



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Kelly Ferreira Esch

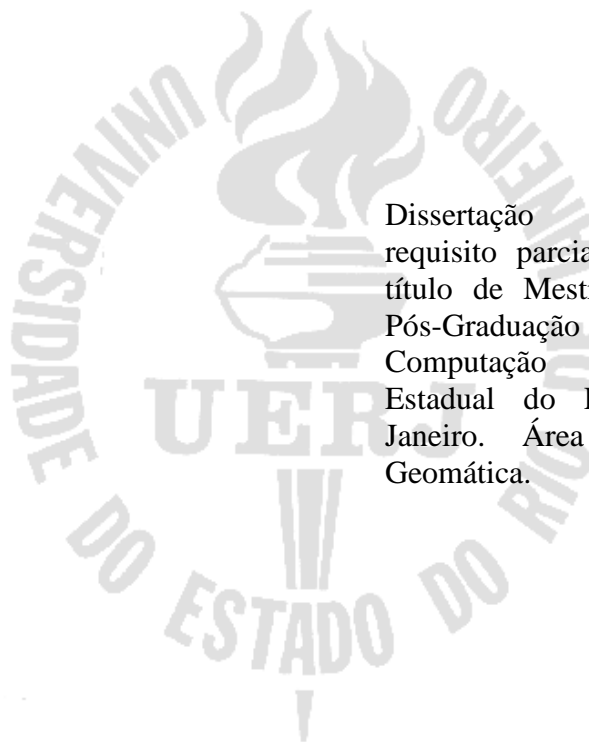
**Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos
por sensoriamento remoto: um estudo de caso
na foz do rio Paraíba do Sul**

Rio de Janeiro

2010

Kelly Ferreira Esch

**Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos
por sensoriamento remoto: um estudo de caso
na foz do rio Paraíba do Sul**



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação da Universidade Estadual do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geomática.

Orientador: Profº. Dr. Marcelo Sperle Dias

Co-Orientador: Profº. Dr. Mauro Antonio Homem Antunes

Rio de Janeiro

2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/CTCB

E74 Esch, Kelly Ferreira

Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos por sensoriamento remoto: um estudo de caso na foz do rio Paraíba do Sul./ Kelly Ferreira Esch. – 2010.

170f

Orientador : Marcelo Sperle Dias

Co-orientador: Mauro Antonio Homem Antunes

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1.Geologia de engenharia. 2.Sedimento em suspensão. I.Dias, Marcelo Sperle. II. Antunes, Mauro Antonio Homem. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.131.1

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Kelly Ferreira Esch

**Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos
por sensoriamento remoto: um estudo de caso
na foz do rio Paraíba do Sul**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação da Universidade Estadual do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Geomática.

Aprovado em _____

Banca Examinadora:

Prof^o. Dr. Marcelo Sperle Dias (Orientador)
Faculdade de Engenharia da UERJ

Prof^o. Dr. Mauro Antonio Homem Antunes (Co-orientador)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Dr^a. Cristina Maria Bentz
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Prof^a. Dr^a. Margareth Simões Penello Meirelles
Faculdade de Engenharia da UERJ

Dr. Angelo Sartori Neto
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Rio de Janeiro

2010

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Nilton e Regina, pelo amor, dedicação e renúncia, que me proporcionaram todas as oportunidades.

AGRADECIMENTOS

À UERJ, ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia da Computação – Área de Concentração Geomática, e à PETROBRAS, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Ao INPE, pela disponibilização de imagens de satélite e qualidade do atendimento.

Ao professor Marcelo Sperle, pela orientação e compreensão ao longo do trabalho.

Ao professor Mauro Antunes, com quem tanto aprendi neste período. Agradeço por compartilhar os seus conhecimentos comigo, tornando-os acessíveis ao meu entendimento, pela sua disponibilidade e atenção sempre que necessário; enfim, agradeço por ter feito parte desta pesquisa.

Ao Angelo, que acompanha este projeto desde o início, são tantas as razões que certamente minhas palavras não saberiam expressar tamanho reconhecimento e gratidão.

Ao professor Lorenzzetti, pelas sugestões e conversas tão esclarecedoras.

Ao Vinicius, por todo apoio na edição das figuras da fundamentação teórica, e à Fernanda e ao André, pelo apoio na elaboração do *abstract*.

À minha mãe, por acreditar e incentivar ideais e possibilidades diferentes daqueles existentes à sua volta.

Ao meu pai, pela responsabilidade e dedicação que propiciaram a estrutura fundamental para as nossas conquistas, as quais, portanto, são também dele.

A minha querida irmã, por ser tão especial e, não apenas por ter nascido primeiro, ter ido à frente abrindo os caminhos e me ensinado muitas coisas.

À Carina, pela companhia incondicional e pelos risos, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos Alexandre, Raquel, Gleice, Renata, Olívia e Gil, pelas demonstrações de carinho e pelas palavras de ânimo.

À minha família, parentes e amigos – inclusive à família paulista – a todos os que compreenderam as freqüentes ausências, esquecimentos e dificuldades, os quais não tinham outro significado senão a dedicação a este projeto de pesquisa, que se tornou a minha primeira companhia nos últimos anos.

Ao Marco Scultz, pelo suporte no momento de dúvida mais difícil desta empreitada, e a Bianca Cirilo, por acompanhar e contribuir ao longo deste caminho.

Ao grupo de Oceanografia do CENPES – Renato, Guisela, Luis Manoel, Guerra, Eric, Zé, Anderson, André, Wellington, Eduardo, Luiz Cláudio, Andrioni, Léo, Paula, Marcelo – pelas demonstrações de interesse, pelo carinho e compreensão.

Ao Xan, é impossível listar todos os motivos, mas citarei alguns... Agradeço por acreditar neste projeto e me transmitir tanta confiança, desde o início; por compartilhar seus conhecimentos comigo e materializar minhas idéias, sem isso esta dissertação não seria esta dissertação; pelas idéias que eu não tive, mas ele teve, principalmente nas formas de analisar os resultados; pelo suporte a qualquer momento; pelo apoio, carinho, incentivo e imensa dedicação, que tornaram os momentos difíceis menos desesperadores; por compreender e aceitar a fase de dedicação praticamente exclusiva a este projeto.

Um agradecimento especial a Deus e a todos os amigos que me inspiraram e fortaleceram nesta jornada.

Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos.

Fernando Pessoa

RESUMO

ESCH, Kelly Ferreira. *Caracterização espaço-temporal de plumas de sedimentos por sensoriamento remoto: um estudo de caso na foz do rio Paraíba do Sul*. 2010. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Sedimentos em suspensão representam um dos principais fatores que afetam a qualidade dos sistemas aquáticos no mundo; influenciam os processos geomórficos de construção da paisagem e podem indicar problemas de erosão e perda de solo na bacia hidrográfica contribuinte. O seu monitoramento espacial e temporal é fundamental nas atividades de gestão ambiental de áreas costeiras. Nesse sentido, a hipótese básica desta pesquisa é que o padrão espacial e temporal de plumas de sedimentos costeiras – associado ao regime hidrológico do rio – pode ser caracterizado a partir de imagens orbitais de média resolução espacial. Para comprová-la, elegeu-se a foz do rio Paraíba do Sul como área de estudo para definição e teste metodológico, e formulou-se como principal objetivo mapear qualitativamente a pluma costeira deste rio a partir de imagens Landsat 5 e CBERS-2, ao longo do período compreendido entre 1985 e 2007. As datas avaliadas foram criteriosamente definidas através de três estratégias de análise, totalizando cinquenta imagens. Pesquisa bibliográfica e avaliação da resposta espectral da feição de interesse nas imagens selecionadas consistiram nas etapas principais da definição da metodologia. As plumas foram então identificadas, mapeadas e extraídas; posteriormente, suas características espaciais e temporais foram analisadas por intermédio de sistemas de informação geográfica e avaliadas em conjunto com dados históricos de vazão. Os resultados indicam que a banda do vermelho forneceu uma melhor discriminação interna da pluma, sendo, portanto, utilizada como base para as análises realizadas neste trabalho. Com exceção do procedimento de correção atmosférica, a metodologia proposta consiste na utilização de técnicas simples de processamento digital de imagens, baseadas na integração de técnicas semi-automáticas e de análise visual. A avaliação do padrão dos sedimentos e dos mapas temáticos qualitativos de concentração de sedimentos em suspensão indica a forte diferenciação existente entre cenários representativos de épocas de cheia e seca do rio. Análises espaciais do comportamento da pluma contribuem ainda para um maior conhecimento do espaço geográfico, fornecendo subsídios aos mais variados setores do planejamento e gestão ambiental.

Palavras-chave: Sedimentos em suspensão. Plumais de sedimentos. Sensoriamento Remoto. Sistemas de informação geográfica.

ABSTRACT

Suspended sediments are a major factor affecting water quality in aquatic ecosystems of the world; they do influence the geomorphological processes of environmental formation and may indicate erosion problems and loss of ground on the contributing watershed. Its spatial and temporal monitoring is fundamental in the activities of the environmental management of the coastal areas. In that direction, the basic hypothesis of this research is that the spatial and temporal pattern of coastal plumes of sediments – associated to the hydrological regime of the river – may be characterized from orbital images of medium spatial resolution. To prove this, it was elected the mouth of Paraíba do Sul river as study area for defining and testing the methodology, which was formulated as principal purpose to map qualitatively the coastal plumes of this river from the images of Landsat 5 and CBERS-2, from the period between 1985 and 2007. The evaluated dates were defined with criteria through three strategies of analysis, totaling fifty images. Literature review and evaluation of the spectral response of the feature of interest consisted on the main steps of the definition of the methodology. The plumes were so identified, mapped and extracted; afterward, its spatial and temporal characteristics were analyzed by geographical information systems and evaluated together with historical data of river discharge. The results indicate that the red band yielded a better internal discrimination of the plume, being, therefore, used as basis to the analyses realized on this work. With exception of the procedure of atmospheric correction, the methodology proposal consists on the utilization of simple techniques of digital processing of images, based on the integration of semi-automatic and visual analyses techniques. The evaluation of the sediments pattern and qualitative thematic maps of suspended particulate matter indicates the strong differentiation existing between scenarios representing the periods of high and low waters of the river. Spatial analyses of the behavior of the plumes even contribute to a better knowledge of the geographical space, supplying subsidies to the most assorted sectors of environmental planning and management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espectro eletromagnético, com definição das suas regiões em função do comprimento de onda e frequência. Fonte: Florenzano (2002).....	30
Figura 2 – Absortividade atmosférica, em cinza, segundo os seus principais constituintes. Modificado de Grimm (1999).....	31
Figura 3 – Esquema hipotético da reflexão da energia eletromagnética pela superfície terrestre. Modificado de Vermote et al (1997 a).	33
Figura 4 – Curvas de irradiância solar no topo da atmosfera, ao nível do mar, e de um corpo negro, com indicação dos principais componentes responsáveis pela atenuação atmosférica. Fonte: Moraes (2005).....	34
Figura 5 – Contribuições da atmosfera à iluminação da superfície: esquema simplificado. (a) radiação difusa; (b) radiação ambiental. Modificado de Vermote et al (1997 a).....	35
Figura 6 – Contribuições da atmosfera ao sinal recebido pelo sensor: esquema simplificado. (a) componente atmosférica; (b) radiação difusa. Modificado de Vermote et al (1997 a).	36
Figura 7 – Esquema geral da interação da radiação com a atmosfera, no percurso sol – atmosfera – sensor, onde A significa absorção e E, espalhamento. As cores indicam diferentes processos: em amarelo, aqueles que retiram radiação do feixe que incidiria sobre a superfície; em verde, os que adicionam radiação ao fluxo incidente na superfície; em azul estão os que retiram radiação do fluxo refletido pela superfície em direção ao sensor. E3, em amarelo, E6, em verde e E5, em vermelho, adicionam radiação na direção do sensor. Modificado de Vermote et al (1997 a).	37
Figura 8 – Interação da radiação eletromagnética com a água. Fonte: Novo et al (1989 b). ...	51
Figura 9 – Espectro de absorção da água pura. Fonte: INPE (2001).	52
Figura 10 – Relacionamento entre os parâmetros de qualidade da água e as propriedades óticas. Fonte: Barbosa (2005).....	53
Figura 11 – Curvas dos coeficientes de absorção (a) e de espalhamento (b) da água pura. Verifica-se que a intensidade destes processos é bem distinta, e na região do visível, entre as linhas pontilhadas, e em parte do infravermelho próximo, o comportamento das curvas é inverso. Modificado de Novo (2001).	55
Figura 12 – Curvas do coeficiente de absorção da clorofila para duas concentrações deste pigmento. Verifica-se o primeiro pico de absorção máxima no azul, e o segundo, no vermelho. Fonte: INPE (2001).	56
Figura 13 – Curvas de reflectância para diferentes concentrações de clorofila a, em dois experimentos de laboratório. As feições identificadas em (b) também estão presentes em (a). Fonte: a) Goodin et al (1993); b) Rundquist et al (1996).....	57
Figura 14 – Espectro de absorção de matéria orgânica dissolvida em um lago. Fonte: INPE (2001).	57
Figura 15 – Curva espectral da matéria orgânica dissolvida em diferentes concentrações. Fonte: Mantovani (1993), modificado por Novo (2001).....	57
Figura 16 – Curvas de reflectância espectral para várias concentrações de sedimentos em suspensão na água. Modificado de Warrick et al (2004).....	59
Figura 17 – Curvas de reflectância espectral para concentrações de sedimentos em suspensão na água, com concentração fixa de clorofila. Fonte: Goodin et al (1993).....	60
Figura 18 – Espectros de sedimentos em suspensão na água, em diferentes concentrações, obtidos sob condições controladas em laboratório. Fonte e unidades de medida: (a) Chen et al (1982), concentração de sedimentos em suspensão (SSC), em mg/l; (b) Goodin et al	

(1993), turbidez, em unidades de turbidez nefelométrica; (c) Witte et al (1981), total de sólidos suspensos, em partes por milhão.	62
Figura 19 – Relacionamento entre CSS e radiância espectral na banda verde em águas próximas à costa. Fonte: Curran e Novo (1989).	63
Figura 20 – Reflectância como uma função da concentração de sólidos suspensos em diferentes comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo. Modificado de Witte et al (1982).	63
Figura 21 – Radiância espectral em diferentes comprimentos de onda para sedimentos marrons e pretos. Modificado de Choubey e Subramanian (1991).	65
Figura 22 – Espectros de reflectância residual entre CSS e a água pura para sedimentos de argila branca e silte vermelho. Fonte: Novo et al (1989 a).	66
Figura 23 – Radiância espectral para misturas de água e sedimentos de dois tipos de solos, em diferentes concentrações: (a) <i>ball</i> e (b) <i>feldspar</i> . Modificado de Whitlock et al (1977). ..	67
Figura 24 – Planos de informação associados a uma única localização em SIGs. Fonte: Foote e Lynch (1995).	78
Figura 25 – Arquitetura geral de sistemas de informações geográficas. Fonte: Davis e Câmara (1999).	78
Figura 26 – Bacia do rio Paraíba do Sul, compreendida entre os paralelos 20°26' e 23°00' S e os meridianos 41°00' e 46°30' W. Fonte: Modificado de RIO DE JANEIRO (1999).	80
Figura 27 – Sentido do transporte litorâneo segundo Cassar e Neves (1993). As cores das setas destacam o sentido do transporte. Modificado de Muehe e Valentini (1998).	81
Figura 28 – Área de estudo: imagens Landsat. a) Foz do rio Paraíba do Sul; composição colorida RGB 123, de 30/05/2004. (b) Recorte da área de estudo, com a máscara utilizada na área de água, em azul, e composição colorida RGB 123 de 16/06/2004.	82
Figura 29 – Comportamento médio mensal da hidrógrafa ao longo do período 1976 – 2006. Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.	84
Figura 30 – Gráfico dos valores médios anuais de vazão ao longo do período 1985 – 2006. Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.	86
Figura 31 – Exemplo de figura disponibilizada como <i>quicklook</i> no banco de imagens da DGI / INPE, na qual a pluma é visível. Imagem CBERS-2, de 02/04/05. Fonte: BANCO de imagens da DGI/INPE.	87
Figura 32 – Sequência metodológica.	91
Figura 33 – Tela do código 6S, adaptado por Antunes (2003).	93
Figura 34 – Arquivo de configuração (*.inp) para entrada no modelo 6S.	93
Figura 35 – Dados corrigidos dos efeitos atmosféricos a partir de diferentes visibilidades, ao longo do perfil exibido em detalhe. Imagem Landsat 5, 23/03/1985.	94
Figura 36 – Diferentes configurações na região do delta do rio Paraíba do Sul, observada a partir de imagens de satélite de diferentes datas.	96
Figura 37 – Máscara na interface terra– água utilizada para recortar as imagens.	97
Figura 38 – Sequência metodológica adotada para geração dos produtos matriciais e vetoriais.	98
Figura 39 – Localização do perfil utilizado para a geração das curvas de frequência espacial.	101
Figura 40 – Processo para extração da pluma de sedimentos: a) geração das linhas de contorno, a partir dos níveis de cinza indicados pela análise da curva de frequência espacial; b) definição da linha que melhor representa a pluma, por interpretação visual, e geração do polígono com edição nas bordas; c) classificação não-supervisionada da imagem através da técnica <i>natural breaks</i> , com três classes.	105

Figura 41 – Esquema ilustrando o processo de sobreposição por união entre polígonos. As duas primeiras imagens representam as camadas de entrada e a última, o <i>layer</i> de saída. Primeiro, há a quebra nas interseções entre as camadas de entrada, depois as feições de mapa são cruzadas e o resultado acumula todas as feições, não havendo cortes, e então a topologia é contruída.	107
Figura 42 – Recorte da área de estudo dividido segundo as direções empregadas nas análises.	108
Figura 43 – Mapa de subtração das bandas correspondentes ao verde e ao vermelho para duas datas distintas: à esquerda, 18/03/1989; à direita, 19/01/1997. As diferenças positivas representam áreas onde o valor do ND registrado no verde é maior que no vermelho, as negativas, onde o ND é maior no vermelho.	111
Figura 44 – Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 18/03/1989.	112
Figura 45 - Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 01/07/2004.	113
Figura 46 - Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 19/01/1997.	113
Figura 47 – Definição do limite da pluma pela classificação por quebras naturais com 3 classes, e o limite definido pelo analista.	116
Figura 48 – Definição do limite da pluma pela segunda classe do classificador e pelo analista.	116
Figura 49 – Fluxograma do método proposto para mapear pluma de sedimentos.	118
Figura 50 – Mapa de subtração das imagens Landsat 5 e CBERS-2, banda do vermelho, em 11/03/2004. Os valores positivos representam áreas onde é maior a reflectância registrada na imagem Landsat 5; F2 e F3 representam a mesma feição, deslocada em função da diferença de horário da passagem dos respectivos satélites; F1 são áreas afetadas por nuvens. A imagem Landsat apresenta ruído de <i>striping</i> , identificado no mapa.	121
Figura 51 – Mapas temáticos qualitativos da CSS na água. Cada imagem exemplifica um cenário segundo a classe de intensidade máxima observada: 24% do total de imagens mapeadas têm concentração “muito alta” em 24%; alta, em 26%; média, em 44%; e baixa, em 6%. Cenas Landsat 5: a) 03/02/1985; b) 22/02/1986; c) 02/04/2005; d) 15/07/2005.	122
Figura 52 – Exemplo de classificação dos sedimentos quanto ao padrão observado: na forma de pluma, com presença marcante da frente de sedimentos, na imagem à esquerda; e difuso, na à direita. Imagens Landsat 5, banda do vermelho, de 23/02/1985 e 16/07/2004, respectivamente.	124
Figura 53 – Gráfico da vazão mensal média ao longo do período 1985 – 2006. Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.	125
Figura 54 – Gráfico e tabela da área de abrangência das plumas segundo as direções.	131
Figura 55 – Gráfico e tabela do alcance máximo e mínimo das plumas segundo as direções.	132
Figura 56 – Mapa da área total de abrangência de pluma na área de estudo.	133
Figura 57 – Mapa temático da área de abrangência de pluma por direção, em porcentagem do total. Os tons em verde representam as direções em que as plumas ocupam áreas menores, enquanto os tons de azul estão associados às direções nas quais a pluma se desenvolve mais.	133
Figura 58 – Mapa de frequência de ocorrência de pluma de sedimentos na área de estudo. .	135

Figura 59 – Mapa temático de soma das áreas de abrangência de pluma por direção. Esta informação leva em conta a frequência das plumas na área de estudo. Os tons em verde referem-se às direções menos ocupadas por plumas ao longo do tempo, e os tons de azul, àquelas com maior ocorrência em área.....	137
Figura 60 – Mapa de frequência de ocorrência de pluma segundo as direções e distâncias do ponto central definido na foz do rio Paraíba do Sul. O intervalo entre as radiais é de 2,5 km.	139
Figura 61 – Mapa de densidade dos pontos centrais das feições, indicando a classificação da forma da pluma.	140
Figura 62 – Exemplos de formas alongadas no sentido norte-sul e relativamente estreitas, denominadas forma 1 no mapa.	141
Figura 63 – Exemplos de formas centralizadas na região frontal à foz do rio, geralmente possuem maior desenvolvimento no quadrante norte e expressão média no sentido este, denominadas forma 2 no mapa.	141
Figura 64 – Exemplos de formas maiores, com grande expressão no sentido este, denominadas forma 3 no mapa.	141
Figura 65 – Mapas temáticos: a) 03/02/1985; b) 19/02/1985; c) 23/03/1985; d) 30/08/1985.	158
Figura 66 – Mapas temáticos: a) 21/01/1986; b) 06/02/1986; c) 22/02/1986; d) 26/12/1987.	159
Figura 67 – Mapas temáticos: a) 28/02/1988; b) 18/03/1989; c) 17/02/1990; d) 27/07/1990.	160
Figura 68 – Mapas temáticos: a) 27/01/1994; b) 17/01/1996; c) 06/04/1996; d) 25/05/1996.	161
Figura 69 – Mapas temáticos: a) 19/01/1997; b) 09/01/1999; c) 15/02/2001; d) 23/06/2001.	162
Figura 70 – Mapas temáticos: a) 14/02/2004; b) 11/03/2004; c) 11/03/2004; d) 27/03/2004.	163
Figura 71 – Mapas temáticos: a) 02/05/2004; b) 25/05/2004; c) 30/05/2004; d) 15/06/2004.	164
Figura 72 – Mapas temáticos: a) 01/07/2004; b) 16/07/2004; c) 11/08/2004; d) 18/08/2004.	165
Figura 73 – Mapas temáticos: a) 02/10/2004; b) 25/01/2005; c) 10/02/2005; d) 14/03/2005.	166
Figura 74 – Mapas temáticos: a) 30/03/2005; b) 02/04/2005; c) 15/04/2005; d) 19/06/2005.	167
Figura 75 – Mapas temáticos: a) 15/07/2005; b) 10/08/2005; c) 21/08/2005; d) 05/09/2005.	168
Figura 76 – Mapas temáticos: a) 01/10/2005; b) 01/03/2006; c) 12/01/2007; d) 16/02/2007.	169
Figura 77 – Mapa temático de 31/03/2007.....	170

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição das faixas espectrais do visível, infravermelho e microondas.....	32
Quadro 2 – Informações sobre a série de satélites Landsat.....	74
Quadro 3 – Principais características do satélite Landsat 5, sensor TM.	75
Quadro 4 – Faixas espectrais do sensor TM, à bordo do satélite Landsat 5.....	75
Quadro 5 – Faixas espectrais do sensor CCD, a bordo do satélite CBERS-2.	76
Quadro 6 – Principais características do satélite CBERS-2, sensor CCD.....	76
Quadro 7 – Total de cenas disponíveis para consulta no banco da DGI / INPE em setembro de 2007, na órbita–ponto 231/75, para o Landsat 1, 2 e 3; 216/75, para o Landsat 5 e 7; e 149/124, para o CBERS-2.	83
Quadro 8 – Lista de imagens selecionadas com base no critério sazonal.	87
Quadro 9 – Lista de imagens selecionadas com base no critério de pluma visível.....	87
Quadro 10 – Lista de imagens definidas para abranger todo o ciclo hidrológico anual.....	88
Quadro 11 – Informações sobre as imagens utilizadas nesta pesquisa.....	89
Quadro 12 – Opções de modelos pré-estabelecidos e parâmetros de entrada necessários para correção atmosférica com o algoritmo 6S. Em destaque estão os modelos utilizados.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre as classes empregadas no mapeamento temático.....	114
Tabela 2 – Número de ocorrências de cada classe como intensidade máxima no conjunto de imagens avaliadas, e considerando ainda os períodos chuvoso e seco.....	123
Tabela 3 – Informações sobre o padrão de sedimentos observado no conjunto de imagens.	124
Tabela 4 – Valores médios mensais de vazão (m ³ /s) por ano entre 1985 e 2006.....	126
Tabela 5 – Informações sobre o padrão de sedimentos, intensidade da classe de máxima CSS e vazão média de 10 dias antes da passagem do satélite para o conjunto de imagens. ..	128
Tabela 6 – Informações sobre o padrão de sedimentos observado nas imagens de 2004 e 2005.	129
Tabela 7 - Número de ocorrências de cada classe como intensidade máxima no conjunto de imagens de 2004 e 2005, considerando ainda o período chuvoso e o seco.....	129
Tabela 8 – Estatística básica para o conjunto de feições de pluma.	130
Tabela 9 – Área total de abrangência e perímetro por direção.	134
Tabela 10 – Informações de área e perímetro associadas à frequência das plumas na área de estudo. As cores desta tabela seguem o padrão do mapa de frequência de ocorrência, para facilitar a sua análise conjunta.....	136
Tabela 11 – Soma das áreas e área máxima de pluma por direção.	137

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDEP	Banco de Dados de Exploração e Produção
CBERS	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD	High Resolution CCD Câmera / Câmara Imageadora de Alta Resolução
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
DGI	Divisão de Geração de Imagens
DOS	Dark Object Subtraction / Subtração do Objeto Escuro
ERDAS	Earth Resource Data Analysis System
ERTS	Earth Resources Technology Satellite
ESA	European Space Agency / Agência Espacial Européia
ESRI	Environment Systems Research Institute
FCT	Função de Transferência de Contraste
GVF	Goodness of Variance Fit
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRMSS	Infrared Multispectral Scanner / Varredor Multiespectral Infravermelho
IVP	Infravermelho Próximo
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
LOA	Laboratoire d'Optique Atmosphérique
LOWTRAN	Low Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model
LUT	Look-Up Table
MOD	Matéria Orgânica Dissolvida
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model
MSS	Multi-Spectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ND	Número Digital
NDVI	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
ONG	Organização Não Governamental
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PCT	Pontos de Controle Terrestres
PDI	Processamento Digital de Imagens

REM	Radiação Eletromagnética
RTC	Radiative Transfer Code / Código de Transferência Radiativa
SCORADIS	Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélites
SEMADS	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SDAM	Squared Deviations from the Array Mean
SDCM	Squared Deviations Between Classes
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
WFI	Wide Field Imager / Imageador de Amplo Campo de Visada
WGS	World Geodetic System
5S	Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum
6S	Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum

SUMÁRIO

Introdução	20
1. Fundamentação Teórica.....	27
1.1 Sedimentos em suspensão	27
1.2 Sensoriamento remoto em nível orbital.....	29
1.2.1 Fundamentos gerais	29
1.2.2 Interações da REM com a atmosfera.....	32
1.2.3 Grandezas radiométricas e a imagem digital.....	38
1.2.4 Correção Radiométrica	39
1.2.5 Sensoriamento remoto de sistemas aquáticos.....	48
1.2.5.1 Aspectos gerais	48
1.2.5.2 Conceitos básicos de óptica hidrológica.....	50
1.2.5.3 Propriedades espectrais da água e seus constituintes	54
1.2.6 Sensoriamento remoto para detecção de sedimentos em suspensão	60
1.2.7 Processamento Digital de Imagem	70
1.2.8 Imagens do sensor TM – satélite Landsat 5	74
1.2.9 Imagens do sensor CCD – satélite CBERS-2.....	75
1.3 Sistemas de informação geográfica	76
2. Materiais e Métodos	79
2.1 Área de estudo	79
2.2 Abordagem proposta	82
2.2.1 Levantamento de imagens históricas dos satélites Landsat e CBERS-2.....	82
2.2.2 Dados históricos de nível de água	84
2.2.3 Definição da data das imagens	85
2.3 Materiais	88
2.4 Métodos	90
2.4.1 Pré-processamento de imagem	90
2.4.1.1 Correção atmosférica.....	90
2.4.1.2 Correção geométrica.....	95
2.4.1.3 Geração da máscara e recorte da área de interesse.....	95
2.4.2 Processamento digital de imagem	98
2.4.2.1 Manipulação do Contraste.....	98
2.4.2.2 Interpretação Visual.....	99
2.4.2.3 Caracterização espectral das plumas de sedimentos.....	99
2.4.2.3.1 Classificação não supervisionada	100
2.4.2.3.2 Curvas de frequência espacial	101
2.4.2.4 Avaliação da resposta espectral dos sedimentos na banda do vermelho.....	101
2.4.2.5 Classificação supervisionada.....	102
2.4.2.6 Generalização e procedimentos pós-classificação.....	103
2.4.2.7 Filtragem Espacial	103
2.4.3 Análise espacial	104
2.4.3.1 Extração das feições	104
2.4.3.2 Elaboração do Banco de Dados	106
2.4.3.3 Análises Espaciais	106
3. Resultados: Apresentação e Discussão.....	109

3.1 Indicação de método para mapeamento de plumas de sedimentos	109
3.2 Avaliação de sedimentos em suspensão em imagens Landsat-5 e CBERS-2	119
3.3 Dinâmica espaço-temporal da pluma costeira do rio Paraíba do Sul	120
4. Conclusões e recomendações	144
Referências	148
APÊNDICE – MAPAS TEMÁTICOS.....	157

INTRODUÇÃO

Existem duas espécies de meio ambiente que você deve observar cuidadosamente: o interno e o externo.

Paramahansa Yogananda

Nas últimas décadas, a humanidade vem enfrentando graves questões ambientais e sociais, que foram se delineando gradativamente através dos séculos, e paradoxalmente, cresceram na medida em que o Homem evoluiu em conhecimento e técnica. A possibilidade de uma intervenção no espaço cada vez mais abrangente e efetiva, aliada à manutenção de um modelo de *desenvolvimento* econômico socialmente excludente e ecologicamente predatório, resultou em inúmeros problemas que hoje desafiam a sociedade.

No Brasil, à semelhança de vários países no mundo, os processos acelerados de urbanização, industrialização e expansão agrícola, verificados a partir da segunda metade do século XX, resultaram na ocupação desordenada do espaço geográfico, comprometendo de forma crescente a qualidade de vida da população. A ausência de um adequado planejamento e gerenciamento do uso e ocupação do solo, associado a níveis elevados de desigualdade social e concentração populacional, geraram e agravaram uma série de problemas ambientais nas grandes cidades mundiais, notadamente aquelas dos países em desenvolvimento.

Considerando este panorama, especial atenção precisa ser dispensada aos ecossistemas aquáticos e regiões costeiras. Como argumenta Coelho (2001), a dependência da civilização humana em relação aos recursos naturais é evidente, principalmente no que se refere aos recursos hídricos. No entanto, há uma complexidade crescente no que se refere aos usos múltiplos da água: de um lado há o aumento exagerado das demandas localizadas; de outro, o comprometimento da qualidade dos recursos hídricos diminui sua disponibilidade e eleva seu custo para as mais diversas atividades humanas (SETTI, 2001).

Os sistemas fluviais são integralizadores dos fenômenos que ocorrem ao longo da bacia hidrográfica, sofrendo direta e indiretamente os impactos das atividades antrópicas desenvolvidas em sua bacia de drenagem. A ausência de mecanismos de controle para evitar a

entrada de diferentes tipos de poluentes contribuiu para a ocorrência de sérios problemas de degradação ambiental em sistemas aquáticos espalhados pelo planeta (MERTEN, 2002). As áreas à jusante recebem os respectivos impactos do uso e ocupação do solo, bem como dos usos da água, estabelecidos à montante, tornando o corpo-receptor final particularmente vulnerável.

Assim, como afirma Lacerda (*on-line*¹), a zona costeira é uma área potencialmente sensível aos impactos de atividades humanas, por ser uma região de interface entre o continente e o mar, dominada por processos originados nas bacias de drenagem dos rios afluentes, por processos oceanográficos e meteorológicos. Com isso, podem sofrer efeitos de atividades desenvolvidas a muitos quilômetros de distância. Associada a esta vulnerabilidade potencial, as áreas costeiras possuem importância estratégica para o desenvolvimento, estando sujeitas a uma pressão antrópica cada vez mais intensa. Ocupando menos de 20% da superfície da Terra, elas concentram mais de 45% da população humana e hospedam 75% das megalópoles com mais de 10 milhões de habitantes. Adicionalmente, configuram-se como abundante reservatório de biodiversidade e ecossistemas, dos quais depende o funcionamento do planeta.

Um dos principais fatores que afetam a qualidade dos sistemas aquáticos pelo mundo são os sedimentos em suspensão (RITCHIE et al, 1987; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1991; TASSAN, 1997; HOLYER, 1978; BHARGAVA e MARIAM, 1990; WHITLOCK et al, 1982). Em altas concentrações, eles afetam diretamente numerosos processos bênticos e na coluna d'água, tais como: produtividade primária, produção de peixes, crescimento de corais, produtividade da vegetação aquática submersa e dinâmica de nutrientes (MILLER e MCKEE, 2004; RITCHIE et al, 1987). Pelas mudanças que ocasionam nas propriedades físico-químicas da água, os prejuízos à vida aquática e às diversas atividades humanas podem ser grandes. Além disso, um aspecto crítico relacionado aos sedimentos refere-se à adsorção de substâncias poluentes, como metais pesados e grande parte do material originário dos efluentes domésticos. Como afirma Coelho (2001), os impactos ambientais são, simultaneamente, produtos e produtores de novos impactos. Associado ao processo de transporte e deposição de sedimentos pode ocorrer, por exemplo, erosão e assoreamento em

¹ Luiz Drude de Lacerda foi coordenador do Instituto do Milênio – Estuários, projeto “Transferência de Materiais na Interface Continente-Oceano” e atualmente coordena o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Transferência de Materiais Continente-Oceano. A referência citada está no site oficial do projeto: LACERDA, L. D. *A zona costeira: o domínio das interações*. [S.I.: s.n., 200-]. Disponível em: <<http://www.institutomilenioestuarios.com.br/zonacosteira.html>>.

regiões costeiras, contaminação de ambientes aquáticos e praias, redução da capacidade de fluxo de rios, lagos, reservatórios e estuários e modificação do fundo do sistema aquático.

Por estas razões, o monitoramento de material em suspensão em corpos d'água, interiores ou costeiros, é fundamental para as atividades de planejamento e gestão ambiental. A sua distribuição espacial pode ser utilizada como subsídio ao monitoramento de poluentes e outros materiais, ao monitoramento da produção primária, à localização de bacias hidrográficas com problemas significativos de erosão e perda de solo e para inferir os padrões de circulação da água. No entanto, as tradicionais técnicas de amostragem de campo são custosas, demoradas e pontuais, não sendo capazes de fornecer uma visão sinótica do ambiente e acompanhar a dinâmica espacial e temporal altamente variável dos materiais em suspensão. Existe, portanto, considerável interesse no uso de dados de sensoriamento remoto para mapear a distribuição e a concentração de partículas em suspensão na água: a disponibilidade de cobertura multiespectral, periódica e relativamente de baixo custo, sobre amplas áreas, propicia os recursos indispensáveis ao monitoramento ambiental (MILLER e MCKEE, 2004; RITCHIE et al, 1987; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1991).

Adicionalmente, as perspectivas para o uso de sensoriamento remoto em nível orbital são cada vez mais promissoras; alguns fatores outrora limitantes estão sendo gradativamente contornados nos últimos anos, reforçando a sua aplicabilidade nos mais variados setores e favorecendo a sua disseminação. A crescente disponibilidade de sensores a bordo de satélites aumenta a frequência de observação de alvos na superfície terrestre e multiplica as possibilidades de obtenção de dados livres de nuvens, a tendência de diminuição do custo para aquisição de imagens e a existência de softwares gratuitos de processamento são alguns destes fatores.

O potencial de emprego do sensoriamento remoto no mapeamento de sedimentos em suspensão em corpos d'água já foi demonstrado em muitas pesquisas realizadas em diferentes países (MISHRA, 2004; RIMMER et al, 1987; RITCHIE et al, 1987; MILLER e MCKEE, 2004; WHITLOCK et al, 1977). No entanto, estudos desta natureza não são frequentes no Brasil. Neste país, a literatura disponível sobre o assunto ainda é pequena; existem apenas alguns esforços isolados para o emprego desta técnica em determinadas regiões. Considerando as dimensões territoriais do Brasil e a abundância de ecossistemas aquáticos existentes, este panorama é, a princípio, surpreendente. Todavia, distinguem-se dois conjuntos

de fatores que provavelmente contribuem para esta situação: questões genéricas inerentes ao uso do sensoriamento remoto, e questões relacionadas às especificidades da aplicação de interesse (CHEN et al, 1992; BARBOSA, 2005; MOREL e PRIEUR, 1977). Neste último caso, acrescentam-se ainda as dificuldades oriundas de abordagens quantitativas: tais estudos necessitam de levantamentos de campo e análises de laboratório, sendo muito dispendiosos e requerendo uma estrutura geralmente não disponível na maior parte das pesquisas realizadas no Brasil.

Nesse sentido, avanços inestimáveis foram logrados recentemente com a disponibilização gratuita de toda a série de imagens Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*) pela Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), além das imagens CBERS (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), que são adquiridas sem custo desde o lançamento do primeiro sensor, em 2003. Esta iniciativa abre possibilidades valiosas não apenas às pesquisas acadêmicas, como também às atividades dos mais diversos órgãos do governo, empresas e ONGs (Organizações Não-Governamentais), beneficiando a sociedade de forma geral.

Já com relação aos ambientes aquáticos, informações muito relevantes podem ser extraídas a partir de análises qualitativas, tanto para a compreensão da dinâmica de sedimentos e processos costeiros quanto para o planejamento e monitoramento ambiental. A recente facilidade para aquisição de imagens de satélite atuais e históricas, isentas de custo, pode efetivamente alavancar pesquisas e aplicações desta natureza, tão importantes em um país onde a carência de informações ainda predomina de forma imperativa.

À vista disso, esta pesquisa tem como objetivo geral mapear a pluma de sedimentos na região da foz do rio Paraíba do Sul, a partir de dados espectrais provenientes de imagens Landsat 5 e CBERS-2, ao longo do período compreendido entre 1985 e 2007. A foz do rio Paraíba do Sul foi escolhida como área de estudo para o desenvolvimento e teste da metodologia proposta em função de diversos aspectos, dentre os quais se destacam: a importância deste rio e de sua bacia hidrográfica no contexto nacional; o Rio de Janeiro está localizado a jusante de outros dois estados, recebendo, portanto, os respectivos impactos dos usos da água e do uso e ocupação do solo nestes trechos da bacia; a sua foz está localizada em importante área turística da região norte do estado. Adicionalmente, como parte integrante do

teste metodológico, realizou-se um estudo de caso visando conhecer o comportamento dos sedimentos em suspensão na região costeira adjacente à foz do rio Paraíba do Sul.

Assim, ao final desta pesquisa serão respondidas duas questões: como mapear plumas de sedimentos utilizando-se apenas imagens orbitais? É possível identificar e mapear o padrão espacial e temporal de plumas costeiras associado ao regime hidrológico do rio através de imagens Landsat 5 e CBERS-2?

Ciente das limitações e restrições que esta abordagem apresenta, as quais serão discutidas ao longo deste trabalho, espera-se contribuir de alguma forma para um maior conhecimento do espaço geográfico, propiciando então novos recursos às atividades de planejamento e gestão territoriais, e para a disseminação do uso do sensoriamento remoto em corpos d'água.

Visando adotar uma sistemática que melhor favorecesse a organização das idéias que nortearam o desenvolvimento desta pesquisa, bem como a posteriores consultas a esta dissertação, apresentam-se na próxima seção, em destaque, os objetivos do trabalho e um breve comentário sobre a sequência dos capítulos que compõem este documento.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

- Utilizar a tecnologia de sensoriamento remoto a nível orbital para mapear a pluma de sedimentos costeira do rio Paraíba do Sul, no período compreendido entre 1985 e 2007.

Objetivos Específicos

- Avaliar e testar um método para mapear plumas de sedimentos através de imagens óticas de sensoriamento remoto orbital;
- Avaliar o potencial de emprego de imagens CBERS-2, sensor CCD (*High Resolution CCD Camera*), na detecção de sedimentos em suspensão em corpos d'água;
- Comparar a resposta espectral da pluma de sedimentos em imagens Landsat 5, sensor TM (*Thematic Mapper*), e CBERS-2, sensor CCD;
- Delimitar e caracterizar a dinâmica espacial e temporal da pluma costeira do rio Paraíba do Sul;
- Verificar se existe associação entre as características da pluma de sedimentos e o regime hidrológico do rio.

ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos. O primeiro capítulo apresenta a fundamentação teórica que norteou todo o trabalho realizado, abordando sucintamente as principais características do sensoriamento remoto e dos sistemas de informações geográficas, dos satélites e sensores utilizados, passando à revisão de literatura sobre utilização de imagens orbitais, tanto em estudos multi-temporais quanto para identificação de sedimentos em suspensão em corpos d'água, interiores ou costeiros. No capítulo dois encontra-se a metodologia utilizada nesta pesquisa, incluindo informações referentes à área de estudo, materiais utilizados, critério para a definição da data das imagens, bem como o seu processamento digital e as técnicas de análise espacial empregadas. No terceiro capítulo estão os resultados obtidos, com suas respectivas análises e discussões. Finalmente, o capítulo quatro apresenta as conclusões desta dissertação e as recomendações para futuros trabalhos, baseadas na avaliação das potencialidades e limitações desta abordagem.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No princípio

Não havia existência ou inexistência

O mundo era energia não revelada...

ELE vivia, sem viver, por SEU próprio poder

E nada mais havia...

Hino da Criação, Rig Veda

Este capítulo apresenta uma explanação sintetizada de praticamente todos os assuntos e técnicas trabalhados nesta dissertação, e enfoca somente aqueles temas considerados indispensáveis ao adequado desenvolvimento da pesquisa realizada. Deste modo, os sedimentos em suspensão e os principais fundamentos do sensoriamento remoto são caracterizados sucintamente, sucedendo aos itens examinados mais profundamente, para os quais se apresenta uma revisão bibliográfica. São eles: estudos e avaliações multi-temporais utilizando dados orbitais, aplicações de sensoriamento remoto em corpos d'água e emprego de imagens de satélite para identificação e mapeamento de sedimentos em suspensão na água.

1.1 Sedimentos em suspensão

De forma geral, os organismos vivos, as partículas inorgânicas e os detritos são os componentes do sistema aquático que podem ser encontrados em suspensão na água; os organismos vivos compreendem o fitoplâncton, o zooplâncton e o bacterioplâncton, enquanto os detritos são formados por matéria orgânica morta. Na literatura sobre o assunto, utilizam-se diversos termos para referenciá-los, individualmente ou em conjunto, embora nem sempre com o mesmo significado. Alguns exemplos são: sólidos, sedimentos, partículas e material particulado em suspensão, sólidos totais e material total em suspensão, entre outros.

Considerando as aplicações de sensoriamento remoto na água, é comum encontrar a descrição e análise do comportamento espectral da matéria orgânica viva, a fração algal,

separada dos demais componentes que se encontram temporariamente em suspensão, devido às suas especificidades, como será discutido adiante no item 1.3. Neste trabalho, optou-se por utilizar os termos *sedimentos*, *partículas* e *material particulado* como sinônimos, designando os demais componentes suspensos no corpo d'água, excluída a fração algal. As análises de sedimentos em suspensão podem incluir partículas orgânicas e inorgânicas; no entanto, estudos de laboratório demonstraram que é a fração inorgânica – as partículas minerais – a principal responsável pelo comportamento espectral dos sedimentos (MOBLEY apud NOVO, 2001). Por esta razão, em se tratando da fração suspensa não algal, independente do termo utilizado por diferentes pesquisadores, a resposta espectral observada refere-se principalmente à fração inorgânica².

Em águas costeiras, a origem do material particulado em suspensão está relacionada à descarga de água doce pela rede de drenagem e à ressuspensão ou erosão do fundo (MILLER e MCKEE, 2004). No que se refere ao transporte nos cursos de água, existem basicamente dois fatores responsáveis pela disponibilização de material particulado: a ação que as águas exercem sobre a margem e leito dos rios e a remoção de sedimentos da bacia contribuinte (ANA, 2002). O tipo e a quantidade de material transportado pelos canais fluviais dependem de vários fatores, como a quantidade e distribuição das precipitações, estrutura geológica, condições topográficas e pedológicas, e uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, inclusive as ações antrópicas pontuais. Tais fatores influenciam diretamente o material intemperizado na bacia hidrográfica e o carreamento destes até o rio. Assim, estão ligados diretamente às áreas de denudação, variando de acordo com as peculiaridades da bacia de drenagem, e os principais fluxos de sedimentos estão intimamente associados às atividades humanas (ANA, 2002; CHRISTOFOLETI, 1981).

O fluxo e o transporte de sedimentos constituem respostas aos processos e ao estado de equilíbrio atuantes no sistema fluvial. Dessa forma, o movimento sedimentar abrange os processos de remoção, transporte e deposição envolvendo toda a dinâmica da bacia hidrográfica (ANA, 2002). A sua concentração é um parâmetro fundamental da qualidade da água, pois entre outros fatores, os sedimentos servem como veículo da movimentação da poluição orgânica, química e industrial; os poluentes agregam-se aos sedimentos mais finos e

² Com esta explicação, evitam-se problemas de nomenclatura ao apresentar a definição de diferentes termos, os quais podem ter sido utilizados com significados distintos por diferentes pesquisadores. A revisão bibliográfica específica apresentada no item 1.2.6 mantém os termos empregados pelos respectivos autores.

são levados ao longo do curso d'água. Em função disso, os efeitos dos lançamentos de efluentes podem ser verificados em locais muito distantes da fonte poluidora.

Através do mecanismo de transporte os sedimentos são redistribuídos; em ambientes costeiros, o seu fluxo, concentração e distribuição são altamente dinâmicos, espacial e temporalmente. Os contínuos processos de troca que envolvem a região costeira e o oceano são regidos por forçantes atmosféricas, que incluem a intensidade e direção do vento, precipitação e pressão; astronômicas (marés); e oceanográficas, como é o caso da ação das ondas e correntes oceânicas, costeiras e de maré, além das características granulométricas do substrato (NOERNBERG et al, 2001).

Estes forçantes físicos de energia externa determinam ainda o padrão de sedimentos observado na região costeira adjacente, se difuso ou em forma de pluma, bem como a variabilidade e a área de abrangência da água turbida. O termo pluma, em hidrodinâmica, refere-se à forma de poluentes na água ou emissões no ar; representa, portanto, uma área diferenciada do seu entorno pela presença de determinadas substâncias, e não é empregado necessariamente apenas para substâncias poluentes. No caso específico de partículas em suspensão na água, a pluma pode ser identificada pela presença marcante da frente de sedimentos.

