Complexo Estuarino de Paranaguá, e causou a morte de quatro tripulantes do navio. Em poucas horas, a embarcação foi a pique. Nos dias seguintes cerca de quatro milhões de litros de óleo bunker cobriram boa parte das baías e praias dos municípios de Antonina, Paranaguá, Guaraqueçaba e Pontal do Paraná. A pesca na região ficou interdita por quase dois meses, prejudicando milhares de famílias. Resquícios do óleo foram encontrados a 30 quilômetros do local do acidente (NOERNBERG, M.A., 2008).

A Tabela 5 apresenta as imagens orbitais utilizadas nas análises desta seção.

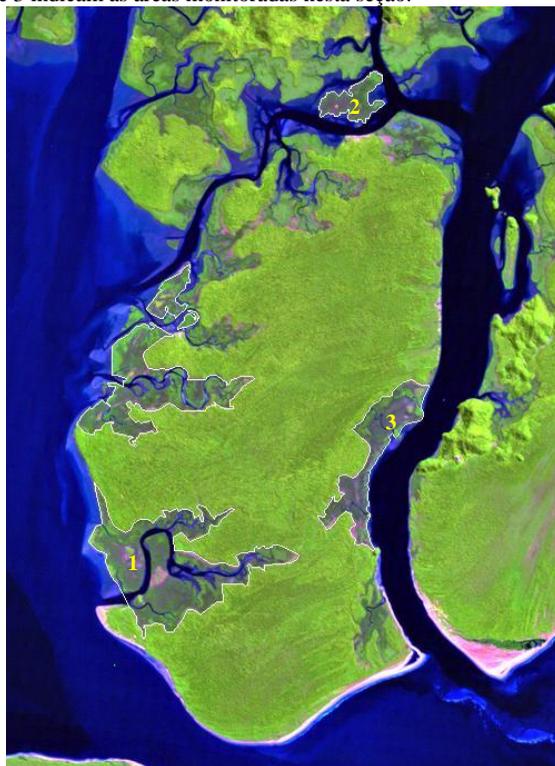
Tabela 5. Imagens orbitais da baía de Paranaguá/PR, onde ocorreu o acidente em 15/11/2004.

<i>Data</i>	<i>Satélite/Sensor</i>	<i>Órbita</i>	<i>Ponto</i>
30/08/2004	Landsat 5 / TM	220	78
15/09/2004	Landsat 5 / TM	220	78
04/12/2004	Landsat 5 / TM	220	78
30/06/2005	Landsat 5 / TM	220	78

A partir de informações apresentadas na carta Guaraqueçaba do IBGE e de imagens alta resolução espacial disponibilizadas no Google Earth foram delimitadas áreas de mangue na Ilha das Peças, na baía de Paranaguá, doravante denominadas Mangue Monitorado.

A Ilha das Peças foi escolhida neste estudo por ter sido uma das áreas mais sujeitas aos impactos do óleo em modelamento matemático contemporâneo ao acidente (CENACID, 2004) e por grande parte dela se encontrar dentro dos limites do Parque Nacional do Superagui (PARNA do Superagui). As áreas de Mangue Monitorado são apresentadas na figura 22.

Figura 22. Ilha das Peças e seu entorno próximo em imagem de composição RGB (543) do Landsat 5 datada de 30/08/2004. As áreas de mangue monitoradas, doravante denominadas Mangue Monitorado, encontram-se delimitadas pela linha branca. Os números 1, 2 e 3 indicam as áreas monitoradas nesta seção.



As áreas 1, 2 e 3 do Mangue Monitorado, apresentadas na figura 22, encontram-se respectivamente parcialmente dentro (área 1), fora (área 2) e dentro (área 3) do PARNA do Superagui (limites disponibilizados em <http://www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros/marinho/unidades-de-conservacao-marinho/2263-parna-do-superagui> e acessado em outubro de 2013).

Diversos fatores naturais podem alterar a reflectância de áreas vegetadas monitoradas por sensores orbitais, como períodos estacionais, fenologia da vegetação, índices pluviométricos, além de fatores artificiais como poluição e/ou supressão de vegetação nessas áreas.