1.2 Sensoriamento remoto em nível orbital

1.2.1 Fundamentos gerais

São várias as definições existentes para sensoriamento remoto; a idéia principal contida em todas elas é a aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos através do uso de sensores, sem que haja contato físico entre eles (NOVO, 1992; LILLESAND e KIEFFER, 1994). Esta tecnologia baseia-se na captação da radiação eletromagnética refletida ou emitida pela superfície terrestre, que então é transformada em sinal passível de ser convertido em informação sobre o ambiente.

Todos os materiais com temperatura superior a zero absoluto podem emitir, refletir, transmitir ou absorver radiação eletromagnética. Este tipo de radiação não necessita de um meio material para se propagar e normalmente é caracterizado pelo seu comprimento de onda ou frequência. Em função das características peculiares concernentes aos processos físicos geradores de energia ou aos mecanismos físicos de detecção desta energia, este amplo espectro de radiação é subdividido em faixas, como pode ser observado na Figura 1. Os sensores passivos operam a partir de fontes naturais, sendo o sol a principal delas, com espectro de emissão concentrado entre 0,35 e 4 μm ; neste caso, o sensor registra a radiação refletida pelo alvo.

Várias interações são possíveis quando a radiação eletromagnética atinge a matéria. Os processos de emissão, absorção, reflexão e transmissão ocorrem simultaneamente, porém este comportamento é seletivo em relação ao comprimento de onda e específico para cada elemento. Assim, as características de reflexão de cada matéria definem sua assinatura espectral e são utilizadas em sensoriamento remoto para distinguir os diversos alvos entre si.

São as interações da radiação eletromagnética com a matéria que definem as faixas espectrais passíveis de serem utilizadas pelos sensores remotos, as chamadas janelas atmosféricas. Como pode ser observado em cinza na Figura 2, existem regiões do espectro em que praticamente toda a radiação é absorvida pelos constituintes atmosféricos, não alcançando, portanto, a superfície da Terra.

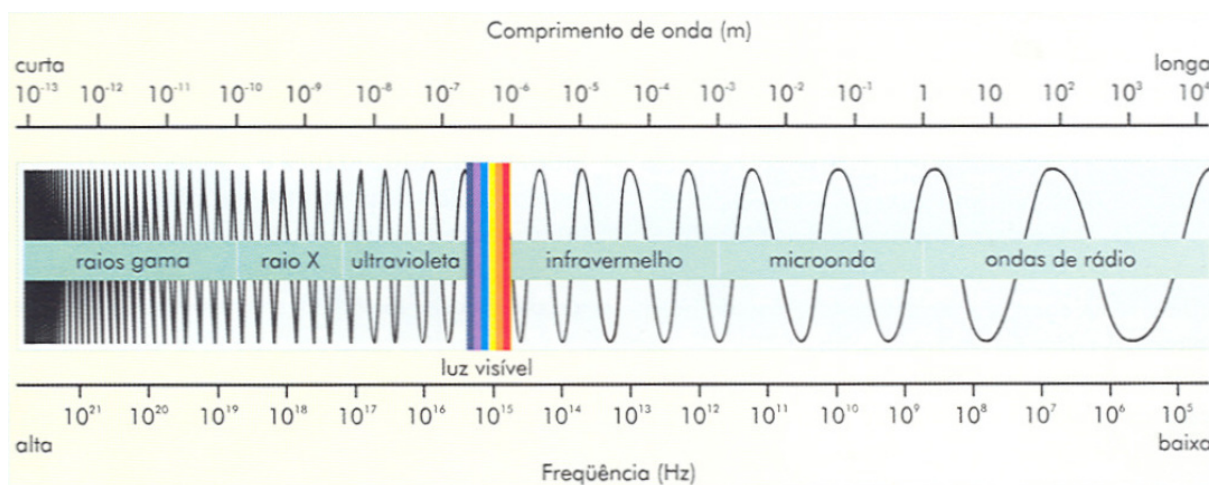


Figura 1 – Espectro eletromagnético, com definição das suas regiões em função do comprimento de onda e frequência. Fonte: Florenzano (2002).

Conseqüentemente, a maior parte dos sensores remotos de recursos terrestres opera dentro das janelas atmosféricas existentes nas faixas do visível, infravermelho e microondas, detalhadas no Quadro 1. Eles podem ser instalados em plataformas aéreas ou orbitais, ou podem ainda ser utilizados ao nível de campo. Apesar do princípio físico de aquisição de dados ser idêntico, somente nos dois primeiros níveis citados, aéreo e orbital, os sinais registrados pelo sensor são transformados em dados na forma de imagens. E mesmo neste caso, o seu processamento e métodos de análise são diferentes, em função das peculiaridades que influem no processo de aquisição de cada um deles.

Com efeito, pela análise da Figura 2 verifica-se que a transmitância da atmosfera nas faixas operadas pelos sensores é parcial; isso significa que os constituintes atmosféricos interferem na intensidade do sinal registrado. O comportamento seletivo destes constituintes nos diferentes comprimentos de onda, a distância entre o sensor e o alvo, e os ângulos de iluminação e visada são fatores fundamentais para se determinar a influência da atmosfera no sinal captado pelo sensor. Em síntese, quanto maior o caminho ótico, maior a interferência atmosférica.

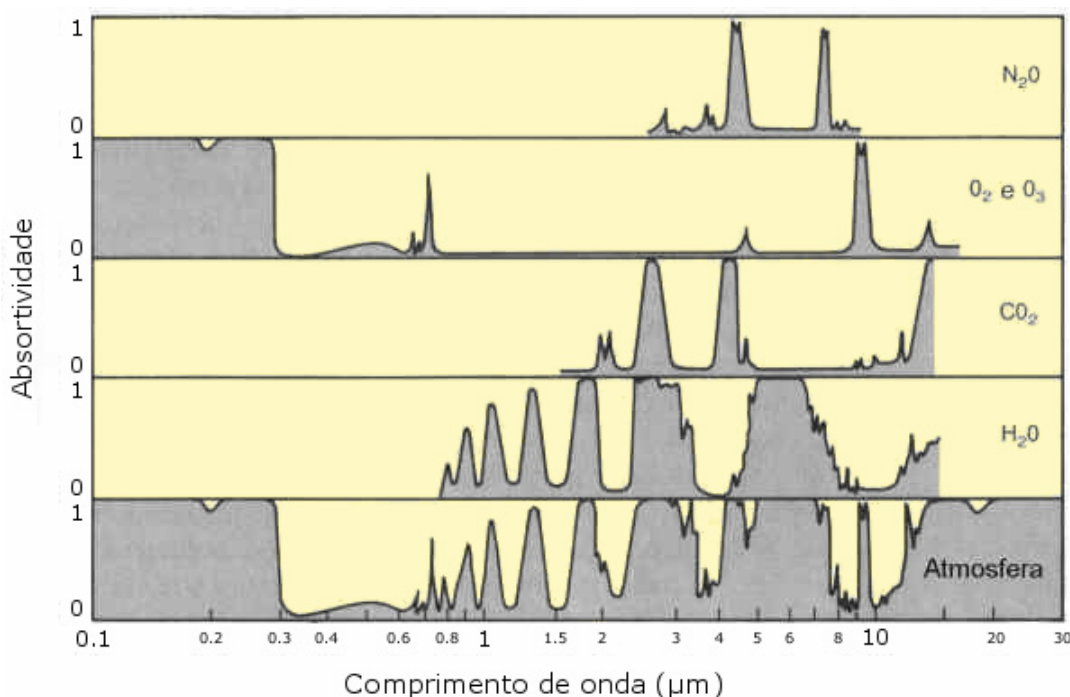


Figura 2 – Absortividade atmosférica, em cinza, segundo os seus principais constituintes. Modificado de Grimm (1999).

Em função disso, na sequência deste trabalho serão abordados apenas as características e processos relevantes às imagens orbitais adquiridas no espectro ótico refletivo, especificamente na região do visível e infravermelho próximo, pela sua importância nas análises sobre sedimentos em suspensão na água.

Quadro 1 - Definição das faixas espectrais do visível, infravermelho e microondas.

Região do Espectro				Comprimento de Onda (µm)
E S P E C T R O Ó T I C O	R E F L E T I V O	VISÍVEL	Violeta	0,400 a 0,446
			Azul	0,446 a 0,500
			Verde	0,500 a 0,578
			Amarela	0,578 a 0,592
			Laranja	0,592 a 0,620
			Vermelha	0,620 a 0,700
	T <small>ERMAL</small>	INFRAVERMELHO	Próximo	0,7 a 1,3
			Médio	1,3 a 3,0
			Distante ou Termal	3,0 a 1000
MICROONDAS				1000 a 10 ⁻⁶

Fonte das informações: NOVO (1992).

1.2.2 Interações da REM com a atmosfera

Na região do espectro ótico refletido, a energia eletromagnética, em sua trajetória, atravessa toda a atmosfera duas vezes antes de ser registrada pelos sensores: do sol em direção à superfície e desta em direção ao sensor. Considerando uma situação hipotética, na qual não haveria nenhuma interferência atmosférica, toda a radiação solar alcançaria a superfície da Terra, e uma parte desta energia seria então absorvida e a outra refletida de volta ao espaço, como indica a Figura 3 (VERMOTE et al, 1997 *a*). Entretanto, a atmosfera é um meio extremamente dinâmico, e ao interagir com a radiação, interfere na qualidade e na quantidade de energia solar disponível para o sensoriamento remoto dos recursos terrestres e na intensidade do sinal captado pelo sensor.

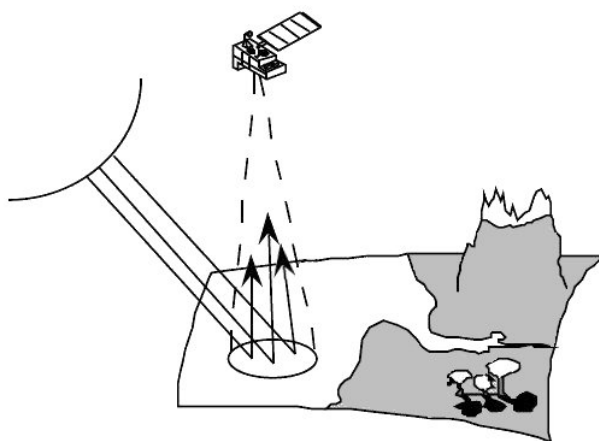


Figura 3 – Esquema hipotético da reflexão da energia eletromagnética pela superfície terrestre. Modificado de Vermote et al (1997 *a*).

Constituída basicamente por um conjunto de gases de concentração permanente, os quais representam mais de 99% de seu volume, outros de concentração variável, e particulados, principalmente aerossóis, a atmosfera provoca perturbações na transmissão da energia solar em função dos processos de absorção e espalhamento.

A absorção é um fenômeno que resulta na perda efetiva de energia para os constituintes atmosféricos, ou seja, a energia radiante é transformada em outro tipo de energia, geralmente calor. Ocorre de forma seletiva de acordo com o comprimento de onda, mas abrange todo o espectro ótico. A Figura 4 ilustra este processo: verifica-se nela que a irradiância solar no topo da atmosfera é muito maior do que ao nível do mar, sendo mesmo desprezível a radiação que alcança à superfície em determinados comprimentos de onda, originando as chamadas “bandas de absorção da atmosfera”. Os principais gases responsáveis pela absorção são o ozônio, vapor d’água, gás carbônico e oxigênio. Destes, merece destaque o vapor d’água, pois é uma importante fonte de absorção da energia radiante e sua concentração é altamente influenciada pelas condições atmosféricas.

O espalhamento corresponde à mudança aleatória da direção de propagação da radiação devido à sua interação elástica com os componentes atmosféricos. Neste processo, a energia é dispersa em todas as direções sem que haja mudança no comprimento de onda. Ocorre desde pequenas moléculas de gases até grandes gotas de chuva e partículas de granizo, sendo que a intensidade do espalhamento está fortemente relacionada com a razão entre o diâmetro das partículas e o comprimento de onda incidente. Assim, de acordo com o tamanho

das partículas, podem ocorrer três tipos de espalhamento: molecular ou Rayleigh, Mie e não seletivo.

O espalhamento Rayleigh ocorre quando o tamanho predominante das partículas é muito menor que o comprimento de onda incidente. É produzido essencialmente pelas moléculas dos gases constituintes da atmosfera e a quantidade de radiação espalhada é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda. Portanto, este efeito decresce rapidamente com o aumento do comprimento de onda, sendo considerado desprezível acima de 1 μm . É o mecanismo de espalhamento dominante na atmosfera superior.

Quando os diâmetros das partículas são da mesma ordem ou próximos ao comprimento de onda da radiação, ocorre o espalhamento Mie. Poeira, fumaça, vapor d'água e pólen são causas comuns deste tipo de espalhamento, que afeta principalmente as porções mais baixas da atmosfera, onde são mais abundantes as partículas maiores. É o tipo de espalhamento dominante quando há poluição devido a queimadas e em metrópoles, principalmente em condição de inversão térmica.

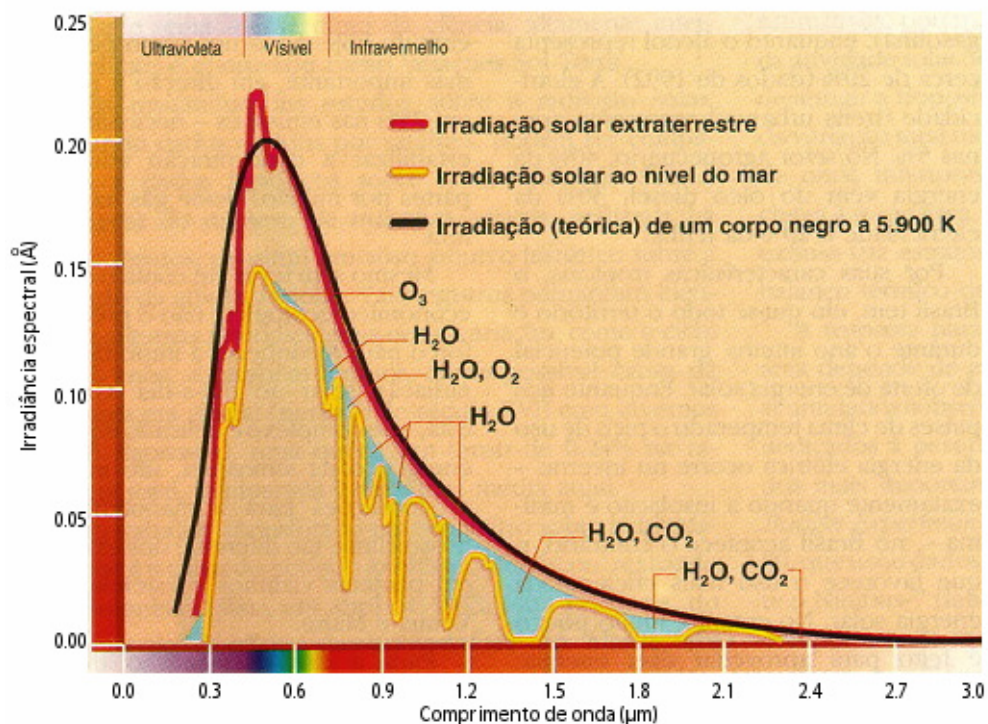


Figura 4 – Curvas de irradiância solar no topo da atmosfera, ao nível do mar, e de um corpo negro, com indicação dos principais componentes responsáveis pela atenuação atmosférica. Fonte: Moraes (2005).

Já o espalhamento não seletivo ocorre quando os diâmetros das partículas são muito maiores que o comprimento de onda da radiação. Nestes casos, o espalhamento se dá com igual intensidade, independente do comprimento de onda. Gotas d'água e partículas grandes de poeira são exemplos de constituintes atmosféricos que causam este tipo de espalhamento.

Como consequência destes processos, ocorre atenuação da energia direta que alcança a superfície terrestre e o sensor, ao mesmo tempo em que se originam outros tipos de radiação incidente e refletida. Com relação à iluminação da superfície, além da radiação direta, há dois tipos de contribuição devido ao espalhamento atmosférico, simbolizados na Figura 5: radiação difusa, a qual consiste na radiação solar que atinge à superfície em um ponto diferente daquele determinado pela sua geometria original, após ter sofrido desvio na atmosfera; e a radiação ambiental, que é refletida pela superfície, mas retorna a ela, em função do bloqueio causado pela atmosfera (LATORRE et al, 2002; ZULLO JUNIOR, 1994).

Com relação ao sinal recebido pelo sensor, além da radiação direta, existem duas contribuições devido ao espalhamento, esquematizadas na Figura 6: a componente atmosférica, a qual consiste na radiação solar que é desviada pelos constituintes atmosféricos e alcança o sensor, sem mesmo ter atingido à superfície; e a radiação difusa, que após ser refletida pela superfície, sofre desvio na atmosfera e então chega ao sensor com uma geometria diferente da original (DESCHAMPS et al, 1983; LATORRE et al, 2002; ZULLO JUNIOR, 1994).

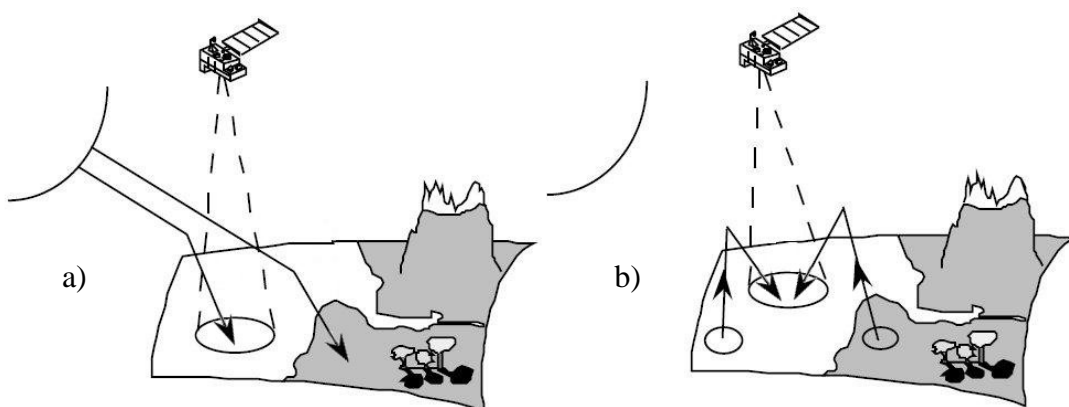


Figura 5 – Contribuições da atmosfera à iluminação da superfície: esquema simplificado. (a) radiação difusa; (b) radiação ambiental. Modificado de Vermote et al (1997 a).

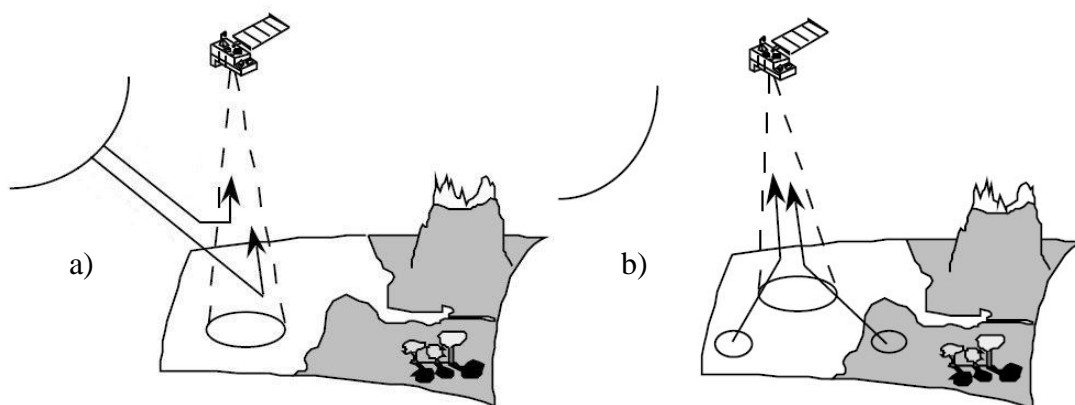


Figura 6 – Contribuições da atmosfera ao sinal recebido pelo sensor: esquema simplificado. (a) componente atmosférica; (b) radiação difusa. Modificado de Vermote et al (1997 a).

Na prática, estes efeitos são complexos e ocorrem simultaneamente. As componentes do efeito atmosférico na irradiância sobre a superfície e na energia que chega ao sensor são mostradas na Figura 7, onde **A** significa absorção e **E** espalhamento. As componentes **A1**, **E1** e **E3** retiram radiação do feixe que incidiria sobre a superfície, enquanto as componentes **E2** e **E6** adicionam radiação ao fluxo incidente, representando, respectivamente, a radiação difusa incidente e a radiação ambiental. O fluxo refletido pela superfície em direção ao sensor é subtraído pelas componentes **A2** e **E4**. Em contrapartida, a radiação refletida pelo alvo na direção do sensor é adicionada pela atmosfera com as componentes **E3**, **E5** e **E6**, sendo **E3** a componente atmosférica e **E5** e **E6** a radiação refletida pelo ambiente em volta do alvo e posteriormente espalhada na direção do sensor.

A magnitude destes processos depende da composição atmosférica e os seus efeitos são dependentes do comprimento de onda. No espectro visível, o processo de absorção não é muito significativo, mas o espalhamento tem grande influência na radiação que alcança o satélite, resultando em um acréscimo no sinal recebido pelo sensor. Já na região do infravermelho refletido, a absorção é o processo dominante. Por representar perda efetiva da energia, este fenômeno atua diminuindo a quantidade de radiação que chega ao sensor (MORAN et al, 1992; CHAVEZ, 1996).

Portanto, observa-se que a radiação captada pelos sensores remotos orbitais contém informação do alvo de interesse mais a influência atmosférica, cujo efeito pode ser um aumento ou diminuição do sinal proveniente do alvo, dependendo do comprimento de onda. Em geral, como na região do visível prevalece o fenômeno do espalhamento, há um

acréscimo no sinal registrado; no infravermelho ocorre o inverso. As principais consequências sobre as imagens são a diminuição da faixa de valores digitais possíveis de serem registrados pelo sensor, a alteração do brilho em cada ponto da imagem e a redução do contraste entre alvos adjacentes (ZULLO JUNIOR, 1994); nos menores comprimentos de onda, a presença de névoa provoca perda de nitidez nas imagens (LATORRE et al, 2002).

Existem ainda outros fatores que influenciam a intensidade do sinal registrado, como as condições de iluminação da cena e a própria configuração do sensor, conforme será abordado em seguida.

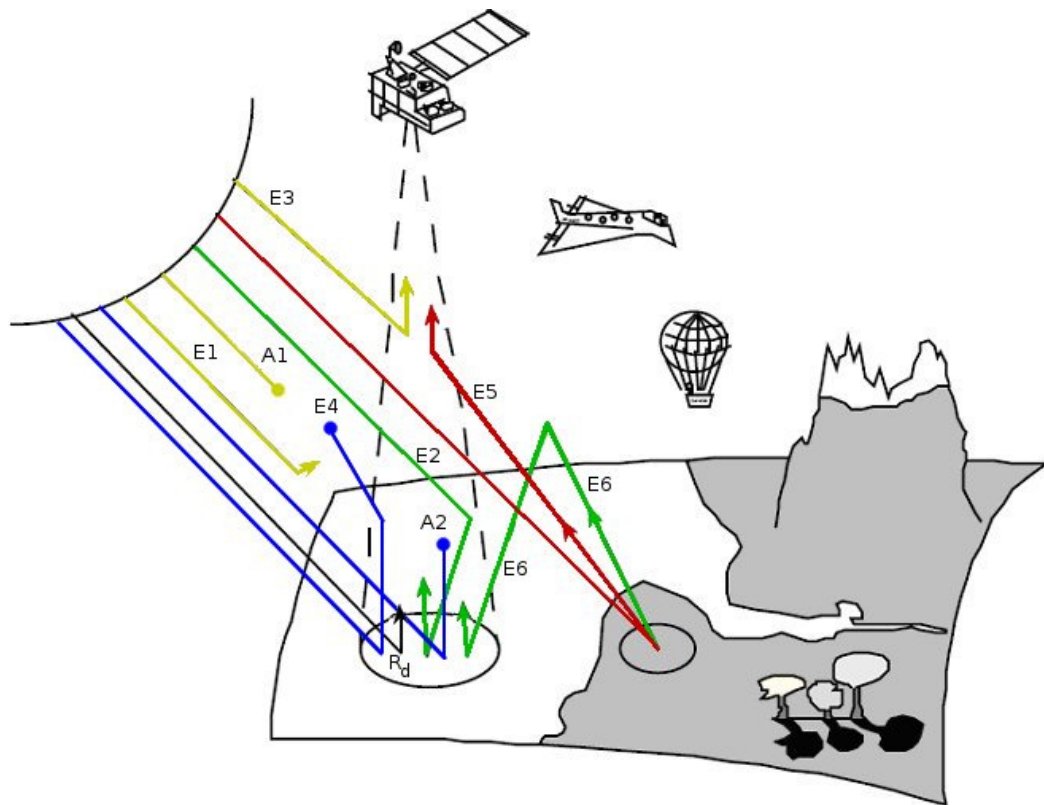


Figura 7 – Esquema geral da interação da radiação com a atmosfera, no percurso sol – atmosfera – sensor, onde A significa absorção e E, espalhamento. As cores indicam diferentes processos: em amarelo, aqueles que retiram radiação do feixe que incidiria sobre a superfície; em verde, os que adicionam radiação ao fluxo incidente na superfície; em azul estão os que retiram radiação do fluxo refletido pela superfície em direção ao sensor. E3, em amarelo, E6, em verde e E5, em vermelho, adicionam radiação na direção do sensor. Modificado de Vermote et al (1997 a).

1.2.3 Grandezas radiométricas e a imagem digital

Em sensoriamento remoto orbital, a maior parte dos sensores são multiespectrais, ou seja, registram a radiação refletida por determinada área da superfície em diferentes faixas do espectro, denominadas canais ou bandas, formando distintas imagens. Estas são compostas por um arranjo de elementos sob a forma de malha ou grade regular, e para a menor unidade de área detectada pelo sensor, conhecida como pixel, é associado um valor numérico inteiro que representa a intensidade da energia refletida na banda correspondente, chamado nível de cinza ou número digital.

O tamanho do pixel e a quantidade máxima possível de números digitais de uma imagem estão relacionados, respectivamente, a sua resolução espacial e radiométrica. A resolução é uma medida da habilidade de um sensor em distinguir entre respostas que são semelhantes: a espacial implica no nível de detalhe observado em uma cena; a radiométrica depende da sensibilidade dos detectores e refere-se ao número de níveis de cinza utilizados para expressar os dados coletados (NOVO, 1992).

Assim, as imagens apresentam a radiação registrada pelo sensor de forma adimensional, a partir do nível de cinza ou número digital (ND), conhecido também como valor de brilho. Para transformá-lo em uma grandeza física, como radiância e reflectância, é necessário realizar cálculos que consideram um conjunto de variáveis relacionadas às características do sensor e às condições de iluminação no momento de aquisição da imagem. Deste modo, a radiância e a reflectância consideram fatores que interferem na intensidade do sinal detectado, mas continuam incluindo a interferência atmosférica, caso não sejam realizados procedimentos específicos para corrigi-la. Quando estas grandezas incluem a mistura de sinal da atmosfera e da superfície, denominam-se *aparente* ou *planetária*; quando se referem exclusivamente ao alvo, são chamadas *de superfície*.

Na prática, para se calcular a radiância aparente é necessário conhecer os parâmetros de configuração do sensor utilizado, válidos para o momento de aquisição da cena. Tais parâmetros são determinados pela engenharia e calibração do sensor e estão relacionados aos valores máximos e mínimos capazes de ser detectados em cada banda. Portanto, a fórmula e

os parâmetros são específicos para cada equipamento e devem ser fornecidos pelo órgão responsável pelo satélite.

Já o cálculo da reflectância aparente é mais complexo, pois inclui um conjunto de variáveis que influem na iluminação da superfície terrestre no momento da passagem do satélite, tais como: ângulo de elevação solar, ângulo zenital solar, distância Terra-sol em unidades astronômicas, valor médio da irradiância solar total no topo da atmosfera em cada banda espectral, dia do ano, além dos parâmetros de configuração citados acima.

1.2.4 Correção Radiométrica

Desde o lançamento do primeiro satélite não tripulado de sensoriamento remoto dos recursos terrestres, o ERTS-1³ (*Earth Resources Technology Satellite*), em 1972, vários outros foram desenvolvidos e postos em órbita através de programas espaciais de diferentes países ou consórcios entre países (MOREIRA, 2003; FLORENZANO, 2002). Hoje, mais de trinta e cinco anos depois, dispõe-se de uma ampla base histórica de imagens da superfície terrestre, a qual possui um valor inestimável face à realidade ambiental contemporânea.

Com sistemas sensores cada vez mais aprimorados, expandiram-se consideravelmente as possibilidades de utilização dos dados oriundos dos satélites de observação da Terra. A resolução espacial, que inicialmente representava uma importante limitação ao uso das imagens orbitais em várias pesquisas, devido à incompatibilidade entre a superfície imageada e a escala do fenômeno de interesse, foi sendo aperfeiçoada, abrindo campo a novas aplicações.

Adicionalmente, a evolução dos sistemas de processamento de imagens, estreitamente ligada ao desenvolvimento da informática, contribuiu significativamente para a maior difusão do uso do sensoriamento remoto. Adquiriu-se vasto conhecimento científico e tecnológico no que se refere à análise das imagens; as técnicas para manipulação visando à extração de informações facilitaram e aceleraram em todos os aspectos o trabalho do analista.

³ Após o lançamento do ERTS-1, o programa foi rebatizado para Landsat.

Este emprego crescente do sensoriamento remoto orbital pela comunidade científica beneficia a sociedade de forma geral, fornecendo informações objetivas e confiáveis sobre o meio ambiente. Destas pesquisas, muitas se baseiam em análises de determinados fenômenos ao longo do tempo, seja no intervalo de anos, seja em diferentes períodos no mesmo ano (GÜRTLER et al, 2003; MOREIRA et al, 2005). Algumas atividades, como o monitoramento ambiental, necessitam de acompanhamento periódico. Nestes casos, tem fundamental importância a frequência temporal com que as imagens são adquiridas.

Uma alternativa viável para aumentar a frequência de observação dos alvos é a utilização de imagens adquiridas por diferentes sensores (MOREIRA et al, 2005). Entretanto, sabe-se que o valor de radiância registrado e apresentado na imagem como nível de cinza não se refere somente ao alvo, tendo interferências causadas pelos efeitos atmosféricos, pelas condições de iluminação da cena e pelas próprias características do sistema sensor. Desta forma, em determinadas aplicações de sensoriamento remoto utilizando dados multi-temporais torna-se imprescindível à realização de procedimentos que ajustem a radiometria de diferentes imagens, a fim de torná-las comparáveis (CHAVEZ, 1996; LIANG et al, 2001).

Com efeito, imagens obtidas em datas distintas apresentam-se sob diferentes condições atmosféricas e de iluminação, tendo contribuições diferentes de cada um destes fatores. Caso tenham sido adquiridas por sensores diversos tem-se ainda mais um aspecto que afeta os valores registrados. Mas a realização de correções radiométricas visando eliminar ou diminuir a interferência de tais fatores não é um procedimento rotineiro nos trabalhos envolvendo análise de dados orbitais (MOREIRA, 2003), nem mesmo nas abordagens multi-temporais. Ainda nestes casos, depende exclusivamente da finalidade das pesquisas efetuadas e dos métodos analíticos utilizados para extrair a informação (SONG et al, 2001).

Correções radiométricas serão indispensáveis em análises quantitativas de dados e na caracterização espectral de alvos, em todas as circunstâncias: uma ou múltiplas imagens, vários sensores ou não (HALL et al, 1991). Nestas aplicações precisa-se conhecer a refletância de superfície; como a radiação detectada pelo sensor inclui os efeitos atmosféricos, é necessário estimá-los para então obter informação unicamente do alvo. São exemplos destas aplicações as estimativas de sedimentos em suspensão em corpos d'água, análises do índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI) em estudos de vegetação, entre muitos outros.

Em geral, para todas as aplicações multi-temporais em que uma escala radiométrica comum deve ser assumida entre as imagens, é fundamental realizar a correção para assegurar a comparabilidade dos alvos (SONG et al, 2001). Somente deste modo os valores apresentados em datas diferentes terão o mesmo significado. O mapeamento qualitativo de sedimentos em suspensão em corpos d'água é uma destas aplicações.

Song et al (2001) enumeram uma série de situações nas quais a correção radiométrica não é necessária em análises de classificação e detecção de mudanças. Entre elas estão os casos onde múltiplas imagens são classificadas individualmente e os mapas resultantes são comparados para identificar mudanças. A idéia básica é: se os dados de treinamento são derivados da imagem que está sendo classificada, a correção pode ser dispensada. A partir deste raciocínio, verifica-se ser desnecessária a correção radiométrica em estudos multi-temporais onde a informação de interesse é o limite da pluma de sedimentos.

Pelo caráter fundamental da correção radiométrica em determinadas pesquisas, este tema tem sido bastante pesquisado na literatura (HALL et al, 1991). Entretanto, há uma certa discordância nos termos utilizados, e por não ser um procedimento trivial no processamento de imagens orbitais, isto dificulta sobremaneira a sua compreensão e até mesmo a escolha de um método adequado. Assim, para evitar conflitos que conduzam a interpretações equivocadas, adotou-se neste trabalho a nomenclatura que pareceu mais conveniente, a qual será devidamente explicada.

O termo correção radiométrica tem sido empregado de forma genérica para designar o conjunto de correções indispensáveis quando se deseja eliminar, ou ao menos uniformizar, conjuntamente, as influências causadas pela atmosfera, pelas características do sensor e pelas condições de iluminação. Como já foi descrito anteriormente, o cálculo da radiância deve suprimir a interferência do sensor, e para isso é necessário conhecer os seus parâmetros de calibração. Já a determinação da reflectância aparente deve anular, além da interferência do sensor, as condições de iluminação no local e data de aquisição da imagem. E, finalmente, o cálculo da reflectância de superfície, realizado através de métodos específicos de correção atmosférica, deve eliminar todas as influências, referindo-se exclusivamente ao alvo.

Destas influências, a mais difícil de se avaliar é a atmosférica. A modelagem da interação da radiação solar com a atmosfera é bem compreendida (HALL et al, 1991; SONG

et al, 2001); entretanto, estimar a participação de cada componente atmosférico é um processo complexo, pois requer o conhecimento das propriedades óticas da atmosfera no local e data de aquisição da imagem.

Assim, se a necessidade da correção radiométrica depende dos objetivos da aplicação, a escolha do método deve considerar também os dados necessários em cada um deles (SONG et al, 2001). Em geral, as correções atmosféricas podem ser realizadas através de códigos de transferência radiativa (RTCs – *radiative transfer codes*) ou de métodos empíricos (MATHER apud ANTUNES et al, 2003). Os modelos de transferência radiativa, como o próprio nome anuncia, são embasados na teoria de transferência radiativa e provêem estimativas realísticas da reflectância de superfície. No entanto, alguns parâmetros de entrada referentes a dados de campo são requeridos, sendo esta a grande dificuldade na utilização de tais modelos. Já os métodos empíricos baseiam-se em informações contidas apenas na imagem digital (HALL et al, 1991; SONG et al, 2001).

Segundo Chavez (1988), os métodos que utilizam outras informações, além da própria imagem, são mais acurados em termos de correção dos efeitos atmosféricos. Antunes et al (2003) compartilham desta idéia, afirmando que os modelos de transferência radiativa permitem um melhor embasamento físico nas correções. Outros autores ratificam este conceito (HALL et al, 1991; SONG et al, 2001, ZULLO JUNIOR, 1994), enfatizando a qualidade dos resultados obtidos por intermédio dos códigos de transferência radiativa. A única ressalva, enfatizada pela maioria dos autores, é a necessidade de dados auxiliares de campo.

Como resultado das pesquisas realizadas nas últimas décadas, existem vários códigos computacionais para correção atmosférica de imagens de satélite baseados na teoria de transferência radiativa. De acordo com Latorre et al (2002), os mais difundidos são: LOWTRAN (*Low Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*), MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*), 5S (*Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*) e 6S (*Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*). O LOWTRAN e o MODTRAN foram desenvolvidos pela *Air Force Geophysics Laboratory* e sofreram várias atualizações ao longo dos anos para otimizar seu desempenho; como estes códigos requerem a obtenção de licenças de uso, não serão abordados com detalhes neste trabalho.

Já os códigos 5S e 6S foram desenvolvidos em 1987 e 1997, respectivamente, pelo *Laboratoire d'Optique Atmosphérique* (LOA) da Universidade de Lille, na França, e apresentam a grande vantagem de serem gratuitos. O modelo 6S (VERMOTE et al, 1997 *b*) é uma versão aperfeiçoada do 5S (TANRE et al, 1990), e ambos foram adaptados no Brasil: Zullo Júnior (1994) desenvolveu o aplicativo SCORADIS (Sistema de Correção Radiométrica de Imagens de Satélites) com base no modelo 5S, e Antunes (2003) disponibiliza o modelo 6S para correções de imagens de sensoriamento remoto.

O código 6S foi desenvolvido para estimar o sinal recebido por sensores remotos no espectro solar (entre 0,25 e 4,00 μm), e modela os efeitos atmosféricos tendo como base as seguintes características: aproximações acuradas da absorção por gases atmosféricos, tratamento completo do processo de espalhamento e um tratamento aproximado da interação entre os dois efeitos. Inicialmente, o sinal do sensor é estimado sem a absorção dos gases; se a banda espectral exibir alguma contaminação, o sinal é então corrigido por um fator de correção (VERMOTE et al, 1997 *b*). Esta versão apresenta melhorias na acurácia e nas aplicações de campo, podendo simular observações a partir de aeronaves, considerar alvos elevados e condições de superfície não-lambertianas. Além disso, inclui novos gases na computação da transmissão gasosa e melhora a acurácia no cálculo dos efeitos de espalhamento por gases e aerossóis usando aproximações do estado-da-arte e implementações de ordens sucessivas do algoritmo de espalhamento (VERMOTE et al, 1997 *a*; VERMOTE et al, 1997 *b*).

A escolha da configuração geométrica de satélites específicos é feita informando-se unicamente o sensor utilizado para aquisição da imagem, e um conjunto de parâmetros de entrada deve ser fornecido para a realização da correção. A maior parte deles é relativamente simples de se obter; as condições de iluminação, por exemplo, são obtidas a partir da data, hora e das coordenadas da imagem. Os mais complexos são os parâmetros referentes às condições atmosféricas, mas neste caso existe um grupo de modelos pré-estabelecidos como alternativa aos dados de campo, normalmente indisponíveis.

Os métodos empíricos são considerados uma opção aos modelos de transferência radiativa, pois estimam a contribuição da atmosfera a partir de informações da própria imagem, sem utilizar, portanto, dados de campo. A maioria deles está baseada na técnica de subtração do objeto escuro, ou DOS – *dark object subtraction*. O princípio fundamental desta

técnica é a existência de alvos com reflectância muito baixa na cena, próxima de zero, os quais aparecem escuros na imagem e deveriam apresentar um número digital muito baixo. Entretanto, devido aos efeitos atmosféricos, estes alvos aparecem com valores superiores ao real, sendo, portanto, um indicador da contribuição da atmosfera no sinal registrado pelo sensor. Em geral, o valor do número digital mínimo na cena é então atribuído ao espalhamento e a correção é realizada subtraindo este valor a partir de todos os pixels da imagem (CHAVEZ, 1989; SONG et al, 2001; LUIZ et al, 2003; GÜRTLER et al, 2005).

Existem vários métodos que utilizam a técnica de subtração do objeto escuro, e a diferença entre eles ocorre em função de variações no cálculo do espalhamento em cada banda e nas simplificações adotadas em alguns parâmetros na computação da reflectância de superfície, proposto por diferentes autores (SONG et al, 2001; LUIZ et al, 2003). Nesse sentido, um dos métodos mais utilizados foi desenvolvido por Chavez (1988).

Este autor enfatiza que, na maioria dos métodos de subtração do objeto escuro, os valores do espalhamento são definidos de forma independente para cada banda espectral, podendo criar problemas no estágio de análise, pois em realidade o espalhamento é altamente dependente do comprimento de onda na parte visível do espectro eletromagnético. Esta falta de conformidade pode superestimar a correção em algumas ou em todas as bandas espectrais. Por esta razão, Chavez (1988) propõe um modelo para o cálculo do espalhamento relativo em cada banda, partindo apenas do valor do número digital mínimo da banda de menor comprimento de onda. Este valor deve ser selecionado através do método do histograma e é utilizado como um guia para identificar o tipo de condição atmosférica existente durante a aquisição da imagem, que determina então o expoente do modelo de espalhamento em cada banda espectral.

Na abordagem proposta por Chavez (1988), são definidos cinco modelos de espalhamento relativo, com base nas características do tipo predominante de espalhamento em cada condição atmosférica, a saber: muito clara, clara, moderada, com bruma e com muita bruma. Após a definição do modelo, os valores de espalhamento devem ser ajustados para os diferentes ganhos e *offsets* utilizados pelo sistema sensor, e através de uma sequência de cálculos é determinada a reflectância de superfície (CHAVEZ, 1988).

É importante considerar que tanto os códigos de transferência radiativa como os métodos empíricos constituem-se métodos de correção atmosférica absoluta, onde o número digital é convertido em reflectância de superfície no final do processo (SONG et al, 2001). Entretanto, enquanto os primeiros são embasados física e teoricamente, os métodos empíricos adotam procedimentos simplificados para avaliar os efeitos atmosféricos e, por isso, podem apresentar erros elevados na determinação do valor de reflectância do alvo (MORAN et al, 1992; ZULLO JÚNIOR, 1994). Nesse sentido, as técnicas de subtração do objeto escuro apresentam uma importante restrição: elas não consideram o processo de absorção atmosférica (CHAVEZ, 1988). Portanto, estes métodos apresentam limitações no que se refere às possibilidades de aplicação, e a escolha de qualquer um deles deve considerar a informação de interesse e as bandas espectrais utilizadas para obtê-la.

Antunes et al (2003) realizaram uma pesquisa onde o desempenho do modelo 6S foi avaliado comparando-se a reflectância aparente, a reflectância de superfície e as curvas teóricas de reflectância de cinco alvos selecionados a partir de duas imagens, uma do Landsat 5 e outra do Landsat 7. Os resultados foram interessantes: em todos os casos, a reflectância de superfície estimada pelo modelo está de acordo com o comportamento esperado para o alvo. Para a água de reservatório, a análise dos gráficos indica claramente que a curva de reflectância planetária não foi capaz de detectar o aumento de reflectância na banda 2, em decorrência da maior concentração de clorofila, enquanto a reflectância da imagem corrigida detecta este fenômeno. Já nos gráficos de vegetação, é possível observar o efeito aditivo nas bandas do visível, onde a atmosfera adiciona radiação e a correção, conseqüentemente, diminui os valores de reflectância de superfície, em relação à reflectância aparente; e o efeito inverso nas bandas do infravermelho, onde a atmosfera retira radiação como efeito do processo de absorção, e a imagem corrigida apresenta um aumento nos valores de reflectância. Esta observação ratifica a limitação dos métodos de subtração do objeto escuro, comentadas acima.

Na pesquisa realizada por Moran et al (1992), alguns procedimentos de correção atmosférica foram avaliados e testados, incluindo códigos de transferência radiativa com condições atmosféricas simuladas, métodos baseados na imagem e a técnica de subtração do objeto escuro. O experimento contou com dados espectrais simultâneos adquiridos por satélite, aeronave e em campo em sete datas no período de um ano. Os parâmetros atmosféricos de entrada nos RTCs foram mensurados durante cada passagem do satélite, e o

valor de reflectância assim calculado foi assumido como o mais acurado, sendo a base das comparações realizadas na pesquisa. Os resultados obtidos demonstram a importância da utilização de códigos de transferência radiativa para calcular a reflectância de superfície. O uso de condições atmosféricas pré-estabelecidas nestes modelos teve um desempenho surpreendentemente próspero, sendo uma alternativa interessante para aplicações de sensoriamento remoto em que não se possuem dados atmosféricos disponíveis. Já a técnica DOS foi a menos acurada, produzindo grandes erros na estimativa da reflectância de superfície no infravermelho próximo. Assim, estes autores também enfatizam a importância da seleção de um método que se ajuste às bandas espectrais utilizadas nas análises.

Em contrapartida, Song et al (2001) compararam sete métodos absolutos de correção atmosférica em um conjunto de imagens multi-temporal do satélite Landsat 5, visando aplicações de classificação e detecção de mudanças, nas quais a correção é necessária. Os resultados indicam que todas as correções melhoraram a acurácia e, contrariamente às expectativas, os algoritmos mais complicados não conduzem necessariamente a melhorias no desempenho das técnicas de classificação e detecção de mudanças. Desta forma, o autor recomenda o método de subtração do objeto escuro, bem como outros métodos simples, em aplicações onde o valor de reflectância de superfície não é necessário. Os resultados encontrados confirmam a dependência existente entre o método de correção atmosférica e a aplicação de interesse.

Além dos procedimentos de correção radiométrica absoluta, discutidos acima, existem métodos relativos que visam uniformizar o valor do número digital entre diferentes imagens. Nestes casos, é como se a imagem tivesse sido adquirida pelo mesmo sensor, em condições iguais de iluminação e atmosfera; assim, elas não são corrigidas realmente dos efeitos atmosféricos e da influência do sensor, mas sim uniformizadas entre si. O mesmo número digital representa a mesma reflectância em qualquer imagem, mas este valor não representa a reflectância real do alvo (HALL ET AL, 1991; SONG et al, 2001).

Estes procedimentos ajustam a radiometria de diferentes imagens, tornando-as comparáveis, e são particularmente úteis em situações nas quais não se conhecem os parâmetros de calibração do sensor. Nenhum dado é necessário além da própria imagem. Entretanto, as suas possibilidades de aplicação também são limitadas, dependendo dos objetivos da pesquisa.

A correção atmosférica relativa é baseada na hipótese de um relacionamento linear entre as bandas de diferentes imagens de determinada área ao longo do tempo, o qual pode ser determinado a partir de medidas radiométricas de alvos pseudo-invariantes. Estes alvos são objetos bem definidos espacialmente e radiometricamente estáveis (GÜRTLER et al, 2003; SONG et al, 2001). A partir deste conceito, várias técnicas foram desenvolvidas utilizando diferentes formas de calcular esta relação entre bandas e localizar as feições pseudo-invariantes na cena. Neste trabalho será comentada apenas a técnica proposta por Hall et al (1991), devido a sua ampla aplicação em pesquisas acadêmicas.

Denominada pelos autores como *retificação radiométrica*, o algoritmo desenvolvido por Hall et al (1991) baseia-se na transformação linear *Tasseled Cap* para facilitar a localização de áreas pseudo-invariantes nas cenas, e nas médias dos conjuntos de pontos de controle para calcular a retificação. A sua suposição fundamental é que os extremos não vegetados do histograma verdor-brilho (greenness-brightness) de *Kauth-Thomas* (KT) sempre contém no mínimo alguns pixels com a mesma reflectância de superfície média entre imagens. A *retificação radiométrica* é realizada sempre com duas imagens, sendo uma delas definida como referência, banda a banda.