Com o objetivo de acompanhar a variação natural da reflectância entre as diferentes datas dos sinais de NDVI da vegetação de mangue da baía, 20 áreas representando a vegetação de mangue foram delimitadas na Ilha das Peças. Essas 20 áreas de mangue foram delimitadas a partir de informações constantes na carta

Guaraqueçaba do IBGE e de imagens de alta resolução espacial disponibilizadas no Google Earth.

Um padrão de reflectância do mangue da baía foi construído a partir da reflectância média das 20 áreas de mangue delimitadas acima mencionadas. Estas 20 áreas foram analisadas em conjunto, sendo doravante denominadas Amostra Mangue e apresentadas na figura 23.

Figura 23. Ilha das Peças em imagem de composição RGB (543) do Landsat 5 datada de 30/08/2004. As elipses brancas indicam as áreas de vegetação de mangue amostradas, que analisadas em conjunto são doravante denominadas Amostra Mangue (vide texto).



Figura 24. Detalhes de algumas das áreas apresentadas na figura 23.



A variação natural da reflectância do mangue da baía foi inferida através do histograma dos valores assumidos pela Amostra Mangue nas imagens \neq NDVIs. Valores médios positivos nesses histogramas indicam um aumento no sinal atribuído à vegetação, interpretado como um aumento no vigor da vegetação, enquanto valores médios negativos são interpretados como um decréscimo no vigor da vegetação amostrada.

As variações observadas nos histogramas da Amostra Mangue definiram os limites para o monitoramento das áreas de Mangue Monitorado apresentadas na figura 22.

Com o intuito de identificar áreas que sofreram um decréscimo no vigor da vegetação devido a efeitos do derramamento de óleo na baía, foram evidenciadas nas imagens \neq NDVIs somente os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética do histograma da Amostra Mangue subtraída de 3 vezes o desvio-padrão calculado ($\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\sigma$). Espera-se desta forma delimitar pixels que sofreram variações extraordinárias nos sinais de NDVI, adicionais às variações consideradas naturais visualizadas no histograma da Amostra Mangue.

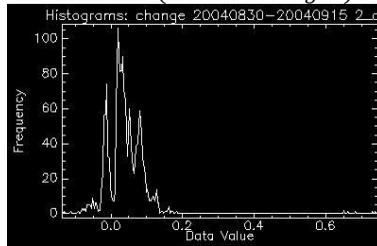
As variações de NDVI das áreas de Mangue Monitorado foram calculadas com as imagens orbitais corrigidas dos efeitos atmosféricos através do módulo FLAASH.

As seções 6.4.1 e 6.4.2 apresentam os resultados da variação de NDVI em três regiões do Mangue Monitorado, indicando possíveis áreas impactadas pelo derramamento e posterior recuperação dessas áreas.

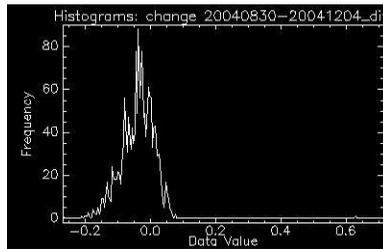
Seção 6.4.1. Variação dos sinais de NDVI no Mangue Monitorado a partir de imagens com correção atmosférica

A figura 25 apresenta os histogramas de valores da Amostra Mangue em imagens \neq NDVIs.

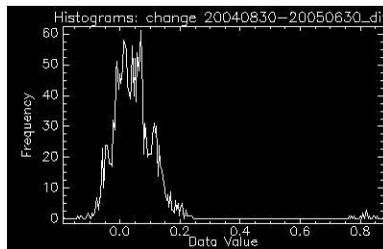
Figura 25. Histogramas de valores da Amostra Mangue nas diferentes imagens \neq NDVIs com suas respectivas médias aritméticas (*Amostra Mangue*) e desvios-padrão (σ).



\neq NDVIs_{15/09/2004-30/08/2004}: $+0,040 \pm 0,058$



\neq NDVIs_{04/12/2004-30/08/2004}: $-0,036 \pm 0,053$

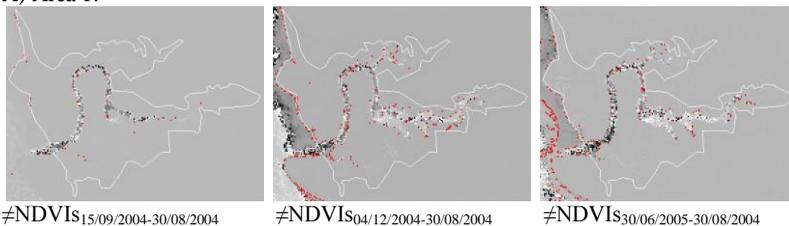


\neq NDVIs_{30/06/2005-30/08/2004}: $+0,051 \pm 0,096$

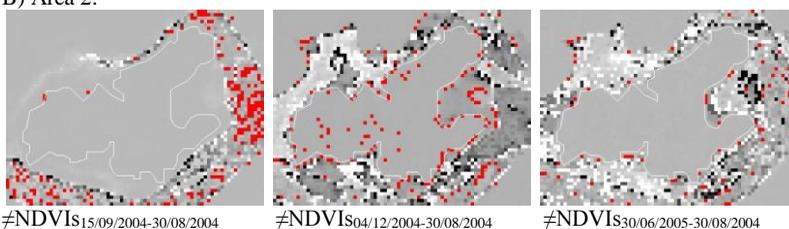
A figura 26 apresenta as áreas 1, 2 e 3 do Mangue Monitorado em imagens \neq NDVIs de diferentes datas, tendo sido evidenciados em vermelho os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética da Amostra Mangue subtraída de 3 desvios-padrão ($\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\sigma$).

Figura 26. Áreas 1 (A), 2 (B) e 3 (C) do Mangue Monitorado delimitadas pela linha branca. Em vermelho, pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* – 3δ) (vide texto).

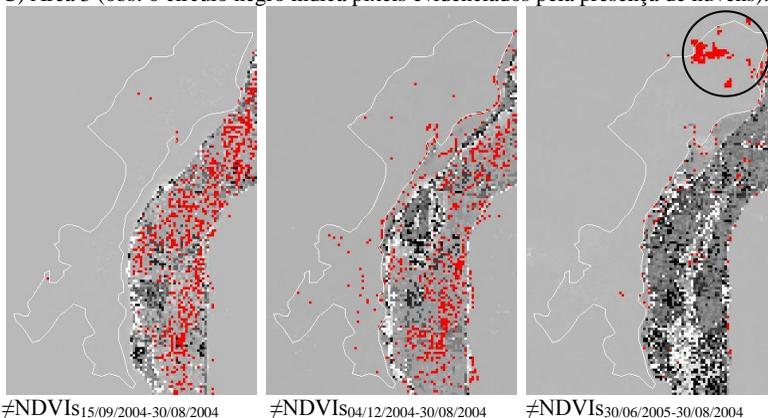
A) Área 1:



B) Área 2:



C) Área 3 (obs: o círculo negro indica pixels evidenciados pela presença de nuvens):



Pode ser observado na figura 26 que, nas imagens $\neq\text{NDVI}_{15/09/2004-30/08/2004}$ anteriores ao acidente, as áreas 1 e 3 apresentaram poucos pixels com valores inferiores à *Amostra Mangue* – 3δ , a maioria associada às linhas de drenagens do mangue (possível efeito de marés) e/ou contato entre floresta de terra seca e mangue (possível efeito de sombra), sendo que a área 2 não apresentou nenhum pixel com tal variação de sinal de NDVI entre essas datas.

Observações semelhantes podem ser aplicadas às imagens $\neq\text{NDVI}_{30/06/2005-30/08/2004}$: a comparação de sinais de NDVI das áreas 1 e 3 entre datas anterior e

bastante posterior não apresentou muitos pixels com valores inferiores à *Amostra Mangue* – 3δ , sendo que a área 2 não apresentou nenhum pixel com tal variação de sinal de NDVI entre essas datas.