Desta forma, inicialmente são geradas as imagens verdor e brilho para cada banda das duas datas, e através da análise do gráfico de dispersão destas imagens selecionam-se os membros dos conjuntos dos pontos de controle, claros e escuros. Com o cruzamento das imagens verdor e brilho de pontos claros tem-se uma nova imagem, e o mesmo é feito com as imagens verdor e brilho de pontos escuros. Finalmente, a partir destas imagens resultantes de pontos claros e escuros para cada data, são extraídas as médias dos valores dos conjuntos de pontos de controle, utilizadas na transformação linear responsável pela *retificação* (HALL et al, 1991; MOREIRA, 2003; SILVA et al, 2003).

Com a utilização de métodos de correção radiométrica relativa, as imagens são corrigidas relativamente à imagem selecionada como referência, homogeneizando as condições entre cenas. Hall et al (1991) sugerem que todas as imagens podem ser corrigidas para reflectância de superfície usando a *retificação radiométrica* se a imagem de referência for corrigida dos efeitos atmosféricos através de algum método de correção absoluta. Para isso, será necessário transformar o valor de número digital de todas as imagens para

reflectância aparente, exceto a imagem referência, que deve ser transformada em reflectância de superfície, antes da aplicação desta técnica.

Uma pesquisa realizada por Pereira et al (2007) comparou os valores de albedo e de reflectância de superfície em duas datas distintas, obtidos a partir de dois métodos: todas as imagens corrigidas individualmente com o modelo 6S e a utilização do método de retificação radiométrica (HALL et al, 1991), com a eleição de uma outra imagem para referência, corrigida através do 6S. Dados de campo foram mensurados e serviram como verdade terrestre. Os resultados indicam que os valores de albedo e reflectância de superfície estimados pelo modelo 6S foram bem próximos àqueles mensurados em campo para ambas as imagens. Já no caso da técnica proposta por Hall et al (1991), os desvios relativos aos dados de campo foram bem altos.

Novamente enfatiza-se que a escolha de uma das técnicas apresentadas, absolutas ou relativas, deve ser fundamentada nos objetivos do trabalho e nas técnicas e bandas utilizadas para extrair a informação de interesse. Todas possuem vantagens e desvantagens, e a primeira questão a ser avaliada é se o valor de reflectância do alvo é importante nas análises, ou se avaliações quantitativas serão realizadas. Se for este o caso, todo rigor deve ser considerado na definição do método, que deve ser acurado para este fim. Além disto, ressalta-se que a aplicação de métodos de normalização radiométrica não é necessária se as imagens tiverem sido corrigidas individualmente dos efeitos atmosféricos através de procedimentos de correção absoluta.

1.2.5 Sensoriamento remoto de sistemas aquáticos

1.2.5.1 Aspectos gerais

Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto tornou-se uma importante ferramenta no conhecimento da paisagem, e uma série de informações úteis sobre os ambientes aquáticos pode ser extraída a partir de imagens de satélite, inclusive com diversos parâmetros de qualidade da água sendo estudados através de técnicas de processamento de dados de sensores

remotos (RIMMER et al, 1987). Entretanto, os sistemas aquáticos apresentam determinadas especificidades que tornam mais complexa a utilização dos dados provenientes de sensores orbitais, e algumas dificuldades de natureza tecnológica fazem com que tais aplicações sejam ainda bem reduzidas (NOVO, 2001).

Com relação às aplicações terrestres, o sensoriamento remoto da água apresenta as seguintes peculiaridades, as quais serão vistas com mais detalhes adiante: possui modelagem inerentemente tridimensional (McCLUNEY, 1976), apresenta reflectância extremamente baixa (CHEN et al, 1992), limita-se a uma faixa relativamente estreita do espectro eletromagnético (NOVO, 2001), é profundamente afetado pela atmosfera (CURRAN e NOVO, 1988), tem maior heterogeneidade espacial e temporal e seus constituintes encontram-se simultaneamente no ambiente (NOVO, 2001).

Enquanto em alvos terrestres a reflectância da onda eletromagnética é normalmente modelada como um evento bidimensional de espalhamento simples, em sistemas aquáticos ela é modelada de forma tridimensional, e envolve muitas ordens de espalhamento múltiplo dentro do corpo d'água (McCLUNEY, 1976). Em consequência, a radiação que alcança o sensor apresenta componentes da reflexão da radiação direta e difusa que atinge a superfície, da radiação espalhada pela atmosfera e da radiação proveniente do interior da massa d'água. De acordo com as características do meio aquático, pode haver ainda influência do fundo neste último componente.

Em função da reflectância da água ser muito baixa, e limitada a uma faixa relativamente estreita do espectro – justamente em comprimentos de onda bastante afetados pelo espalhamento atmosférico – torna-se bem mais crítica a influência da atmosfera em aplicações de sensoriamento remoto orbital em ambientes aquáticos, comparativamente a outras áreas de aplicação (CURRAN e NOVO, 1988). Existem dados indicativos de que até 90% do sinal registrado pelo sensor sobre um corpo d'água resultam de interferência atmosférica, conforme citam diversos pesquisadores (NOVO, 2001; CURRAN e NOVO, 1988; BARBOSA, 2005; MANTOVANI, 1993).

Ainda no que se refere à baixa reflectância da água, outra dificuldade está relacionada à sensibilidade radiométrica dos sistemas detectores, que muitas vezes não conseguem registrar as mudanças na composição do sistema aquático (NOVO, 2001). Além disso, os

componentes da água detectáveis por sensoriamento remoto encontram-se simultaneamente no ambiente, e todos estes aspectos reunidos dificultam a interpretação e a extração de informações nas imagens de satélite (CURRAN e NOVO, 1988).

No tocante à utilização desta tecnologia de forma operacional em corpos d'água, permanecem alguns desafios metodológicos relacionados principalmente a frequência de aquisição de dados com resolução espacial adequada, face à dinâmica destes ecossistemas, e a obtenção de imagens livres de cobertura de nuvens, como afirma Barbosa (2005).

Apesar destas dificuldades na aplicação de dados de sensoriamento remoto na água, esta tecnologia oferece uma oportunidade inigualável de conhecer e compreender melhor os sistemas aquáticos, haja vista a escassez de informações sobre estas áreas, cujo monitoramento através de técnicas tradicionais configura-se bastante difícil e dispendioso.

Assim, os próximos itens apresentam a interação da radiação eletromagnética com o meio e as propriedades óticas da água e seus constituintes, já que este conhecimento é indispensável para extrair informações do ambiente aquático e inferir sobre os seus parâmetros de qualidade, de forma remota.

1.2.5.2 Conceitos básicos de óptica hidrológica

Conforme mencionado, a reflectância da onda eletromagnética em ambientes aquáticos é inerentemente tridimensional. Para fins explicativos, a Figura 8 representa esta interação de forma bastante simplificada: a energia que alcança à superfície da água, seja ela por radiação direta (1) ou difusa (3), é parcialmente refletida (2) e parcialmente transmitida para o interior da massa d'água (4). Esta energia transmitida será então absorvida e espalhada internamente, sendo que parte deste fluxo espalhado emerge da coluna d'água após atravessar a interface água/ar (5).

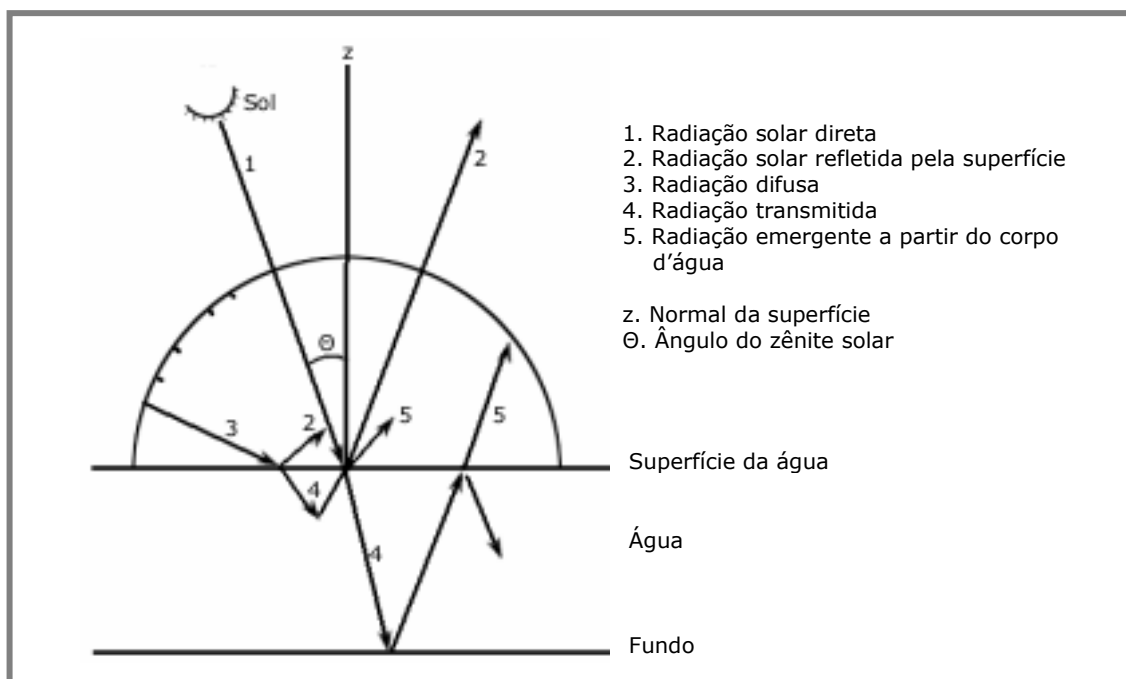


Figura 8 – Interação da radiação eletromagnética com a água. Fonte: Novo et al (1989 *b*).

Desta forma, o fluxo de radiação que penetra o meio aquático está sujeito a dois processos básicos – absorção e espalhamento, os quais atenuam a sua propagação na coluna d’água e estão intimamente relacionados à composição do sistema aquático. Quantificados através dos coeficientes de absorção e espalhamento, estes processos correspondem às propriedades ópticas inerentes da água, pois seus valores dependem exclusivamente das características do meio.

A absorção ocorre de forma seletiva e responde pela limitação das aplicações de sensoriamento remoto a uma estreita faixa do espectro eletromagnético. Considerando o espectro de absorção da água pura, os menores coeficientes ocorrem na região do visível, aumentando rapidamente na região do infravermelho próximo, como indica a Figura 9. Combinada à baixa irradiância solar em comprimentos de onda menores que 400 nm, a faixa disponível para estudos na água limita-se entre 400 nm e aproximadamente 800 nm.

Já o espalhamento promove a mudança de direção da radiação descendente, ou seja, aquela que penetra o corpo d’água, e o seu coeficiente pode ser definido, simplificadamente, como a integração da energia espalhada em todas as direções por um volume unitário de água (NOVO, 2001). Tem uma componente de radiação ascendente – espalhada na direção oposta à de incidência, e uma componente descendente ou frontal – espalhada na direção incidente.

A primeira, denominada retroespalhamento, é responsável pela formação de um fluxo de energia emergente em direção à superfície, sendo, portanto, a que mais interessa ao sensoriamento remoto.

Destas propriedades decorrem outras duas, quais sejam a função de atenuação de volume e a função de espalhamento de volume. A primeira é uma medida da perda do fluxo radiante por absorção e espalhamento em determinado comprimento de onda, e permite inferir a espessura da camada superficial sobre a qual podem ser extraídas informações de interesse. Ao penetrar na coluna d'água, a quantidade inicial de radiação eletromagnética vai sendo atenuada na medida em que o feixe é transmitido para as camadas mais profundas, e a radiação transmitida decresce exponencialmente com a distância percorrida. Já a segunda considera a forma e a distribuição angular do fluxo de luz resultante do processo de espalhamento primário, pois a penetração e a configuração do campo de luz em determinado meio dependem não apenas do coeficiente de espalhamento, mas também destes fatores (BARBOSA, 2005).

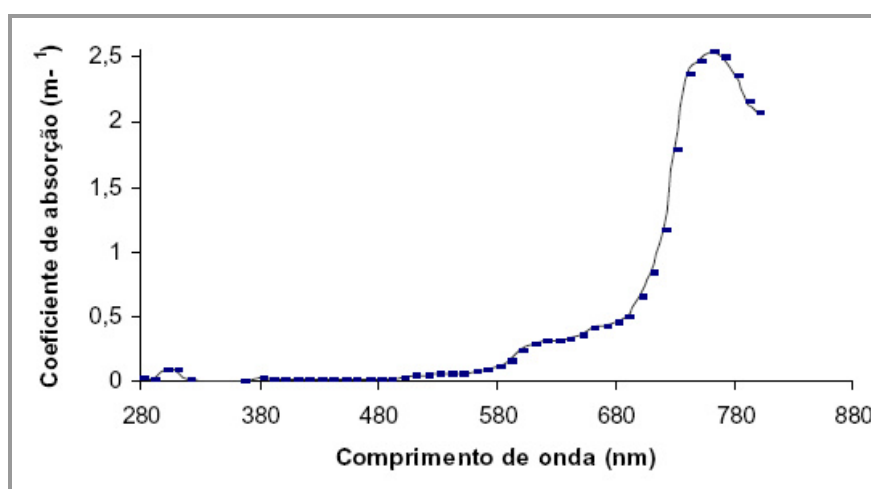


Figura 9 – Espectro de absorção da água pura. Fonte: INPE (2001).

A magnitude de todas as propriedades descritas acima para cada comprimento de onda depende do tipo, concentração e composição das substâncias presentes no corpo d'água. Portanto, mudanças em sua composição e flutuações nas concentrações de seus constituintes ocasionam mudanças em suas propriedades óticas inerentes, as quais, por sua vez, afetam a reflectância e outras propriedades óticas aparentes, como indica a Figura 10. Estas últimas são assim denominadas porque sofrem influência tanto das substâncias que compõem o sistema

aquático quanto do campo de luz ambiente, e a grandeza detectada pelo sistema sensor está inserida neste conjunto. Os dois grupos de propriedades – inerentes e aparentes – relacionam-se segundo fórmulas específicas, sendo o fluxo de energia detectado pelo sensor diretamente proporcional ao coeficiente de retroespalhamento da água e inversamente proporcional ao seu espectro de absorção.

Assim, os constituintes da água podem ser inferidos de forma remota a partir do sinal registrado pelo sensor através da mudança que ocasionam no espectro de reflexão da água pura. Disso decorre que muitos componentes da água não podem ser detectados por este recurso, uma vez que não afetam o comportamento ótico do meio aquático. Os constituintes passíveis de detecção por sensoriamento remoto são denominados *substâncias opticamente ativas* e incluem três categorias: os organismos vivos; as substâncias orgânicas dissolvidas e as partículas em suspensão. Para inferir propriedades do corpo d'água é necessário, portanto, conhecer os principais efeitos específicos de cada substância em seu espectro de reflexão.

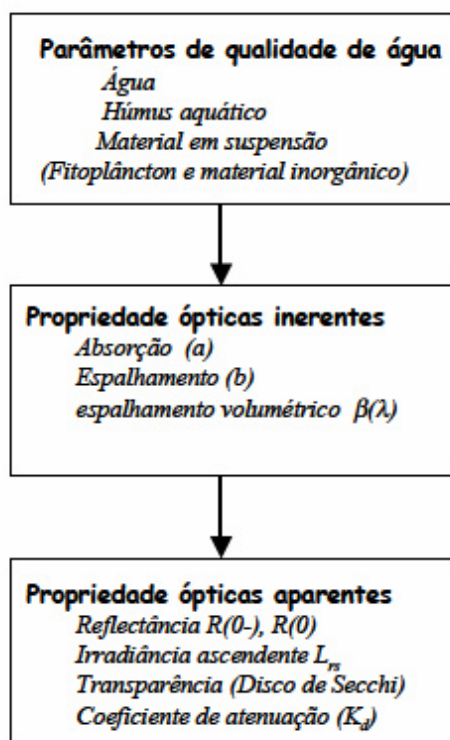


Figura 10 – Relacionamento entre os parâmetros de qualidade da água e as propriedades óticas.
Fonte: Barbosa (2005).

1.2.5.3 Propriedades espectrais da água e seus constituintes

As substâncias opticamente ativas encontram-se simultaneamente no ambiente natural, em variadas proporções, afetando as propriedades espectrais da água pura. A matéria orgânica dissolvida é constituída por um conjunto de substâncias provenientes da excreção, secreção e decomposição de organismos terrestres e aquáticos, sendo conhecida também por várias outras denominações, tais como substâncias húmicas ou substâncias amarelas (MANTOVANI e NOVO, 1996). Já os organismos vivos incluem o fitoplâncton, zooplâncton e bacterioplâncton (NOVO, 2001), dentre os quais o fitoplâncton compreende os organismos fotossintetizantes que flutuam nos corpos d'água, ocupando papel de destaque no ecossistema (LONDE, 2005). Finalmente o material particulado em suspensão inclui componentes inorgânicos – as partículas minerais, e orgânicos – detritos ou matéria orgânica morta, e já foi previamente descrito neste capítulo.

São estes os constituintes da água que podem ser detectados por sensoriamento remoto através da mudança que ocasionam nas propriedades espectrais da água pura. Para identificá-los, é necessário, portanto, conhecer inicialmente as características espectrais da água pura e o efeito de cada um deles em seu espectro de reflexão.

O coeficiente de absorção da água pura é mínimo na região do azul, e aumenta significativamente à medida que se aproxima do infravermelho próximo. Já o coeficiente de espalhamento apresenta um comportamento contrário: é máximo no azul e diminui exponencialmente em direção ao infravermelho (Figura 11). Na água pura, o espalhamento é causado por pequenas flutuações de densidade devido à oscilação contínua e aleatória das moléculas, e pode ser modelado segundo a teoria de Rayleigh para gases, onde a sua magnitude é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (INPE, 2001).

Como o espectro de reflexão da água pode ser estimado pela razão dos coeficientes de retroespalhamento e absorção, conclui-se que a energia refletida pela água pura é máxima na região do azul e decresce em direção ao vermelho. Estas características espectrais explicam porque a faixa de maior penetração de luz na água e, conseqüentemente, de maior interação da radiação com a coluna d'água localiza-se entre 400 e 500 nm, sendo por esta razão que a

banda do azul é indicada como bastante propícia para estudos em ambientes aquáticos. Explicam ainda a utilização da região do infravermelho para mapear corpos d'água, pois estes aparecem bem escuros nas imagens, sendo máxima a sua distinção com áreas adjacentes.

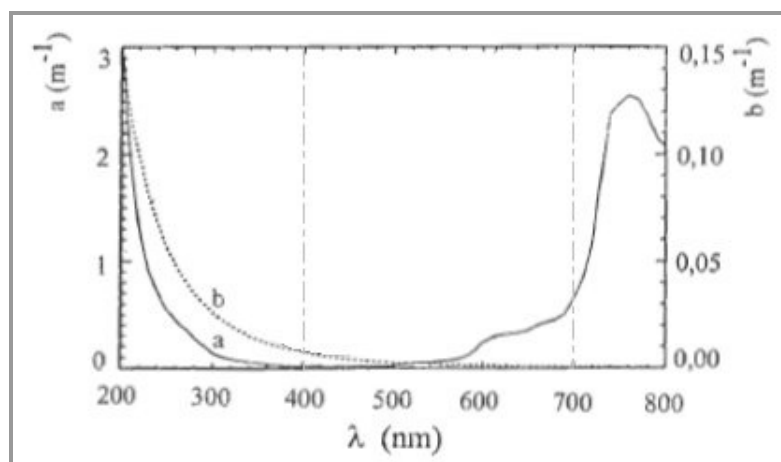


Figura 11 – Curvas dos coeficientes de absorção (a) e de espalhamento (b) da água pura. Verifica-se que a intensidade destes processos é bem distinta, e na região do visível, entre as linhas pontilhadas, e em parte do infravermelho próximo, o comportamento das curvas é inverso. Modificado de Novo (2001).

A presença de fitoplâncton na água causa um aumento na absorção da luz, pois os pigmentos responsáveis pela fotossíntese absorvem seletivamente a radiação que penetra no volume d'água. Os pigmentos fotossintetizadores são as clorofilas, carotenóides e biliproteínas, sendo que a clorofila *a* ocorre em maior abundância e é a principal responsável pela absorção de energia luminosa. As duas principais regiões de absorção por pigmentos localizam-se no azul e no vermelho, onde se encontram, respectivamente, o primeiro e o segundo pico de absorção máxima por clorofila, como se observa na Figura 12. As biliproteínas são exceção, pois apresentam algumas bandas de absorção no verde (NOVO, 2001).

O que se verifica com a presença de fitoplâncton na água é uma redução da reflectância, principalmente na faixa do azul, e um acréscimo significativo na faixa do verde (CURRAN e NOVO, 1988). Na região do vermelho, há uma diminuição da energia refletida em torno de 665 nm, a qual se refere ao segundo pico de absorção máxima por clorofila (INPE, 2001), e um aumento em torno de 680 nm, que corresponde à faixa de emissão associada à fluorescência por este pigmento (NOVO, 2001). Já no infravermelho próximo observam-se dois picos de reflectância (BARBOSA, 2005).

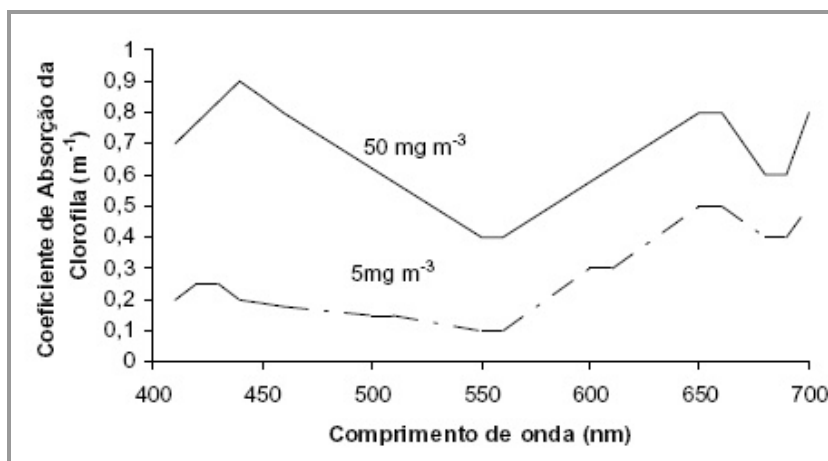


Figura 12 – Curvas do coeficiente de absorção da clorofila para duas concentrações deste pigmento. Verifica-se o primeiro pico de absorção máxima no azul, e o segundo, no vermelho. Fonte: INPE (2001).

À medida que a concentração de pigmentos aumenta, observa-se uma tendência de acompanhamento na magnitude destas feições, ou seja, há uma diminuição na reflectância na região do azul e um acréscimo na região do verde. A análise da Figura 13 evidencia as principais características do espectro de reflectância da clorofila, como apontado por Rundquist et al (1996): baixa reflectância na região do azul, indicada pela feição (A); existência de um pico de reflectância máxima no verde (B); a existência de um pequeno ponto de inflexão em torno de 640 (C); o ponto de absorção clássico na faixa do vermelho (D); um pico maior de reflectância no infravermelho próximo, em (E), e um menor, em (F). Assim, com relação à água pura, águas com concentrações de pigmentos aumentam a absorção da luz no azul e deslocam a região de máxima reflectância em direção ao verde (CURRAN e NOVO, 2001).

A matéria orgânica dissolvida (MOD) também provoca substanciais modificações no processo de absorção da luz no meio aquático, ocasionando um aumento do coeficiente de absorção da água. A sua máxima ação absorvedora ocorre nos menores comprimentos de onda da faixa espectral visível, pois a magnitude da absorção é inversamente proporcional ao comprimento de onda entre 400 e 700 nm (Figura 14). Assim, o aumento da concentração de MOD na água provoca uma redução da reflectância em praticamente toda a faixa do visível, sendo significativa no azul e no verde e mínima no vermelho, como indicam os trabalhos de Bukata et al (1983) e Mantovani (1993). Já no infravermelho, há um aumento da reflectância, como se verifica na Figura 15.

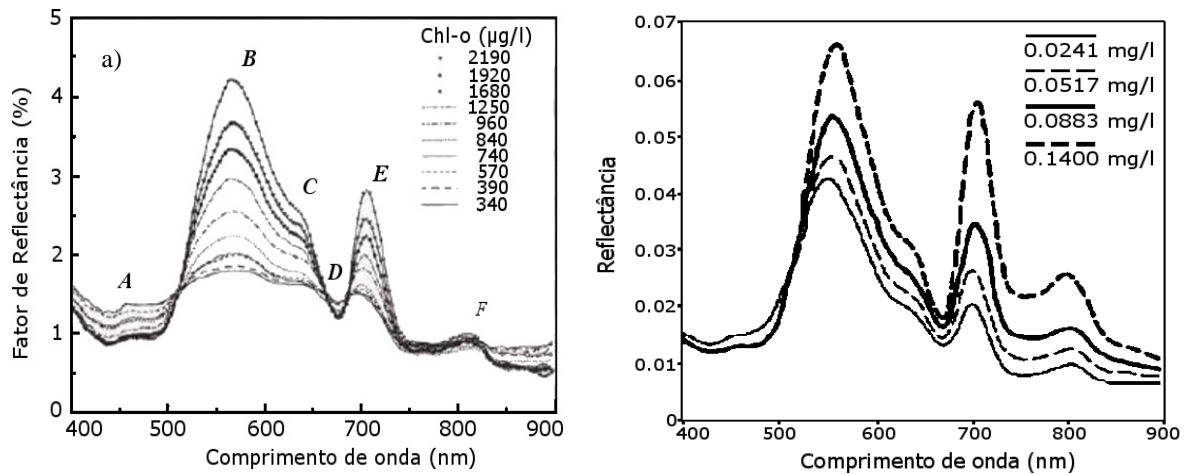


Figura 13 – Curvas de reflectância para diferentes concentrações de clorofila a, em dois experimentos de laboratório. As feições identificadas em (b) também estão presentes em (a). Fonte: a) Goodin et al (1993); b) Rundquist et al (1996).

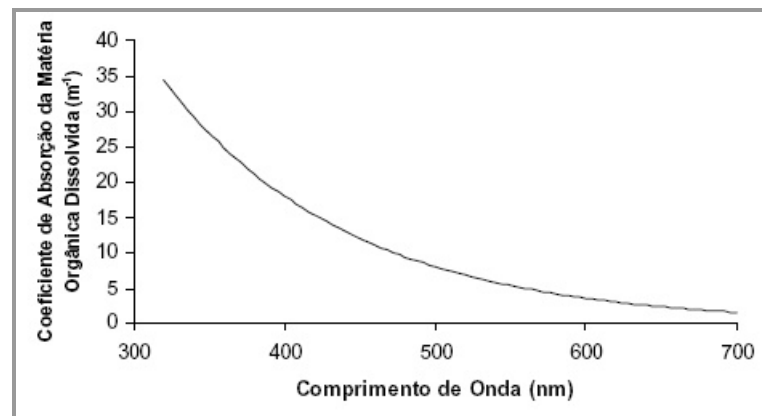


Figura 14 – Espectro de absorção de matéria orgânica dissolvida em um lago. Fonte: INPE (2001).

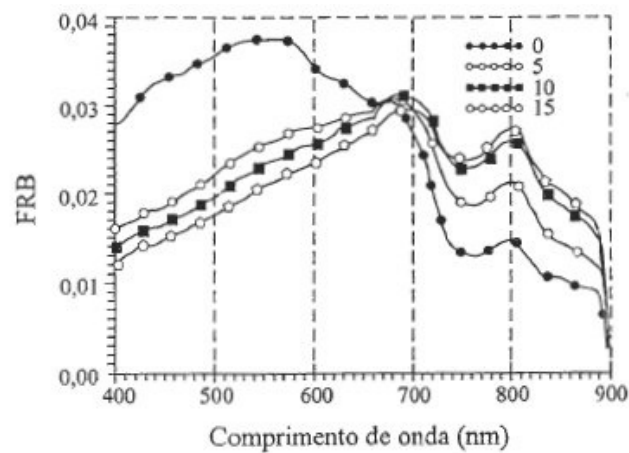


Figura 15 – Curva espectral da matéria orgânica dissolvida em diferentes concentrações. Fonte: Mantovani (1993), modificado por Novo (2001).

Uma pesquisa de laboratório realizada por Mantovani e Novo (1996) indica que a reflectância da água diminuiu cerca de 40 a 50% com concentrações de matéria orgânica dissolvida, na faixa espectral entre 400 e 570 nm. Acima de 570 nm, a influência destas substâncias diminui consideravelmente e, entre 670 e 900 nm há um aumento na amplitude da reflectância proporcional ao aumento da concentração de substâncias húmicas.

Com relação ao material particulado em suspensão, o seu principal efeito nas características espectrais da água ocorre em seu coeficiente de espalhamento, havendo um acréscimo em toda a região do visível e infravermelho próximo. O espalhamento por partículas maiores que o comprimento de onda da radiação incidente é muito próximo daquele previsto pela teoria de Mie, e a sua magnitude dependerá do diâmetro das partículas (MANTOVANI, 1993).

O material em suspensão inclui partículas orgânicas e inorgânicas, mas a fração inorgânica é a que mais afeta as propriedades espectrais da água, como constata estudos citados por Novo (2001). Por esta razão, muitas pesquisas avaliam os efeitos do material em suspensão no espectro da água e os relacionam aos sedimentos, ou seja, a sua fração inorgânica.; esta simplificação também foi adotada nesta pesquisa.

A resposta espectral de um corpo d'água varia de acordo com a concentração de sedimentos em suspensão, como mostra a Figura 16. Algumas importantes considerações podem ser verificadas a partir da sua análise: de forma geral, o aumento na concentração de sedimentos ocasiona um aumento na reflectância em toda a faixa entre 400 e 900 nm; com a maior concentração de sedimentos em suspensão há um deslocamento da reflectância máxima para comprimentos de onda mais longos; é comum observar-se a região de reflectância máxima comportando-se como um patamar quase constante na região do vermelho; e finalmente, o acréscimo expressivo da reflectância em uma estreita faixa localizada no infravermelho próximo. Vários outros fatores, além da concentração, influenciam na resposta espectral dos sedimentos em suspensão na água, os quais serão abordados no próximo item.

A presença de partículas em suspensão também pode aumentar o coeficiente de absorção da água, e o seu comportamento espectral é semelhante ao da matéria orgânica dissolvida, com máxima absorção no azul, porém com magnitude muito menor (INPE, 2001;

NOVO, 2001). No entanto, o espalhamento domina a resposta espectral na presença destas substâncias no meio aquático.

Uma importante consideração deve ser realizada com relação às características espectrais dos constituintes da água. Diversas vezes, notam-se diferenças em determinadas feições existentes nas curvas ou pequenas diferenças nos comprimentos de onda em que tais feições ocorrem, em estudos realizados por diferentes pesquisadores. Isto pode ocorrer porque os diversos componentes da água encontram-se simultaneamente no ambiente, em diferentes proporções, modificando de forma combinada as propriedades espectrais do meio aquático. Esta peculiaridade dos ambientes naturais dificulta a reprodução de curvas espectrais muito semelhantes, uma vez que cada elemento interfere nas propriedades da água segundo um conjunto de fatores bem específico, e cada local configura-se diferente do outro no tocante à constituição da água. Nesse sentido, Goodin et al (1993) analisam a resposta espectral de um corpo d'água com uma determinada concentração de clorofila, mas variando a concentração de sedimentos em suspensão. Apesar do acréscimo da concentração de sedimentos resultar no aumento da reflectância em toda a faixa espectral, a forma da curva é afetada pela presença da clorofila. Na Figura 17 verifica-se o pico de absorção deste pigmento na faixa do vermelho, entre 660 e 670 nm, e também seu pico de reflectância no infravermelho próximo, em torno de 710 nm. Já o seu pico de reflectância no verde é mascarado pela presença de maiores concentrações de sedimentos.

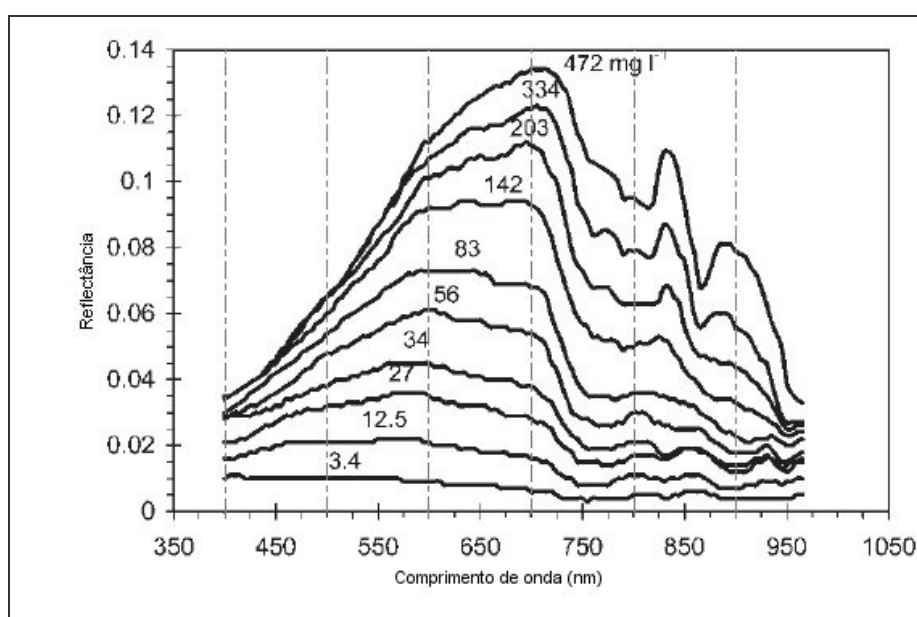


Figura 16 – Curvas de reflectância espectral para várias concentrações de sedimentos em suspensão na água. Modificado de Warrick et al (2004).

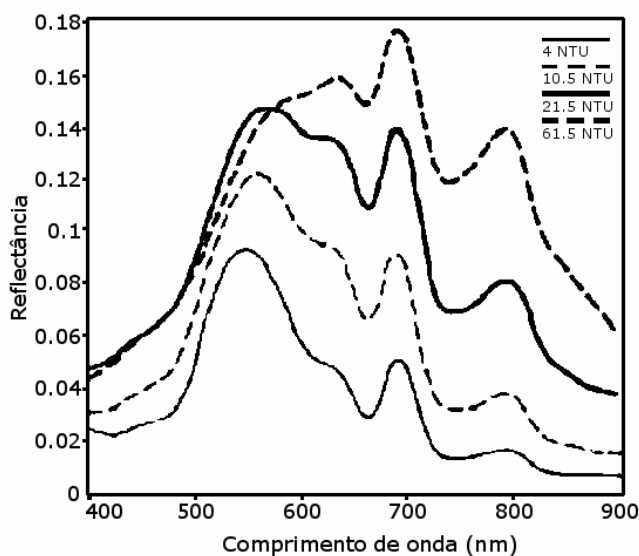


Figura 17 – Curvas de reflectância espectral para concentrações de sedimentos em suspensão na água, com concentração fixa de clorofila. Fonte: Goodin et al (1993).

1.2.6 Sensoriamento remoto para detecção de sedimentos em suspensão

A detecção, o mapeamento e a estimativa da quantidade de sedimentos em suspensão na água através de sensoriamento remoto fundamentam-se no forte relacionamento positivo existente entre a radiância mensurada pelo sensor e a concentração de sedimentos suspensos (CURRAN e NOVO, 1987; CHEN et al, 1992). Diversas pesquisas, realizadas em campo e laboratório, têm demonstrado que a interação da radiação solar incidente com materiais em suspensão resulta em um aumento na reflectância da água em todas as bandas espectrais localizadas entre 0,45 e 0,9 μm (RITCHIE et al, 1976; NOVO et al, 1991; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1991; CURRAN et al, 1987; CHEN et al, 1992). Isso significa que o espalhamento causado pelos materiais em suspensão frequentemente domina a reflectância espectral, quando comparados à água pura e à absorção fitoplanctônica (KIRK apud MILLER e McKEE, 2004). Na prática, a presença daquele constituinte em corpos d'água pode ser verificada pelo acréscimo de brilho em imagens de sensoriamento remoto, especialmente na região do visível (CURRAN e NOVO, 1987).

Em função da alta correlação positiva existente entre concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e radiação refletida, observa-se que, quando a CSS aumenta, a reflectância

também aumenta, e a magnitude deste relacionamento varia com o comprimento de onda. Como indicam diversos trabalhos, em geral a região do espectro mais sensível à presença de sedimentos em suspensão na água corresponde à faixa do vermelho, onde a radiação solar refletida alcança seu valor máximo (CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1990; KRITIKOS et al, 1974; NOVO et al, 1991; MILLER e McKEE, 2004; CHEN et al, 1992; MISHRA, 2004; WHITLOCK et al, 1978; WITTE et al, 1982). No entanto, outros autores afirmam que a região do espectro mais adequada depende da própria quantidade de sedimentos em suspensão na água: no caso de concentrações mais baixas, os comprimentos de onda menores, como o verde, são mais sensíveis; já para concentrações mais altas, a região de máxima radiação solar refletida desloca-se para os comprimentos de onda maiores, como o vermelho e o infravermelho próximo (CURRAN e NOVO, 1988; RITCHIE, 1976; NOVO et al, 1991; WITTE et al, 1982). A Figura 18 indica este comportamento espectral variável de acordo com a concentração de sedimentos.

Como explicam Curran e Novo (1987) e Witte et al (1981), isso ocorre porque o relacionamento entre radiância e concentração de sedimentos suspensos é assíntota, mas depende do comprimento de onda. Em outras palavras, a radiância aumenta linearmente com a quantidade de sedimentos suspensos até determinado nível de concentração, quando toma uma forma curvilínea, indicando uma tendência de saturação da radiação refletida com o aumento da CSS. A Figura 19 ilustra este processo, evidenciando que a sensibilidade da radiância para mudanças na quantidade de sedimentos diminui com o aumento da concentração. Todavia, em comprimentos de onda mais longos, onde a radiação atinge menores profundidades na água, esta assíntota é alcançada com concentrações de sedimentos mais altas. Nesse sentido, Witte et al (1982) concluíram que a reflectância torna-se assíntota com o aumento da concentração primeiro no azul, depois no verde, e só então no vermelho. Já no infravermelho próximo não houve saturação dentro do intervalo de concentração empregado na pesquisa realizada por estes autores, conforme reflete a Figura 20.

Além da concentração de sedimentos, vários outros fatores interferem na radiância mensurada pelo sensor, e conseqüentemente, no relacionamento entre CSS e reflectância espectral. Para facilitar a compreensão, optou-se em subdividi-los em dois grupos: o primeiro refere-se às questões intrínsecas ao alvo de interesse e inclui o tamanho, a forma e a mineralogia da partícula, além da própria CSS; o segundo está relacionado às influências

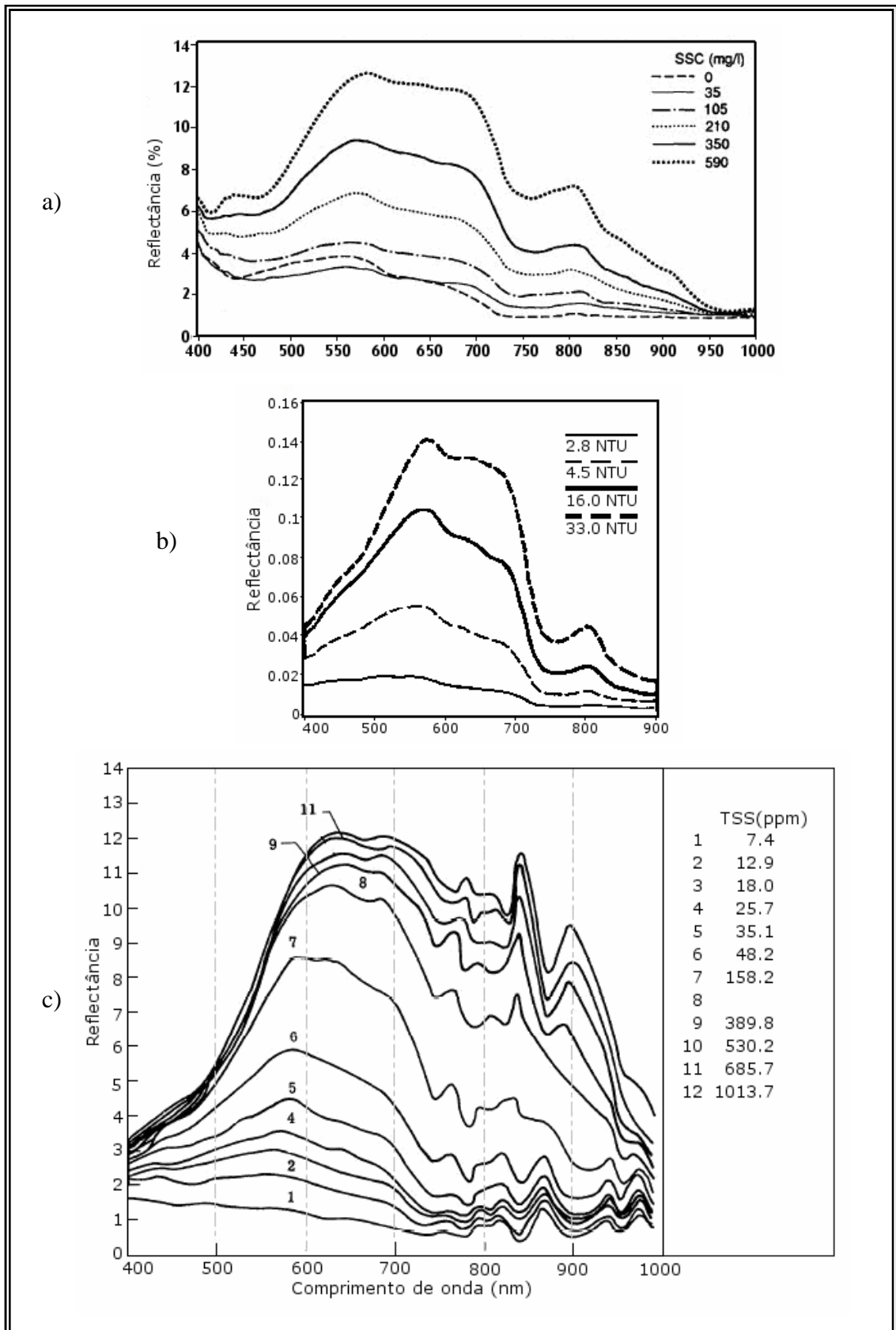


Figura 18 – Espectros de sedimentos em suspensão na água, em diferentes concentrações, obtidos sob condições controladas em laboratório. Fonte e unidades de medida: (a) Chen et al (1982), concentração de sedimentos em suspensão (SSC), em mg/l; (b) Goodin et al (1993), turbidez, em unidades de turbidez nefelométrica; (c) Witte et al (1981), total de sólidos suspensos, em partes por milhão.

ambientais, e englobam a atmosfera, a geometria de visada, os componentes da água, o limite água-atmosfera, a profundidade do corpo d'água e a variabilidade espacial, vertical e temporal dos sedimentos em suspensão (CURRAN e NOVO, 1988; NOVO et al, 1989 *a*; CURRAN et al, 1987).

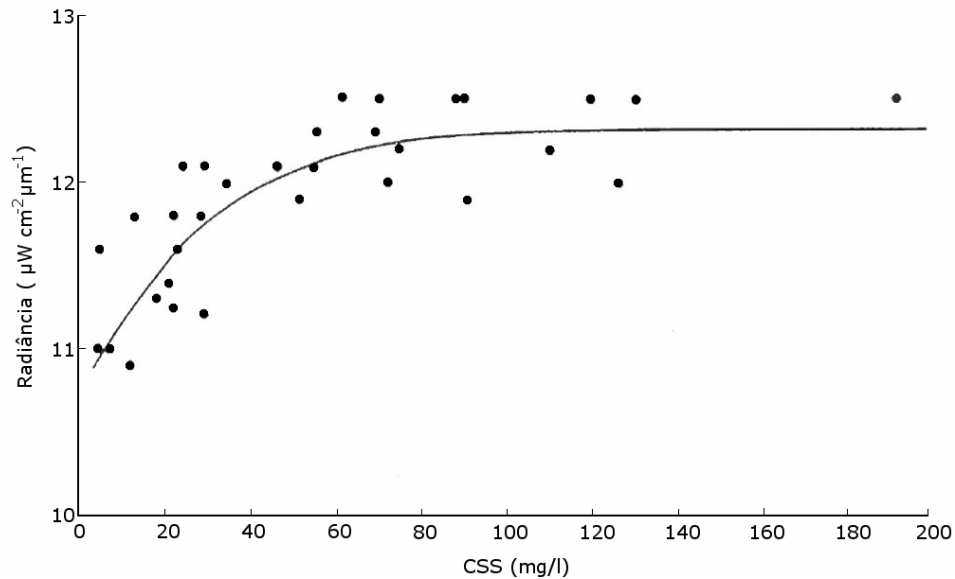


Figura 19 – Relacionamento entre CSS e radiância espectral na banda verde em águas próximas à costa. Fonte: Curran e Novo (1989).

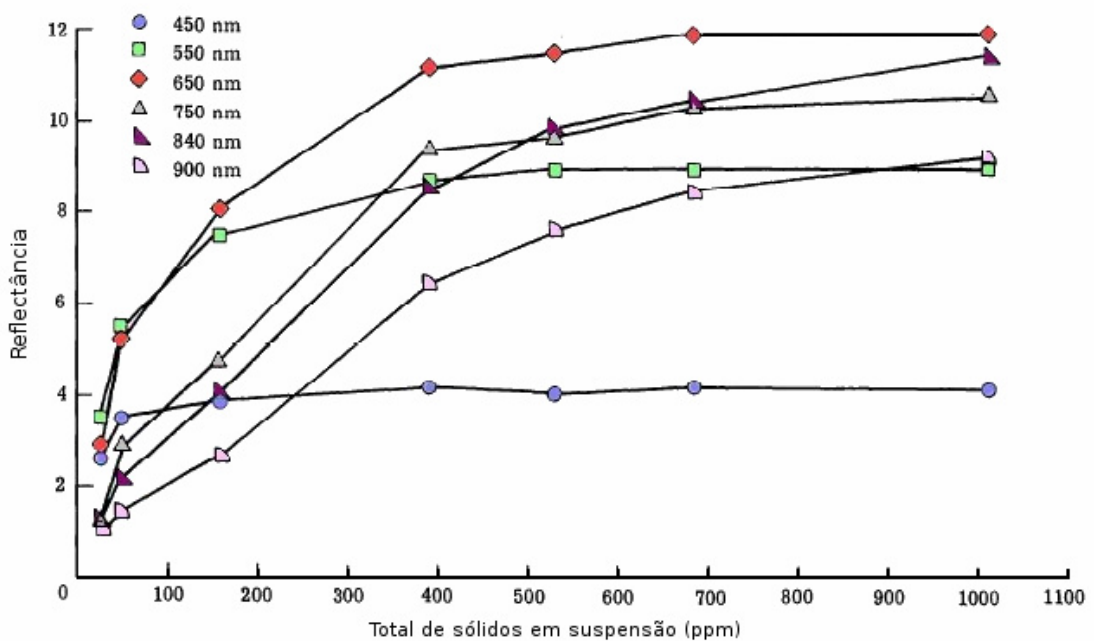


Figura 20 – Reflectância como uma função da concentração de sólidos suspensos em diferentes comprimentos de onda do visível e infravermelho próximo. Modificado de Witte et al (1982).