Entretanto, a comparação de sinais de NDVI entre datas anterior e pouco posterior ao acidente, ilustradas nas imagens \neq NDVIs_{04/12/2004-30/08/2004}, demonstram que aumentaram em muito o número de pixels com valores inferiores à *Amostra Mangue* – 3δ , nas áreas 1, 3 e especialmente na área 2, que não havia apresentado tais pixels nas outras imagens \neq NDVIs.

Estes pixels com grande variação negativa do sinal de NDVI entre datas anterior e posterior ao acidente são compatíveis com áreas que sofreram eventuais decréscimos no vigor vegetacional do mangue em razão dos efeitos do derramamento de óleo e indicam possíveis áreas de impacto a serem confirmadas por exames de campo.

O padrão de variação dos sinais de NDVI entre datas anteriores ao acidente (não apresentando muitas áreas com grande variação negativa), entre datas anterior e pouco posterior ao acidente (apresentando muitas áreas de grande variação negativa) e entre datas anterior e bastante posterior ao acidente (não apresentando muitas áreas de grande variação negativa) sugere que áreas evidenciadas nas imagens \neq NDVIs_{04/12/2004-30/08/2004}, foram recuperadas e não são mais consideradas impactadas nas imagens \neq NDVIs_{30/06/2005-30/08/2004}.

Este possível padrão de recuperação de áreas que apresentaram grandes variações negativas nos sinais de NDVI é apresentado na Seção 3.4.2, sendo esperadas em tais áreas grandes variações positivas nos sinais de NDVI em datas posteriores.

Assim como explicitado na seção 3.3., é esperado que a presença de água sob a vegetação estuarina alagável possa interferir na reflectância total dessas áreas. A Tabela 6 apresenta uma aproximação da altura das marés na data e hora das imagens utilizadas nesta seção.

Tabela 6. Altura aproximada das marés no Porto Paranaguá na data e hora das imagens utilizadas na seção 6.4.

Data e hora da imagem (GMT -3h)	Tábua de Marés (Porto Paranaguá) (GMT -3h)		Maré assumida (aprox. linear)
30/08/2004 09:54h	09:09h	-0,2m	Baixa (0,02m)
	16:13h	+1,9m	
15/09/2004 09:55h	09:11h	-0,2m	Baixa (0,00m)
	17:06h	+2,0m	
04/12/2004 09:56h	09:38h	+1,4m	Alta (1,35m)
	13:08h	+0,8m	
30/06/2005 09:58h	08:21h	+0,5m	Alta (0,99m)
	11:58h	+1,6m	

Tabua de marés disponibilizada pelo Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) acessado pelo site <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/tabuas/>

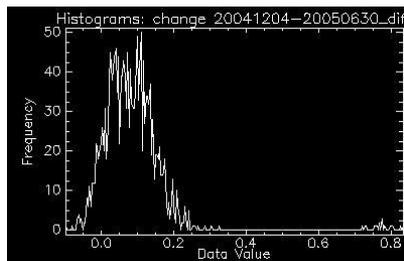
A Tabela 6 ilustra a grande diferença na altura das marés na baía de Paranaguá nas imagens de diferentes datas.

Um grande número de pixels com variações negativas extraordinárias de NDVI (valores inferiores à $\overline{\text{Amostra Mangue}} - 3\delta$) foi observado na imagem $\neq\text{NDVI}_{04/12/2004-30/08/2004}$, o que poderia ser atribuído à grande diferença entre as marés de 30/08/2004 e 04/12/2004. A ausência dessas observações na imagem $\neq\text{NDVI}_{30/06/2005-30/08/2004}$, datas que apresentam também grande variação na altura das marés e mesmo a observação de um grande número de pixels com variações positivas extraordinárias de NDVI (valores superiores à $\overline{\text{Amostra Mangue}} + 3\delta$) na imagem $\neq\text{NDVI}_{30/06/2005-04/12/2004}$, datas que apresentam pouca variação na altura das marés (dados que serão apresentados na seção 6.4.2), permitem minimizar os possíveis efeitos das marés na variação do NDVI do Mangue Monitorado.

Seção 6.4.2. Monitoramento da Recuperação da área impactada

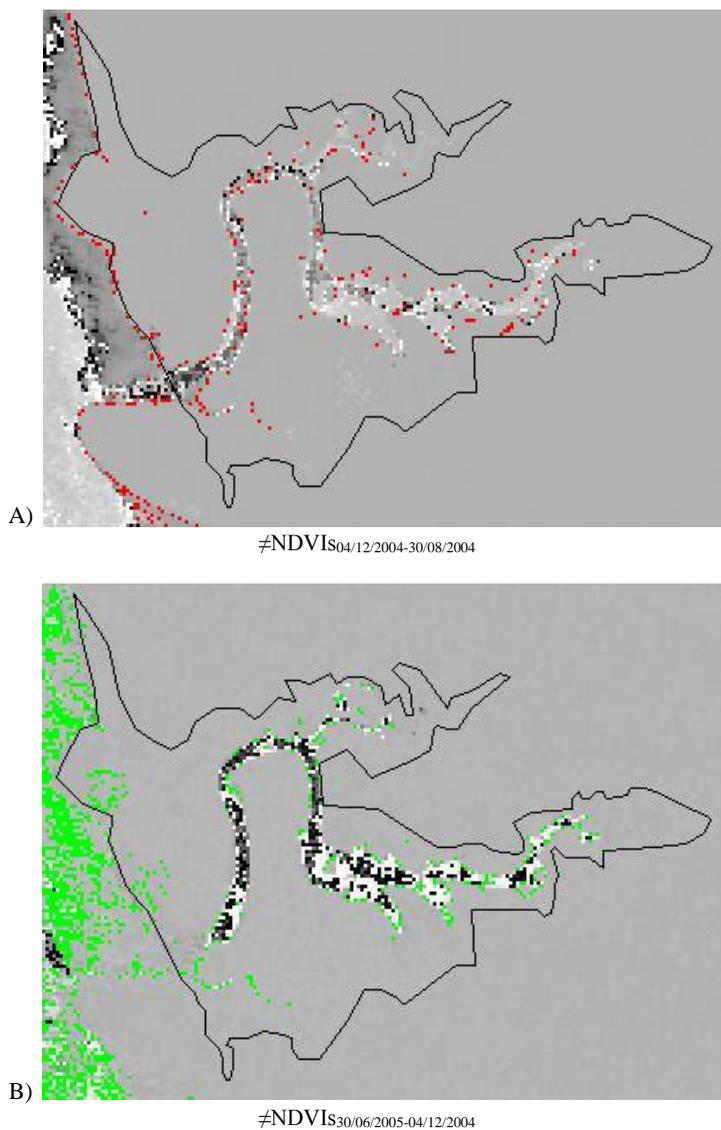
No monitoramento da recuperação de áreas impactadas foram utilizadas as imagens $\neq\text{NDVIS}_{04/12/2004-30/08/2004}$ e $\neq\text{NDVIS}_{30/06/2005-04/12/2004}$. Da mesma forma como conduzida a metodologia de observação do impacto, foi calculada uma média aritmética e seu respectivo desvio-padrão dos valores assumidos pela Amostra Manguê na imagem $\neq\text{NDVIS}_{30/06/2005-04/12/2004}$, apresentados no histograma da figura 27.

Figura 27. Histograma de valores da Amostra Manguê na imagem $\neq\text{NDVIS}_{30/06/2005-04/12/2004}$ com média aritmética (*Amostra Manguê*) e desvio-padrão (σ) de $+0,085 \pm 0,090$.



A figura 28 apresenta a região 1 da Ilha das Peças em imagens $\neq\text{NDVIS}$. Na imagem $\neq\text{NDVIS}_{04/12/2004-30/08/2004}$ foram evidenciados em vermelho os pixels que apresentaram valores inferiores à média aritmética da Amostra Manguê subtraída de 3 desvios-padrão ($\text{Amostra Manguê} - 3\sigma$). Na imagem $\neq\text{NDVIS}_{30/06/2005-04/12/2004}$ foram evidenciados os pixels que apresentaram valores superiores à média aritmética da Amostra Manguê somada de 3 desvios-padrão ($\text{Amostra Manguê} + 3\sigma$).