Enquanto o primeiro grupo é constituído por fatores que realmente influenciam a resposta do alvo, caracterizando o seu comportamento espectral, o segundo configura-se como um conjunto de influências ambientais indesejáveis que causam interferências no sinal registrado pelo sensor. Em conjunto, estas questões respondem pela falta de consenso existente na literatura com relação à intensidade, à forma e ao comprimento de onda ótimo para avaliar o relacionamento entre CSS e reflectância mensurada remotamente (NOVO et al, 1989 *a*; CURRAN e NOVO, 1988). Muitos trabalhos exemplificam esta divergência e apresentam contribuições no sentido de minimizá-las: Curran e Novo (1988) apresentam uma revisão completa sobre este assunto, indispensável às pesquisas e experimentos sobre sedimentos em suspensão; Munday e Alföldi (1979) avaliaram um número de relacionamentos empíricos entre CSS e radiância espectral, em um ou alguns comprimentos de onda, obtidos em experimentos anteriores; Curran et al (1987), motivados pela existência de inúmeros trabalhos visando estimar a CSS a partir de dados de sensores remotos, realizaram uma pesquisa para determinar a acurácia da estimativa e posterior classificação da CSS em plumas próximas à costa e encontraram erros bastante elevados, analisando as cinco razões principais que explicam tal comportamento; Novo et al (1991) conduziram um experimento de laboratório com o objetivo de verificar o comprimento de onda ótimo para estimar a concentração de sólidos suspensos a partir da reflectância da água.

Avaliando o efeito da geometria de visada, Novo et al (1989 *b*) concluem que a força do relacionamento entre CSS e dados espectrais depende também deste fator, com a assíntota sendo dependente tanto do ângulo como do azimuth do sensor. As condições ótimas para a estimativa da concentração de material em suspensão por sensoriamento remoto é com o sensor no nadir.

Considerando a hipótese de que a influência dos fatores ambientais seja reduzida a um nível mínimo, permanecem incertezas no relacionamento entre CSS e reflectância espectral associadas às características das partículas. Estudos realizados em laboratório indicam que as propriedades dos sedimentos têm uma importante contribuição na reflectância (HOLYER, 1978; NOVO et al, 1989 *a*; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1990; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1991; BHARGAVA e MARIAM, 1990), sendo necessário, portanto, obter informação de calibração do relacionamento entre CSS e reflectância em campo para medidas quantitativas a partir de dados de sensoriamento remoto (ROUSE e COLEMAN, 1976).

Choubey e Subramanian (1991) realizaram um experimento de laboratório para determinar as características espectrais de sedimentos em suspensão na água, como uma função do tipo e da concentração de sedimentos. Foram examinados os padrões de reflectância de sedimentos naturais pretos e marrons, e determinados os limites de concentração possíveis de serem mensurados em quatro bandas, localizadas na faixa de comprimentos de onda entre 0,45 e 0,9 μm , utilizando-se a hipótese de um relacionamento linear. Neste caso estudado, os resultados indicam que a composição mineralógica, a cor e o tamanho dos sedimentos são fatores dominantes para a reflectância, antes mesmo do que a CSS. Para alcançar o mesmo nível de turbidez da água são necessárias concentrações muito diferentes de sedimentos pretos e marrons: por exemplo, o nível de 16 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*) é alcançado com concentração de 44 e 100 mg/L, considerando as partículas pretas e marrons, respectivamente. Tomando como base a reflectância a partir da concentração, os sedimentos pretos apresentaram valores bem mais altos que os marrons em todos os comprimentos de onda, como indica a Figura 21. A abundância de minerais de argila nos sedimentos pretos é apontada como um dos fatores controladores da resposta espectral observada.

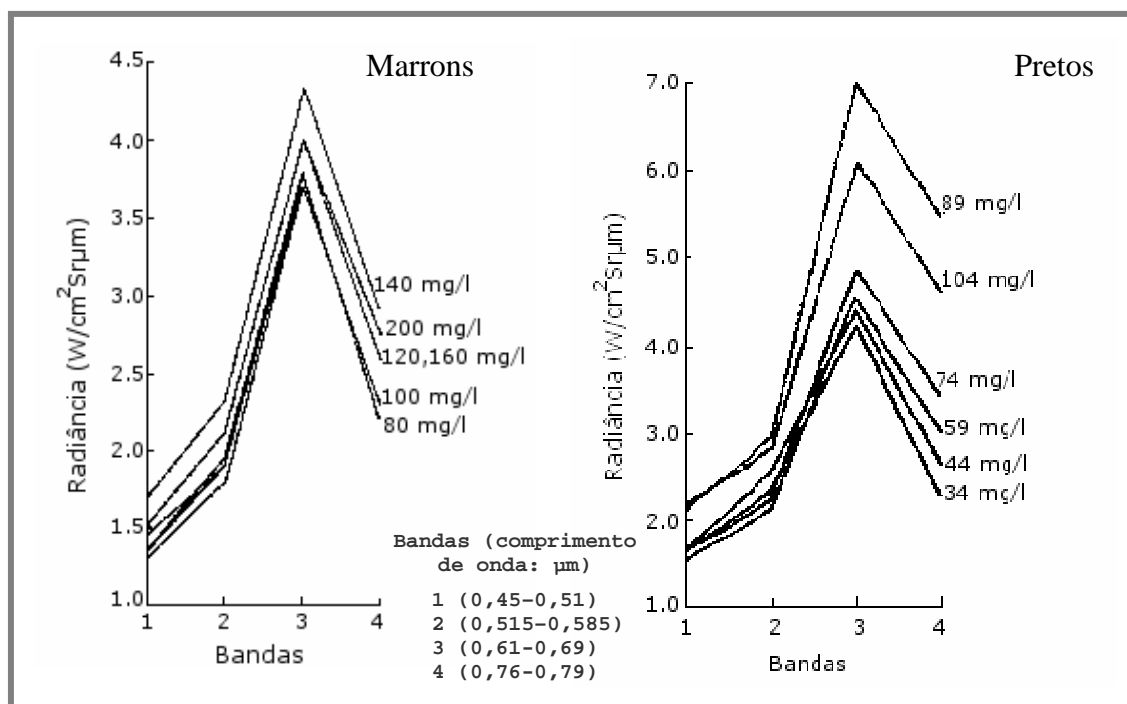


Figura 21 – Radiância espectral em diferentes comprimentos de onda para sedimentos marrons e pretos. Modificado de Choubey e Subramanian (1991).

Novo et al (1989 *a*) examinaram o efeito do tamanho e cor da partícula no relacionamento entre CSS e reflectância da água, sob condições controladas em laboratório. Dois tipos de sedimentos foram usados: argila branca industrial e silte vermelho natural (Figura 22). Os resultados confirmam trabalhos anteriores, como o de Holyer (1978), indicando aumento da reflectância com a diminuição do tamanho da partícula. Como a intensidade do relacionamento entre CSS e reflectância depende primeiramente da diferença entre a reflectância da água pura e da água turbida, os sedimentos mais finos podem resultar em uma correlação mais alta, e o tipo de sedimento pode definir a melhor banda espectral para estimar a CSS.

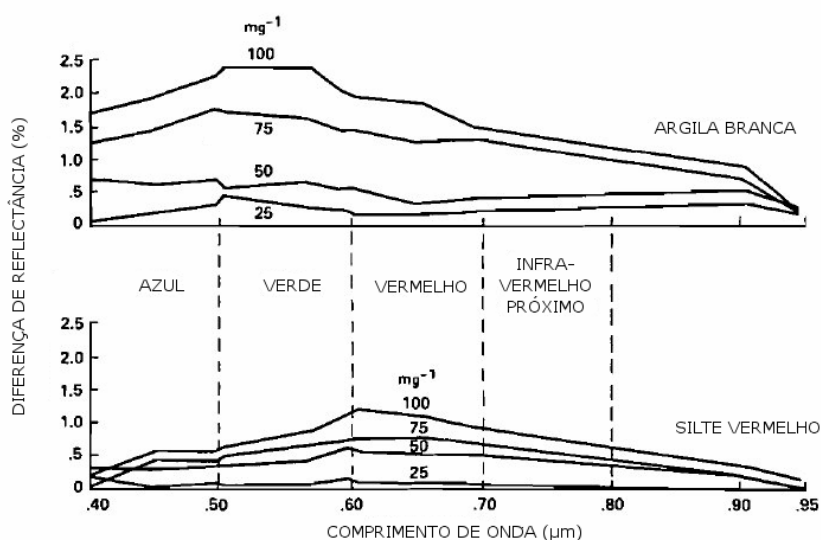


Figura 22 – Espectros de reflectância residual entre CSS e a água pura para sedimentos de argila branca e silte vermelho. Fonte: Novo et al (1989 *a*).

Ainda no que se refere ao comportamento espectral dos sedimentos, Whitlock et al (1977) conseguiram diferenciar, em laboratório, os espectros de suspensões com diferentes concentrações a partir de quatro tipos de solos. Utilizaram amostras de *Calvert*, *Ball*, *Jordan* e *Feldspar*, pois estes solos apresentam cor, distribuição do tamanho das partículas e conteúdo mineralógico diferentes, e são típicos de materiais que compõem os sedimentos de solos em vários locais no leste dos Estados Unidos, em concentrações que variaram entre 4 e 173 ppm. A Figura 23 exemplifica as curvas espectrais encontradas para as misturas de solo *Ball* (argila de cor cinza) e de *Feldspar* (quase puramente branco). Para cada suspensão, os autores testaram ainda duas resoluções espectrais: 32 e 160 nm. Na primeira, a resposta espectral das amostras foi diferente para todos os solos, em todas as faixas de concentração; já para a resolução de 160, somente as concentrações mais altas apresentaram diferenças espectrais.

Estes resultados sugerem que, para diferenciar espectros de baixas concentrações de sedimentos em suspensão, são requeridos sensores com bandas espectrais estreitas, mas para altas concentrações, sensores como bandas amplas, como o Landsat, podem ser utilizados. Quanto à forma do relacionamento, conclui-se que, em geral, os níveis de radiância variam de forma não-linear com o aumento da CSS, e o grau desta não-linearidade é função do comprimento de onda; por outro lado, a linearidade ocorre em casos especiais, e depende do tipo, faixa de concentração e também do comprimento de onda.

Apesar de todas as peculiaridades descritas, o sensoriamento remoto tem sido utilizado com sucesso em pesquisas sobre sedimentos em suspensão sobre amplas áreas de oceanos, rios, lagos, reservatórios e águas costeiras (CURRAN et al, 1987; CHEN et al, 1992). Como poderia se esperar, estudos realizados *in situ* apresentam, em geral, coeficientes de correlação inferiores àqueles obtidos em laboratório, sob condições controladas⁴. No campo, existem consideráveis problemas associados ao fluxo constante da água e a grande variabilidade espacial, temporal e vertical dos sedimentos. Este último aspecto dificulta sobremaneira a realização de uma amostragem adequada para correlacionar os dados de campo com as imagens de sensoriamento remoto, indispensável à obtenção de medidas acuradas (CURRAN e NOVO, 1988; NOVO et al, 1989 a). Já em laboratório encontram-se dificuldades para simular as condições existentes em águas naturais, provocando diferenças nas respostas obtidas em campo e sob condições controladas (WHITLOCK, 1977).

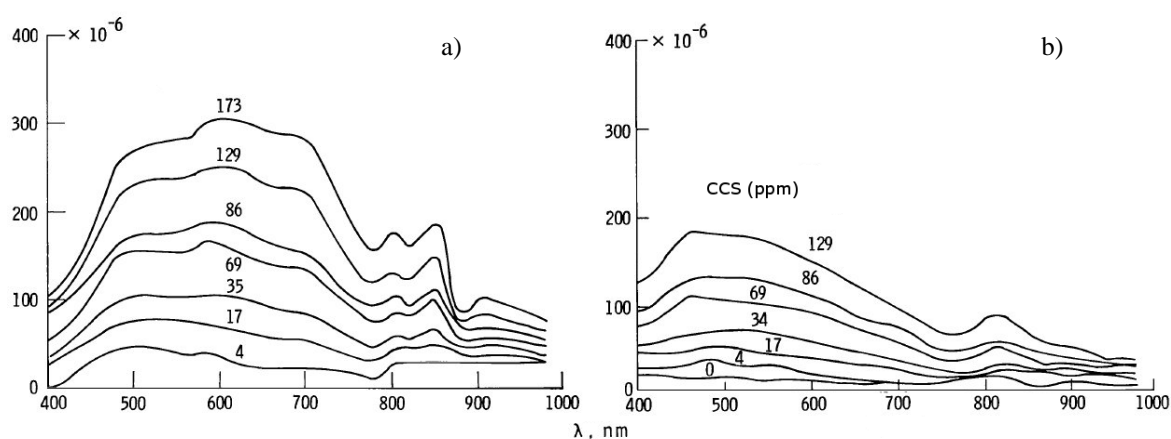


Figura 23 – Radiância espectral para misturas de água e sedimentos de dois tipos de solos, em diferentes concentrações: (a) *ball* e (b) *feldspar*. Modificado de Whitlock et al (1977).

⁴ Um ótimo exemplo pode ser encontrado na pesquisa realizada por Chen et al (1992). Nos experimentos de laboratório, diversas condições devem ser observadas para evitar a introdução de erros nas pesquisas. Curran and Novo (1988), Novo et al (1989) e McCluney (1976) apresentam considerações sobre este assunto.

Em geral, os estudos de sedimentos em suspensão com abordagens quantitativas são baseados na aquisição simultânea de dados mensurados remotamente, dados de radiância e de concentração de sedimentos, estes dois últimos em campo. A partir deste conjunto de dados, é derivado um relacionamento empírico entre CSS e reflectância espectral, o qual pode ser utilizado para estimar a CSS naquele corpo d'água⁵. Holyer (1978) e Curran e Novo (1988) alertam ainda para a necessidade de se proceder ao último passo dos experimentos quantitativos, que é a avaliação da acurácia das estimativas efetuadas.

Em pesquisa realizada por Ritchie et al (1987) com o objetivo de avaliar o uso de dados espectrais do sensor MSS (*Multi-Spectral Scanner*), a bordo dos satélites Landsat 4 e 5, para estimar a CSS em lagos onde a concentração anual é superior a 50 mg/L. Foram analisadas e comparadas quatorze cenas de *Moon Lake*, Mississipi, com dados de campo, no período entre janeiro de 1983 e maio de 1985. Diversas técnicas foram testadas para determinar o melhor relacionamento entre CSS e dados espectrais, baseadas em uma única banda ou em diferentes combinações de bandas. As análises são bem interessantes, pois os autores avaliaram dezessete tipos de combinações de bandas na tentativa de encontrar mais informação sobre sedimentos suspensos do que aquela disponível em uma única faixa espectral. Como conclusão, é sugerida a utilização da banda correspondente ao vermelho (0,6 a 0,7) ou infravermelho próximo (0,7 a 0,8) para estimar a CSS. Nesse sentido, é importante considerar que esta banda específica, localizada na região do infravermelho próximo, não está disponível nos sensores a bordo dos satélites Landsat posteriores.

A partir da melhor equação derivada nesta pesquisa, Ritchie e Cooper (1988) estimaram a CSS para o *Moon Lake* em treze cenas do sensor MSS, diferentes daquelas utilizadas inicialmente para determinar o relacionamento. Os resultados indicam que boas estimativas podem ser alcançadas para esta região, especialmente na faixa de concentrações entre 50 e 250 mg/L; acima deste valor, as concentrações foram subestimadas. Quando se utiliza a hipótese de um relacionamento linear entre CSS e dados espectrais, há realmente uma tendência de superestimar concentrações mais baixas e subestimar as mais altas. No entanto, os autores testaram diversas equações, e a melhor relação não linear não foi tão boa quanto esta utilizada.

⁵ Sobre tentativas de avaliar a CSS, realizadas em estudos prévios, Curran and Novo (1988) apresentam os procedimentos mais comuns responsáveis por erros nas estimativas.

Miller e McKee (2004) examinaram a utilidade do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para mapear a concentração de material total em suspensão em águas costeiras no norte do Golfo do México, e também utilizaram a hipótese de uma relação linear entre concentração e reflectância espectral. Os dados de campo foram mensurados com até 30 minutos de diferença do horário de passagem do satélite e posteriormente correlacionados com dados espectrais na faixa do vermelho. Os resultados apontam um relacionamento significativo sobre uma ampla faixa de concentrações de material total em suspensão, demonstrando a aplicabilidade do MODIS para estas pesquisas.

Muitas outras técnicas são apresentadas na literatura para quantificar a CSS a partir de dados espectrais de diferentes sensores, com resultados bastante satisfatórios nos locais onde foram aplicadas. Exemplos são os trabalhos conduzidos por Chen et al (1992), que utilizou análise derivativa a partir de dados de espectroradiômetros em águas costeiras na parte norte oriental da Inglaterra, e Mertes et al (1993), que desenvolveu um método baseado em análise de mistura espectral utilizando imagens Landsat e aplicou na Amazônia Central.

Por outro lado, os estudos com abordagens qualitativas fundamentam-se na existência de um forte relacionamento positivo entre CSS e dados espectrais para interpretar os padrões de níveis de cinza nas imagens como indicativos de diferentes níveis de concentrações de sedimentos. Apesar de não fornecer nenhuma estimativa numérica da quantidade de sedimentos em suspensão, as análises qualitativas são muito úteis em diversas atividades, podendo ser empregadas para avaliar o padrão sazonal de sedimentos suspensos no corpo d'água; avaliar a dinâmica de sedimentos em uma determinada região ao longo do tempo; inferir a dinâmica de fluxo em sistemas aquáticos; estudar o transporte e o destino de materiais em ambientes aquáticos e regiões costeiras; entre outras.

Nesse sentido, Kritikos et al (1974) demonstram a aplicabilidade de imagens de satélite para estudos de qualidade da água através da análise da distribuição de sólidos suspensos no rio Potomac em uma imagem Landsat-1. Gerou-se um mapa temático a partir da identificação de três classes distintas de água – aquelas com alta, média e baixa refletividade, as quais representam diferentes níveis de concentrações de sólidos em suspensão. Todas as bandas espectrais do visível e infravermelho próximo foram avaliadas, e a banda correspondente ao vermelho foi considerada a melhor para o mapeamento, pois foi a que ofereceu a máxima variação de brilho na imagem.

Rouse e Coleman (1976) analisaram dezenove imagens Landsat ao longo de dois anos consecutivos, 1973 e 1974, para obter o padrão de sedimentos suspensos em Louisiana Bight, na região do delta do rio Mississippi. Os mapeamentos foram realizados em função de uma gradação dos valores de radiância, após os procedimentos de correção radiométrica. Realizaram-se diversas análises em função da variabilidade da forma da pluma de sedimentos, avaliando-se o efeito de várias condições ambientais nas características da pluma.

Uma quantidade substancial de informações pode ser derivada a partir de imagens de sensoriamento remoto, e a grande vantagem das análises qualitativas em relação às quantitativas é que as primeiras podem ser amplamente aplicadas. Como as estimativas numéricas requerem parâmetros mensurados no local de interesse para determinar e validar a relação entre CSS e dados espectrais, elas só podem ser realizadas onde tais informações estão disponíveis, ou quando a aquisição destes dados é previamente planejada. Entretanto, para que a simplificação existente nos estudos qualitativos não conduza a erros de interpretação, é imprescindível considerar alguns aspectos, principalmente no que se refere à magnitude dos sedimentos em suspensão.

Adotando uma escala de magnitude de sedimentos suspensos para um determinado local, a partir do mapeamento temático de uma série de imagens multi-temporais, por exemplo, considera-se que as características principais dos sedimentos permanecem as mesmas ao longo do período avaliado. Além disso, não é possível comparar magnitudes de sedimentos em suspensão em diferentes locais. Como a relação entre CSS e reflectância depende das características das partículas e não foi determinada através de correlação com dados de campo, qualquer mapeamento com escala de magnitude tem valor relativo, sendo representativo da condição específica daquele corpo d'água.

1.2.7 Processamento Digital de Imagem

O processamento digital de imagens (PDI) consiste em um conjunto de técnicas computacionais para a manipulação de imagens, cujo objetivo primordial é facilitar a identificação e extração de informação (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, 2000). Ao melhorar o aspecto visual de feições estruturais para o analista humano e fornecer

outros subsídios para a sua interpretação, o PDI representa uma etapa fundamental na produção de novas imagens contendo informações específicas, extraídas e realçadas a partir de imagens brutas (CROSTA, 1992).

As técnicas de processamento digital de imagem podem ser subdivididas três etapas: pré-processamento, na qual são realizadas as correções radiométricas e geométricas; realce, onde a imagem é transformada através do emprego de técnicas para melhorar a sua aparência e qualidade visual; e finalmente a etapa de extração da informação, que inclui técnicas como segmentação e classificação, por exemplo. Neste tópico, serão abordadas sucintamente apenas as técnicas utilizadas nesta pesquisa, com exceção da correção atmosférica, que já foi apresentada em itens anteriores.

Na fase de pré-processamento, os erros, ruídos e distorções radiométricas e geométricas introduzidos nas imagens durante os processos de aquisição, transmissão e registro são corrigidos ou atenuados através do emprego de técnicas específicas. As distorções geométricas referem-se aos erros na posição relativa dos pixels e, com as suas correções, a imagem é transformada de tal forma que adquire as propriedades de um mapa. O georreferenciamento é produzido ao se estabelecer uma relação geométrica entre as coordenadas da imagem (linha e coluna) e as coordenadas geográficas da área correspondente. O modelo polinomial é o mais empregado neste tipo de correção, e utiliza pontos de controle do terreno – feições bem definidas e claramente identificáveis – para realizar a transformação e o registro da imagem.

Os ruídos radiométricos consistem em variações na intensidade dos pixels (nível de cinza) que não são causadas pelo objeto imageado. Podem ser classificados em ruídos coerentes, quando apresentam um padrão sistemático, e aleatórios, quando não exprimem nenhum padrão. Os ruídos mais comuns são linhas ruins (*line dropouts*), pixels isolados e *striping* ou *banding*. Este último tipo de ruído apresenta-se como faixas horizontais caracterizadas por uma alteração contínua dos níveis de cinza na direção perpendicular à linha de varredura do sensor (CABRAL et al, 1990), e é bastante freqüente nos sensores MSS e TM, a bordo dos satélites Landsat. A diferença de resposta dos detectores e o efeito de memória causam esta anomalia (USGS – *United States Geological Survey*; ESA – European

Space Agency⁶). No caso do efeito de memória para o sensor TM, o ruído apresenta-se em faixas alternadas de 16 pixels, claras e escuras, com uma intensidade muito pequena, tipicamente na ordem de 1 a 2 níveis de cinza. É, portanto, mais aparente em áreas uniformes do terreno, tais como água e deserto, onde pode ficar bem evidente ao se aplicar realce na imagem (USGS; ESA). Algumas técnicas são sugeridas na bibliografia para correção deste defeito, como filtragens e análises de Fourier, e uma revisão sucinta pode ser encontrada em Crippen (1989) e Helder et al (1992).

Na etapa seguinte do PDI, está disponível um conjunto de procedimentos para melhorar a qualidade visual da imagem. O tipo de realce mais empregado é o aumento de contraste, no qual os níveis de cinza são manipulados para evidenciar feições e aumentar a quantidade de informação que pode ser extraída visualmente. É um tipo de operação pontual, pois o novo valor do pixel depende somente de seu valor anterior na cena, e está relacionado à distribuição dos níveis de cinza no intervalo radiométrico, sendo uma medida do seu espalhamento. Existem diversos tipos de realce, os quais são especificados pela função de transferência de contraste (FCT) utilizada; é a partir desta função que os novos valores são calculados, e o mapeamento é implementado através de tabelas denominadas LUT – *Look-up Table*. Pode ou não haver saturação, com conseqüente perda de informação no processo, e estas definições, inclusive do tipo de realce, dependem do efeito desejado (IBGE, 2000; FONSECA, 2000).

As operações de filtragem espacial incluem outro conjunto de funções usadas para realçar a aparência de imagens, evidenciando ou suprimindo feições específicas, e para eliminar ruído. São operações de vizinhança⁷, baseadas na frequência espacial da imagem⁸, que podem ser realizadas no domínio do espaço ou da frequência. No domínio espacial, os filtros são implementados através do processo de convolução, no qual uma máscara desloca-se por toda a imagem pelo avanço de um pixel por vez efetuando operações lineares, não lineares ou adaptativas, para calcular o valor do pixel central com base em informações estatísticas localizadas. Estas máscaras podem apresentar diferentes formatos e tamanhos, dependendo do algoritmo utilizado, e quanto maior for a máscara, maior será a magnitude da

⁶ Informações detalhadas sobre anomalias nos satélites Landsat podem ser obtidas na internet, nas páginas oficiais da USGS e ESA, respectivamente em: <http://landsat.usgs.gov/science_an_anomalies.php>, <http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_product_anomalies/>.

⁷ Nas operações de vizinhança o valor do novo pixel depende não apenas de seu valor original, mas também do valor dos pontos vizinhos.

⁸ A frequência espacial é dada pelas variações de intensidade (brilho) por unidade de distância.

filtragem. De acordo com o efeito alcançado, os filtros são classificados em passa-baixas, passa-altas, passa-banda e rejeita-faixa. Os dois primeiros tipos são mais comuns: o passa-baixas elimina as altas frequências, suavizando e homogeneizando a imagem; já o passa-altas elimina as baixas frequências, tornando as bordas e detalhes mais nítidos. Existem inúmeros algoritmos para filtragem espacial; uma revisão pode ser encontrada em Barros (1998).

No domínio da frequência, as funções de filtragem são implementadas através de análises de Fourier. Primeiro aplica-se uma transformada de Fourier para converter a imagem para o domínio da frequência, onde os procedimentos de edição serão realizados, e depois esta imagem é convertida para o domínio espacial através de uma transformada inversa. Também existe uma grande variedade de funções no domínio da frequência, as quais devem ser utilizadas segundo os efeitos desejados.

Na etapa de análise ou extração de informação, um processo amplamente empregado é a classificação, no qual os valores digitais da imagem são agrupados em classes, com o objetivo de reconhecer padrões e objetos homogêneos, formando um mapa temático. A classificação automática baseia-se na informação espectral representada pelos níveis de cinza da imagem, em uma ou mais bandas, a partir da qual são derivadas estatísticas, e os pixels são então classificados de acordo com algum critério matemático. Este processo pode envolver duas partes, o treinamento e a classificação propriamente dita, e de acordo com a forma de treinamento, a classificação pode ser supervisionada ou não supervisionada.

Na classificação supervisionada, o analista seleciona amostras representativas de cada uma das classes que deseja identificar na imagem, as quais são utilizadas pelo algoritmo de classificação para reconhecer padrões nos dados e encontrar pixels com características similares. É, portanto, um processo controlado pelo analista, sendo necessário um conhecimento prévio dos dados e das classes de interesse. Por outro lado, a classificação não supervisionada, ou clusterização, agrupa os pixels segundo as suas características espectrais através de um processo totalmente transparente para o analista. Os algoritmos de clusterização utilizam padrões estatísticos inerentes aos dados para encontrar características similares e determinar os agrupamentos, organizando-os em *clusters*. De acordo com o algoritmo, alguns parâmetros devem ser definidos no início do processo, como o número de *clusters* desejados, por exemplo. Ao final, uma interação é necessária para avaliar a adequação do resultado. Esta classificação pode ser empregada como uma operação exploratória para verificar o que é

estatisticamente separável nos dados, quais as classes mais evidentes e sua relação com o que se deseja discriminar, e os padrões gerados podem ser aproveitados em uma posterior classificação supervisionada (IBGE, 2000). É comum uma imagem classificada apresentar heterogeneidades, como áreas mal definidas e pixels isolados. Por esta razão, são bastante utilizadas operações pós-classificação para uniformizar os temas e criar uma imagem com aspecto mais homogêneo.

1.2.8 Imagens do sensor TM – satélite Landsat 5

O programa Landsat, estabelecido pelos Estados Unidos e gerenciado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e pelo USGS, foi responsável pelo lançamento do primeiro de satélite de recursos terrestres, em 1972, quando ainda se chamava ERTS-1. Desde então, mais seis satélites foram colocados em órbitas da Terra, sendo que um deles, o Landsat 6, não chegou a operar devido a sua destruição durante o lançamento, como indica o Quadro 2. É a maior série histórica de imagens de sensoriamento remoto de recursos terrestres, com valor inestimável para pesquisas científicas e para a sociedade de forma geral. Atualmente, o satélite Landsat 5 é o único em operação, e tem a maior vida útil entre eles, imageando a superfície terrestre há cerca de vinte e quatro anos. Operando em sete bandas do espectro eletromagnético, com uma largura de faixa de 185 km, o sensor TM obtém informações da mesma área a cada 16 dias. As suas principais características podem ser observadas no Quadro 3 e no Quadro 4.

Quadro 2 – Informações sobre a série de satélites Landsat.

Satélite	Lançamento	Final da Operação	Situação	Inclinação	Altitude (km)	Sensor	Resolução Espacial (m)	Período de Revisita (dias)
Landsat 1	Julho / 1972	Janeiro / 1978	Inativo	99,9°	907	MSS	80	18
Landsat 2	Janeiro / 1975	Fevereiro / 1982	Inativo	99,2°	908	MSS	80	18
Landsat 3	Março / 1978	Março / 1983	Inativo	99,1°	915	MSS	80	18
Landsat 4	Julho / 1982	Junho / 2001	Inativo	98,3°	705,3	TM	30	16
Landsat 5	Março / 1984		Ativo	98,3°	705,3	TM	30	16
Landsat 6	Outubro / 1993	-	Inativo	Não chegou a operar				
Landsat 7	Abril / 1999	2003	Inativo	98,2°	705	ETM+	30	16

Fonte: USGS.

Quadro 3 – Principais características do satélite Landsat 5, sensor TM.

Características do Satélite Landsat 5, Sensor TM	
Resolução espacial	30 e 120 m
Resolução radiométrica	8 bits
Resolução temporal	16 dias
Largura de faixa	185 km
Tipo de órbita	polar heliossíncrona
Altitude	705,3 km
Tempo de duração da órbita	98,9 min
Inclinação	98,3°

Fonte: USGS.

Quadro 4 – Faixas espectrais do sensor TM, à bordo do satélite Landsat 5.

Banda	Faixa espectral	Região do Espectro	Resolução Espacial (m)
1	0,45 - 0,52	Azul	30
2	0,52 - 0,60	Verde	30
3	0,60 - 0,69	Vermelho	30
4	0,76 - 0,90	IV Próximo	30
5	1,55 - 1,75	IV Médio	30
6	10,4 - 12,5	IV Termal	120
7	2,08 - 2,35	IV Médio	30

Fonte: USGS.

1.2.9 Imagens do sensor CCD – satélite CBERS-2

O programa CBERS é resultado de uma cooperação estabelecida entre o Brasil e a China em 1988, com o objetivo de desenvolver dois satélites de observação da Terra; em 2002 foi assinado novo acordo para a continuação do programa e construção de outros dois. O primeiro da série foi lançado em outubro de 1999 e o segundo, o CBERS-2, em novembro de 2003. Uma característica singular é que ambos são equipados com três sistemas sensores, os quais possuem diferentes resoluções espaciais e temporais: o imageador de visada larga (WFI), a câmara de alta resolução (CCD) e o varredor multiespectral infravermelho (IRMSS).

O sensor CCD opera em cinco bandas espectrais e recobre toda a superfície terrestre em 26 dias, com resolução espacial de 20 m e largura de faixa de 113 km. Com capacidade adicional de apontamento lateral de $\pm 32^\circ$, obtém frequência de observações aumentada ou visão estereoscópica para uma dada região. Suas principais informações são apresentadas no Quadro 5 e no Quadro 6.

Quadro 5 – Faixas espectrais do sensor CCD, a bordo do satélite CBERS-2.

Banda	Faixa espectral	Região do Espectro
1	0,45 - 0,52	Azul
2	0,52 - 0,59	Verde
3	0,63 - 0,69	Vermelho
4	0,77 - 0,89	IV Próximo
PAN	0,51 - 0,73	Pancromático

Fonte: INPE.

Quadro 6 – Principais características do satélite CBERS-2, sensor CCD.

Características do Satélite CBERS-2, Sensor CCD	
Resolução espacial	20 m
Resolução radiométrica	8 bits
Resolução temporal	26 dias / 3 dias
Largura de faixa	113 km
Campo de visada	8,3°
Visada lateral	$\pm 32^\circ$
Tipo de órbita	polar heliossíncrona
Altitude	778 km
Tempo de duração da órbita	100,26 minutos
Inclinação	98,5°

Fonte: INPE.

1.3 Sistemas de informação geográfica

De acordo com Burrough (1989), os sistemas de informação geográfica constituem um poderoso conjunto de ferramentas para coleta, armazenamento, recuperação, transformação e

visualização de dados espaciais do mundo real. Nos SIGs (Sistemas de Informação Geográfica), os objetos e eventos do mundo real são descritos através de três características fundamentais: sua localização espacial, ou seja, sua posição em um sistema de coordenadas conhecido; seus atributos, os quais constituem um conjunto de informações alfanuméricas não espaciais; e suas relações topológicas, que descrevem o relacionamento entre cada um deles (BURROUGH, 1989). Possuem, portanto, a capacidade de associar bases gráficas à banco de dados, oferecendo uma visão inédita da área de estudo onde todas as informações disponíveis estão interligadas pela característica fundamental que lhes é comum: a localização geográfica (DAVIS e CÂMARA, 1999).

Os SIGs organizam a informação gráfica de forma muito conveniente, em camadas ou planos de informação, para permitir que diferentes variáveis sejam integradas ao banco de dados e que diferentes tipos de estudo e análise possam ser realizados, combinando somente os fenômenos de interesse (CÂMARA e MONTEIRO, 1999). Assim, como se observa na Figura 24, cada nível de informação contém características particulares da região, os quais são integrados de acordo com as necessidades do trabalho em questão.

As informações de natureza espacial são representadas graficamente através de duas estruturas geométricas: vetorial e matricial. Na vetorial, a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas, através de três elementos básicos: ponto, linha e polígono. Já a estrutura matricial, ou *raster*, consiste em uma malha retangular onde os objetos são construídos célula a célula.

Em função de suas características e ampla aplicabilidade, há no mínimo três grandes maneiras de utilizar os sistemas de informação geográfica: como ferramenta para a produção de mapas, como suporte para análise espacial de fenômenos e como um banco de dados geográfico (DAVIS e CÂMARA, 1999). A Figura 25 evidencia estas possibilidades, ao apresentar a estrutura geral de um subsistema de software do SIG, com seus principais componentes.

A função de manipulação e análise refere-se a um amplo conjunto de técnicas empregadas a fim de melhor compreender e gerenciar o espaço geográfico. Podem ser utilizadas considerando os aspectos espaciais e não espaciais dos dados, separadamente ou em conjunto. Nesse sentido, determinadas questões formuladas a um SIG dificilmente seriam

atendidas por intermédio de outros métodos; a capacidade analítica destes sistemas é extraordinária (BURROUGH, 1989).

Para facilitar a compreensão, as principais funcionalidades de um SIG podem ser subdivididas em categorias, tais como: funções cartométricas, comparação e sobreposição, ordenação e classificação, análise estatística e modelagem e processamento digital de imagem. Algumas funções são básicas e estão disponíveis em praticamente todos os SIGs; outros tipos de manipulação, mais elaborados ou específicos a determinadas aplicações, encontram-se apenas em *softwares* mais avançados. Uma particularidade das operações de análise é que algumas são mais facilmente empregadas em dados no formato vetorial e outras, no formato matricial (BURROUGH, 1989). Por serem amplamente descritas na literatura, estas funções não serão abordadas em particular nesta dissertação.

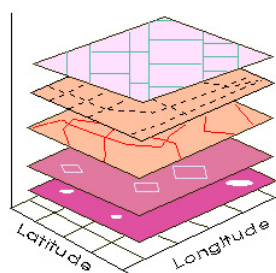


Figura 24 – Planos de informação associados a uma única localização em SIGs. Fonte: Foote e Lynch (1995).

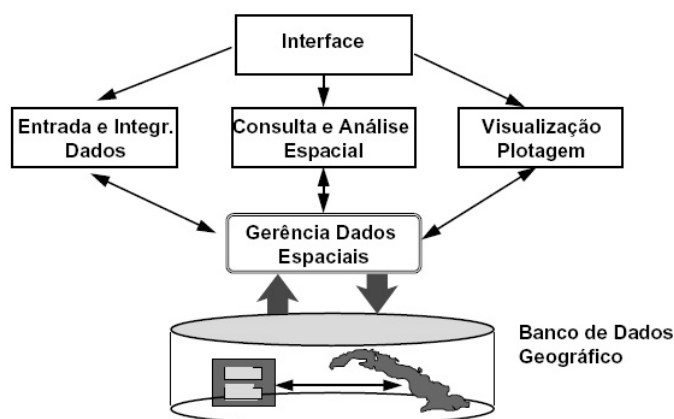


Figura 25 – Arquitetura geral de sistemas de informações geográficas. Fonte: Davis e Câmara (1999).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Além da nobre arte de fazer coisas, existe a nobre arte de deixar coisas sem fazer.

A sabedoria da vida consiste na eliminação do que não é essencial.

Lin Yutang

2.1 Área de estudo

A bacia do rio Paraíba do Sul localiza-se na região Sudeste e abrange três dos mais desenvolvidos estados do Brasil, como indicado na Figura 26. Possui uma área de aproximadamente 57.000 km², dos quais 25 % estão inseridos em São Paulo, 37 % em Minas Gerais e 38 % no Rio de Janeiro, onde vivem cerca de 5.250.000 habitantes. Com um formato irregular, alongado no sentido leste-oeste, a bacia tem um comprimento cerca de três vezes maior que a sua largura máxima, abrange 180 municípios e está situada ao longo do eixo Rio – São Paulo, uma das mais importantes regiões econômicas da América do Sul (BIZERRIL et al, 1998; Comitê da Bacia do rio Paraíba do Sul – CEIVAP, 2006).

O rio Paraíba do Sul é formado pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, no estado de São Paulo, a mais de 1.800 m de altitude, e deságua em Atafona, município de Campos, no norte fluminense, após percorrer seus 1.137 km de extensão. Suas águas chegam ao estado do Rio de Janeiro com a qualidade já comprometida pelo lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais e grande carga de sólidos em suspensão. No trecho fluminense, a bacia corresponde à metade da área de todo o estado, e novas contribuições de esgotos sanitários *in natura* e despejos de indústrias potencialmente poluidoras, de grande e pequeno porte, avolumam a carga poluente, agravando ainda mais a qualidade das águas (RIO DE JANEIRO, 1999).

É, portanto, no trecho fluminense que a bacia adquire sua maior importância relativa, considerando sua extensão, situação geográfica e os usos da água. Localizado à jusante dos outros dois estados, o Rio de Janeiro recebe os respectivos impactos do uso e ocupação do solo e dos usos da água estabelecidos à montante, contribui para o agravamento da qualidade

ambiental pelas atividades desenvolvidas em seu território, e, neste trecho da bacia, as águas do Paraíba do Sul serão ainda aproveitadas para diversos fins (RIO DE JANEIRO, 1999). Cerca de 12 milhões de pessoas dependem delas para o abastecimento, sendo 8 milhões só na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro; entre outros usos, destacam-se a geração de energia elétrica, o consumo industrial e a agricultura irrigada (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMADS, 2001).

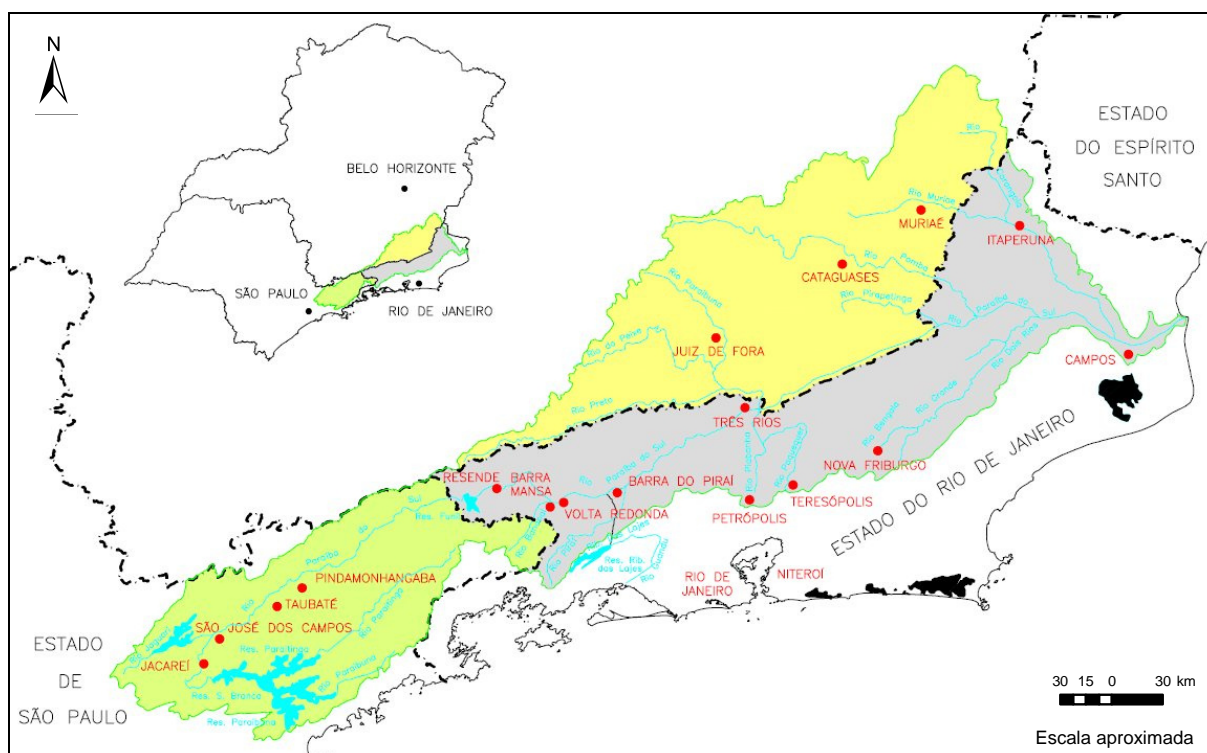


Figura 26 – Bacia do rio Paraíba do Sul, compreendida entre os paralelos 20°26' e 23°00' S e os meridianos 41°00' e 46°30' W. Fonte: Modificado de RIO DE JANEIRO (1999).

Na região de sua desembocadura, as águas costeiras recebem o material carreado pelo rio, seja ele dissolvido ou em suspensão, onde estará sujeito às condições de transporte e deposição característicos do ambiente, de acordo com as influências dos forçantes físicos de energia externa. De acordo com Muehe e Valentini (1998), a plataforma continental interna nesta região é essencialmente afetada pelos aportes de água e sedimentos do Paraíba do Sul, os quais, por sua vez, são induzidos pelas alternâncias entre tempo bom, com ventos e ondas de nordeste, e de tempestade, com ventos e ondas do quadrante sul.

A configuração da linha de costa na forma de um delta e a presença de um banco submarino em frente ao cabo de São Tomé expõe a linha de praia a diferentes direções de

incidência de ondas, e conseqüentemente, a diferentes direções e intensidades de transporte litorâneo. A Figura 27 indica o sentido do transporte: na região próxima à foz do rio, na altura de Gargaú, verifica-se a ocorrência de transporte residual de 3.000 m³/dia em direção ao norte; já imediatamente ao sul de Atafona, o transporte é da ordem de 4.400 m³/dia, dirigido para o sul (MUEHE e VALENTINI, 1998).



Figura 27 – Sentido do transporte litorâneo segundo Cassar e Neves (1993). As cores das setas destacam o sentido do transporte. Modificado de Muehe e Valentini (1998).

No que se refere à configuração de sua foz, o delta do Paraíba do Sul é uma planície que se estende na direção sudoeste – nordeste (Figura 28 *a*), e corresponde a um conjunto de ambientes sedimentares relacionados principalmente às fases de erosão costeira (BIZERRIL et al, 2001). De acordo com Ribeiro (2005), atualmente vive-se mais um período de erosão em Atafona; desde antes de 1960 relata-se o processo de erosão ativa com recuo da linha costeira continente adentro. As ilhas fluviais próximas à foz também têm sofrido as

consequências da instabilidade morfológica presente no delta, apresentando modificações em sua forma ao longo do tempo. Já outras feições apresentam mesmo um caráter pouco duradouro, pois resultam da interação predominante entre a direção e frequência das ondas que chegam ao litoral, bem como da velocidade e carga das correntes fluviais (RIBEIRO, 2005). Em razão destes fenômenos, observam-se diferentes configurações espaciais nesta região ao longo dos anos, conforme será detalhado adiante.

Para atender aos objetivos propostos nesta dissertação, a área de estudo foi recortada na interface terra-água e delimitada no sentido norte-sul e leste-oeste, conforme indica a figura 28 *b*.

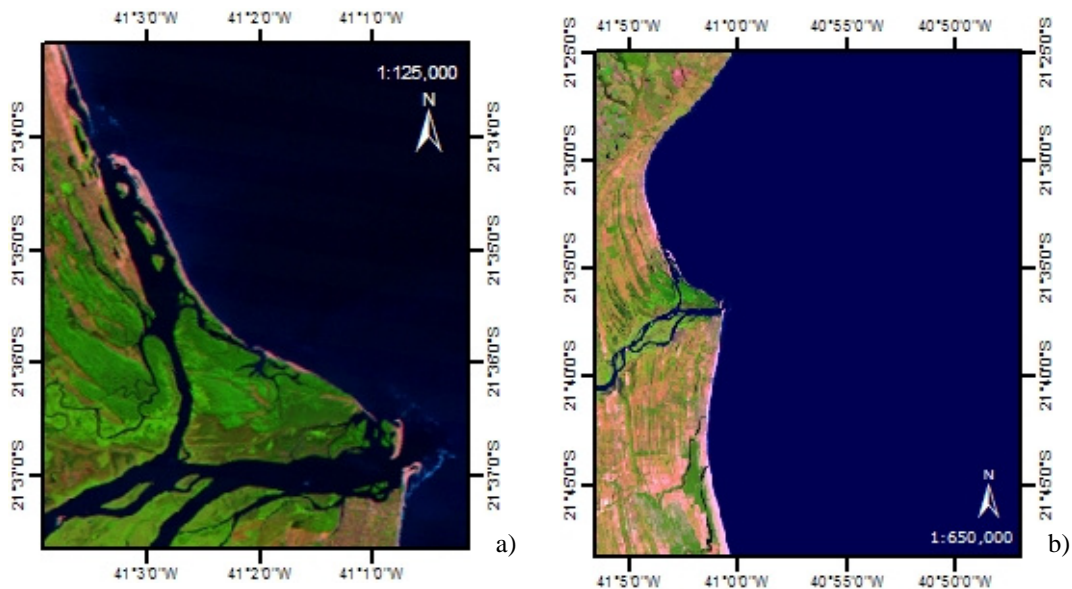


Figura 28 – Área de estudo: imagens Landsat. a) Foz do rio Paraíba do Sul; composição colorida RGB 123, de 30/05/2004. (b) Recorte da área de estudo, com a máscara utilizada na área de água, em azul, e composição colorida RGB 123 de 16/06/2004.