Figura 28. Delimitação da área 1 do Mangue Monitorado (linha negra) em imagens \neq NDVIs. A) Destaque em vermelho de pixels que apresentaram valores inferiores à (*Amostra Mangue* $- 3\sigma$) em imagem \neq NDVIs_{04/12/2004-30/08/2004}. B) Destaque em verde de pixels que apresentaram valores superiores à (*Amostra Mangue* $+ 3\sigma$) em imagem \neq NDVIs_{30/06/2005-04/12/2004} (vide texto).



A figura 28 ilustra como muitos pixels que apresentaram um decréscimo extraordinário de NDVI entre ago/2004 e dez/2004 apresentaram também um acréscimo extraordinário ($\overline{\text{Amostra Mangue}} + 3\sigma$) de NDVI entre dez/2004 e jun/2005. Esta variação de sinais extraordinários na mesma área geográfica é compatível com processos de recuperação de vegetação em áreas impactadas, habilitando em tese, a utilização da metodologia aqui desenvolvida para o monitoramento de processos de recuperação de áreas impactadas.

Deve ser enfatizado que a recuperação inferida pelos sinais de recuperação de NDVI da figura 28B é uma recuperação do sinal de vegetação e não necessariamente a recuperação da vegetação afetada (por exemplo, com as áreas impactadas se tornando mais vulneráveis à recolonização por espécies invasoras). Nesta metodologia, o sinal de NDVI recuperado sugere um aumento do vigor da vegetação em áreas que apresentaram um decréscimo anterior, sendo que tal aumento do vigor da vegetação pode ser obtido por rebrota, crescimento da espécie atacada, recuperação da espécie atacada, recolonização da área por outras espécies, aumento da proporção de espécies invasoras adaptadas, entre outras.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta processamento digital utilizando imagens orbitais amplamente aceitas na comunidade científica, assim como índices de estresse vegetacional já estabelecidos na literatura de sensoriamento remoto. A metodologia utilizada neste trabalho identificou alterações nos índices vegetacionais de áreas de abrangência de acidentes ambientais e visou auxiliar no direcionamento dos exames de campo exigidos após a ocorrência de eventos deste porte, exames em geral de tempo e custo elevados.

Os resultados apresentados sugerem que as áreas onde ocorreram alterações espectrais vegetacionais sejam alvo de exames de campo, de modo a confirmar as causas dessas alterações assim como correlacionar se são contemporâneas ao acidente.

A demarcação das alterações espectrais vegetacionais podem priorizar as áreas a serem examinadas em campo imediatamente após o acidente, em razão do processamento poder ser realizado assim que forem disponibilizadas imagens posteriores ao acidente.

O monitoramento por imagens orbitais da área de abrangência do acidente pode indicar alterações espectrais vegetacionais relacionadas com o acidente, que se confirmadas em exames de campo, ampliarão a área de impacto inicialmente delimitada, com efeitos diretos na avaliação do dano e seus trabalhos de recuperação.

O monitoramento por imagens orbitais da área de abrangência do acidente pode indicar a eficiência dos processos de recuperação das áreas impactadas.

A metodologia descrita neste trabalho é factível de ser processada em um grande número de unidades de criminalística da Polícia Federal e é baseada em imagens orbitais distribuídas gratuitamente.