2.2 Abordagem proposta

2.2.1 Levantamento de imagens históricas dos satélites Landsat e CBERS-2

Uma etapa básica na análise de viabilidade desta pesquisa foi verificar a disponibilidade de imagens para a região de interesse. A utilização de produtos dos satélites

Landsat e CBERS-2 foi previamente definida por diversas razões, entre as quais se destacam: ausência de custos, facilidade para obtenção das cenas, relativa similaridade entre as suas respectivas resoluções espacial e espectral, e particularmente no caso do Landsat, por reunir a maior série temporal de imagens de sensoriamento remoto de recursos terrestres.

O levantamento de imagens históricas da série de satélites Landsat e do sensor CCD, a bordo do CBERS-2, foi realizado no banco de imagens da DGI / INPE, disponível na internet em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>. Não se utilizou nenhum filtro temporal, pois o período avaliado neste trabalho foi determinado em função da disponibilidade dos produtos de sensoriamento remoto. Também não foi utilizado nenhum filtro definindo a cobertura máxima de nuvens, já que todas as imagens foram avaliadas individualmente considerando a existência de nuvens especificamente na região de interesse, e não na cena inteira. Desta forma, evita-se desconsiderar imagens apropriadas para análise na subcena desejada.

No levantamento de imagens, a partir da observação do *quicklook* disponibilizado no banco de dados, as imagens foram classificadas através de dois critérios: cobertura de nuvens e existência de pluma de sedimentos. No primeiro caso, classificou-as em aptas e não aptas; no segundo, realizou-se uma pré-avaliação quanto à existência de pluma de sedimentos, identificada por análise visual sem realização de nenhum tipo de processamento. O Quadro 7 apresenta o resultado geral do levantamento de imagens disponíveis na área de estudo.

Quadro 7 – Total de cenas disponíveis para consulta no banco da DGI / INPE em setembro de 2007, na órbita-ponto 231/75, para o Landsat 1, 2 e 3; 216/75, para o Landsat 5 e 7; e 149/124, para o CBERS-2.

SATÉLITE	TOTAL GERAL DE IMAGENS	TOTAL DE IMAGENS APTAS	PERÍODO
LANDSAT-1	2	2 (100%)	1976
LANDSAT-2	42	13 (31%)	Dez/1976 a Jan/1982
LANDSAT-3	19	6 (32%)	Mai/1978 a Jun/1982
LANDSAT-5	401	121 (30%)	Abr/1984 a Jun/2007
LANDSAT-7	50	9 (18%)	Nov/2000 a Mai/2003
CBERS-2	50	23 (46%)	Nov/2003 a Abr/2007
TOTAL	564	174 (31%)	Mai/1976 a Jun/2007

2.2.2 Dados históricos de nível de água

Uma série de dados históricos de nível de água, referentes à estação fluviométrica mais próxima à foz do rio Paraíba do Sul, foi obtida junto à Agência Nacional de Águas (ANA) através do Sistema de Informações Hidrológicas denominado HidroWeb, disponível no endereço eletrônico <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Registros diários de vazão entre 1976 e 2006 compõem a série avaliada nesta pesquisa.

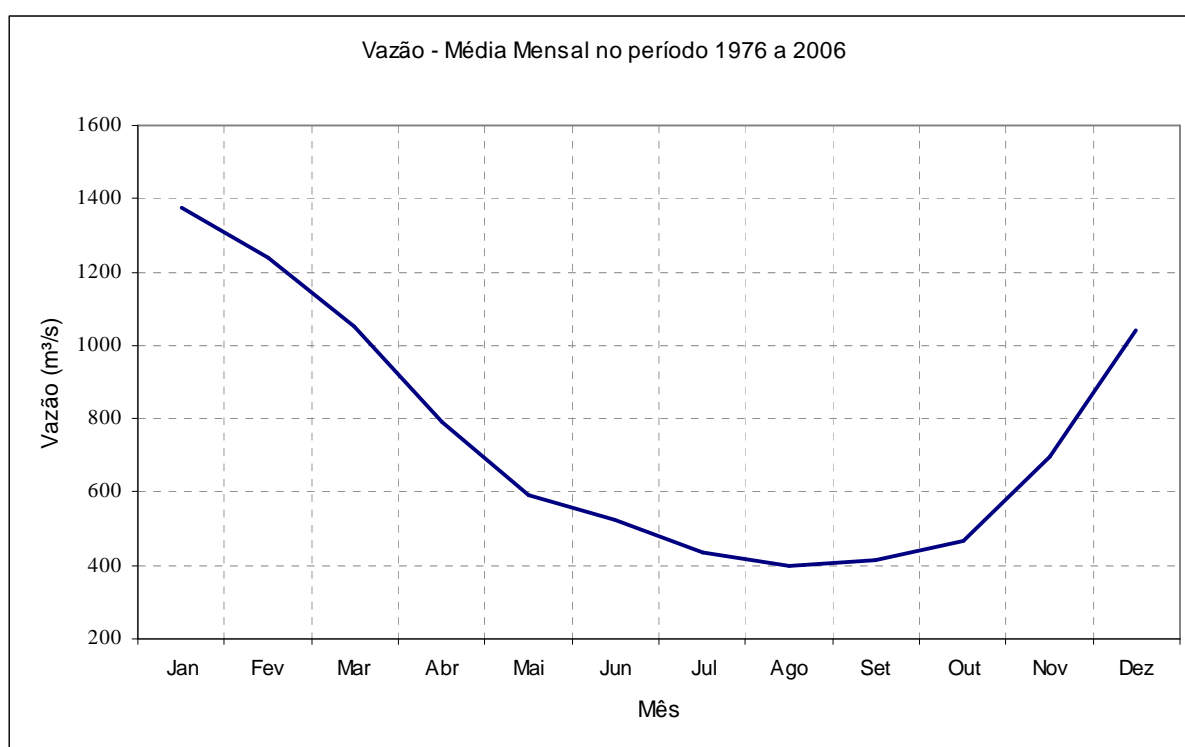


Figura 29 – Comportamento médio mensal da hidrógrafa ao longo do período 1976 – 2006. Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.

A análise destes dados foi fundamental para o conhecimento da dinâmica do nível de água na área de estudo e, inicialmente, foi um dos fatores que subsidiaram a escolha das datas das imagens utilizadas para avaliar o comportamento da pluma de sedimentos, os quais serão detalhados na próxima seção. Neste caso, consideraram-se duas informações fundamentais: a vazão média mensal e a vazão média anual registrada no período em que há disponibilidade de imagens de satélite. No que se refere à dinâmica do nível de água, a análise da Figura 29 indica a existência de duas condições bem marcadas: a primeira compreende os meses de dezembro a março, onde a vazão atinge seus valores máximos, e a segunda os meses de julho

a outubro, nos quais a descarga atinge seus valores mínimos. Os outros podem ser considerados meses de transição. Com isso, definiram-se os períodos de seca e cheia, utilizados para a seleção de imagens. Na análise dos resultados, convencionou-se designar o período seco como os meses de maio a novembro, e o chuvoso, de dezembro a abril, simplificando o critério de sazonalidade.

2.2.3 Definição da data das imagens

O período geral de abrangência da pesquisa foi determinado em função da disponibilidade de imagens de satélite e de sua distribuição ao longo do ano, considerando o comportamento sazonal da hidrógrafa. O primeiro ano com disponibilidade de imagens nas épocas de cheia e seca foi 1985, estabelecido, portanto, como o marco inicial da pesquisa, a qual se estendeu até 2007, quando foi realizado o levantamento no banco de imagens do INPE. Manteve-se então este período como base para a seleção das datas, e a partir da listagem de cenas disponíveis, foram definidas três estratégias para a seleção das datas que comporiam a série temporal para análise da pluma costeira do rio Paraíba do Sul.

Primeiro, em uma abordagem mais genérica, definiu-se o período de 1985 a 2007 para avaliar o comportamento da pluma no que se refere à sazonalidade anual da hidrógrafa, considerando os seus dois estados extremos – seca e cheia. Este período foi definido em função da disponibilidade de imagens durante os meses do ano, e a escolha das datas neste intervalo temporal teve como subsídio a análise da série temporal de dados de vazão. Para viabilizar o trabalho, em função da quantidade de imagens, consideraram-se os anos com valores anuais médios extremos de descarga fluvial, em uma periodicidade de aproximadamente 5 anos, como pode ser observado na Figura 30. São eles: 1985, 1990, 1996, 2001 e 2006. As 10 datas que compõem este conjunto são apresentadas no Quadro 8.

A segunda abordagem tem como objetivo avaliar todas as datas em que foram observadas plumas na composição colorida disponibilizada para visualização no banco de imagens da Divisão de Geração de Imagens (DGI) do INPE, no período 1985 – 2007. Neste caso, observou-se pluma através de análise visual do *quicklook* em aproximadamente 15% das imagens livres de nuvens. Um exemplo deste critério de classificação pode ser visualizado na

Figura 31. A idéia principal era avaliar a relação da existência de pluma com dados de vazão, e posteriormente, proceder a uma série de análises espaciais no que se refere ao comportamento destas feições, como por exemplo, forma, área de abrangência, alcance máximo na região *offshore*, entre outros. Foram selecionadas 27 datas, as quais estão listadas no Quadro 9.

Na terceira estratégia de análise pretendeu-se ampliar o número de amostras selecionadas ao longo do ciclo hidrológico anual, garantindo que todos os estados da hidrógrafa fossem avaliados. Além de considerar todos os estados representativos da variabilidade natural da vazão ao longo do ano, esta abordagem apresenta mais uma vantagem: é possível comprovar se existem ou não tendências nos resultados relacionadas à definição das datas. Para isso, foram adquiridas todas as imagens disponíveis em dois anos consecutivos, 2004 e 2005, visando reunir o maior número possível de dados. Estes anos foram definidos por reunir a maior quantidade de imagens classificadas como aptas quanto ao critério de cobertura de nuvens em dois anos seguidos. Este conjunto é composto por 25 datas, especificadas no Quadro 10.

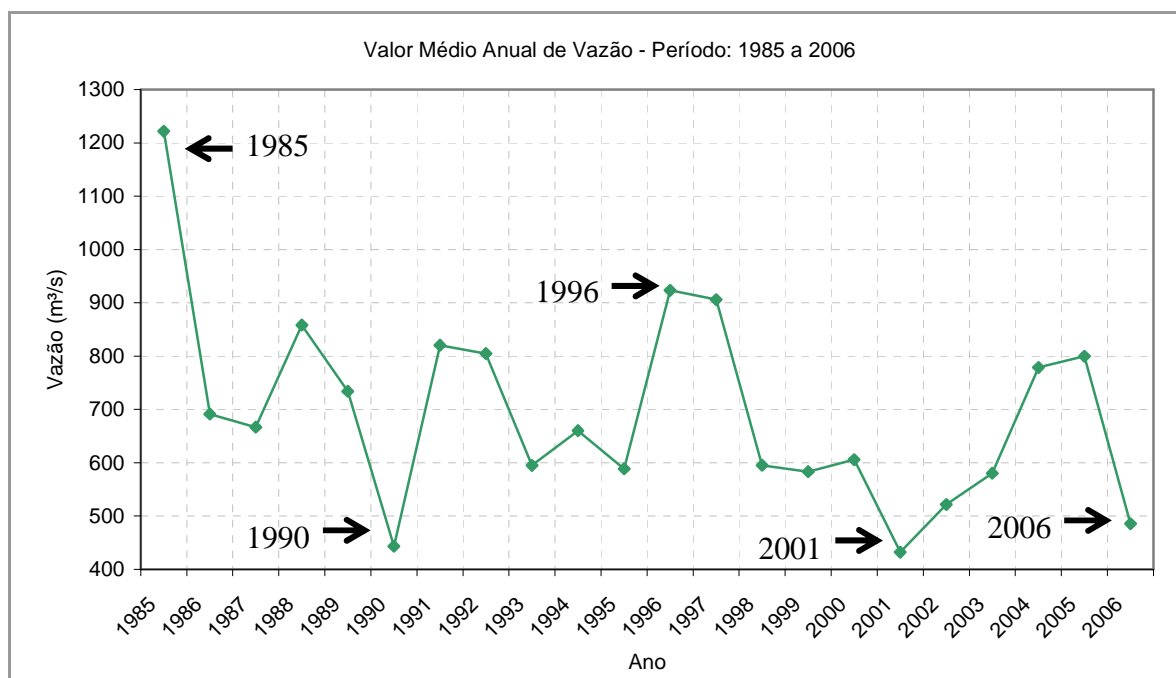


Figura 30 – Gráfico dos valores médios anuais de vazão ao longo do período 1985 – 2006. Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.

Quadro 8 – Lista de imagens selecionadas com base no critério sazonal.

DATA	SATÉLITE
03/02/85	LANDSAT 5
30/08/85	LANDSAT 5
17/02/90	LANDSAT 5
27/07/90	LANDSAT 5
17/01/96	LANDSAT 5
25/06/96	LANDSAT 5
15/02/01	LANDSAT 5
23/06/01	LANDSAT 5
01/03/06	LANDSAT 5
08/08/06	LANDSAT 5

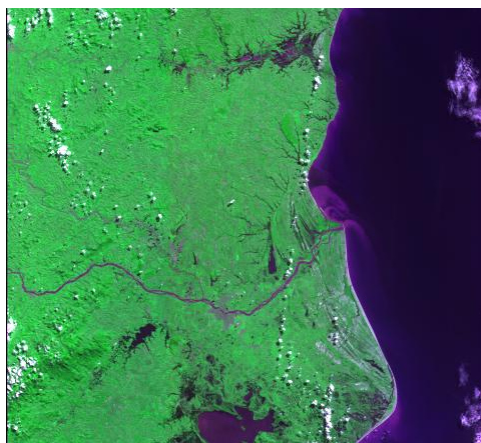


Figura 31 – Exemplo de figura disponibilizada como *quicklook* no banco de imagens da DGI / INPE, na qual a pluma é visível. Imagem CBERS-2, de 02/04/05. Fonte: BANCO de imagens da DGI/INPE.

Quadro 9 – Lista de imagens selecionadas com base no critério de pluma visível.

Data	Satélite	Data	Satélite
03/02/85	LANDSAT 5	14/02/04	CBERS-2
19/02/85	LANDSAT 5	11/03/04	CBERS-2
23/03/85	LANDSAT 5	11/03/04	LANDSAT 5
21/01/86	LANDSAT 5	27/03/04	LANDSAT 5
06/02/86	LANDSAT 5	25/01/05	LANDSAT 5
22/02/86	LANDSAT 5	10/02/05	LANDSAT 5
26/12/87	LANDSAT 5	14/03/05	LANDSAT 5
28/02/88	LANDSAT 5	30/03/05	LANDSAT 5
18/03/89	LANDSAT 5	02/04/05	CBERS-2
27/01/94	LANDSAT 5	01/03/06	LANDSAT 5
17/01/96	LANDSAT 5	12/01/07	CBERS-2
06/04/96	LANDSAT 5	31/03/07	CBERS-2
19/01/97	LANDSAT 5	16/02/07	LANDSAT 5
09/01/99	LANDSAT 5		

Quadro 10 – Lista de imagens definidas para abranger todo o ciclo hidrológico anual.

Data	Satélite	Data	Satélite
14/02/04	CBERS-2	25/01/05	LANDSAT 5
11/03/04	CBERS-2	10/02/05	LANDSAT 5
11/03/04	LANDSAT 5	14/03/05	LANDSAT 5
27/03/04	LANDSAT 5	30/03/05	LANDSAT 5
02/05/04	CBERS-2	02/04/05	CBERS-2
25/05/04	CBERS-2	15/04/05	LANDSAT 5
30/05/04	LANDSAT 5	19/06/05	CBERS-2
15/06/04	LANDSAT 5	15/07/05	CBERS-2
01/07/04	LANDSAT 5	10/08/05	CBERS-2
16/07/04	CBERS-2	21/08/05	LANDSAT 5
11/08/04	CBERS-2	05/09/05	CBERS-2
18/08/04	LANDSAT 5	01/10/05	CBERS-2
02/10/04	CBERS-2		

2.3 Materiais

Os seguintes recursos foram utilizados para a realização desta pesquisa:

- 50 imagens orbitais, das quais 35 são do satélite Landsat 5 e 15 são do CBERS-2, conforme indicado no Quadro 11.
- Série histórica de dados de vazão referente à estação fluviométrica de Campos – Ponte Municipal, código 58974000, coordenadas geográficas 21°45'12'' S e 41° 18 01'' W, no período entre 1976 e 2006, obtida junto à ANA através do banco de dados HidroWeb.
- Dados de visibilidade horizontal de quatro estações meteorológicas, obtidos junto à PETROBRAS (Petróleo Brasileiro S.A.), cujas coordenadas geográficas são, respectivamente: -21,7° e -14,13°; -22,68° e -40,61°; -22,34° e -41,76°; -22,03° e -41,07°.
- Linha de costa integrante do Banco de Dados de Exploração e Produção – BDEP.
- Batimetria disponibilizada pelo IBGE.

Quadro 11 – Informações sobre as imagens utilizadas nesta pesquisa.

Número	Data	Satélite	Órbita / Ponto	Condição
1	03/02/85	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
2	19/02/85	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
3	23/03/85	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
4	30/08/85	LANDSAT 5	216 / 75	
5	21/01/86	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
6	06/02/86	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
7	22/02/86	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
8	26/12/87	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
9	28/02/88	LANDSAT 5	216 / 74	pluma
10	18/03/89	LANDSAT 5	216 / 74	pluma
11	17/02/90	LANDSAT 5	216 / 75	
12	27/07/90	LANDSAT 5	216 / 75	
13	27/01/94	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
14	17/01/96	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
15	06/04/96	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
16	25/06/96	LANDSAT 5	216 / 75	
17	19/01/97	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
18	09/01/99	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
19	15/02/01	LANDSAT 5	216 / 75	
20	23/06/01	LANDSAT 5	216 / 75	
21	14/02/04	CBERS-2	148 / 124	pluma
22	11/03/04	CBERS-2	148 / 124	pluma
23	11/03/04	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
24	27/03/04	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
25	02/05/04	CBERS-2	148 / 124	
26	25/05/04	CBERS-2	149 / 124	
27	30/05/04	LANDSAT 5	216 / 75	
28	15/06/04	LANDSAT 5	216 / 75	
29	01/07/04	LANDSAT 5	216 / 75	
30	16/07/04	CBERS-2	149 / 124	
31	11/08/04	CBERS-2	149 / 124	
32	18/08/04	LANDSAT 5	216 / 75	
33	02/10/04	CBERS-2	149 / 124	
34	25/01/05	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
35	10/02/05	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
36	14/03/05	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
37	30/03/05	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
38	02/04/05	CBERS-2	149 / 124	pluma
39	15/04/05	LANDSAT 5	216 / 75	
40	19/06/05	CBERS-2	149 / 124	
41	15/07/05	CBERS-2	149 / 124	
42	10/08/05	CBERS-2	149 / 124	
43	21/08/05	LANDSAT 5	216 / 75	
44	05/09/05	CBERS-2	149 / 124	
45	01/10/05	CBERS-2	149 / 124	
46	01/03/06	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
47	08/08/06	LANDSAT 5	216 / 75	
48	12/01/07	CBERS-2	149 / 124	pluma
49	16/02/07	LANDSAT 5	216 / 75	pluma
50	31/03/07	CBERS-2	149 / 124	pluma

- Softwares e aplicativos:
 - ArcGIS 9.2, desenvolvido pela ESRI (*Environment Systems Research Institute*);
 - ERDAS Imagine 8.7 (*Earth Resource Data Analysis System*), desenvolvido pela *Leica Geosystems GIS e Mapping, LLC*;
 - Código 6S, adaptado por Antunes (2003).

2.4 Métodos

A fim de facilitar a compreensão da seqüência metodológica adotada nesta pesquisa, a Figura 32 sintetiza os procedimentos e análises empregados, e os próximos itens deste subcapítulo descrevem com mais detalhes as técnicas utilizadas. Procurou-se organizá-las na seqüência em que foram empregadas; entretanto, algumas técnicas foram utilizadas mais de uma vez, em momentos distintos. Desta forma, sugere-se consultar a Figura 32 para maiores esclarecimentos sobre a seqüência de passos adotada no processamento das imagens orbitais.

2.4.1 Pré-processamento de imagem

2.4.1.1 Correção atmosférica

O primeiro passo no tratamento das imagens foi a realização de correção radiométrica visando minimizar os efeitos do espalhamento e absorção pelos constituintes atmosféricos, normalizar variações sazonais na irradiância solar e diferenças de calibração do sensor. Ao eliminar ou reduzir a influência das diversas variáveis externas ao comportamento do alvo no valor registrado pelo sistema imageador, a correção atmosférica permite a comparabilidade entre cenas adquiridas ao longo do tempo, por diferentes sensores, garantindo que as variações existentes entre datas sejam representativas de mudanças intrínsecas ao objeto de interesse.

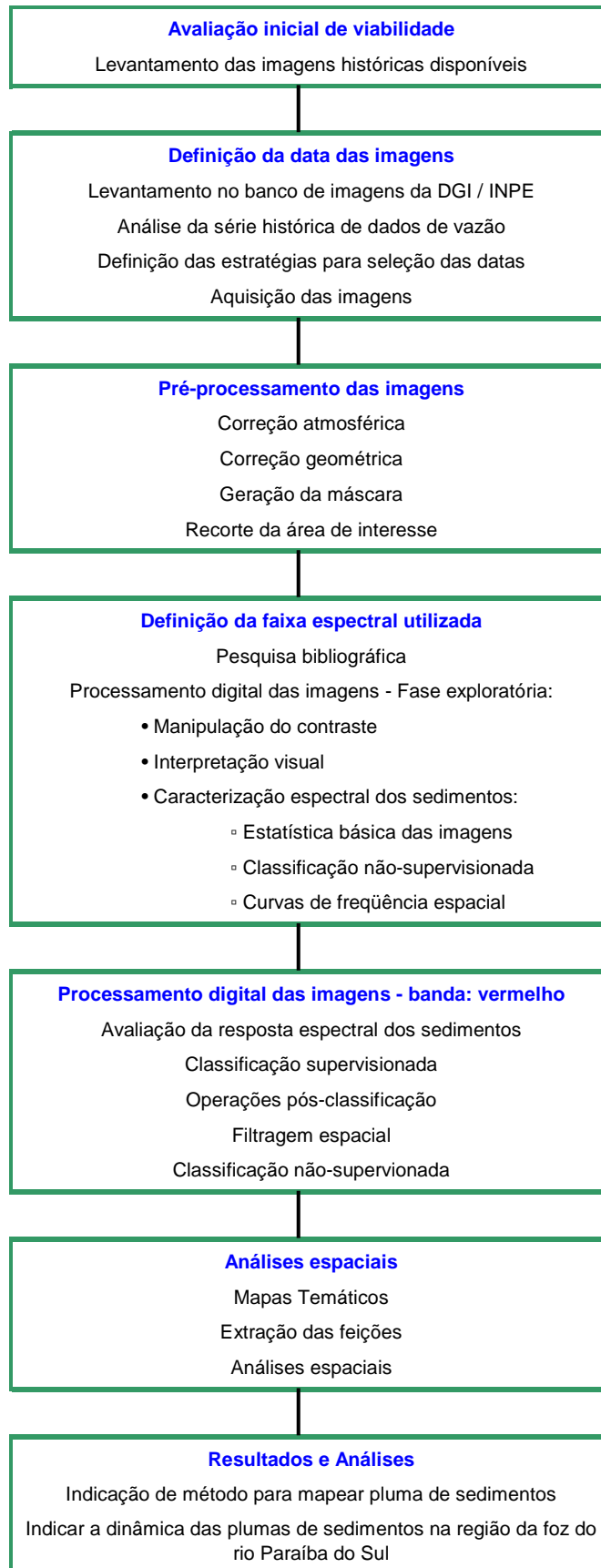


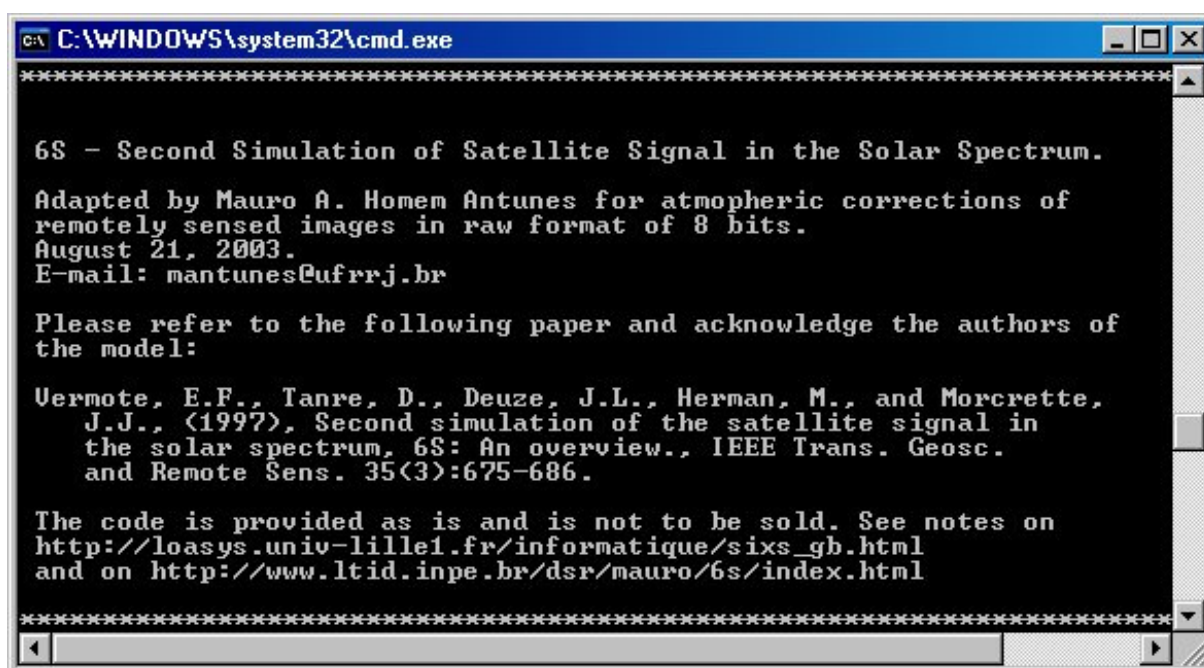
Figura 32 – Sequência metodológica.

A reflectância de superfície foi calculada para todas as imagens utilizando-se o modelo de transferência radiativa desenvolvido por Vermote et al (1997 *b*) – o algoritmo 6S, adaptado no Brasil por Antunes (2003). Este aplicativo encontra-se configurado para imagens de diversos sensores, inclusive o CBERS-2, cujos parâmetros de calibração divulgados pelo INPE não são facilmente aplicáveis à fórmula comumente utilizada no cálculo da reflectância de superfície. Um conjunto de informações é requerido para a utilização do modelo; para determinadas variáveis, é possível utilizar parâmetros de entrada pré-estabelecidos, na ausência de dados de campo, optando pela configuração mais adequada à região de aplicação, conforme indicado no Quadro 12. Em destaque está a configuração adotada nesta pesquisa.

Quadro 12 – Opções de modelos pré-estabelecidos e parâmetros de entrada necessários para correção atmosférica com o algoritmo 6S. Em destaque estão os modelos utilizados.

Modelo de atmosfera	0 Sem absorção gasosa
	1 Tropical
	2 Latitude média no verão
	3 Latitude média no inverno
	4 Subártico no verão
	5 Subártico no inverno
	6 Modelo padrão US 62
	7 Modelo de usuário
Modelo de aerossol	0 Sem aerossóis
	1 Continental
	2 Marítimo
	3 Urbano
	4 Modelo de usuário
	5 Modelo de deserto
	6 Queima de biomassa
	7 Estratosférico
	8-12 Modelos de usuário
Lista de informações de entrada no modelo	Sensor
	Mês
	Dia
	Hora decimal
	Latitude
	Longitude
	Modelo de atmosfera
	Modelo de aerossóis
	Visibilidade
	Altitude do alvo
	Tipo de plataforma
	Banda espectral
	Número de pixels
	Período ¹
	Ângulo de Visada ²
	Azimute de visada ²
	¹ Não é necessário informar para o CBERS-2
	² Informar para o CBERS-2

Para a utilização deste código (Figura 33), é indispensável converter os arquivos de imagens disponibilizados na extensão *geotiff* para o formato bruto *raw*, e gerar os respectivos arquivos de configuração em formato texto, com extensão *inp*, contendo as informações de entrada no modelo, como exemplificado na Figura 34. Os programas de edição de imagens realizam esta conversão de formato; neste trabalho, utilizou-se o *Adobe Photoshop*. Informações sobre as equações utilizadas para o cálculo da reflectância de superfície são encontradas em detalhes no manual do modelo 6S (VERMOTE et al, 1997 *b*).



```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

*****

6S - Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum.

Adapted by Mauro A. Homem Antunes for atmospheric corrections of
remotely sensed images in raw format of 8 bits.
August 21, 2003.
E-mail: mantunes@ufrrj.br

Please refer to the following paper and acknowledge the authors of
the model:

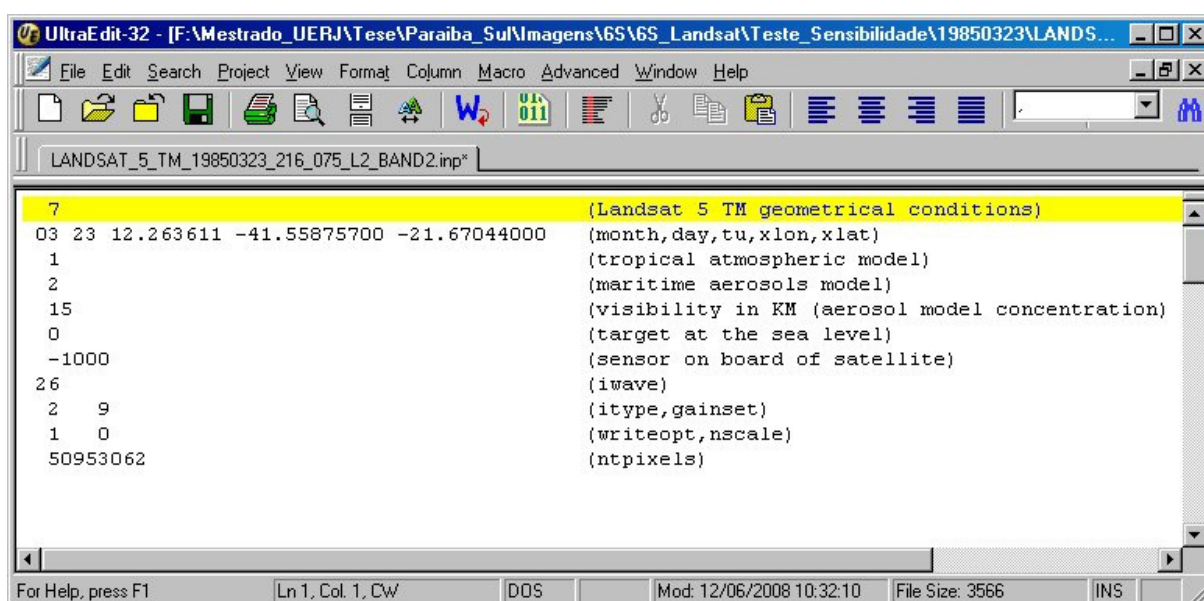
Vermote, E.F., Tanre, D., Deuze, J.L., Herman, M., and Morcrette,
J.J., (1997), Second simulation of the satellite signal in
the solar spectrum, 6S: An overview., IEEE Trans. Geosc.
and Remote Sens. 35(3):675-686.

The code is provided as is and is not to be sold. See notes on
http://loasys.univ-lille1.fr/informatique/sixs_gb.html
and on http://www.ltid.inpe.br/dsr/mauro/6s/index.html

*****

```

Figura 33 – Tela do código 6S, adaptado por Antunes (2003).



```

UltraEdit-32 - [F:\Mestrado_UERJ\Tese\Paraiba_Sul\Imagens\6S\6S_Landsat\Teste_Sensibilidade\19850323\LANDS...
File Edit Search Project View Format Column Macro Advanced Window Help
LANDSAT_5_TM_19850323_216_075_L2_BAND2.inp*

7 (Landsat 5 TM geometrical conditions)
03 23 12.263611 -41.55875700 -21.67044000 (month,day,tu,xlon,xlat)
1 (tropical atmospheric model)
2 (maritime aerosols model)
15 (visibility in KM (aerosol model concentration)
0 (target at the sea level)
-1000 (sensor on board of satellite)
26 (iwave)
2 9 (itype,gainset)
1 0 (writeopt,nscale)
50953062 (ntpixels)

```

Figura 34 – Arquivo de configuração (*.inp) para entrada no modelo 6S.

O parâmetro visibilidade horizontal, utilizado para avaliar a concentração de aerossóis, foi o de mais difícil obtenção. As medições mais comuns de visibilidade são realizadas para fins aeronáuticos e normalmente discriminam valores numéricos de até 10 km, ou seja, valores superiores a este são registrados como “superiores a 10 km”. Então, primeiro foram consultados os registros disponíveis para a estação aeronáutica mais próxima à área de estudo, adquiridos pela Petrobras, e posteriormente, a partir dos valores encontrados, realizou-se um teste de sensibilidade deste parâmetro nos resultados do algoritmo 6S.

O objetivo do teste foi verificar a magnitude da influência da visibilidade no valor de reflectância de superfície na região de interesse, considerando valores superiores a 10 km. Para a mesma cena, aplicou-se o algoritmo cinco vezes, em todas as bandas, mudando-se apenas o valor da visibilidade horizontal, que variou entre 15 e 35 km. Em seguida, determinou-se um perfil, localizado longitudinalmente à foz do rio Paraíba do Sul, para analisar os resultados em cada banda. Este procedimento foi realizado para quatro imagens, entre datas no verão e no inverno, e as diferenças encontradas na reflectância a partir dos diferentes valores de visibilidade foram consideravelmente pequenas, conforme se exemplifica na Figura 35.

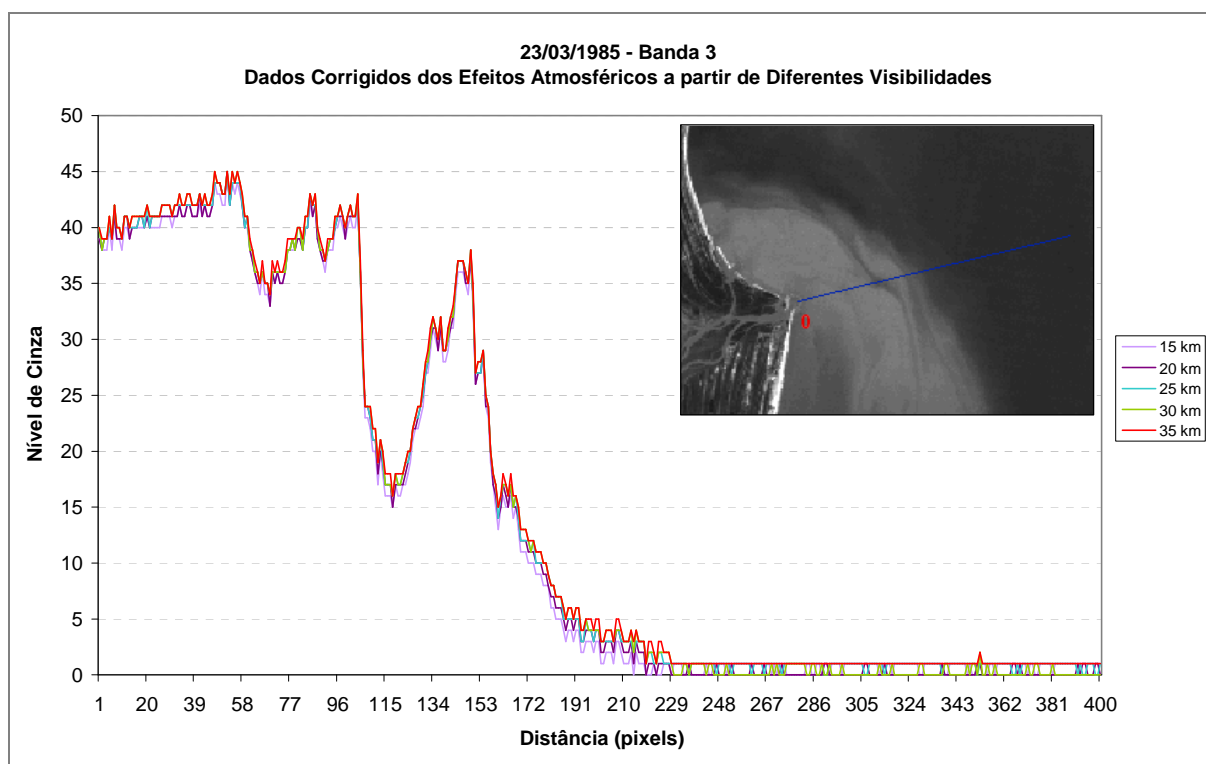


Figura 35 – Dados corrigidos dos efeitos atmosféricos a partir de diferentes visibilidades, ao longo do perfil exibido em detalhe. Imagem Landsat 5, 23/03/1985.

Com base nos registros medidos e no resultado desta avaliação, utilizaram-se valores estimados: 20 km para os meses de verão e 15 km para os de inverno. Após executar o algoritmo em lote para todas as datas, os arquivos resultantes foram convertidos para o formato *tiff*. Para facilitar o tratamento das imagens em softwares específicos de PDI, os pixels da imagem corrigida dos efeitos atmosféricos apresentam valores de reflectância de superfície escalonados para níveis de cinza.

2.4.1.2 Correção geométrica

Todas as imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos foram georreferenciadas utilizando-se uma linha de costa em formato vetorial, disponível no BDEP, para a seleção das coordenadas geográficas dos pontos de controle terrestres (PCTs). O georreferenciamento foi realizado separadamente para cada imagem utilizando-se o modelo de correção polinomial de primeira ordem, o qual requer um número mínimo de três pontos de controle. A matriz de transformação afim plana consiste em seis coeficientes: dois parâmetros de translação, dois de rotação e dois de escala, conforme indica a equação abaixo. O sistema de coordenadas utilizado foi o WGS 1984 (*World Geodetic System*).

$$\begin{aligned}x_0 &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y_0 &= b_0 + b_1x + b_2y\end{aligned}\tag{1}$$

onde:

x e y são as coordenadas de entrada;

x_0 e y_0 são as coordenadas de saída;

$a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$, são os coeficientes da matriz de transformação.

2.4.1.3 Geração da máscara e recorte da área de interesse

A geração da máscara contendo apenas a região de interesse teve como objetivo promover o isolamento da região aquática, bem como uniformizar o recorte da área selecionada para análise. O procedimento foi relativamente complexo, pois a configuração da

foz do rio Paraíba do Sul é bastante dinâmica, conforme observado nas cinquenta imagens de satélite avaliadas entre 1985 e 2007 e exemplificado na Figura 36. Como o interesse era avaliar a área aquática em comum nas imagens, a solução encontrada foi mapear a interface terra-água a partir de uma única data, gerando uma máscara preliminar, e posteriormente editá-la para evitar o seu contato com áreas emersas adjacentes em todo o conjunto de dados.

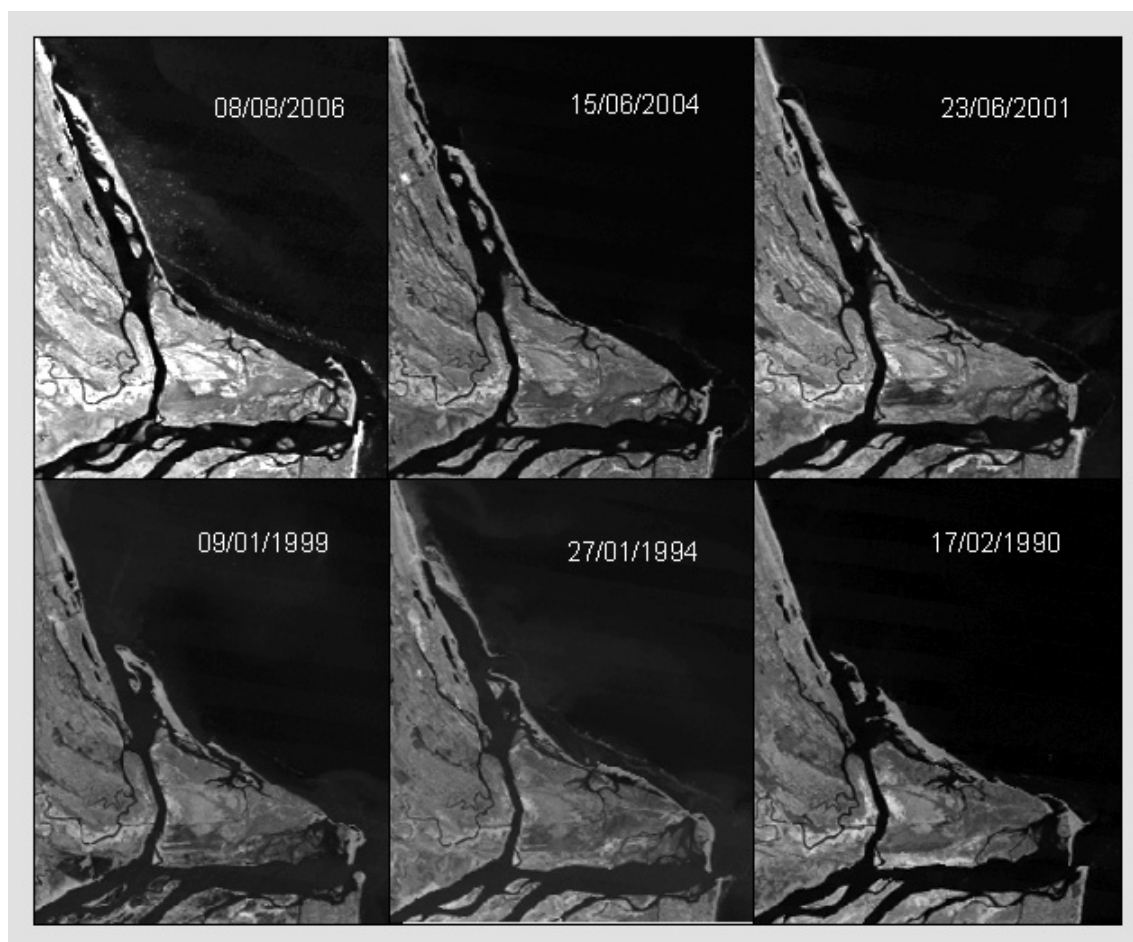


Figura 36 – Diferentes configurações na região do delta do rio Paraíba do Sul, observada a partir de imagens de satélite de diferentes datas.

Para a criação da máscara, utilizou-se a banda 4 referente à imagem Landsat 5 de 30/03/2005. Nesta faixa, localizada no infravermelho próximo, é forte a absorção da radiação pela água, tornando-a bastante adequada para o mapeamento de corpos hídricos, uma vez que a diferenciação entre a resposta espectral da água e dos alvos adjacentes emersos é bem marcada. Utilizou-se a ferramenta “*Raster Calculator*”, disponível no módulo “*Spacial Analyst*” do ArcGIS, para delimitar a interface terra-água: a partir da definição de um limiar de nível de cinza, gerava-se uma imagem binária contendo os grupos de valores acima e abaixo deste limiar, e o resultado foi avaliado apenas na área de interesse – a linha de costa e

a foz do rio. A melhor representação desta interface na imagem selecionada ocorreu com valor de nível de cinza igual a 20. Após exportar o resultado para uma estrutura de dados vetorial, selecionou-se somente a feição que representa a linha de costa, gerando o polígono que consiste na máscara preliminar.

O processo de edição visando à generalização da máscara foi realizado utilizando-se as ferramentas de edição disponíveis no *ArcMap* e compreendeu o estreitamento de algumas áreas de água pelo alargamento de outras de terra, principalmente nas proximidades da foz do rio. No restante da área recortada, a edição consistiu apenas em um leve deslocamento da linha de costa em direção ao oceano. Estes ajustes foram realizados cuidadosamente, evitando ao máximo comprometer o contorno original das feições, mas foram fundamentais para minimizar a ocorrência de números digitais referentes a porções de terra nos recortes das imagens avaliadas, evitando inconsistências nas análises realizadas posteriormente. A geração das estatísticas das imagens recortadas auxiliou na avaliação da eficiência da máscara, ou seja, na identificação de porções emersas através dos números digitais, realizando-se o procedimento de edição da máscara até que as estatísticas de grande parte das datas não estivessem *contaminadas* por valores digitais referentes à porção terrestre. Assim, obteve-se o isolamento adequado das porções emersas utilizando-se a máscara indicada na Figura 37, e todas as imagens referentes às bandas 2 e 3 foram recortadas no programa ArcGIS.

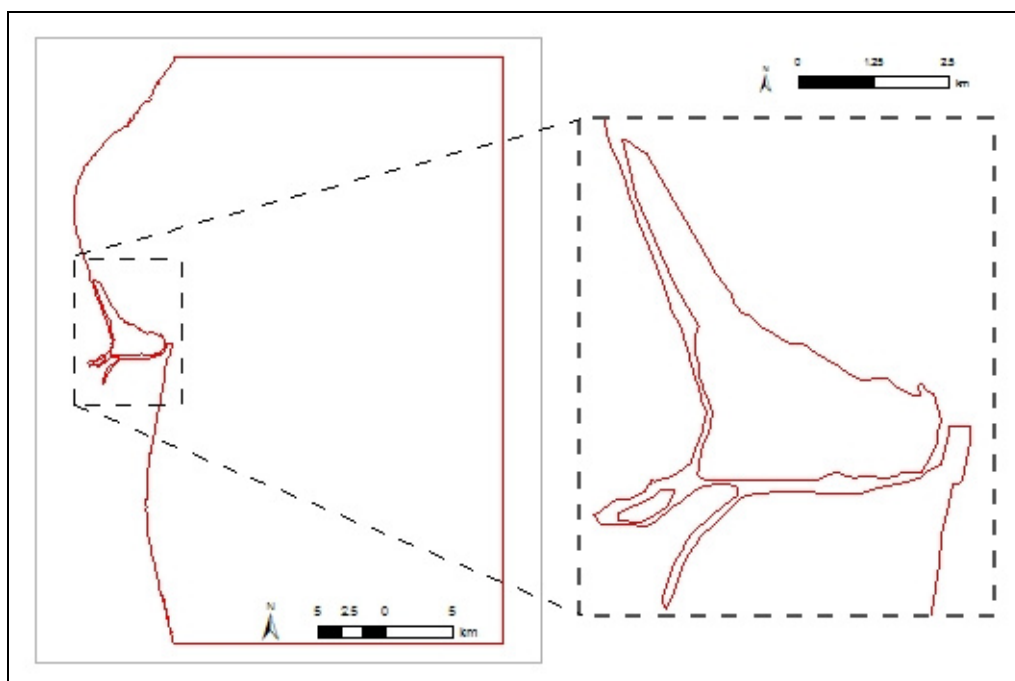


Figura 37 – Máscara na interface terra- água utilizada para recortar as imagens.

2.4.2 Processamento digital de imagem

Os produtos gerados para análise nesta pesquisa são de dois tipos: mapas temáticos (formato matricial) e polígonos (formato vetorial). Como a sequência de técnicas empregadas em cada um destes casos foi diferente, apresentam-se esquematizados na Figura 38 os procedimentos aplicados na extração de informação a partir das imagens.

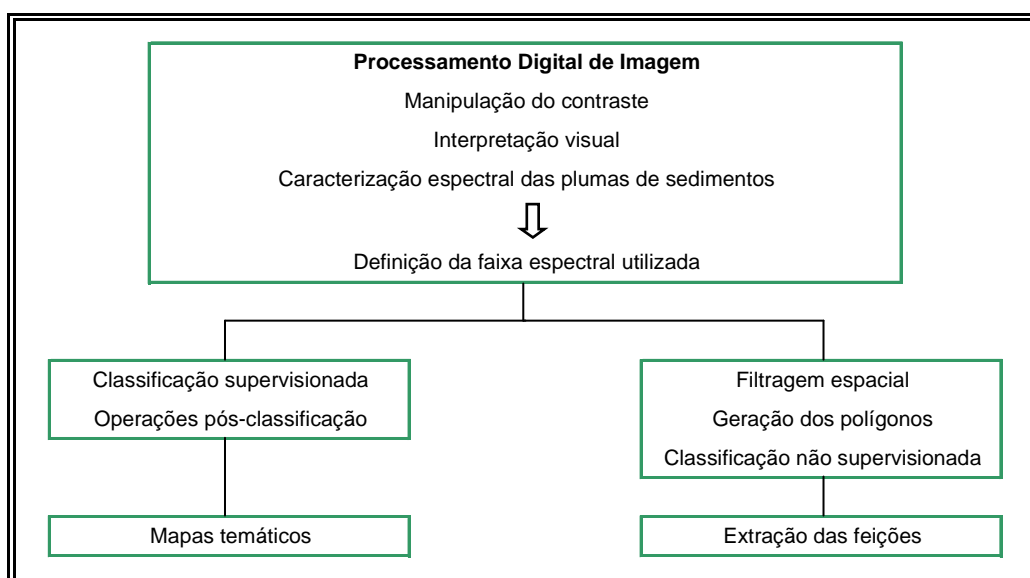


Figura 38 – Sequência metodológica adotada para geração dos produtos matriciais e vetoriais.

2.4.2.1 Manipulação do Contraste

Aplicou-se um realce de contraste linear em todas as imagens, a fim de melhorar a visualização das cenas e aumentar a quantidade de informação que pode ser extraída por análise visual. Esta manipulação foi realizada apenas para efeitos de visualização na tela, ou seja, não houve mudanças nos valores dos pixels no arquivo de dados. De acordo com a análise realizada, o efeito desejado era diferente, então as imagens foram realçadas linearmente através do contraste denominado mínimo-máximo, onde não há perda de informação, e do contraste de desvio padrão, onde se produz saturação e conseqüentemente, perda de informação em benefício de um realce maior em outra parte do histograma.

2.4.2.2 Interpretação Visual

O procedimento de correção atmosférica e o isolamento da região aquática pela utilização da máscara na interface terra-água facilitaram sobremaneira a realização da interpretação visual das imagens. Em geral, no primeiro momento de avaliação foram considerados elementos como tonalidade, textura, forma e tamanho para identificar o alvo de interesse e localizar nuvens e suas respectivas sombras, quando houvesse. A diferença de tonalidade entre a água turbida e a água límpida adjacente foi o principal elemento empregado na identificação das plumas, e os demais elementos foram muito úteis na discriminação de feições características de nuvens.

2.4.2.3 Caracterização espectral das plumas de sedimentos

Como o verde e o vermelho são as duas bandas mais citadas na literatura para estudos sobre sedimentos em suspensão (RITCHIE et al, 1987; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1991; KRITIKOS et al, 1974; NOVO et al, 1991; MILLER e McKEE, 2004; CHEN et al, 1992; TASSAN, 1997), avaliou-se e comparou-se a resposta espectral destas referidas regiões do espectro-eletromagnético visando definir qual seria a banda utilizada no mapeamento. Nesse sentido, os seguintes procedimentos foram realizados individualmente, de forma exploratória, nas bandas do verde e do vermelho, com as imagens devidamente recortadas na região de interesse: estatística básica para cada data, contendo valores mínimo, máximo, médio e desvio padrão; classificação não supervisionada; e geração de curvas de frequência espectral. As duas primeiras técnicas propiciaram uma comparação geral dos resultados obtidos em cada banda, mas foi a partir da análise da resposta do alvo através das curvas de frequência espacial que efetivamente foi definida a banda utilizada no mapeamento. Posteriormente, a estatística básica e a classificação não supervisionada da faixa espectral utilizada no mapeamento subsidiaram a definição dos limites das classes utilizadas oportunamente na classificação supervisionada.

2.4.2.3.1 Classificação não supervisionada

A classificação não supervisionada foi realizada com fins exploratórios nas imagens das bandas referentes ao verde e ao vermelho através do método *Natural Breaks*, disponível no *ArcGIS*. Neste método de agrupamento os intervalos das classes são determinados estatisticamente pelo encontro de pares de feições adjacentes entre os quais existe uma diferença relativamente grande no número de vezes que os respectivos níveis de cinza aparecem na cena. O agrupamento é realizado com base no histograma da imagem, encontrando-se os pontos de ruptura mais significativos nos dados a partir do número de classes definido previamente. Assim, o classificador escolhe os intervalos de classe que melhor agrupam valores similares e maximizam as diferenças entre classes (MITCHELL, 1999; LONGLEY et al, 2005). Por se tratar de uma classificação exploratória, definiu-se o número de classes igual a sete a fim de verificar o comportamento dos dados e o nível de discretização obtido.

A técnica *Natural Breaks* é uma implementação do método de Otimização *Jenks* (*Jenks Optimization*), também conhecido como Melhor Ajuste da Variância (GVF)⁹. A documentação da ESRI não especifica o algoritmo utilizado, trata-se de uma informação proprietária. No entanto, os algoritmos *Jenks* são amplamente empregados em pacotes GIS (De SMITH et al, 2006); em geral, a variância é minimizada no interior da classe e maximizada entre as classes por intermédio de uma série interativa de cálculos. Primeiro, o método calcula a média do conjunto de dados e a soma dos desvios quadráticos (SDAM) de cada observação. Um agrupamento arbitrário é definido para os dados numéricos, a média de cada classe é computada e calcula-se a soma dos desvios quadráticos de cada observação dentro da classe (SDCM). Realizam-se então os cálculos interativos: as observações são movidas de uma classe para outra em um esforço para reduzir a soma dos SDCM e, conseqüentemente, aumentar a estatística de GVF. O processo continua até que o valor de GVF não possa mais ser maximizado.

⁹ Para detalhes sobre o método de Otimização *Jenks*, consultar:

SLOCUM, T. A. *Thematic Cartography and Visualization*. New Jersey: Prentice Hall. 1999. 292 p.

JENKS, G. F.; CASPALL, F. C. Error on Choropleth maps: definition, measurement and reduction. *Annals of the Association of American Geographers*, 61 (2): 217-44.

2.4.2.3.2 Curvas de frequência espacial

As curvas de frequência espacial nas bandas do verde e do vermelho foram geradas ao longo de um perfil localizado longitudinalmente à foz do rio, para nove datas com características distintas no que se refere à magnitude da reflectância de superfície nas proximidades da foz. Como indica a Figura 39, este perfil foi localizado propositalmente em uma área que atravessasse toda a pluma, a fim de verificar o comportamento da resposta espectral da água com diferentes níveis de concentração de sedimentos. As seguintes datas foram avaliadas: 03/02/1985, 23/03/1985, 28/02/1988, 18/03/1989, 19/01/1997, 26/12/1987, 01/07/2004 e 12/01/2007; e os resultados são apresentados e discutidos no capítulo seguinte, item 3.1.

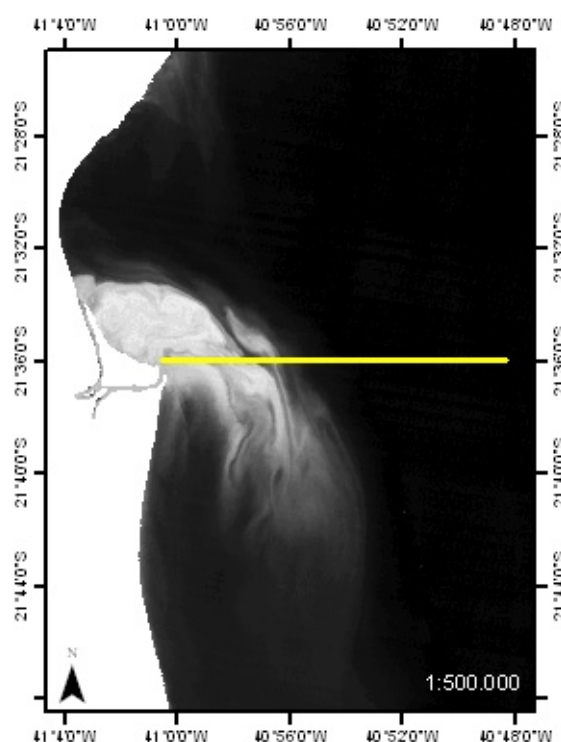


Figura 39 – Localização do perfil utilizado para a geração das curvas de frequência espacial.

2.4.2.4 Avaliação da resposta espectral dos sedimentos na banda do vermelho

Em função da indisponibilidade de dados de sedimentos em campo para estimar sua correlação com dados espectrais orbitais, nas bandas do visível e infravermelho próximo, a

definição da faixa espectral utilizada na análise das plumas de sedimentos baseou-se inicialmente em pesquisa bibliográfica e, em um segundo momento, nos resultados da caracterização espectral do alvo de interesse, descritas acima e apresentadas no capítulo 3.1.

Desta forma, após a definição de que seria utilizada a banda do vermelho para o mapeamento, foram geradas curvas de frequência espacial ao longo do perfil apresentado na Figura 39, para todo o conjunto de imagens que apresentavam padrão de sedimentos na forma de pluma. Isto foi particularmente útil no reconhecimento da variação espectral existente no interior da pluma, bem como na identificação de seu limite. Conseqüentemente, auxiliou bastante nos processos de classificação supervisionada e na extração da feição nas imagens.

2.4.2.5 Classificação supervisionada

Após a avaliação do comportamento espectral dos sedimentos na região do verde e do vermelho, foi realizada a classificação supervisionada apenas para imagens da faixa do vermelho. Utilizou-se uma classificação manual, na qual o número de classes, bem como os seus intervalos, foram previamente definidos e aplicados a todas as imagens visando unificar a escala de valores e propiciar a comparação dos cenários referentes a cada data. A classificação não supervisionada e a avaliação prévia de todo o conjunto de imagens serviram como base para o reconhecimento dos valores de reflectância de superfície mínimos e máximos em cada cena, representativos do objeto de interesse, a partir dos quais se extraiu o valor de reflectância máximo a ser adotado na classificação e se definiu o número de classes. Já o critério empregado na definição dos seus intervalos foi estabelecido a partir de pesquisa bibliográfica, obedecendo a forma geral de um relacionamento linear entre concentração de sedimentos suspensos e reflectância espectral, utilizado por diversos pesquisadores (RITCHIE et al, 1987; RITCHIE e COOPER, 1988; MILLER e McKEE, 2007; ROUSE e COLEMAN, 1976). A única exceção foi o primeiro intervalo de classe, cujo valor foi propositalmente definido para representar águas com influência mínima de sedimentos em sua resposta espectral.

Adotou-se uma escala qualitativa na legenda com a intenção de não enfatizar valores numéricos, uma vez que não existem dados mensurados em campo. Nesse sentido, é

importante considerar que a classificação supervisionada foi adotada para viabilizar a análise temporal, porém as classes, bem como os seus intervalos, foram criteriosamente definidos conforme explicação anterior, e são apresentados oportunamente no capítulo de resultados.

2.4.2.6 Generalização e procedimentos pós-classificação

As imagens classificadas foram submetidas a um processo de generalização para eliminar ruídos, como pequenas áreas mal definidas e pixels isolados e fora de contexto. Nas imagens avaliadas, os principais problemas na classificação referiam-se à presença de nuvens e suas respectivas sombras. Testaram-se algumas funções disponíveis no software *ArcGIS*, utilizadas com esta finalidade, desde a aplicação de filtros de moda até funções combinadas de generalização. O melhor resultado foi obtido utilizando-se as ferramentas *Nibble* e *Focal Majority* em conjunto, porque as principais heterogeneidades eram causadas por nuvens, e estas feições podem se apresentar com tamanhos bem variados. A função *Nibble* permite selecionar áreas de qualquer dimensão para atribuir-lhe o valor de seu vizinho mais próximo, calculado de acordo com a distância Euclidiana. Após este procedimento, as bordas das zonas foram suavizadas através da ferramenta *Focal Majority*, que funciona de forma similar a um filtro de moda, no qual se especifica a forma e o tamanho da máscara desejada. Utilizou-se uma janela quadrada, com dimensão de 15x15, onde a célula central é substituída pelo valor mais comum na vizinhança.

2.4.2.7 Filtragem Espacial

As cenas da banda do vermelho foram submetidas ao procedimento de filtragem espacial através da operação de convolução utilizando-se um filtro passa-baixa de média, com vizinhança de 3x3, conforme matriz e fórmula abaixo:

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{matrix} \quad (2)$$

$$V = \left[\frac{\sum_{i=1}^q \left(\sum_{j=1}^q f_{ij} d_{ij} \right)}{F} \right] \quad (3)$$

onde:

f_{ij} = o coeficiente da matriz de convolução na posição i,j na máscara

d_{ij} = o valor do pixel na posição correspondente a f_{ij}

q = a dimensão da máscara, assumindo uma máscara quadrada (se $q=3$, então a máscara é 3 x 3)

F = soma dos coeficientes da máscara, ou 1 se a soma for igual a 0

V = valor do pixel de saída

Fonte: LEICA GEOSYSTEMS GEOSPATIAL IMAGING (2005).

Uma máscara de convolução com estes coeficientes é amplamente utilizada para melhorar a aparência da imagem, produzindo uma pequena suavização sem alterar significativamente os valores originais dos dados. As imagens filtradas foram utilizadas apenas nas análises para a extração das feições; já as análises de classificação basearam-se nas imagens sem aplicação de filtro espacial, uma vez que os procedimentos pós-classificação mostraram-se indispensáveis para generalizar feições de dimensões maiores, como é o caso das nuvens. Conseqüentemente, os pequenos ruídos e valores espúrios foram eliminados automaticamente na geração dos mapas temáticos. Assim, evitou-se inserir mais um processo na manipulação dos valores adquiridos pelo sensor.

2.4.3 Análise espacial

2.4.3.1 Extração das feições

Do conjunto de imagens de satélite analisado nesta dissertação, a extração da feição de interesse foi realizada em todas as imagens onde o padrão dos sedimentos observado foi em forma de pluma, com a presença marcante da frente de sedimentos. Para extrair esta feição, procedeu-se à geração de um polígono cuja linha coincidissem com o contorno da pluma. Neste processo, inicialmente aplicou-se o filtro passa-baixa nas imagens, descrito acima, obtendo-se um contorno menos ruidoso. A partir da análise da curva de frequência espacial de cada data,

definiram-se os valores de números digitais que poderiam representar o limite da frente de sedimentos e geraram-se as linhas de contorno correspondentes através da função *Contourn List*, disponível no programa utilizado, conforme exemplifica a Figura 40a. Os procedimentos de filtragem e de geração dos contornos foram realizados de forma automatizada, e depois as imagens foram analisadas individualmente para selecionar a linha que melhor representasse o limite da frente de sedimentos. A partir da escolha do contorno, criou-se o polígono para cada data, com a realização de pequenos procedimentos de edição para fechá-lo nas bordas, quando necessário (Figura 40b).

Este resultado foi gerado através de um processo semi-automático, porém a definição do limite da feição foi realizada pela análise do pesquisador. Visando encontrar uma técnica simples na qual o limite da pluma fosse estabelecido de forma automática, procedeu-se a uma classificação não supervisionada através do método *Natural Breaks*, com três classes (Figura 40c). De acordo com a avaliação do pesquisador, este número de classes seria o mais indicado para destacar o contorno da pluma, pois para cada imagem o algoritmo determinará estatisticamente três intervalos que maximizam as diferenças entre classes, definindo dois valores de quebra. O primeiro deve representar o limite da água sem contribuição significativa

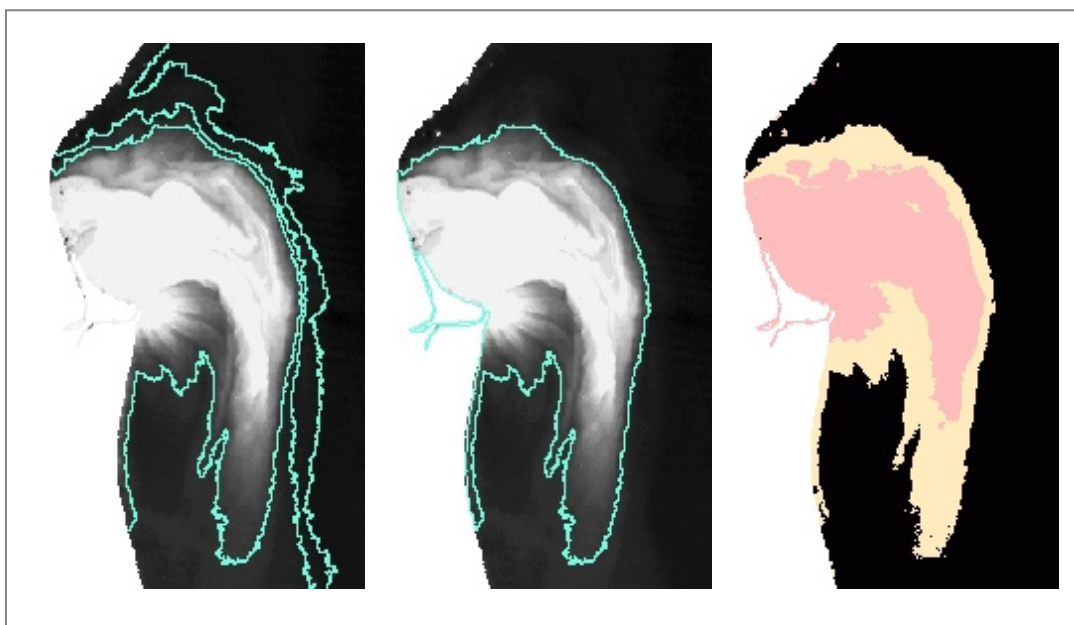


Figura 40 – Processo para extração da pluma de sedimentos: a) geração das linhas de contorno, a partir dos níveis de cinza indicados pela análise da curva de frequência espacial; b) definição da linha que melhor representa a pluma, por interpretação visual, e geração do polígono com edição nas bordas; c) classificação não-supervisionada da imagem através da técnica *natural breaks*, com três classes.

de sedimentos, e o segundo, a área de maior diferenciação interna da pluma. Desta forma, a primeira classe indica águas mais limpas, e a segunda e a terceira representam a pluma, sendo que o contorno da água turbida poderia coincidir com o início da segunda classe. Os resultados desta avaliação estão no item 3.1.

2.4.3.2 Elaboração do Banco de Dados

O banco de dados foi implementado no formato nativo do software *ArcGIS* 9.2, denominado *Geodatabase*¹⁰, uma base relacional que armazena dados geográficos. As principais informações espaciais da base são de natureza vetorial, geradas pelo processo de extração de feições das imagens. Para cada linha da estrutura tabular existe uma representação no mapa, com topologia de polígono, representando a pluma em determinada data. A partir desta tabela inicial foram realizadas todas as operações de análise espacial, que originaram novas tabelas ou apenas novas colunas naquelas já existentes. Em todos os casos, cada feição vetorial no mapa representa um elemento do mundo real descrito por um conjunto de atributos organizado em tabela. Os principais atributos são: informações de identificação e localização, área, perímetro e distância, associados ou não a dados de direção.

2.4.3.3 Análises Espaciais

As análises espaciais da pluma de sedimentos realizadas no contexto do banco de dados incluíram o mapa de frequência de ocorrência, as análises direcionais e de distância das plumas considerando a foz do rio Paraíba do Sul. O mapa de frequência foi gerado com base na função de análise topológica de sobreposição (*overlay*) por união, disponível nas ferramentas de geoprocessamento. O intuito desta operação é integrar feições contidas em diversos níveis de informação, unindo-as fisicamente em uma única camada. Todos os objetos envolvidos são incluídos neste novo conjunto de dados, aumentando o conteúdo de informações no espaço geográfico de referência e na estrutura tabular dos dados. O número de

¹⁰ Maiores informações sobre *geodatabases* estão disponíveis nos manuais do programa *ArcGIS*. Sugere-se a consulta a seguinte referência: ESRI. *What is ArcGIS?* Redlands, Califórnia: ESRI Press, 2001 – 2004. 125 p.

polígonos existente na camada de saída pode ser maior que a soma de todos os polígonos presentes nas camadas de entrada, pois eles são divididos por múltiplas feições. A Figura 41 ilustra este processo, ao apresentar os princípios básicos de sobreposição por união entre polígonos. Antes de realizar a operação de sobreposição, foi necessário criar um atributo com valor igual a 1 para cada feição, a fim de utilizá-lo depois como contador para a geração do mapa temático de frequência.

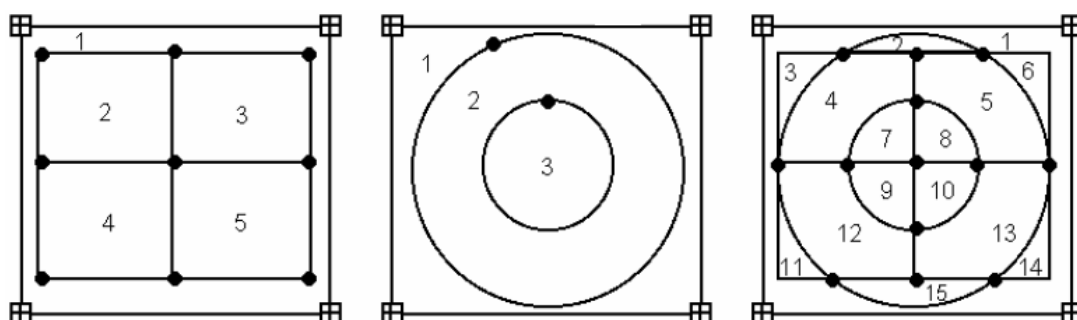


Figura 41 – Esquema ilustrando o processo de sobreposição por união entre polígonos. As duas primeiras imagens representam as camadas de entrada e a última, o *layer* de saída. Primeiro, há a quebra nas interseções entre as camadas de entrada, depois as feições de mapa são cruzadas e o resultado acumula todas as feições, não havendo cortes, e então a topologia é contruída.

Para a realização das análises direcionais, gerou-se inicialmente uma máscara com a dimensão da área de cobertura de plumas, subdividida em 9 direções a partir de um ponto central estabelecido na foz do rio Paraíba do Sul, como indicado na Figura 42. As radiais de 22,5° foram definidas para adotar o padrão dos pontos cardeais, colaterais ou subcolaterais, que formam a rosa dos ventos. Posteriormente foi realizada uma nova análise de sobreposição, desta vez entre a máscara e a camada que contém as feições, e o produto desta análise é uma nova camada de informação que contém cada polígono subdividido pelas direções da máscara. Assim, para cada linha da tabela do *layer* de entrada existem 9 linhas na tabela do *layer* de saída. Este mesmo processo de sobreposição foi realizado com a camada de feições que originou o mapa de frequência, possibilitando análises direcionais considerando a frequência de ocorrência no espaço, além das análises pontuais, onde as plumas são avaliadas individualmente.

Para efetuar as análises do alcance espacial da pluma tendo como base a foz do rio Paraíba do Sul cada polígono foi subdividido em pequenos segmentos de reta determinados pelos seus vértices. Isto foi feito tanto para a camada que contém os polígonos subdivididos

pelas direções quanto para a camada que contém as informações de frequência associadas às direções. O objetivo foi acrescentar a informação de distância da pluma em relação à foz do rio nas análises espaço-temporais realizadas.

Por fim, determinou-se o centro de cada polígono que representa a pluma de sedimentos em determinada data, o qual serviu como um indicador de sua forma e como base para análise de *buffer*. Um *buffer* constitui uma zona em torno de uma feição de mapa, medida em unidades de distância ou tempo, utilizado para avaliação de proximidade. Neste caso, serviu para mapear as áreas distantes até 1000 metros do centro de cada polígono, indicando áreas onde é maior a concentração de pontos centrais, utilizada para análise conjunta da forma da pluma, realizada também por interpretação visual.

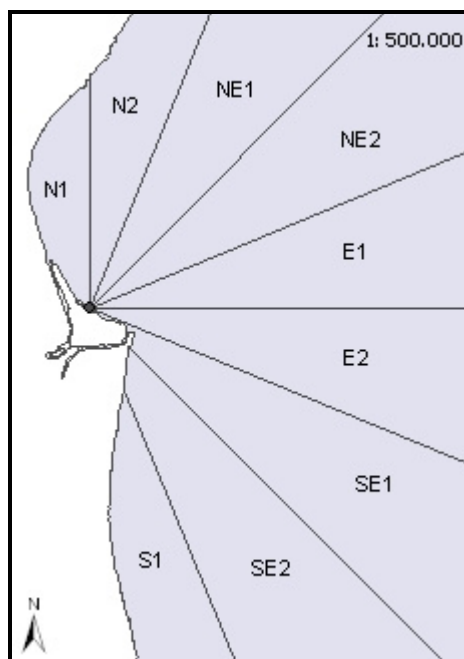


Figura 42 – Recorte da área de estudo dividido segundo as direções empregadas nas análises.

3. RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

*Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.*

Chico Xavier

3.1 Indicação de método para mapeamento de plumas de sedimentos

O método testado nesta dissertação para mapear plumas de sedimentos costeiras a partir de imagens de sensoriamento remoto orbital mostrou-se bastante adequado, atendendo ao primeiro objetivo específico desta pesquisa. Utilizaram-se 50 imagens ao longo de 22 anos, sob diferentes condições ambientais, atestando a aplicabilidade das técnicas empregadas para identificação da feição de interesse.

Neste tópico, serão discutidos apenas os principais processos que envolveram a definição da metodologia proposta nesta dissertação. Entende-se que algumas técnicas específicas empregadas como parte do processo de identificação da feição poderiam ser diferentes, em função da disponibilidade de ferramentas no software utilizado, sem que houvesse qualquer mudança significativa na metodologia. Outras são básicas e constam em qualquer aplicação de sensoriamento remoto, como o georreferenciamento. Assim, os processos específicos e indispensáveis à obtenção dos resultados através do método testado e indicado são discutidos abaixo, mas todas as técnicas utilizadas constam no fluxograma da metodologia indicada.

Correção Atmosférica

O procedimento de correção atmosférica é indispensável para estimar a concentração de material em suspensão na água, seja quantitativa ou qualitativamente, e garantir a comparabilidade entre cenários de diferentes datas. A definição do método deve considerar principalmente a finalidade da aplicação visando assegurar o padrão de confiabilidade

necessário. Entre os mais amplamente empregados na literatura destacam-se o de subtração do pixel escuro, desenvolvido por Chavez (1988), e o 5S e 6S. Nesta dissertação optou-se por utilizar o 6S, pois os métodos de transferência radiativa são mais acurados que os métodos empíricos, mesmo fazendo uso de modelos pré-estabelecidos.

Apenas para identificar e extrair a frente da pluma de sedimentos em imagens orbitais, com base em técnicas de análise visual, a correção atmosférica não é indispensável, uma vez que neste processo não é necessário utilizar, de forma absoluta ou relativa, os valores dos níveis de cinza. Entretanto, a correção ajuda na identificação, principalmente quando os sedimentos apresentam-se de forma mais difusa. Importante lembrar que, sem o procedimento de correção, nenhuma avaliação temporal da intensidade da pluma pode ser realizada.

Faixa Espectral Utilizada

Com relação à faixa espectral empregada, os resultados encontrados nesta pesquisa estão de acordo com diversos estudos realizados em campo e laboratório, os quais têm demonstrado que as bandas espectrais mais sensíveis à presença de sedimentos em suspensão na água encontram-se localizadas na região do verde e do vermelho (RITCHIE et al, 1987; CHOUBEY e SUBRAMANIAN, 1990; KRITIKOS et al, 1974; NOVO et al, 1991; MILLER e McKEE, 2004; CHEN et al, 1992). Apesar de a bibliografia especializada sugerir ainda a utilização do infravermelho próximo, esta possibilidade não foi constatada nas imagens avaliadas. Mesmo neste caso, tal resultado está de acordo com vários outros trabalhos, como o realizado por Ritchie e Cooper (1988) e Choubey e Subramanian (1990), que não encontraram bons coeficientes de determinação utilizando o IVP (Infravermelho Próximo) para estimar a concentração de sedimentos. Talvez isto possa ser explicado porque este alvo responde em uma faixa particularmente estreita do IVP, enquanto os sensores orbitais multiespectrais apresentam uma resolução espectral menor, ou seja, a largura da banda é muito grande, tornando-a pouco propícia para identificar esta feição.

A avaliação da resposta espectral dos sedimentos na região da foz do rio Paraíba do Sul indica que, em menores concentrações, a refletância é maior na região do verde, enquanto as maiores concentrações refletem mais na região do vermelho. A Figura 43 evidencia este comportamento, ao apresentar dois mapas de subtração das bandas 2 e 3 para duas datas

distintas, ou seja, a diferença no valor de reflectância de superfície entre as respectivas bandas para uma data específica na área de estudo. Como pode ser observado, os tons de rosa nos mapas apresentam valores negativos e representam as áreas onde a reflectância é maior no vermelho; estas áreas estão localizadas próximas à foz, onde é mais alta a concentração de sedimentos. Já os tons de verde apresentam valores positivos e indicam as áreas onde a reflectância é maior no verde; estas ocupam a maior parte da imagem, e estão localizadas nas áreas mais intermediárias da pluma, expandindo-se para toda a região costeiro-oceânica adjacente, onde a concentração de sedimentos é menor.

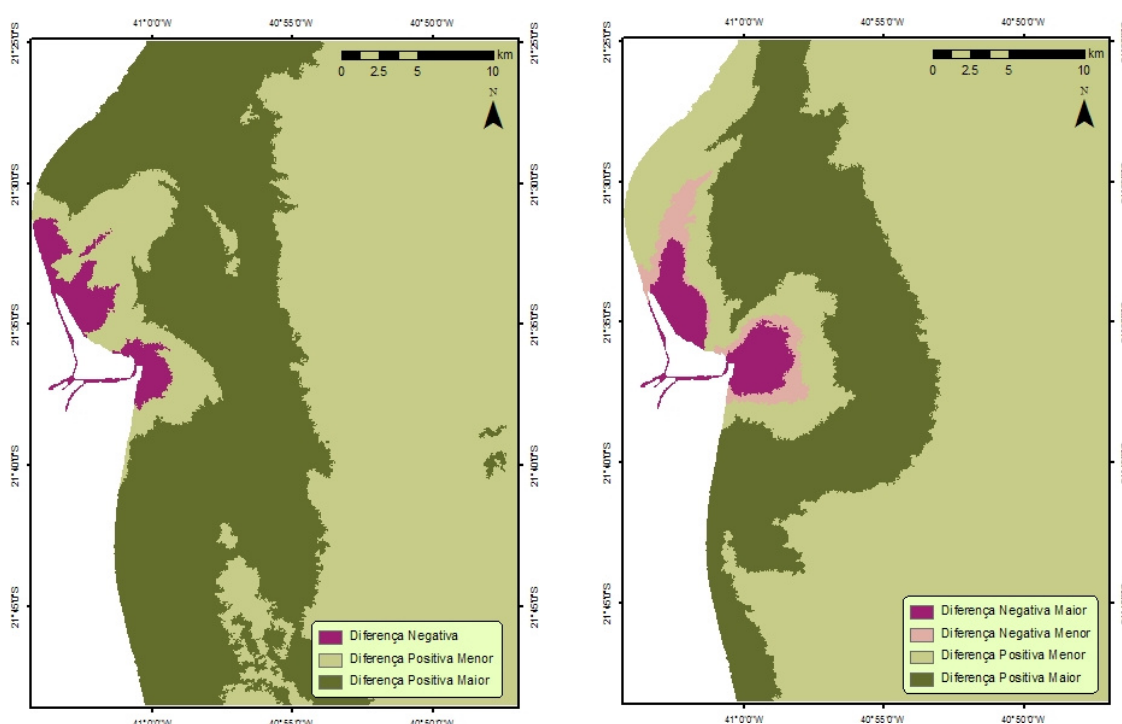


Figura 43 – Mapa de subtração das bandas correspondentes ao verde e ao vermelho para duas datas distintas: à esquerda, 18/03/1989; à direita, 19/01/1997. As diferenças positivas representam áreas onde o valor do ND registrado no verde é maior que no vermelho, as negativas, onde o ND é maior no vermelho.

Outra forma de visualizar facilmente este comportamento espectral é apresentada nas Figuras 43, 44 e 45, onde se acompanham os valores de níveis de cinza ao longo de um perfil localizado perpendicularmente à foz do rio em três datas distintas. Este perfil atravessa a pluma de sedimentos e alcança a área oceânica, onde a concentração de partículas em suspensão não é significativa, e as datas foram escolhidas para representar diferentes condições ambientais no que se refere à magnitude da pluma. As figuras mostram este gráfico e um trecho da imagem correspondente, com detalhe na área da foz. Como se observa, a Figura 44 foi dividida em quatro áreas identificadas no gráfico e na imagem: na primeira, a

reflectância no vermelho é maior que no verde, e a sua localização é bem próxima à foz do rio; a segunda é uma área de transição, onde os valores registrados nestas bandas são bem parecidos; já a terceira e a quarta representam áreas onde é menor a concentração de sedimentos e o valor de reflectância no verde é mais elevado. Na quarta, amplia-se a diferença entre os valores de níveis de cinza nas respectivas bandas, porque a reflectância no verde é mais sensível às menores concentrações. A Figura 45 representa uma condição ambiental de pequena concentração de material em suspensão em toda a área de estudo, e se observam valores mais elevados na região do verde no perfil inteiro. Por último, a análise da Figura 46 indica que o perfil atravessa duas áreas com maiores concentrações de sedimentos (A1 e A3), as quais estão separadas por uma área cuja concentração é menor (A2), até que alcança uma região mais extensa com diminuição da concentração de sedimentos (A4). O cenário da pluma nesta data é exatamente este, como se observa no detalhe da imagem à direita.

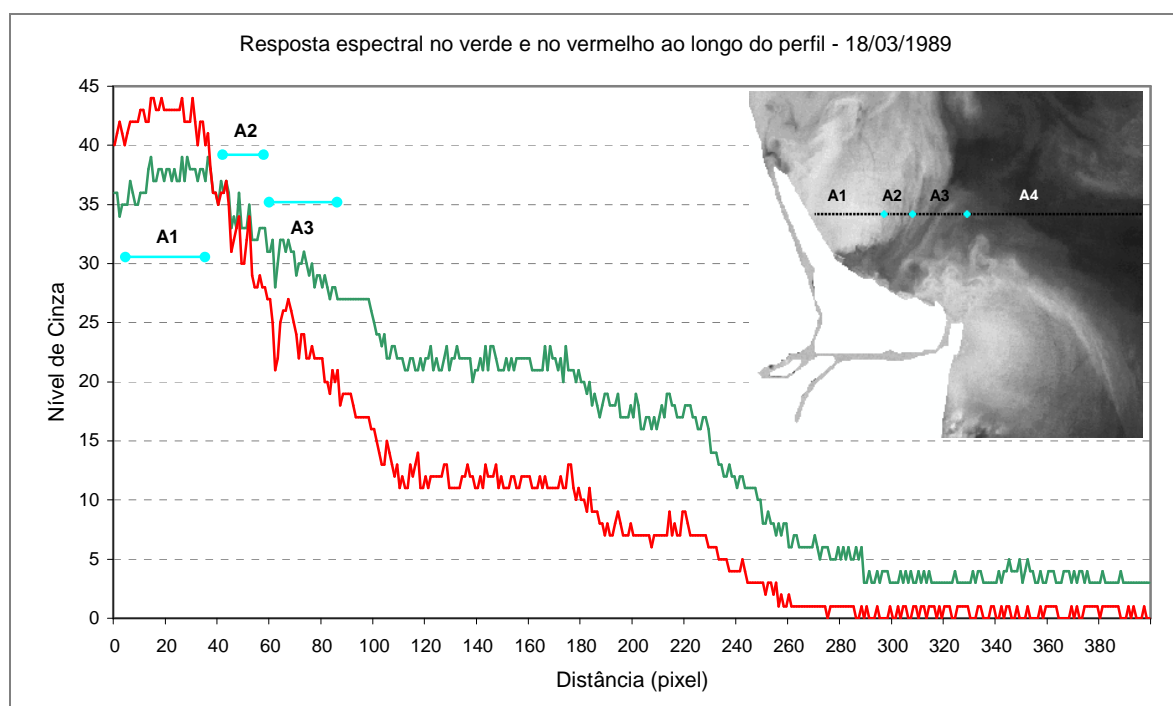


Figura 44 – Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 18/03/1989.

Esta resposta espectral dos sedimentos nas bandas avaliadas obedeceu ao comportamento descrito na literatura. Como indicam diversas pesquisas, a região do verde é mais sensível às menores concentrações de sedimentos, enquanto nas concentrações mais altas a região de máxima radiação solar refletida desloca-se para comprimentos de onda maiores, como o vermelho (CURRAN e NOVO, 1988; RITCHIE, 1976; NOVO et al, 1989 *a*;

WITTE et al, 1982). Nesta faixa espectral, a saturação do valor mensurado remotamente para estimar a quantidade de sedimentos ocorre com concentrações mais altas. Provavelmente por esta razão a banda do vermelho seja a mais amplamente utilizada em estudos de material em suspensão na água.

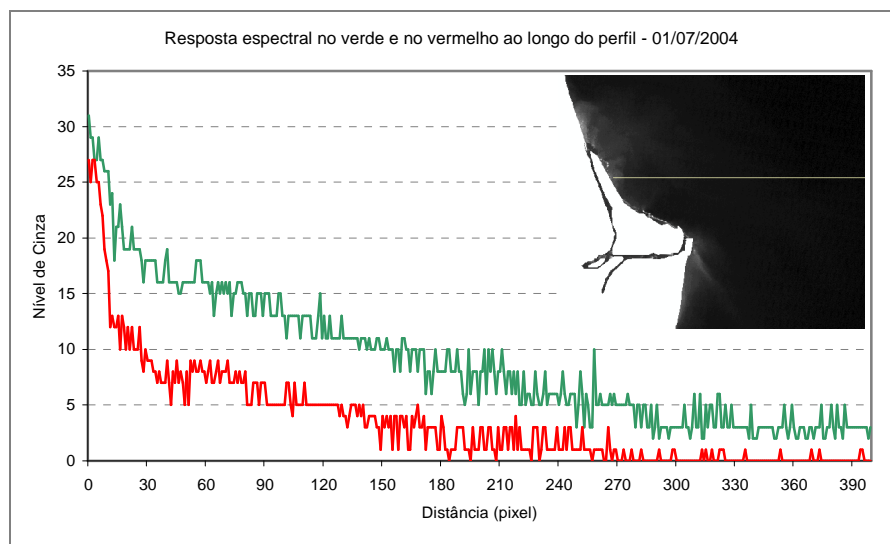


Figura 45 - Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 01/07/2004.

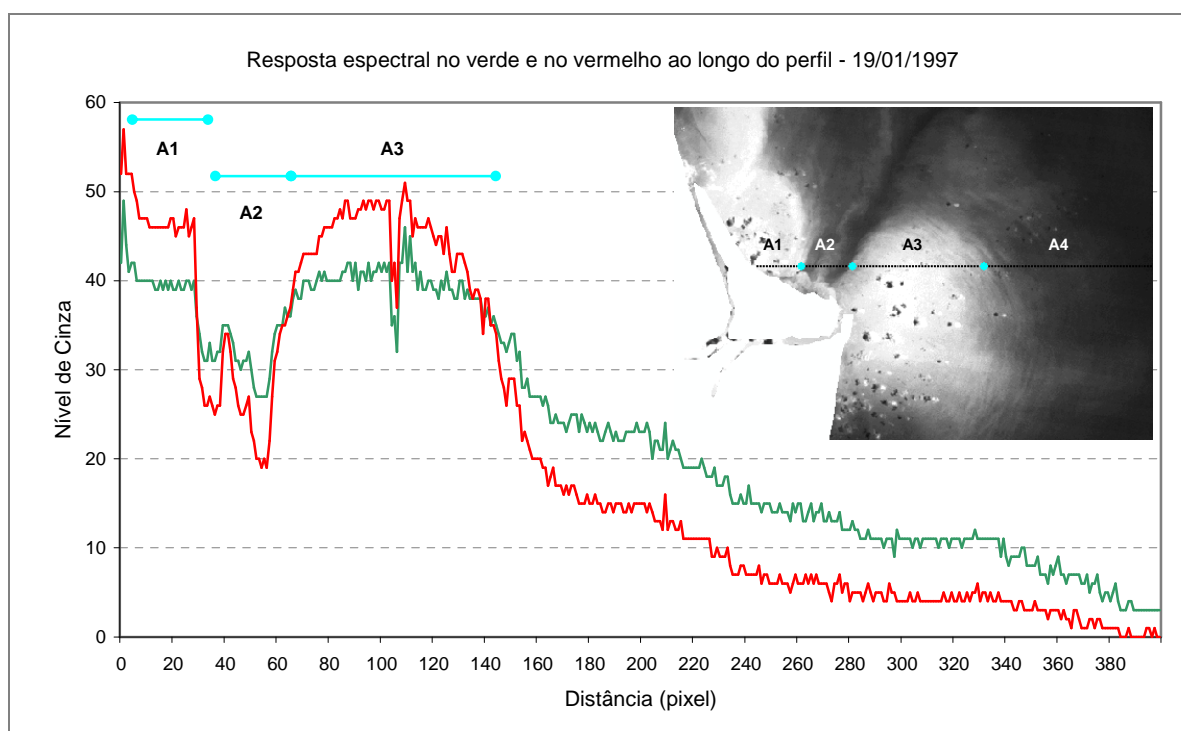


Figura 46 - Gráfico da resposta espectral no verde e no vermelho ao longo do perfil em 19/01/1997.

Geração dos Mapas Temáticos

A classificação não supervisionada, realizada de forma exploratória, em conjunto com a análise das estatísticas e das curvas de frequência espacial na banda do vermelho, foram fundamentais na caracterização espectral dos sedimentos, formando a base indispensável à definição do número e do intervalo das classes utilizadas para a geração dos mapas qualitativos de CSS. Somente com esta classificação supervisionada foi possível adotar uma escala comum para toda série temporal de imagens, assegurando a comparabilidade dos cenários ambientais.

A escala qualitativa de intensidade de CSS adotada baseou-se na existência de forte correlação positiva entre reflectância espectral e a quantidade de partículas em suspensão na água, considerando a hipótese de um relacionamento linear. Na prática, sabe-se que este relacionamento tem uma forma assíntota, mas vários pesquisadores encontraram melhores coeficientes de determinação a partir da hipótese simplificada de um relacionamento linear (RITCHIE et al, 1987; RITCHIE e COOPER, 1988; MILLER e McKEE, 2004; ROUSE e COLEMAN, 1976; NOVO, 1991), justificando a sua utilização nesta pesquisa. A Tabela 1 indica os valores utilizados na definição das classes. Como explicado anteriormente, os pixels apresentam o valor de reflectância de superfície escalonado para níveis de cinza, a fim de facilitar o tratamento das imagens em softwares específicos de PDI; a correspondência entre estes valores é indicada na tabela abaixo.

Tabela 1 – Informações sobre as classes empregadas no mapeamento temático.

Nível de Cinza		Reflectância (%)		Classe
Limite Inferior	Limite Superior	Limite Inferior	Limite Superior	
0	5	0,0	2,0	Não Significativa
5	16	2,0	6,3	Baixa
16	29	6,3	11,4	Média
29	42	11,4	16,5	Alta
42	55	16,5	21,6	Muito Alta

As operações pós-classificação foram fundamentais para diminuir a aparência ruidosa das imagens e corrigir áreas mal classificadas pela influência das nuvens e suas respectivas

sombras. Conseqüentemente, não se aplicou nenhum filtro espacial antes da classificação, evitando-se superposição de processamentos para obtenção de resultado similar.

Extração da Feição de interesse

A extração da feição de interesse foi realizada em todas as imagens onde o padrão de sedimentos apresentava-se bem delimitado, na forma de pluma. A integração entre a análise visual e procedimentos semi-automáticos para delimitação do alvo mostrou-se extremamente positiva, pois uniu a habilidade do analista em identificar o contorno da pluma com a capacidade computacional de extrair feições. O polígono resultante manteve então a forma exata com que aparece na imagem, e procedimentos simples de edição manual só foram realizados para fechá-lo nas bordas do seu lado oeste, onde está localizada a foz do rio Paraíba do Sul.

No que se refere à delimitação automática da pluma, o classificador retornou um resultado similar à avaliação visual com extração semi-automática da feição em 75 % dos casos, utilizando o método quebras naturais com três classes, como apresentado na Figura 47. Este resultado corrobora com a técnica escolhida, e indica que o classificador pode ser utilizado como um indicador da localização da frente da pluma, ou mesmo para extrair a feição. A escolha da técnica depende da acurácia necessária à aplicação, da disponibilidade de tempo e de profissional capacitado e da complexidade da própria imagem. Nos casos em que o classificador apresentou um resultado diferente daquele encontrado pelo analista, entende-se que a presença de nuvens ou ruídos nas imagens afetou significativamente a definição das classes pelo algoritmo, como exemplifica a Figura 48.

Integração entre Análise Visual e Técnicas Automáticas e Semi-automáticas

Como destacado acima, a integração de técnicas de análise visual com técnicas automáticas ou semi-automáticas nas análises de sedimentos em suspensão na água produziu ótimos resultados. A dificuldade na obtenção de imagens totalmente livres de nuvens e a existência de ruídos tornam mais complexa a utilização de técnicas baseadas apenas em processos automatizados.