A utilização de imagens orbitais com melhores resoluções espaciais e/ou espectrais nesta metodologia ampliará as possibilidades analíticas aqui discutidas.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, T., TIAN, L., ZHANG, Y. e TING, K.C., **A review of remote sensing methods for biomass feedstock production**, Biomass and Bioenergy, 35, 2455-2469, 2011.
- ARAÚJO, D. S. D e MACIEL, N. C., **Os manguezais do recôncavo da Baía da Guanabara**. Rio de Janeiro. DECAM-FEEMA, 113p, 1979.
- CENACID – Centro de Apoio Científico em Desastres – UFPR, acessado pelo sítio <http://www.cenacid.ufpr.br/vicunha1000/>.
- EMENGINI, E.J., BLACKBURN, G.A. e THEOBALD, J.C., **Detection and discrimination of stress in bean (*Phaseolus vulgaris* ‘tendergreen’) caused by oil pollution and waterlogging using spectral and thermal remote sensing**, Art, Science and Applications of Reflectance Spectroscopy Symposium sponsored by ASD Inc. and IEEE GRSS, Boulder, Colorado, 23-25th February, 2010.
- Farias, C.O., **Avaliação da degradação de óleo em sedimentos de manguezal: Estudo de caso, Baía de Guanabara, RJ**, Tese de Doutorado, PUC-RJ, 2006.
- GESTÃO MINERAL EM DESTAQUE, Boletim Informativo do Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia, 3, 22, 2007.
- GETTER, C.D., BALLOU, T.G., e KOONS, C.B., **Effects of Dispersed Oil on Mangroves Synthesis of a Seven-Year Study**, Marine Pollution Bulletin, 16, 318-324, 1985.
- GONÇALVES, J.C., **O gerenciamento das estratégias de comunicação em crises empresariais. Um estudo de caso em uma empresa de mineração em Minas Gerais**, dissertação de Mestrado, PUC-MG, 2005.
- HARDISKY, M.A., KLEMAS, V., e SMART, R.M., **The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 49,77- 83, 1983.
- LARCHER, M.A., **A responsabilidade civil decorrente de acidentes ambientais deflagrados por eventos da natureza – o caso do rompimento da barragem de rejeitos em Miraf**, obtido na Biblioteca Virtual do Ministério Público do Estado de Minas Gerais (<https://aplicacao.mp.mg.gov.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1088/8%20R%20MJ%20Responsabilidade%20civil%20-%20marta.pdf?sequence=1>).
- LI, L., USTIN, S.L. e LAY, M., **Application of AVIRIS data in detection of oil-induced vegetation stress and cover change at Jornada, New Mexico**, Remote Sensing of Environment, v. 94, p. 1-16, 2005.

LICHTENTHALER, H.K., **Vegetation Stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants**, Journal of Plant Physiology, 148, 4-14, 1996.

MICHEL, J., **Assessment and recommendations for the oil spill cleanup of Guanabara Bay, Brazil**, *Spill Science & Technology Bulletin*, 6, 89-96, 2000.

MMA/CONAMA, **Relatório sobre o impacto ambiental causado pelo derramamento de óleo na Baía de Guanabara**, Brasília, 2001

NOERNBERG, M.A., ANGELOTTI, R., CALDEIRA, G.A., e RIBEIRO DE SOUSA, A.F., **Determinação da sensibilidade do litoral paranaense à contaminação por óleo**, *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 12,49-59, 2008,

PLANO DE MANEJO DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE GUAPI-MIRIM, MMA/IBAMA, acessado pelo sítio do ICMBIO (http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidades-coservacao/apa_guapi_mirim.pdf).

PONZONI, F.J. e SHIMABUKURO, Y.E., **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**, São José dos Campos: Parêntese, 127p, 2010.

RODRIGUES, F.O., MOURA, D.O. e LAMPARELLI, C.C., **Efeitos do óleo nas folhas do mangue**, *Ambiente*, v. 3, n. 1, p. 36-45, 1989.

SOUZA FILHO, C.R., AUGUSTO, V., OLIVEIRA, W.J. e LAMMOGLIA, T., **Deteção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no Remanso do Fogo (MG)**, *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, p. 228-243, 2008.

TEAS, H.J., DUERR, E.O., e WILCOX, J.R., **Effects of South Louisiana Crude Oil and Dispersants on Rhizophora Mangroves**, *Marine Pollution Bulletin*, 18, pp. 122-124, 1987.

TERZIAN, R.L., **Conceitos e metodologias de gestão de projeto e sua aplicação ao caso da integridade da malha dutoviária**, Dissertação de Mestrado, PUC-RJ, 2005.

VAN DER WERFF, H., VAN DER MEIJDE, M., JANSMA, F., VAN DER MEER, F. e GROOTHUIS, G.J., **A spatial-spectral approach for visualization of vegetation stress resulting from pipeline leakage**, *Sensors*, v. 8, p. 3733-3743, 2008.