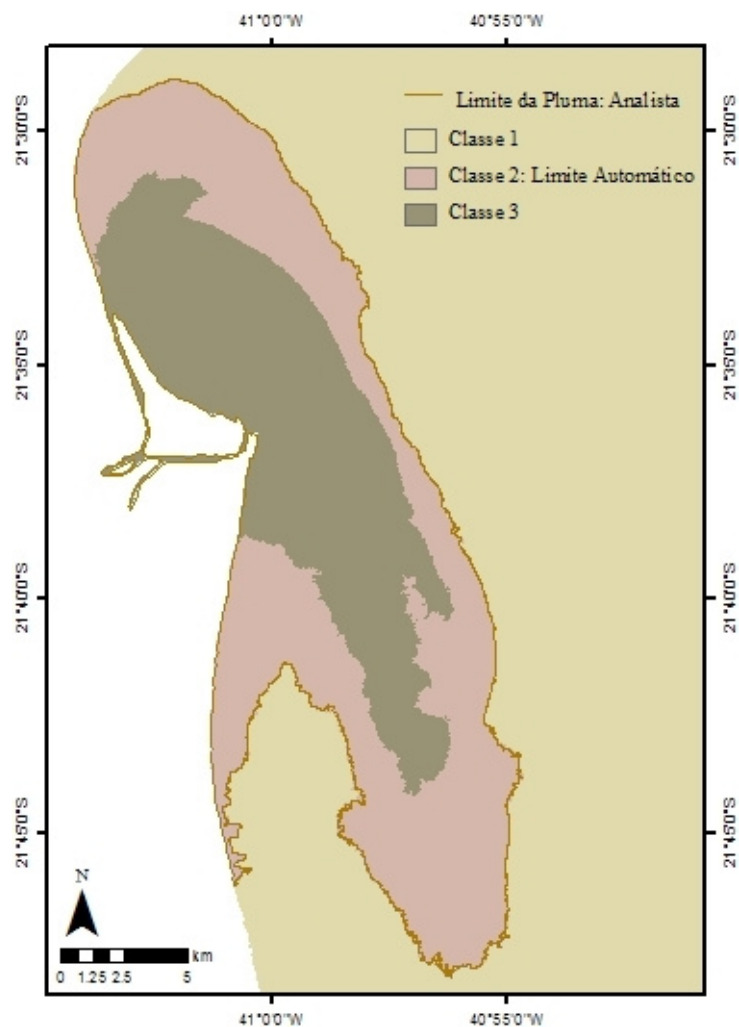


Figura 47 – Definição do limite da pluma pela classificação por quebras naturais com 3 classes, e o limite definido pelo analista.

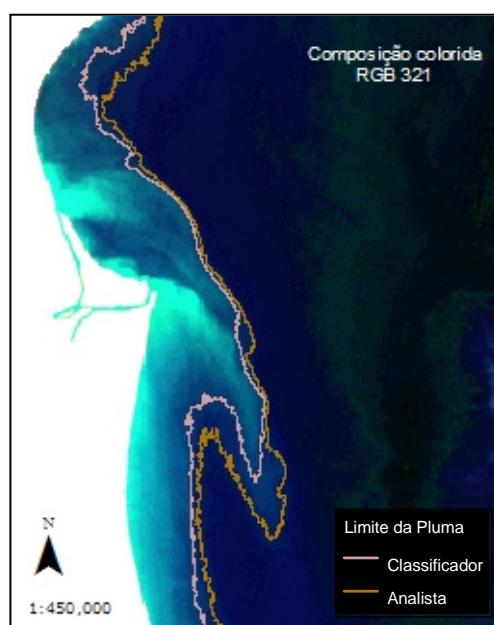


Figura 48 – Definição do limite da pluma pela segunda classe do classificador e pelo analista.

O Método: Considerações e Fluxograma

O método proposto nesta dissertação para avaliar qualitativamente sedimentos em suspensão na água é constituído por um conjunto de processos e está sintetizado na Figura 49; as técnicas adotadas em cada um deles encontram-se descritas no capítulo 2 e discutidas nos itens anteriores deste capítulo. Recomenda-se o seu emprego em outros locais, mas é importante considerar que a escala de magnitude adotada para a concentração de sedimentos, bem como suas respectivas classes, devem ser obtidas a partir de dados extraídos da região de interesse. As informações qualitativas de concentração obtidas para diferentes locais não devem ser comparadas entre si, porque não houve calibração com dados de campo. Assim, não é possível utilizar os valores desta pesquisa para a classificação supervisionada em outras regiões, e não se deve compará-los em termos de concentração com outra área de estudo, para estabelecer, por exemplo, qual sistema aquático apresenta maior concentração de sedimentos. Como abordado na fundamentação teórica, diversos aspectos inerentes aos sedimentos contribuem para a magnitude da reflectância registrada remotamente; desta forma, materiais com origens distintas apresentam diferenças na resposta espectral em função de outros fatores, além de sua concentração. Estas restrições são inerentes à aplicação em questão e, portanto, independem do método utilizado. Apenas os mapeamentos quantitativos podem ser comparados entre si, pois foram previamente calibrados com dados de campo e representam valores absolutos.

As técnicas utilizadas no método proposto são simples e consagradas na literatura; talvez a sua maior dificuldade esteja na etapa de pré-processamento da imagem, na correção atmosférica. Caso não seja possível realizá-la, torna-se inviável estimar qualitativamente a concentração de sedimentos; no entanto, de acordo com os conceitos expostos por Song et al (2001), as feições de pluma podem ser extraídas nas imagens desde que se empreguem técnicas que não considerem o valor dos níveis de cinza de forma absoluta, como as utilizadas nesta pesquisa. Nesse sentido, as restrições comentadas acima não se aplicariam às análises realizadas através dos polígonos; caso haja interesse, os limites das plumas de diferentes locais podem até ser comparados entre si, mas não haverá nenhuma informação quanto à magnitude da sua concentração de sedimentos.

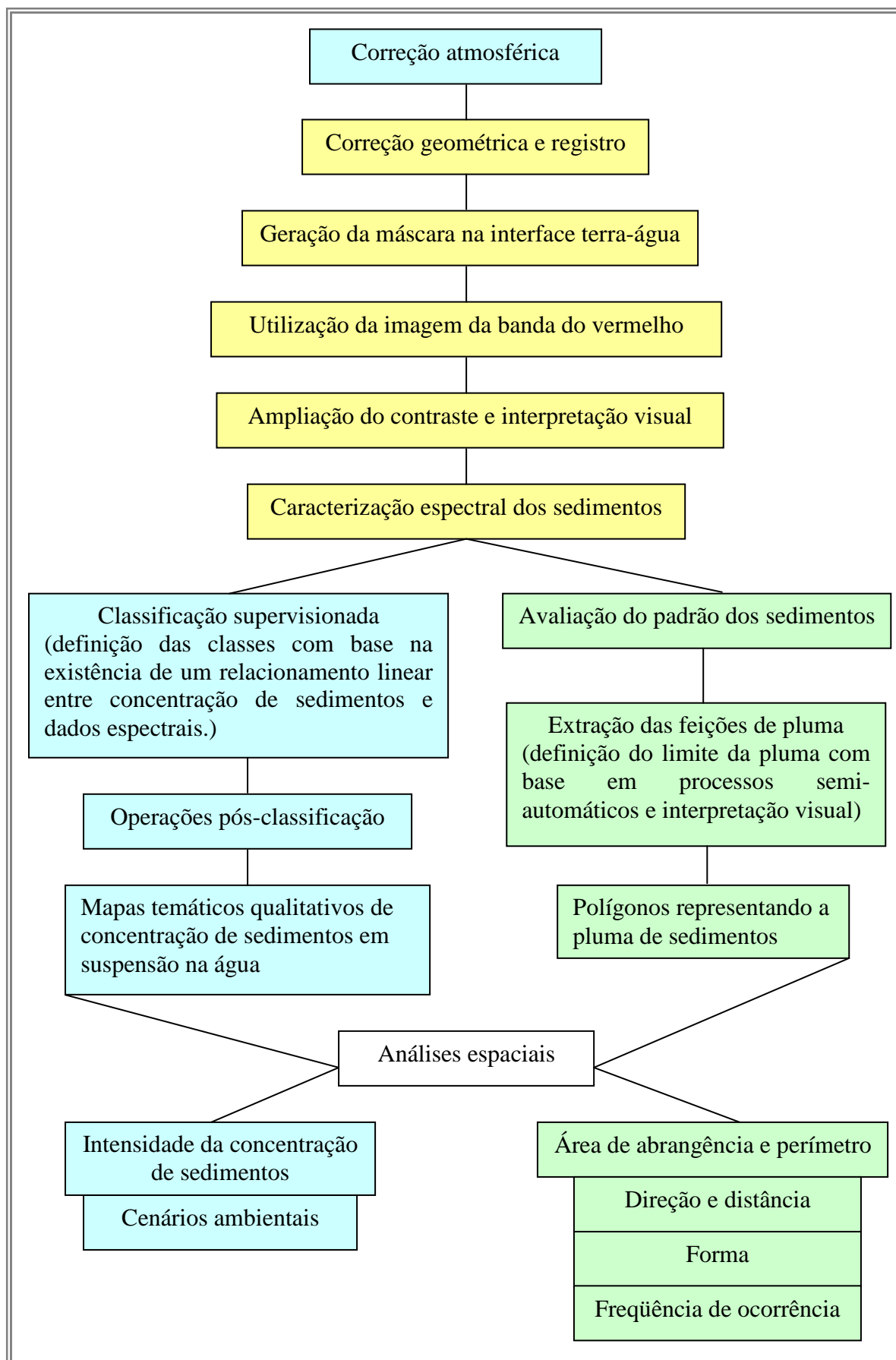


Figura 49 – Fluxograma do método proposto para mapear pluma de sedimentos.

Para utilizar parcialmente este método, somente para as análises em que não é fundamental realizar a correção atmosférica, deve-se adotar a sequência sugerida na Figura 49, em amarelo e verde. Conforme comentado, pode haver mais dificuldade na extração da feição nestas imagens, e recomenda-se bastante critério na realização destas análises.

3.2 Avaliação de sedimentos em suspensão em imagens Landsat-5 e CBERS-2

O emprego de imagens Landsat para avaliação de sedimentos em suspensão na água é bem documentado na literatura (MUNDAY e ALFÖLDI, 1979; RITCHIE et al, 1987; RITCHIE e COOPER, 1988; ROUSE e COLEMAN, 1976; MERTES et al, 1993; TASSAN, 1997), mas o potencial de emprego de imagens CBERS-2, avaliado a partir de uma série temporal de imagens, ainda não havia sido realizado. Como as imagens do CBERS-2 não são adequadas para avaliações dos valores absolutos de reflectância dos alvos em função dos problemas de calibração deste sensor, reconhecidos e divulgados pelo INPE, entende-se que elas não devem ser utilizadas para avaliações quantitativas de sedimentos em suspensão. Já as avaliações qualitativas são relativas e podem ser realizadas, mas seus resultados devem ser analisados com bastante cautela.

O potencial de emprego das imagens CBERS-2 foi então avaliado de forma relativa ao longo de dois anos consecutivos, 2004 e 2005, em uma série temporal de 25 imagens, sendo 13 cenas do CBERS-2 e 12, do Landsat-5. Comparou-se o padrão de resposta obtido pelo sensor CCD, na faixa espectral do vermelho, com base na resposta do sensor TM, nesta mesma banda, através da análise visual dos mapas temáticos. Os principais parâmetros avaliados foram: classes de máxima concentração de sedimentos em suspensão ao longo do ano e variabilidade interna da pluma. Os resultados foram bastante satisfatórios. Nenhuma imagem CBERS-2 apresentou um padrão de resposta diferente das imagens Landsat no que se refere à avaliação qualitativa da concentração de sedimentos em suspensão e ao padrão espacial observado no comportamento da pluma, na banda do vermelho.

A diferença absoluta da resposta espectral da pluma na banda do vermelho entre estes dois sensores foi avaliada para a única data na qual houve coincidência na passagem dos satélites, em 11/03/2004. No entanto, esta análise foi muito prejudicada e seu resultado serve

apenas como um indicativo, por duas razões. Primeiro, a existência de nuvens no momento de tomada das cenas torna o processo de comparação mais complexo; apesar da diferença entre elas ser de apenas 27 minutos, a configuração das nuvens na área está bem diferente nas duas imagens. Segundo, a cena Landsat desta data está afetada pelo ruído de *striping*¹¹.

Ciente destas interferências, a Figura 50 apresenta o mapa de subtração das cenas destes dois sensores em 11/03/2004 e sua análise revela que o sensor TM apresenta valor de refletância mais alto que o sensor CCD principalmente em áreas onde é maior a concentração de sedimentos (F4). Muito provavelmente as outras feições do mapa resultam dos problemas citados; as feições F1 e F2 encontram-se apenas deslocadas pela diferença de tempo na aquisição das cenas, sendo na verdade a mesma feição; a área em verde claro representa diferenças em função do *striping* na cena Landsat; e a área F3 está contaminada pela presença de nuvens.

Desta forma, não foi possível obter resultados mais conclusivos no que se refere à comparação da resposta espectral obtida pelos sensores CCD e TM na banda do vermelho, que corresponde ao terceiro objetivo específico desta dissertação, mas confirma-se o potencial de aplicação de imagens CBERS-2 para detecção de sedimentos em suspensão nesta faixa espectral, atendendo ao segundo objetivo específico.

3.3 Dinâmica espaço-temporal da pluma costeira do rio Paraíba do Sul

A dinâmica espaço-temporal dos sedimentos em suspensão na região da foz do rio Paraíba do Sul foi avaliada a partir dos mapas temáticos qualitativos de concentração de sedimentos e das plumas delimitadas e extraídas pela análise das imagens orbitais. O comportamento do material em suspensão foi examinado quanto a sua intensidade, padrão – se difuso ou em forma de pluma, área de abrangência, frequência, direção preferencial e distância máxima em relação à foz. Avaliou-se ainda a existência de tendências no

¹¹ Informações sobre o ruído de *striping* podem ser encontradas em: Gibson e Power (2000), ESA – *European Space Agency*, disponível em <http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/landsat_product_anomalies/>, e USGS – *United States Geological Survey*, disponível em <http://landsat.usgs.gov/science_an_anomalies.php>.

comportamento espaço-temporal dos sedimentos associadas ao regime hidrológico e se as características da pluma estão relacionadas às condições meteorológicas atuantes.

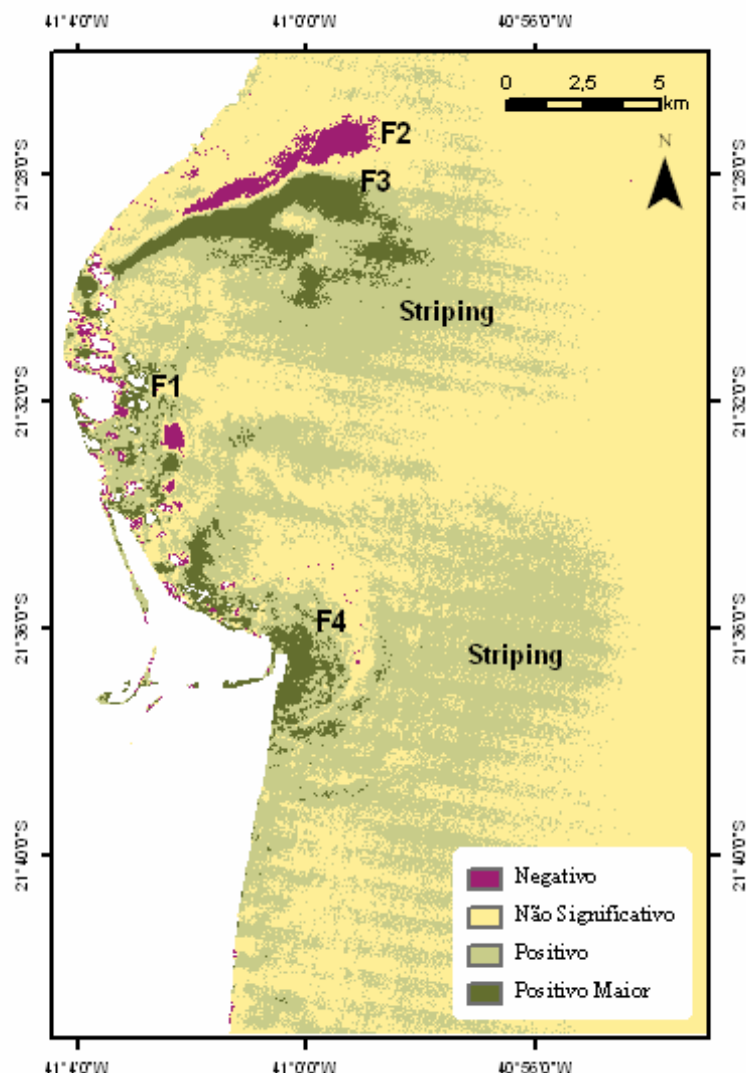


Figura 50 – Mapa de subtração das imagens Landsat 5 e CBERS-2, banda do vermelho, em 11/03/2004. Os valores positivos representam áreas onde é maior a reflectância registrada na imagem Landsat 5; F2 e F3 representam a mesma feição, deslocada em função da diferença de horário da passagem dos respectivos satélites; F1 são áreas afetadas por nuvens. A imagem Landsat apresenta ruído de *striping*, identificado no mapa.

A análise dos mapas temáticos foi bastante elucidativa. Os 50 cenários ambientais – 30 no período chuvoso e 20 no período seco – subsidiaram a avaliação da distribuição espacial e da intensidade da concentração de sedimentos em cada data específica, a investigação da existência ou não de padrões de concentração de sedimentos ao longo do ciclo hidrológico anual, e ainda revelam importantes informações sobre o processo de transporte de sedimentos na região costeira adjacente. Todos os mapas temáticos são apresentados no Apêndice.

A concentração de material em suspensão foi avaliada qualitativamente a partir de quatro classes: baixa, média, alta e muito alta. Como este parâmetro varia amplamente entre os cenários examinados, os dados foram agrupados de acordo com a classe de intensidade máxima observada em cada data, fornecendo uma visão geral do seu comportamento na área de estudo. A Figura 51 exemplifica estes cenários e indica o percentual de ocorrência de cada classe como intensidade máxima relativa no conjunto de imagens avaliado.

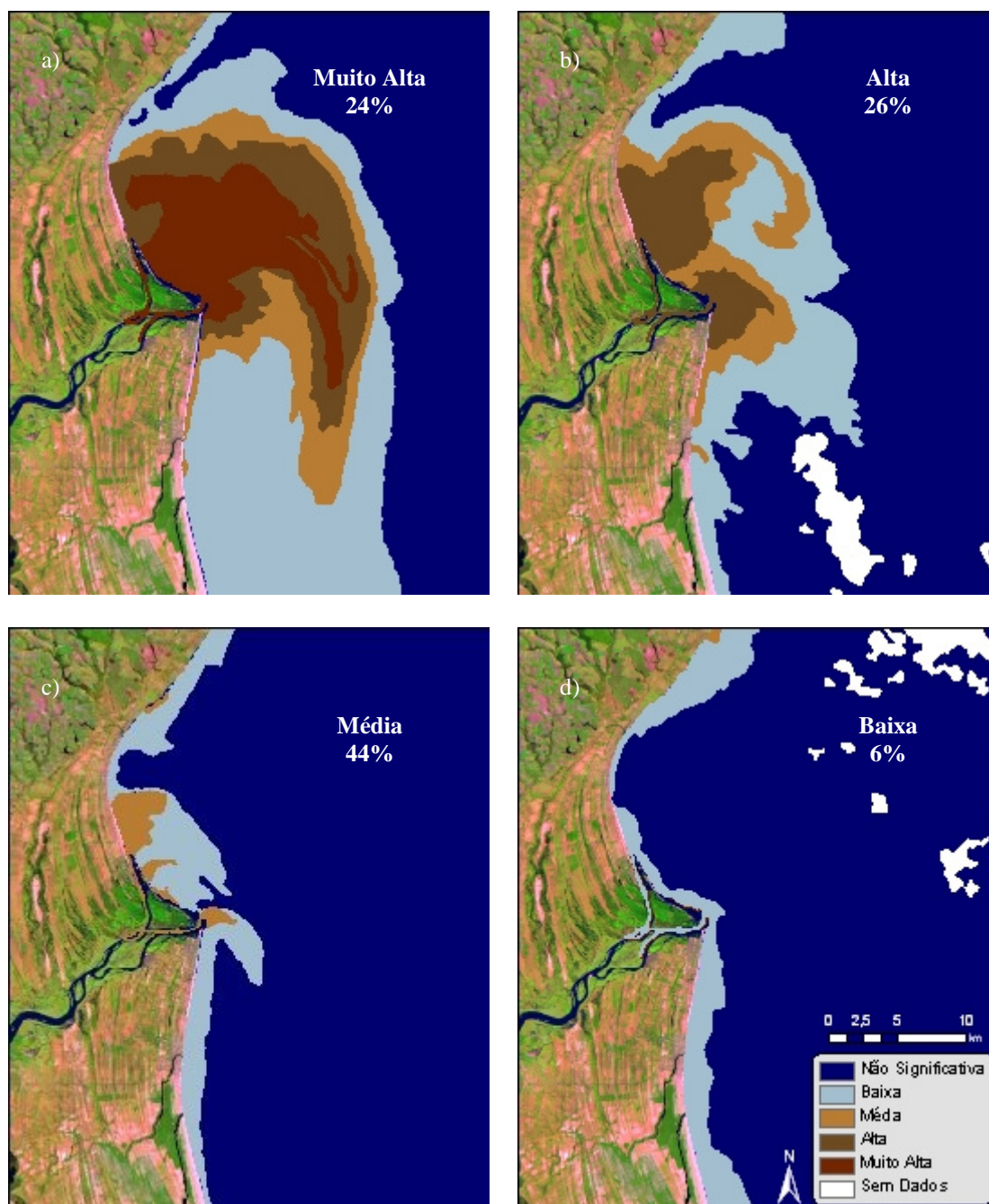


Figura 51 – Mapas temáticos qualitativos da CSS na água. Cada imagem exemplifica um cenário segundo a classe de intensidade máxima observada: 24% do total de imagens mapeadas têm concentração “muito alta” em 24%; alta, em 26%; média, em 44%; e baixa, em 6%. Cenas Landsat 5: a) 03/02/1985; b) 22/02/1986; c) 02/04/2005; d) 15/07/2005.

Como se observa nesta figura, analisadas duas a duas, há um equilíbrio na ocorrência das classes “muito-alta – alta”, as quais, juntas, representam exatamente 50% dos casos de intensidade máxima relativa de concentração de sedimentos, e “média – baixa”, responsáveis pela outra metade dos casos. Consideradas individualmente, no entanto, aparecem disparidades: a classe de intensidade máxima mais freqüente é a “média”, que ocorre 22 vezes e totaliza 44% dos casos; seguidas pelas classes “alta” e “muito alta”, que acontecem 13 e 12 vezes, respectivamente, representando 26% e 24% do total; e por fim, a classe baixa, que ocorreu apenas 3 vezes, representando uma pequena contribuição para o total de imagens.

Estes resultados ficam bastante esclarecedores quando se verifica a época do ano em que tais categorias ocorreram como intensidade máxima. Analisando a Tabela 2 verifica-se que as classes “muito alta” e “alta” ocorreram 24 vezes no período chuvoso e apenas 1 vez no período seco, representando, respectivamente, 80% e 20%. Em contrapartida, nas classes “média” e “baixa” a situação se inverte: elas ocorreram como intensidade de máxima concentração de sedimentos em 95% dos casos avaliados no período seco e em 5% no período chuvoso. Tais informações comprovam que a quantidade de sedimentos em suspensão na água está relacionada à sazonalidade: as maiores concentrações absolutas ocorrem nos meses onde é maior a vazão do rio; já no período seco, predominam valores medianos de concentração de sedimentos.

Tabela 2 – Número de ocorrências de cada classe como intensidade máxima no conjunto de imagens avaliadas, e considerando ainda os períodos chuvoso e seco.

Imagens	Nº de ocorrências nas classes de intensidade de máxima concentração				
	TOTAL	Muito Alta	Alta	Média	Baixa
TOTAL	50	12	13	22	3
Período de Cheia	30	12	12	5	1
Período de Seca	20	0	1	17	2

No que se refere ao padrão do material em suspensão, exemplificado na Figura 52, observa-se pluma com presença marcante da frente de sedimentos em 60% dos casos avaliados, enquanto nos outros 40% o padrão é difuso. Examinando novamente a influência da sazonalidade verifica-se que, no período chuvoso, apenas 1 imagem não apresenta pluma, do total de 27, ao passo que no período seco, a situação se inverte: 19 imagens apresentam-se com padrão difuso, e somente uma possui frente de sedimentos, como se verifica na Tabela 3.

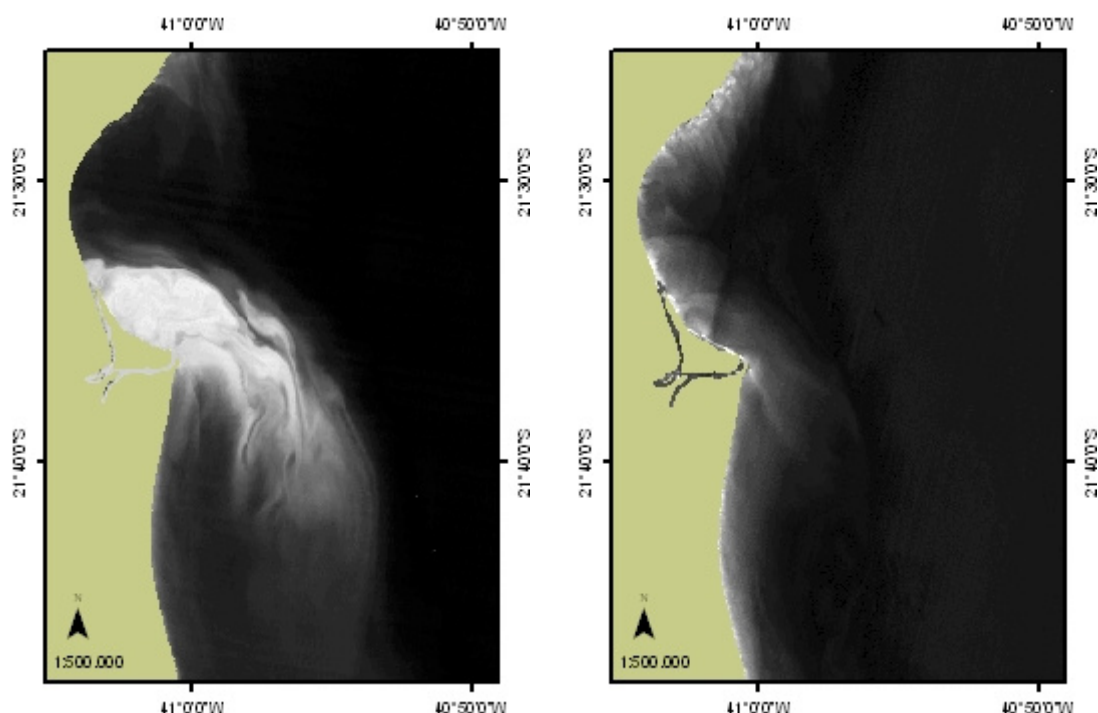


Figura 52 – Exemplo de classificação dos sedimentos quanto ao padrão observado: na forma de pluma, com presença marcante da frente de sedimentos, na imagem à esquerda; e difuso, na à direita. Imagens Landsat 5, banda do vermelho, de 23/02/1985 e 16/07/2004, respectivamente.

Tabela 3 – Informações sobre o padrão de sedimentos observado no conjunto de imagens.

Imagens	Padrão de sedimentos		
	TOTAL	Com Frente	Difuso
TOTAL	50	30	20
Período de Cheia	30	29	1
Período de Seca	20	1	19

A análise dos dados de vazão pode efetivamente contribuir para a compreensão destes resultados e para a comprovação das tendências espaço-temporais observadas. A Figura 53 apresenta o comportamento médio mensal da hidrógrafa ao longo do período entre 1985 e 2006; nela percebe-se a existência de duas condições bem marcadas: a primeira compreende os meses de janeiro a março, onde a vazão atinge seus valores máximos, e a segunda os meses de julho a outubro, nos quais a vazão atinge seus valores mínimos. Os outros podem ser considerados meses de transição. A definição de dois períodos nas análises, chuvoso e seco, considerou os meses de dezembro a abril e de maio a novembro, respectivamente. A Tabela 4 complementa as informações da Figura 53 apresentando os valores médios mensais e anuais

no período de abrangência desta pesquisa, com exceção do ano 2007, para o qual não havia dados disponíveis.

Avaliando as particularidades encontradas, a única data em que se verifica um padrão difuso no período de cheia ocorreu em 17/02/1990, e como indica a Tabela 4, a vazão estava muito abaixo da média do mês de fevereiro e de todo o período chuvoso. Ainda nesta tabela verifica-se que o ano de 1990 apresenta o segundo valor médio mais baixo de vazão no período 1985–2006, explicando este comportamento mais característico de cenários do período seco. A mesma constatação é encontrada ao se avaliar a vazão média dos 30 dias anteriores à passagem do satélite. Já considerando a época seca, o único cenário que se apresenta com pluma ocorreu no início do mês de maio, em 02/05/2004. Os dados de vazão média mensal por ano indicam que em abril de 2004 o valor registrado foi 1092,5 m³/s, bem acima da média do período, cujo valor é 747 m³/s, justificando a presença de pluma, característica de época chuvosa, nesta data.

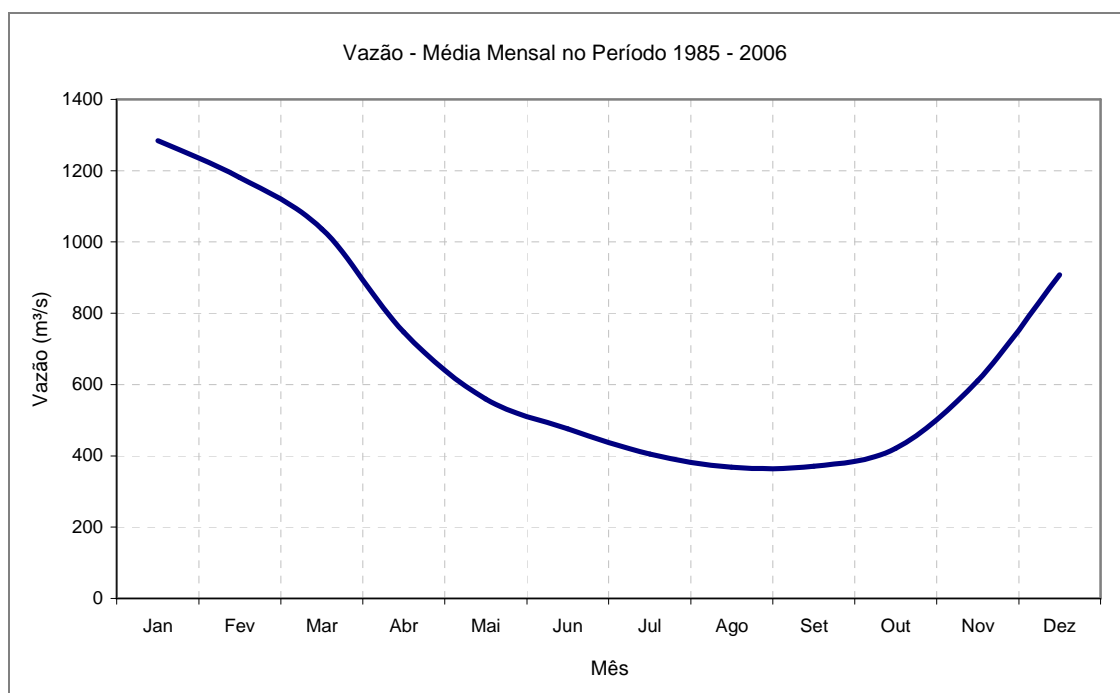


Figura 53 – Gráfico da vazão mensal média ao longo do período 1985 – 2006. Fonte dos dados: HydroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.

Tabela 4 – Valores médios mensais de vazão (m³/s) por ano entre 1985 e 2006.

Ano / Meses	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	MÉDIA
1985	2.602,2	2.610,1	2.498,4	1.282,0	945,3	759,6	646,7	570,4	556,7	578,6	676,5	934,2	1.221,7
1986	1.256,1	1.085,3	1.031,7	645,1	548,9	478,1	467,6	506,2	358,5	345,2	485,7	1.089,6	691,5
1987	1.179,8	1.086,9	803,7		613,2	548,5	390,8	326,0	333,4	348,2	539,2	1.163,4	666,6
1988	1.058,7	2.282,9	1.350,6	989,3	787,3	699,4	514,3	427,2	389,1	485,9	614,8	700,1	858,3
1989	1.201,1	1.203,6	1.281,4	824,2	551,0	565,0	481,5	450,4	424,8	522,6	540,5	759,0	733,8
1990	693,5	539,0	606,8	527,5	436,7	355,5	353,0	313,7	346,8	344,7	388,1	413,6	443,2
1991	1.473,8	1.317,6	1.078,1	1.272,4	726,8	540,1	509,8	418,7	409,0	460,2	-	-	820,6
1992	1.712,4	-	723,8	548,4	593,6	-	418,2	405,7	553,6	741,3	1.113,3	1.235,7	804,6
1993	882,9	848,1	989,7	878,5	540,8	471,6	386,9	379,9	385,6	429,4	423,4	522,9	595,0
1994	1.378,6	568,2	1.076,0	910,1	741,4	562,1	452,6	402,7	312,1	321,3	448,7	748,5	660,2
1995	537,4	1.397,9	654,5	512,5	435,8	361,8	312,9	268,7	250,3	517,9	816,9	997,6	588,7
1996	1.562,3	1.078,3	1.458,0	883,3	606,2	520,0	437,5	411,2	673,9	694,6	1.374,4	1.382,5	923,5
1997	2.821,2	1.280,5	1.326,2	781,3	663,8	583,8	460,2	461,7	453,0	484,3	599,1	956,0	905,9
1998	891,9	1.020,2	710,3	577,1	488,9	488,2	367,3	377,4	314,3	465,4	671,4	771,2	595,3
1999	1.121,8	933,9	969,4	550,9	402,9	392,9	368,3	295,6	276,9	313,5	527,5	846,1	583,3
2000	1.224,4	1.120,6	863,4	635,9	429,3	360,9	329,3	305,2	417,1	314,7	485,8	782,4	605,8
2001	823,2	668,7	536,0	442,7	315,5	268,1	220,6	194,7	200,0	258,3	561,3	697,9	432,3
2002	998,3	1.214,0	637,1	411,7	357,5	260,6	251,9	222,4	250,0	208,3	479,2	970,2	521,8
2003	1.611,4	913,5	687,3	554,1	408,2	334,8	302,9	285,9	286,7	330,9	424,2	821,9	580,2
2004	1.379,4	1.205,1	1.244,9	1.092,5	638,6	538,9	470,6	388,3	313,7	399,4	418,9	1.253,6	778,6
2005	1.261,4	1.556,7	1.415,9	802,2	631,1	569,5	481,9	428,0	385,9	332,3	622,9	1.107,0	799,6
2006	588,2	861,7	863,7	565,0	429,5	334,9	293,6	275,7	269,5	377,0	-	-	485,9
MÉDIA	1.284,5	1.180,6	1.036,7	747,0	558,7	475,9	405,4	368,9	371,0	421,5	610,6	907,7	695,3

Fonte dos dados: HidroWeb; a autora deste trabalho é responsável pelas informações apresentadas.

A análise conjunta do padrão de sedimentos na região costeira adjacente à foz do rio com informações de vazão média de 10 dias antes da passagem do satélite revela que o valor mais baixo de descarga com formação de pluma foi 737 m³/s. A partir deste valor, houve presença marcante da frente de sedimentos em todos os casos avaliados; abaixo deste valor, o padrão encontrado foi difuso para todas as ocorrências. Estas informações estão na Tabela 5, ordenadas crescentemente pelos valores de vazão média de 10 dias.

No que se refere à relação entre a intensidade da concentração de sedimentos e os valores numéricos de vazão, não se encontrou um padrão tão definido para as classes, mas avaliando apenas os períodos seco e chuvoso os resultados evidenciam uma forte tendência das maiores concentrações relativas ocorrerem nas classes “muito alta” e “alta” na época chuvosa, enquanto é mínima a possibilidade disto ocorrer no período seco.

Além das características dos sedimentos fortemente condicionadas ao ciclo hidrológico anual, há outros dois indicativos de que a principal origem do material em suspensão é a descarga fluvial: a presença das maiores concentrações sempre na região da desembocadura, com o trecho no interior do rio Paraíba do Sul acompanhando esta mesma classe de concentração. Os mapas temáticos apresentados no Apêndice – Figura 65 a Figura 77, a partir da página 158, evidenciam este comportamento espacial.

Para confirmar se não há nenhuma tendência nos resultados em função do número de imagens existente no período seco ser 10 % menor que no período chuvoso, realizaram-se as mesmas análises apenas nos anos de 2004 e 2005, para os quais foram selecionadas todas as datas disponíveis no banco de imagens segundo o critério de cobertura de nuvens utilizado, totalizando 25 imagens, 15 na época seca e 10 na chuvosa. Os resultados são similares àqueles encontrados para o total de imagens, como se observam na Tabela 6 e na Tabela 7, comprovando as constatações realizadas. De fato, os sedimentos apresentam um padrão de comportamento bem definido ao longo do ciclo hidrológico anual, tanto no que se refere à concentração quanto à forma, difusa ou em pluma, com a qual são observados.

Tabela 5 – Informações sobre o padrão de sedimentos, intensidade da classe de máxima CSS e vazão média de 10 dias antes da passagem do satélite para o conjunto de imagens.

Nome	Padrão dos Sedimentos	Intensidade Máxima	Vazão (m³/s)
			Média de 10 dias
20010623_L	Difuso	Média	251,1
20060808_L	Difuso	Alta	295,6
20041002_C	Difuso	Média	299,8
19900727_L	Difuso	Baixa	325,6
20050905_C	Difuso	Média	371,5
20040818_L	Difuso	Média	389,2
20040811_C	Difuso	Média	410,1
20040701_L	Difuso	Média	434,8
20051001_C	Difuso	Média	436,2
20040716_C	Difuso	Média	439,8
20050821_L	Difuso	Média	442,1
20050810_C	Difuso	Média	450,5
19960625_L	Difuso	Média	479,8
20050715_C	Difuso	Baixa	493,6
20050619_C	Difuso	Média	513,8
19900217_L	Difuso	Baixa	522,8
19850830_L	Difuso	Média	583,7
20040530_L	Difuso	Média	593,3
20040615_L	Difuso	Média	644,1
20040525_C	Difuso	Média	664,3
19860206_L	Pluma	Média	736,9
20010215_L	Pluma	Alta	831,8
20040327_L	Pluma	Muito Alta	836,2
20050415_L	Pluma	Alta	852,2
20040214_C	Pluma	Média	898,5
20040502_C	Pluma	Média	913,4
20060301_L	Pluma	Muito Alta	1.007,2
19960406_L	Pluma	Média	1.085,1
20050402_C	Pluma	Média	1.111,4
20050330_L	Pluma	Muito Alta	1.147,5
19871226_L	Pluma	Muito Alta	1.261,2
19940127_L	Pluma	Alta	1.331,6
19860222_L	Pluma	Muito Alta	1.380,6
19990109_L	Pluma	Alta	1.395,1
20050125_L	Pluma	Muito Alta	1.466,0
19860121_L	Pluma	Alta	1.582,4
19890318_L	Pluma	Alta	1.667,7
20040311_C	Pluma	Alta	1.827,6
20040311_L	Pluma	Alta	1.827,6
19960117_L	Pluma	Alta	1.896,8
20050314_L	Pluma	Alta	2.046,1
20050210_L	Pluma	Muito Alta	2.128,1
19850219_L	Pluma	Alta	2.130,0
19880228_L	Pluma	Alta	2.199,9
19850323_L	Pluma	Muito Alta	2.805,7
19970119_L	Pluma	Muito Alta	2.940,9
19850203_L	Pluma	Muito Alta	4.769,5
20070112_C	Pluma	Muito Alta	-
20070216_L	Pluma	Muito Alta	-
20070331_C	Pluma	Média	-

Tabela 6 – Informações sobre o padrão de sedimentos observado nas imagens de 2004 e 2005.

Imagens	Nº de ocorrências		
	TOTAL	Com Frente	Difuso
2004 e 2005	25	10	15
Período de Cheia	10	10	0
Período de Seca	15	1	14

Tabela 7 - Número de ocorrências de cada classe como intensidade máxima no conjunto de imagens de 2004 e 2005, considerando ainda o período chuvoso e o seco.

Imagens	Nº de ocorrências (%)				
	Todas	Muito Alta	Alta	Média	Baixa
2004 e 2005	100	16	16	64	4
Período Chuvoso	40	40	40	20	0
Período Seco	60	0	0	93	7

De forma geral, as análises das imagens e dos mapas temáticos mostram que as maiores concentrações de sedimentos em suspensão são encontradas na região da desembocadura, e a dimensão e a forma da área ocupada são bem variáveis, mas acompanham a forma geral da pluma. Da foz em direção às extremidades da pluma encontram-se concentrações decrescentes de material em suspensão, e após a frente de sedimentos bem delineada existe uma espécie de área de espalhamento, na qual a concentração é menor que na região da frente, mas ainda mantém a forma da pluma. Esta área também apresenta tamanho variado e foi considerada na definição das feições.

As análises de área de abrangência, frequência, distância em relação à foz e direção predominante foram realizadas apenas para o conjunto de imagens com padrão de sedimentos na forma de pluma. Das 30 imagens que se enquadram neste padrão, 29 foram avaliadas, porque uma delas, a de 02/05/2004, encontra-se parcialmente sem dados na área da pluma, impossibilitando a correta extração da feição e todas as análises subsequentes. Para fins elucidativos, estas análises podem ser subdivididas em absolutas e relativas; as primeiras fazem referência ao comportamento de cada pluma individualmente, enquanto as segundas consideram o total de plumas mapeadas em conjunto. Em geral, as análises relativas baseiam-se na sobreposição de todas as plumas. Como já foi explicado, as análises direcionais e de distância referiram-se a um ponto definido na região central da foz do rio Paraíba do Sul (Figura 42).

No que se refere à área das plumas mapeadas, utilizou-se inicialmente a estatística descritiva para fornecer um indicativo geral do comportamento dos dados. Como se observa na Tabela 8, a maior e a menor pluma ocupam uma área de 329,7 km² e 106,9 km², respectivamente, e a área média de todas as ocorrências é de 190,3 km². A análise conjunta das informações contidas nesta tabela indica que o conjunto de dados possui variabilidade relativamente alta e não está distribuído de forma simétrica em torno do valor médio; a mediana é inferior à média e a amplitude entre os valores máximo e médio é mais elevada do que a amplitude entre os valores médio e mínimo, revelando que a distribuição apresenta uma assimetria positiva. Em outras palavras, há predomínio de valores inferiores à média no conjunto de dados.

Relacionando a área ocupada pela pluma com os dados médios de vazão de 30 e 10 dias antes da passagem do satélite encontram-se coeficientes de correlação de Pearson de 0,73 e 0,72, respectivamente. Estes resultados indicam a existência de correlação forte e direta entre os dados, com nível de confiança de 99%. Correlações significativas, mas não tão altas, já eram esperadas entre estas variáveis, em função do comportamento espacial da pluma ser influenciado por outros fatores ambientais, conforme será comentado no próximo capítulo.

Tabela 8 – Estatística básica para o conjunto de feições de pluma.

Parâmetros Estatísticos	Valores
Média (km ²)	190,3
Mediana (km ²)	161,6
Máxima (km ²)	329,7
Mínima (km ²)	106,9
Amplitude (km ²)	222,8
Desvio Padrão (km ²)	68,6
Coef. de Variação	0,37

As análises de área de abrangência enfocando o comportamento direcional das plumas indicam que os maiores valores médios de área por direção ocorrem predominantemente no quadrante Sul, com destaque para a direção S1, que apresenta o maior valor de área média ao longo do tempo. Ao norte, a única exceção é a direção N1, como se verifica na Figura 54. Já os valores máximos de área por direção seguem comportamento similar, sendo mais expressivos ao sul do ponto central da foz, com o máximo valor absoluto ocorrendo na

direção SE2. Nesse sentido, avaliando todos os registros de área maiores que 40 km² por direção, verifica-se que eles representam 11,5% do total e estão localizados preferencialmente ao sul, com 40% na direção S1, 23% em SE2, 13 % em SE1 e 13 % em E2. Por outro lado, as áreas menores que 5 km² correspondem a 12,3 % do total e não apresentam predominância em direção alguma. O mesmo acontece com as direções menores que 3 km², que constituem 5,3% do total. A estatística de valores mínimos de área não consta na tabela porque a geometria do litoral e o contorno da foz do rio comprometem estes resultados, uma vez que as direções localizadas ao sul são cortadas pela área do delta do rio Paraíba do Sul (Figura 42).

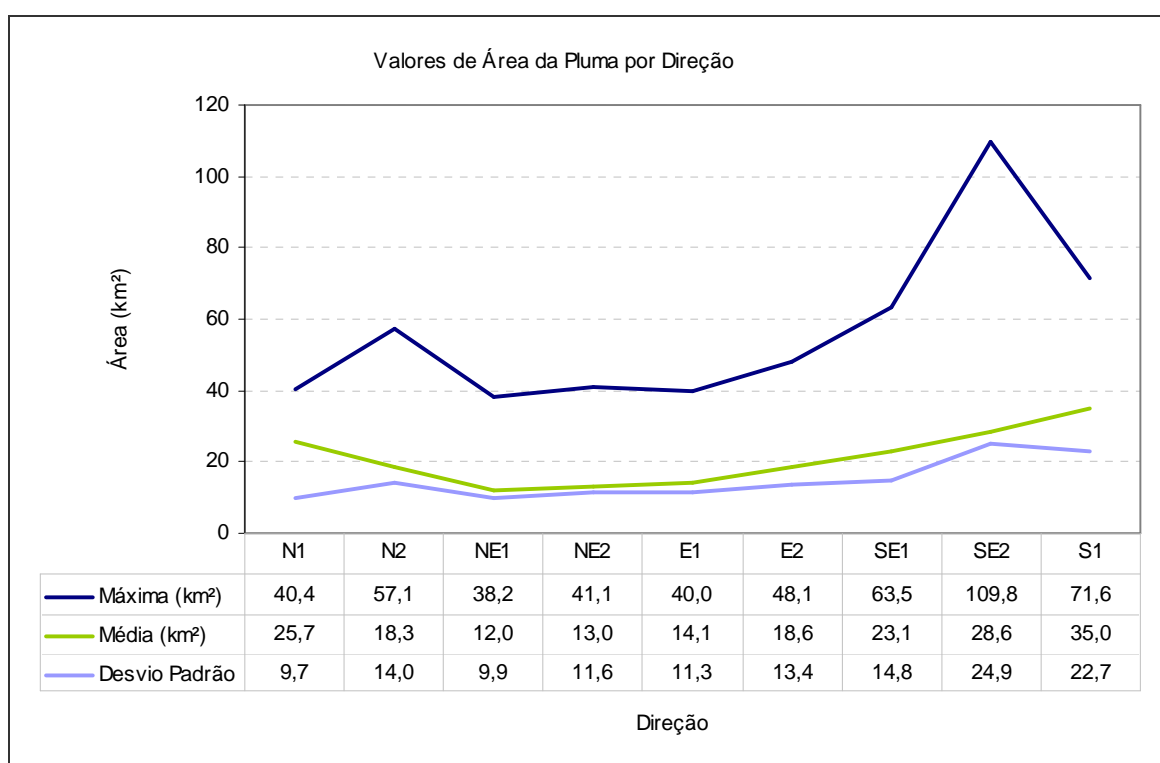


Figura 54 – Gráfico e tabela da área de abrangência das plumas segundo as direções.

A distância máxima alcançada pela pluma, em relação ao ponto definido na região central da foz do rio Paraíba do Sul, foi de 27,3 km na direção SE2, e a mínima foi de 2,2 km na direção E1. As informações de alcance máximo por direção indicam que as plumas têm maior alcance espacial nas direções sudeste – sul, respectivamente em SE2, S1, SE1, seguida pela direção N2, como indica a Figura 55. Apenas estas quatro direções apresentam distâncias maiores que 20 km da foz, das quais 71,7 % estão localizadas em S1, sendo praticamente irrelevante a contribuição de N2 e SE1. As outras apresentam dimensões relativamente menos expressivas, com o menor valor de alcance máximo ocorrendo na direção N1. Já as distâncias

menores que 5 km estão concentradas nas direções nordeste – este, respectivamente em NE1, NE2 e E1. Estas informações permitem inferir até quais distâncias da foz, e em que direções, podem-se encontrar sedimentos no padrão de pluma, e as distâncias a cada direção nas quais é muito provável encontrar plumas de sedimentos no período chuvoso, tomando como base o comportamento observado ao longo dos últimos 22 anos.

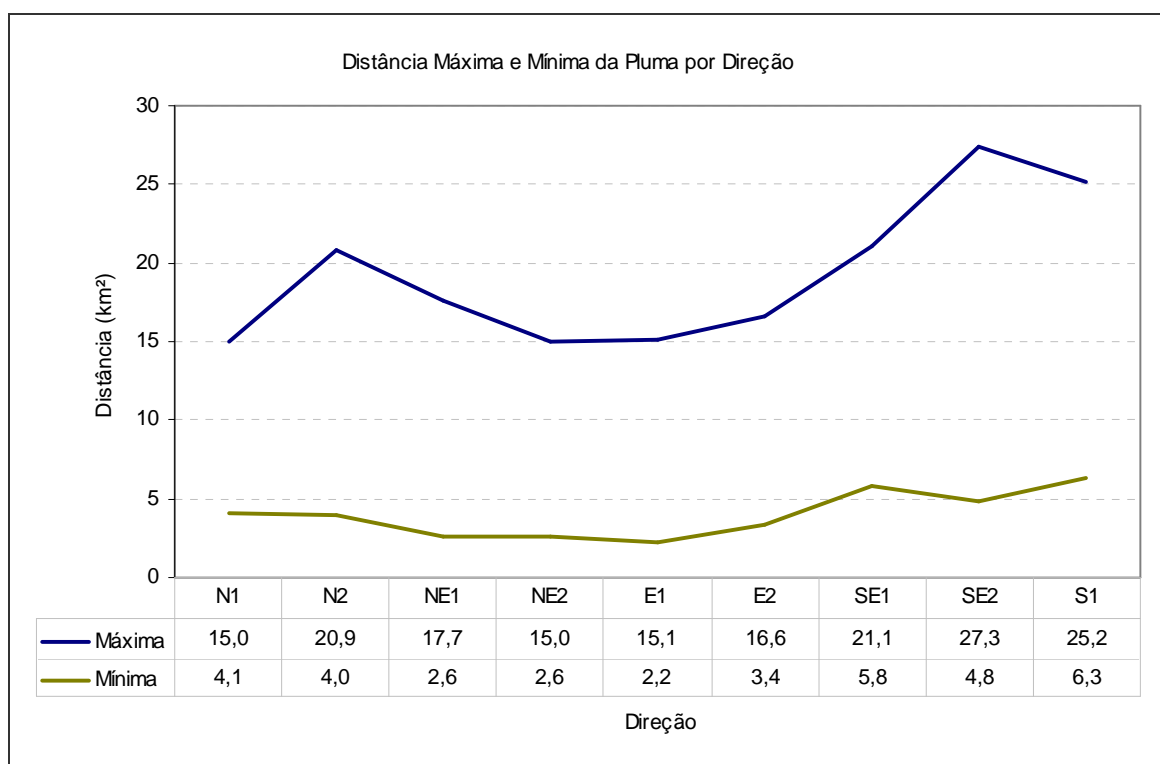


Figura 55 – Gráfico e tabela do alcance máximo e mínimo das plumas segundo as direções.

Considerando o conjunto de feições, a área total de abrangência de pluma de sedimentos ao longo do período analisado é de 539,3 km², com 458,8 km de perímetro, e encontra-se mapeada na Figura 56. Este mapa representa a área máxima de influência direta dos sedimentos na região adjacente à foz do rio Paraíba do Sul, de acordo com os dados avaliados e a área de estudo previamente definida nesta pesquisa. Sua análise revela que a área de maior abrangência de pluma está no sentido Sul, e o mapa apresentado na Figura 57 mostra esta análise direcional com mais detalhes. Em função da geografia da costa, o quadrante norte tem uma direção a mais na área oceânica e, ainda assim, a área de influência direta da pluma é menor do que no quadrante sul. Como indica a Tabela 9, organizada em ordem decrescente de área, o norte tem 235,8 km², e o sul, 303,5 km², com destaque para a direção SE2, que representa 21,4% da área total. No sentido norte, a direção N2 tem destaque,

ocupando 12,9% do total e cerca de 30% deste quadrante. Com relação ao perímetro, não há diferença significativa entre o norte e o sul.

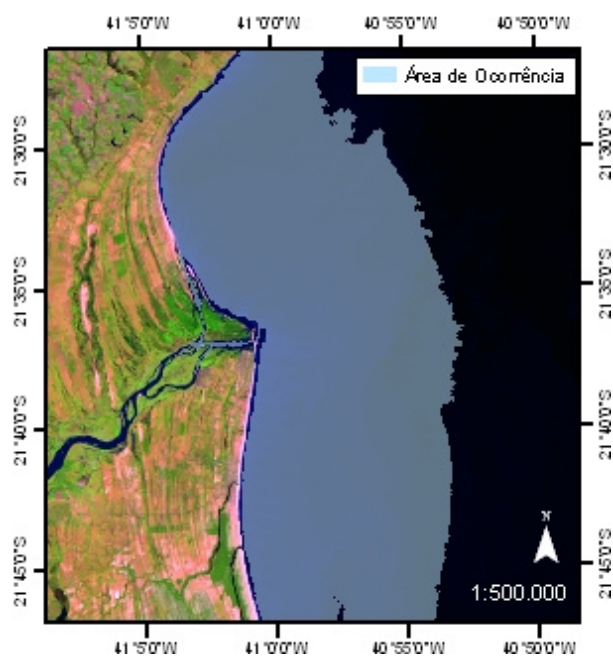


Figura 56 – Mapa da área total de abrangência de pluma na área de estudo.

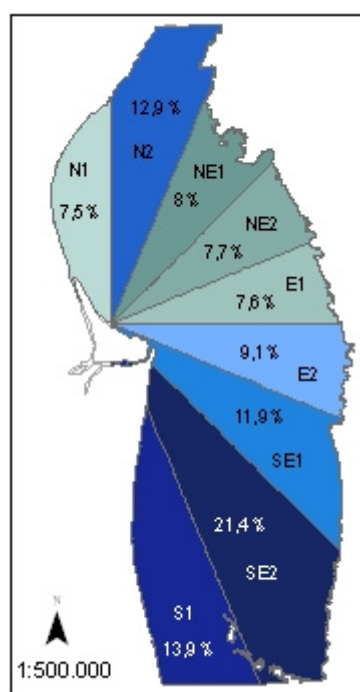


Figura 57 – Mapa temático da área de abrangência de pluma por direção, em porcentagem do total. Os tons em verde representam as direções em que as plumas ocupam áreas menores, enquanto os tons de azul estão associados às direções nas quais a pluma se desenvolve mais.

Tabela 9 – Área total de abrangência e perímetro por direção.

Direção	Área (km²)	Perímetro (km)
N1	40,4	36,5
N2	69,7	51,5
NE1	43,4	56,2
NE2	41,5	40,3
E1	40,8	40,0
E2	48,9	44,6
SE1	64,1	53,8
SE2	115,6	77,2
S1	74,9	58,8
NORTE	235,8	290,6
SUL	303,5	168,2

O mapa de frequência de ocorrência de pluma, apresentado na Figura 58, é o indicador mais importante do comportamento espaço-temporal da feição de interesse. Além de inferir sobre informações gerais de área e distância, ele indica o número de vezes que a pluma atinge uma determinada área ao longo do tempo, dado o total de ocorrências avaliado. A partir de sua análise verifica-se que a área em vermelho mais escuro simboliza a região que sempre contém sedimentos no padrão de pluma no período chuvoso, considerando as amostras trabalhadas; representa, portanto, a área mínima de abrangência de pluma, com 33,6 km², cerca de 6 % do total. Já o tom de verde mais escuro ocupa 11 % da área total e refere-se à região ocupada por pluma em apenas um caso. Enquanto as áreas em tons de verde constituem cerca de 55 % do total e retratam as regiões alcançadas por pluma em até 1/3 dos casos menos frequentes, as áreas em tons de laranja e vermelho são alcançadas em até 1/3 das ocorrências mais frequentes, mas significam apenas 17 % da área total. A análise conjunta deste mapa com a Tabela 10 revela importantes informações sobre o comportamento espacial da pluma ao longo do tempo.

Nesse sentido, verifica-se no mapa que o limite entre as cores laranja e amarela representa 50 % das ocorrências de pluma: desta linha até o vermelho, no sentido oeste, encontra-se uma área de 144,7 km², que representa apenas 27 % do valor total, enquanto na direção leste, ou seja, desta linha até o verde mais escuro, a área corresponde a 73 % do total. Quanto aos valores extremos, a área cuja frequência de ocorrência é maior que 85 %,

simbolizada no mapa em tons de vermelho, têm 59,5 km² e ocupa 11 % da área total de abrangência; já aquela com frequência de 15 %, retratada nos tons mais escuros de verde, apresenta 197,7 km² e abrange 37 % da área máxima. Torna-se evidente que a maioria das plumas ocupa uma área relativamente pequena, considerando a área total mapeada em todo o período; portanto, uma pequena quantidade de ocorrências contribui decisivamente para a área geral de abrangência de sedimentos no padrão de pluma.

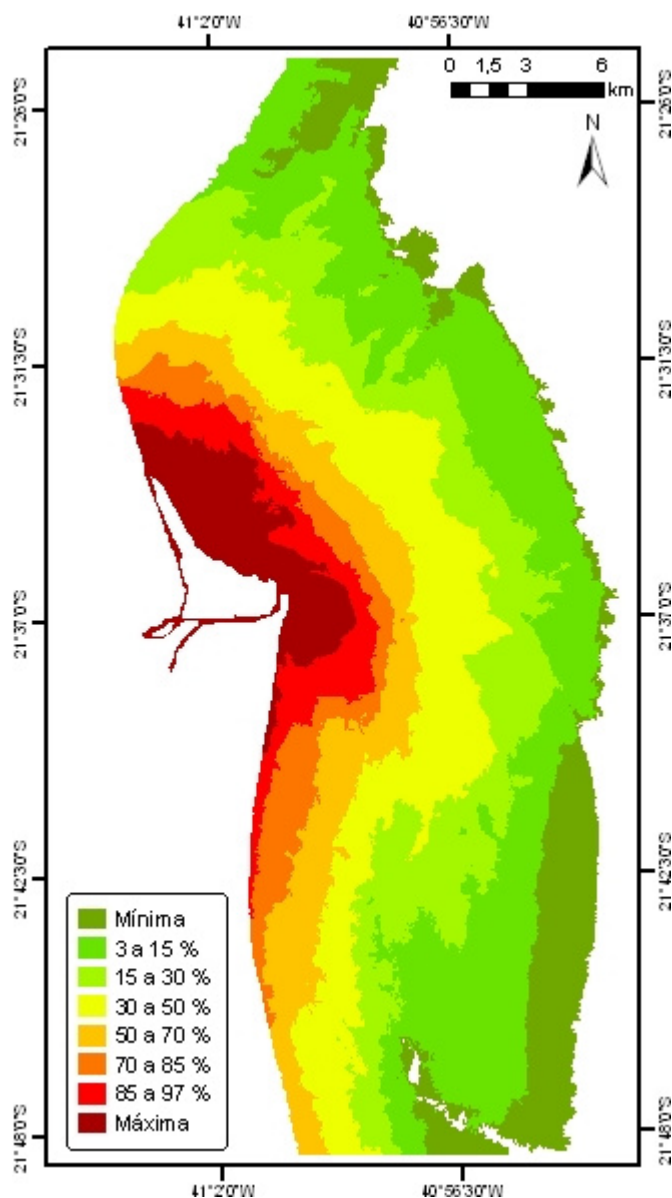


Figura 58 – Mapa de frequência de ocorrência de pluma de sedimentos na área de estudo.

Tabela 10 – Informações de área e perímetro associadas à frequência das plumas na área de estudo. As cores desta tabela seguem o padrão do mapa de frequência de ocorrência, para facilitar a sua análise conjunta.

Frequência Absoluta	Área (km²)	Perímetro (km)	Área (%)	Frequência (%)	Área Acumulada (%)
1	59,4	333,3	11,0	3,4	100,0
2	45,6	326,2	8,4	6,9	89,0
3	52,0	321,2	9,6	10,3	80,6
4	40,6	347,1	7,5	13,8	71,0
5	35,8	347,0	6,6	17,2	63,5
6	20,6	288,8	3,8	20,7	56,8
7	20,4	275,1	3,8	24,1	53,0
8	22,1	277,1	4,1	27,6	49,3
9	20,1	261,2	3,7	31,0	45,2
10	19,5	247,0	3,6	34,5	41,5
11	19,4	234,9	3,6	37,9	37,9
12	15,0	218,2	2,8	41,4	34,3
13	11,3	205,7	2,1	44,8	31,5
14	14,5	192,9	2,7	48,3	29,4
15	8,3	184,9	1,5	51,7	26,7
16	7,6	176,0	1,4	55,2	25,2
17	10,0	176,4	1,9	58,6	23,8
18	10,7	183,4	2,0	62,1	21,9
19	10,2	163,9	1,9	65,5	20,0
20	8,2	149,6	1,5	69,0	18,1
21	7,4	138,3	1,4	72,4	16,6
22	7,8	118,5	1,4	75,9	15,2
23	8,7	107,7	1,6	79,3	15,2
24	6,2	103,3	1,1	82,8	12,1
25	6,2	105,9	1,1	86,2	11,0
26	5,8	105,0	1,1	89,7	9,9
27	6,1	91,8	1,1	93,1	8,8
28	7,9	138,3	1,5	96,6	7,7
29	33,6	88,0	6,2	100,0	6,2

Outra informação interessante refere-se à direção preferencial das plumas considerando o conjunto total de ocorrências, pois fornece uma indicação do seu comportamento no espaço e no tempo, ou seja, leva em conta a frequência em cada direção. O mapa temático que apresenta a soma das áreas de abrangência de pluma por direção, exibido na Figura 59, indica que em S1 e SE2 estão as maiores ocorrências em área, seguida por N1, SE1 e E2. Novamente encontra-se o padrão de maiores áreas localizadas ao sul do ponto central, confirmando que as maiores extensões e também as maiores concentrações de plumas estão neste quadrante. A surpresa, nesta análise, ocorre pelo alto valor encontrado em N1, pois nas análises realizadas até este momento, a direção que se destacava ao norte era N2. Isso

sugere que, apesar de ter a menor área absoluta, apresentada na Tabela 11, N1 tem alta frequência de plumas com extensão média. Já o baixo valor de N2 na soma das áreas indica que, apesar de sua área absoluta ser extensa, a maioria das plumas tem alcance limitado nesta direção. A Tabela 11 apresenta estas informações de soma das áreas e área máxima por direção, reunidas visando facilitar a consulta e comparação destes resultados.

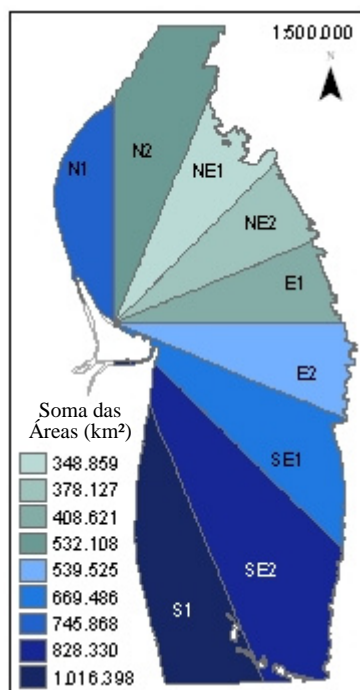


Figura 59 – Mapa temático de soma das áreas de abrangência de pluma por direção. Esta informação leva em conta a frequência das plumas na área de estudo. Os tons em verde referem-se às direções menos ocupadas por plumas ao longo do tempo, e os tons de azul, àquelas com maior ocorrência em área.

Tabela 11 – Soma das áreas e área máxima de pluma por direção.

Direção	Soma das Áreas (km²)	Área Máxima (km²)
N1	745,9	40,4
N2	532,1	69,7
NE1	348,9	43,4
NE2	378,1	41,5
E1	408,6	40,8
E2	539,5	48,9
SE1	669,5	64,1
SE2	828,3	115,6
S1	1.016,4	74,9

A Figura 60 evidencia grande parte das deduções desta dissertação ao mostrar o mapa de frequência de pluma de sedimentos associado às informações de direção e distância a partir do ponto central da foz do rio Paraíba do Sul. As radiais em preto sinalizam distâncias em intervalos de 2,5 km, e as linhas em azul indicam as direções. O comportamento geral observado é a diminuição da frequência com o aumento da distância em todas as direções; a partir da linha de 7,5 km, o número de ocorrências de pluma diminui consideravelmente, em especial nas direções nordeste e E1. A análise detalhada do mapa revela que a área em comum para todas as ocorrências, destacada em vinho, ultrapassa a linha de 5 km em todas as direções ao sul, e ao norte, somente em N1. Já a área com frequência entre 70 e 85 % apresenta um comportamento análogo com relação à linha de 7,5 km. Em síntese, este mapa indica que as áreas com maior frequência de ocorrência de pluma são maiores e alcançam maiores distâncias da foz principalmente nas direções ao sul, em S1, SE2, SE1, e em N1. As direções E2 e N2 representam uma condição intermediária, enquanto o menor alcance espacial acontece em NE1, NE2 e E1. Portanto, a pluma desenvolve-se mais na direção sul, e apresenta uma significativa extensão no eixo norte-sul.

O mapa apresentado na Figura 61 corrobora este comportamento espaço-temporal ao fornecer uma visão do ponto central de cada pluma mapeada, fornecendo ainda um indicativo de sua forma. A distribuição destes pontos no sentido norte-sul reflete que, em geral, as plumas têm maiores dimensões neste eixo. Observam-se duas regiões com alta concentração de pontos, sinalizadas pela cor vermelha nos círculos maiores: aqueles mais próximos à costa, reunidos ao sul, indicam plumas com formas alongadas, mais próximas à costa, e com maior extensão e área ao sul; já aqueles localizados na região frontal à foz indicam, em geral, feições mais desenvolvidas no sentido este, bem centralizadas quanto às direções norte e sul, ou com maior projeção ao norte. Os outros pontos nos círculos maiores em verde e laranja, localizados fora das áreas com maior densidade, podem ser assim interpretados: quando mais afastados da foz, refletem plumas com maior desenvolvimento no sentido este; quando mais próximos, indicam plumas mais alongadas; nos dois casos, o fato de estarem localizados ao norte ou ao sul reflete a maior extensão da pluma nestas direções.

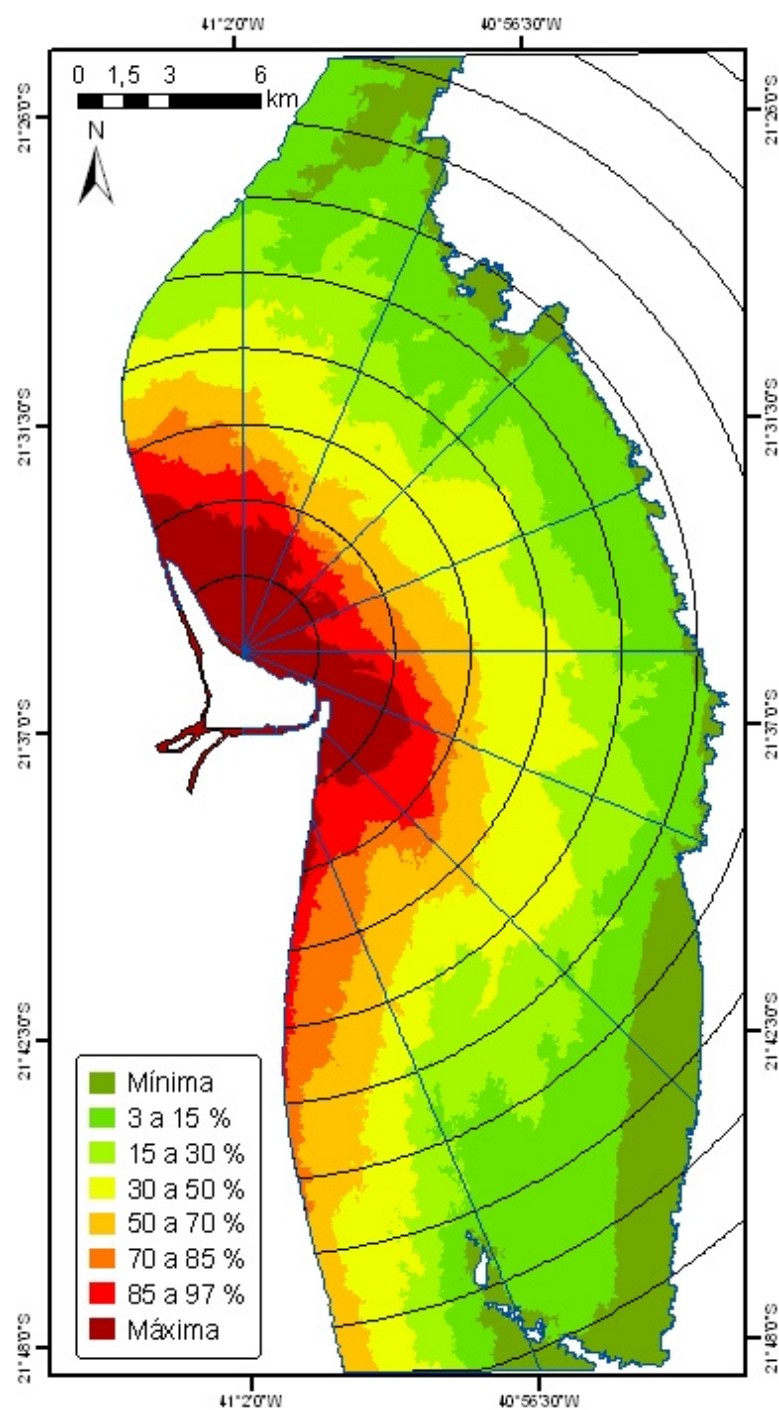


Figura 60 – Mapa de frequência de ocorrência de pluma segundo as direções e distâncias do ponto central definido na foz do rio Paraíba do Sul. O intervalo entre as radiais é de 2,5 km.

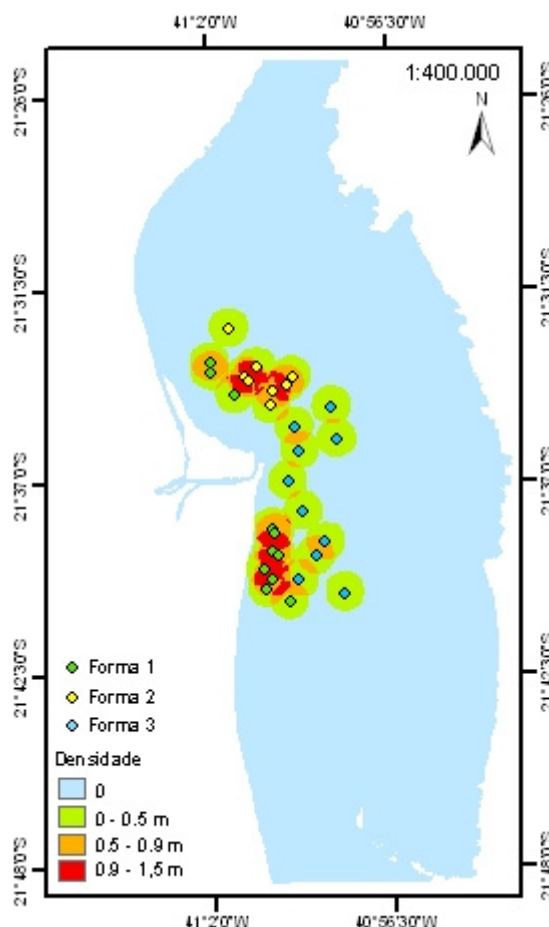


Figura 61 – Mapa de densidade dos pontos centrais das feições, indicando a classificação da forma da pluma.

Finalmente, apresenta-se a análise da forma da pluma, realizada por interpretação visual; estes resultados coincidem com as informações contidas no mapa temático de pontos centrais das feições. A variabilidade da forma é grande, mas a partir de suas características principais foram identificados três padrões: alongadas no sentido norte-sul e relativamente estreitas, simbolizadas no mapa pela forma 1, em verde, e exibidas na Figura 62; centralizadas na região frontal à foz do rio, em geral com desenvolvimento maior no quadrante norte e expressão média no sentido este, em amarelo no mapa (forma 2) e na Figura 63; e formas maiores, com grande expressão no sentido este, coloridas em azul (forma 3) e expressas na Figura 64. As formas alongadas desenvolvem-se mais para o sul e aconteceram em 34 % dos casos; já as formas maiores foram responsáveis por 38 % das ocorrências e poderiam ser subdivididas em dois grupos: as mais frequentes possuem seu maior desenvolvimento ao sul (28%), e os outros 10% dos casos apresentaram pontos centrais localizados na região frontal à foz do rio e desenvolvimento expressivo ao norte e ao sul. Estas últimas, inclusive, poderiam

ter sido classificadas nas formas 2 ou 3; o critério definitivo para incluí-las na forma 3 foi a sua grande dimensão espacial.

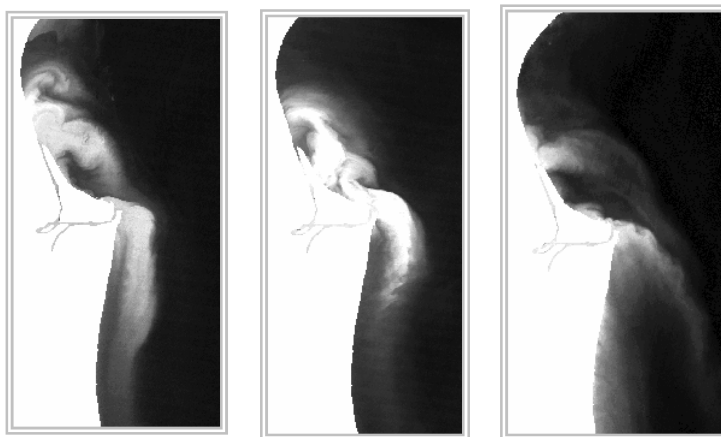


Figura 62 – Exemplos de formas alongadas no sentido norte-sul e relativamente estreitas, denominadas forma 1 no mapa.

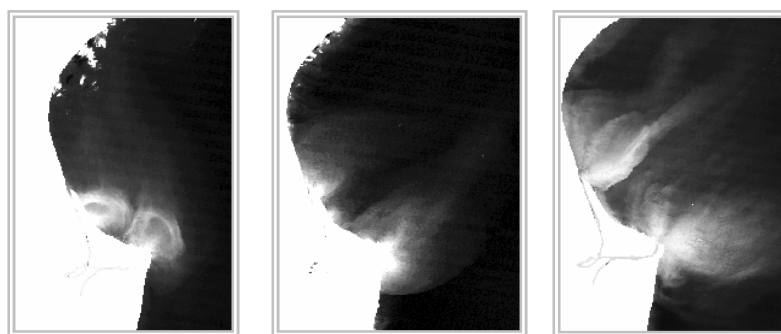


Figura 63 – Exemplos de formas centralizadas na região frontal à foz do rio, geralmente possuem maior desenvolvimento no quadrante norte e expressão média no sentido este, denominadas forma 2 no mapa.

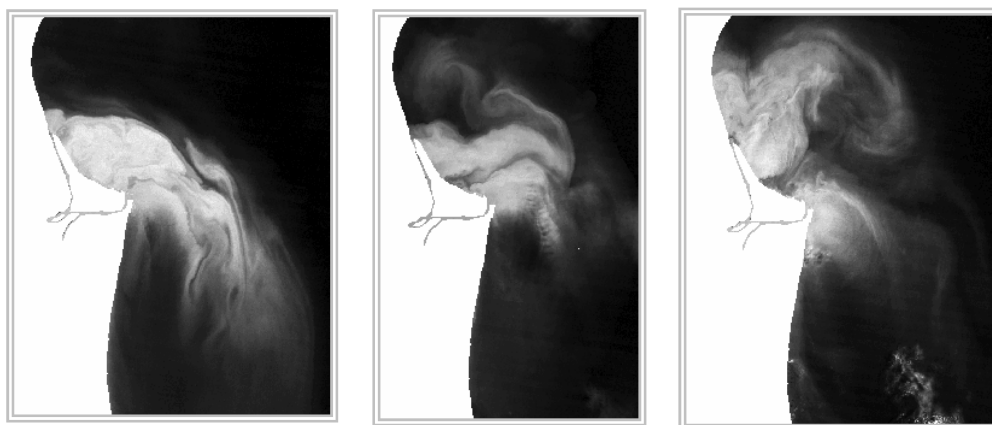


Figura 64 – Exemplos de formas maiores, com grande expressão no sentido este, denominadas forma 3 no mapa.

Pela observação das figuras acima, percebe-se claramente que a forma da pluma é bastante influenciada pela geografia do delta do rio Paraíba do Sul, que deságua no oceano através de dois canais principais, e pelas características do transporte litorâneo existente nesta região. O canal superior está sujeito ao transporte no sentido norte, enquanto o inferior, na direção sul, conforme apresentado na Figura 27. Isso explica em parte a significativa expressão das plumas no sentido norte-sul e pode ser observado na forma que se apresentam na região costeira; mesmo quando transportadas predominantemente para o sul, exibem uma feição de dimensão variável sendo deslocada para norte. Assim, quanto ao processo de transporte dos sedimentos, observam-se diferenças notáveis entre as imagens, com cinco modelos principais, relacionados às formas descritas acima. São eles: i) alongados no sentido norte – sul e mais próximos à costa, com as saídas do canal superior e inferior do rio sendo transportadas predominantemente para sul – sudeste (mais freqüente); ii) o mesmo que o anterior, porém com a saída do canal superior sendo carregada para o norte, e a do canal inferior, para o sul; iii) com relativa expressão na direção este, e o fluxo advindo destes dois canais sendo transportados para nordeste; iv) transportados a maiores distâncias no sentido este, com a saída dos dois canais apontando para a direção este – sudeste; v) o mesmo que o anterior, com a saída do canal superior sendo carregada para nordeste, com maior projeção espacial.

Além de demonstrar a relação entre os dados de vazão e a existência de pluma de sedimentos na região da foz do rio Paraíba do Sul, tentou-se, em um segundo momento, encontrar relacionamentos entre os parâmetros adotados nesta dissertação para caracterizar a pluma, quando ela estava presente. Assim, utilizaram-se as informações de área, forma e intensidade com os dados de vazão; os resultados de área e vazão já foram abordados, e para os outros, conforme era esperado, não se encontrou um padrão absoluto. Uma vez que diversos fatores influenciam o comportamento espacial da pluma, eles devem ser considerados na tentativa de explicar, em conjunto, as características encontradas na região de interesse. Nesse sentido, o trabalho de Rouse e Coleman (1976) no rio Mississippi conclui que a forma e a dimensão da pluma observada naquela região não é somente função da descarga de água doce, mas também da velocidade e direção do vento; portanto, a área da pluma só pode ser relacionada à vazão do rio de uma forma geral, porque existem efeitos consideráveis na sua concentração e dispersão provocados pelo vento. No que se refere à relação entre vazão e área da pluma, estes argumentos confirmam os resultados encontrados nesta pesquisa, onde se verifica um relacionamento entre as variáveis, mas percebe-se ainda a influência de

outros fatores no comportamento da feição de interesse. Por exemplo, as diferenças encontradas no transporte de sedimentos, citadas acima, estão relacionadas a fatores não estudados nesta pesquisa; em alguns casos, inclusive, o sentido do transporte não segue o padrão geral observado na região, indicando claramente a influência de outros forçantes no desenvolvimento da pluma.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

*A responsabilidade de todos é o único caminho
para a sobrevivência humana.*

Dalai Lama

O mapeamento qualitativo de sedimentos em suspensão na água por sensoriamento remoto orbital na região da foz do rio Paraíba do Sul mostrou-se extremamente aplicável em todas as condições sazonais, representativas de períodos de seca e cheia, e em todas as condições observadas quanto à concentração de material em suspensão. Os sensores utilizados apresentam resolução espacial média e a largura de suas bandas espectrais segue o padrão observado em sistemas desta categoria, mas as necessidades de mapeamento e de identificação do limite da pluma foram plenamente atendidas nesta região costeira. O emprego destes sensores em outras regiões, com sucesso, dependerá da escala espacial e da intensidade com que o fenômeno ocorre na área de interesse; precisa haver compatibilidade entre as características específicas do objeto e as possibilidades de discriminação do equipamento, tanto espaciais quanto espectrais.

As imagens selecionadas foram representativas de todas as condições presentes durante o ciclo hidrológico anual, associadas a valores sazonais intermediários, máximos e mínimos de vazão. Ao longo do período compreendido entre 1985 e 2006, os anos que apresentaram valores médios extremos de descarga fluvial foram também avaliados, garantindo um recobrimento significativo no que tange ao comportamento temporal da hidrógrafa. Com isso, testou-se a aplicabilidade do método em uma extensa variedade de cenários ambientais, comprovando a viabilidade de mapeamento da dinâmica espaço-temporal de plumas costeiras associada ao regime hidrológico do rio através de imagens Landsat 5 e CBERS-2.

Conforme indicado pela revisão de literatura, obtêm-se excelentes resultados em aplicações de sensoriamento remoto de sedimentos em suspensão na água através de técnicas univariadas. Nesta pesquisa, avaliou-se a resposta espectral na região do verde e do vermelho, as duas bandas mais citadas para esta finalidade. Os resultados apontaram que a diferenciação

interna da feição de interesse foi menor no verde, uma vez que as menores concentrações de sedimentos apresentam maior reflectância, enquanto as maiores concentrações refletem menos, quando comparados ao vermelho.

Assim, o método empregado para detecção, mapeamento e extração da pluma baseou-se na resposta espectral registrada apenas na banda do vermelho. Com exceção do procedimento de correção atmosférica, as técnicas utilizadas no processamento digital das imagens foram simples e consagradas na literatura. Os resultados mostraram-se adequados tanto na identificação da feição de interesse, como em sua diferenciação interna. Portanto, a sequência de etapas definida e indicada nesta dissertação mostrou-se oportuna para estudos de sedimentos em suspensão na água, com a integração entre procedimentos semi-automáticos e técnicas de interpretação visual resultando em uma proveitosa combinação.

A caracterização espectral dos sedimentos foi essencial ao sucesso da metodologia adotada. Para realizá-la, a etapa de pré-processamento da imagem teve fundamental importância: a correção atmosférica e o isolamento da região aquática propiciaram as bases para todos os processos subsequentes. A necessidade de comparar os diferentes cenários ao longo do tempo exigiu a adoção de uma escala comum para o mapeamento temático qualitativo da concentração de material em suspensão, tornando indispensável a realização da correção atmosférica. No mapeamento, as classes foram definidas considerando a hipótese simplificada de um relacionamento linear entre CSS e reflectância.

A aplicação deste método específico em outros sistemas aquáticos deverá produzir resultados bastante satisfatórios, desde que observados os cuidados básicos na preparação das imagens e realizada a caracterização espectral dos sedimentos na área de estudo, pois não é possível utilizar a escala de intensidade produzida com base em outra região. Além disso, pela ausência de dados de campo, este método não permite a comparabilidade entre magnitudes de concentração de sedimentos de diferentes ambientes aquáticos.

Em geral, considerando o mapeamento qualitativo, o padrão de resposta observado nas imagens CBERS-2 foi similar ao apresentado nas imagens Landsat 5; já a comparação absoluta dos valores registrados foi bastante prejudicada pela presença de nuvens na área de estudo e pelo ruído existente na cena adquirida pelo sensor TM. Em todo caso, as imagens CBERS-2 não devem ser utilizadas para fins quantitativos, conforme orientações do INPE.

Com relação à análise espaço-temporal da pluma costeira do rio Paraíba do Sul, a avaliação conjunta das imagens e mapas temáticos com os dados de vazão indicou que o aporte fluvial é a principal origem dos sedimentos, e que existe um padrão espacial e temporal nas características do material em suspensão fortemente relacionado à descarga fluvial. O comportamento geral observado é que há formação de pluma no período de cheia, enquanto no restante do ano o padrão apresentado é difuso, sem presença marcante da frente de sedimentos. Especificamente, houve formação de pluma quando a vazão média dos dez dias anteriores foi superior a $730 \text{ m}^3/\text{s}$ em todos os casos avaliados; valores de vazão atípicos em determinada época do ano produziram, portanto, um padrão diferente do esperado. A intensidade da concentração de sedimentos em suspensão também apresentou comportamento similar ao longo do ano, com as classes de maior concentração máxima ocorrendo preferencialmente na época de cheia.

Quanto às suas características, a pluma se desenvolve mais no eixo norte-sul, mas alcança significativa expressão *offshore*. A extensão máxima de sua frente de sedimentos ocorre na direção sudeste (SE2), onde alcança aproximadamente 27 km de distância do ponto central da foz. As direções ao sul, principalmente S1 e SE2, são as direções preferenciais da maior parte das feições, e também onde elas apresentam seus maiores alcances espaciais. Ao norte, sempre uma direção se destaca, conferindo esta expressão alongada no sentido norte – sul. Considerando o comportamento espacial da pluma ao longo do tempo, verificou-se que a área total de abrangência mapeada é de $539,3 \text{ km}^2$, dos quais $33,6 \text{ km}^2$, distantes até 7 km da foz, sempre contém frente de sedimentos. Um pequeno número de ocorrências contribui decisivamente para a área total de abrangência mapeada; a metade das plumas que ocorre com mais frequência ocupa cerca de 30 % da área total.

Os resultados deste estudo de caso comprovam a viabilidade de se mapear o comportamento espaço-temporal de plumas de sedimentos costeiras associadas a sazonalidade anual através de imagens Landsat 5 e CBERS-2. Os dados de descarga fluvial definem o padrão dos sedimentos em suspensão na região da foz do rio Paraíba do Sul, mas a configuração espacial da pluma é determinada por outros fatores ambientais, não analisados nesta pesquisa. De fato, o período de revisita dos satélites utilizados permite captar variações no sistema aquático relacionadas a eventos com escala temporal mais longa, a partir da análise de cenários ambientais. Já as características espaciais da pluma e a dinâmica altamente variável dos sedimentos em suspensão em curtos espaços de tempo estão associadas a outros

parâmetros ambientais, não analisados nesta abordagem, uma vez que requerem sensores com período de revisita menor. Nesse sentido, uma sugestão para trabalhos futuros é analisar a influência dos sistemas meteorológicos, sobretudo o vento, na pluma costeira do rio Paraíba do Sul utilizando-se imagens MODIS, já que este sensor recobre a mesma área a cada 12 horas. No que se refere a sua resolução espacial, os resultados desta dissertação indicam que é possível empregá-lo na foz do rio Paraíba do Sul, em função da magnitude de sua pluma costeira.

Seria interessante a realização de uma pesquisa com o objetivo de testar e aprimorar técnicas para extração de informações sobre plumas de sedimentos a partir de dados de sensoriamento remoto orbital ou aéreo, baseados na reflectância da banda do vermelho. Uma abordagem comparativa entre diversas técnicas visando à obtenção de melhores resultados, utilizando-se procedimentos mais automatizados, sem dúvida, contribuiria para o desenvolvimento de metodologias aplicadas a ambientes aquáticos.

Outra sugestão para futuros pesquisas é estimar a concentração de sedimentos em suspensão nesta área a partir de sensoriamento remoto, com a realização de uma campanha de coleta de dados em campo concomitante à passagem do satélite. A caracterização do material em suspensão na área costeira adjacente à foz do rio Paraíba do Sul acrescentaria valiosa informação sobre a dinâmica dos sedimentos, sendo indispensável para a realização de estudos quantitativos.

A abordagem adotada nesta pesquisa contribui para a disseminação do uso do sensoriamento remoto em corpos d'água e provê novos recursos para um maior conhecimento do espaço geográfico, sendo efetivamente capaz de auxiliar nas atividades de planejamento e gestão ambiental. As suas limitações foram apontadas neste capítulo e discutidas oportunamente, ao longo do trabalho; nesse sentido, as sugestões para futuros estudos pretendem alargar as suas possibilidades de aplicação.

REFERÊNCIAS

- ANA. *Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos*. Plano de recursos hídricos para a fase inicial da cobrança na bacia do rio Paraíba do Sul, PGRH-RE-010-R0. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 2002. v. 1., 243 p. Relatório técnico.
- ANTUNES, M. A. H. *Adaptação do modelo de correção atmosférica 6 S* – Second simulation of satellite signal in the solar spectrum. 2003. Programa computacional.
- ANTUNES, M. A. H.; FREIRE, R. M. B.; BOTELHO, A. S.; TONIOLLI, L. H. Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2003.
- BANCO de imagens da DGI / INPE. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 07 jun. 2007.
- BARBOSA, C. C. F. *Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema planície do Curuai / Rio Amazonas*. 2005. 225 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2005.
- BARROS, R. F. Q. *Filtros espaciais de alto desempenho para imagens em sistemas de informações geográficas*. 1998. 75 f. Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1998.
- BHARGAVA, D. S.; MARIAM, D. W. Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 56, n. 2, p. 225-229, 1990.
- BIZERRIL, C. R. S. F.; TOSIN, P. C.; ARAÚJO, L. M. N. *Contribuição ao conhecimento da bacia do rio Paraíba do Sul* – coletânea de estudos. Rio de Janeiro: ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 1998. 113 p.
- BUKATA, R. P.; BRUTON, J. E.; JEROME, J. H. Use of chromaticity in remote measurements of water quality. *Remote Sensing of Environment*, 13: 161-177, 1983.
- BURROUGH, P. A. *Principles of geographical informations systems for land resources assessment*. Clarendon Press, Oxford, 1989. 194 p.
- CABRAL, A. P.; MANTOVANI, J. E.; LIMA, R. F.; COSTA, M. P. F. Redução do stripping de imagens TM-Landsat de ambientes aquáticos através de técnicas de filtragem espacial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6, 1990, Manaus. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 1990. p. 833-839, 1990.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.; PAIVA, J. A.; D'AGE, J. C. L. (Orgs). *Geoprocessamento: teoria e aplicações*. São José dos Campos: INPE, 1999. Cap. 2, 35 p.

Livro *on-line*. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>>. Acesso em: 08 jun. 2009.

CASSAR, J. C. M.; NEVES, C. F. Aplicação das rosas de transporte litorâneo à costa norte-fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia*, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 81-106, 1993.

CEIVAP. *Diagnóstico dos recursos hídricos – Relatório final*. PSR-010-R0, Projeto BRA/96/017, MPO / SEPURB / PQA-ABC-PNUD-UFRJ–COPPE. Resende: AGEVAP, 2006. 201 p. Relatório técnico.

CHAVEZ Jr, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479, 1988.

CHAVEZ Jr, P. S. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, n. 9, p. 1285-1294, 1989.

CHAVEZ Jr, P. S. Image-based atmospheric corrections: revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 62, n. 9, p. 1025-1036, 1996.

CHEN, Z.; CURRAN, P. J.; HANSOM, J. D. Derivative reflectance spectroscopy to estimate suspended sediment concentration. *Remote Sensing of Environment*, v. 40, p. 67-77, 1992.

CHOUBEY, V. K.; SUBRAMANIAN, V. Nature of suspended solids and IRS1A-LISSI data: a case study of Tawa Reservoir (Narmanda Basin). *Remote Sensing of Environment*, v. 34, p. 207-215, 1990.

CHOUBEY, V. K.; SUBRAMANIAN, V. Spectral response of suspended sediments in water under controlled conditions. *Journal of Hydrology*, 122: 301-308, 1991.

CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia Fluvial*. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 313 p.

COELHO, M. C. N. Impactos ambientais em áreas urbanas – teorias, conceitos e métodos de pesquisa. In: GUERRA, A.J.T., CUNHA, S.B.C. (Orgs). *Impactos ambientais urbanos no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. Cap. 1, p. 19-45.

CRIPPEN, R. E. A simple spatial filtering routine for the cosmetic removal of scan-line noise from Landsat TM P-tape imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 55, n. 3, p. 327-331, 1989.

CRÓSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas: IG / UNICAMP, 1992. 170 p.

CURRAN, P. J.; HANSOM, J. D.; PLUMMER, S. E.; PEDLEY, M. I. Multispectral remote sensing of nearshore suspended sediments: a pilot study. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 1, p. 103-112, 1987.

CURRAN, P. J.; NOVO, E. M. M. The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review. *Journal of Coastal Research*, v. 4, n. 3, p. 351-368, 1988.

DAVIS, C.; CÂMARA, G. Arquitetura de sistemas de informação geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.; PAIVA, J.A.; D'AGE, J.C.L. (Orgs). *Geoprocessamento: teoria e aplicações*. São José dos Campos: INPE, 1999. Cap. 3, 35 p. Livro *on-line*. Disponível em: < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>>. Acesso em: 19 dez. 2001.

de SMITH, M. J.; GOODCHILD, M. F.; LONGLEY, P. A. *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Winchelsea, UK: Winchelsea Press, 2007. 416 p.

DESCHAMPS, P. Y.; HATMAN, M.; TANRÉ, D. Definitions of atmospheric radiance and transmittances in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, v. 13, p. 89-92, 1983.

ESA. Página oficial da Agência Espacial Européia. Disponível em: <<http://www.esa.int/>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

FONSECA, L. M. G. *Processamento digital de imagens*. São José dos Campos: INPE, 2000. Não paginado. Notas de aula. Disponível em: <<http://geosere.ccr.ufsm.br/download.php?cat=1>>. Acesso em: 18 fev. 2008.

FONSECA, E. L.; GLERIANI, J. M. Avaliação do efeito da correção atmosférica e retificação radiométrica no cálculo da transformação tasseled cap. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 513-519.

FLORENZANO, T. G. *Imagens de satélite para estudos ambientais*. São Paulo, Oficina de Textos, 2002. 97 p.

FOOTE, K. E.; LYNCH, M. *Geographic information systems as an integrating technology: context, concepts, and definitions*. Colorado: Department of Geography, The University of Colorado, The Geographer's Craft Project, 1995. Não paginado. Disponível em: <http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/intro/intro_f.html>. Acesso em: 19 jun. 2009.

GIBSON, P. J.; POWER, C. H. *Introductory remote sensing: digital image processing and applications*. London: Routledge, 2000. 249 p.

GOODIN, D. G.; HAN, L.; FRASER, R. N.; RUNDQUIST, C.; STEBBINS, W. A.; SCHALLES, J. F. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 59, n. 4, p. 505-510, 1993.

GRIMM, A. M. *Meteorologia básica*. Paraná: Departamento de Física da UFPR, 1999. Não paginado. Notas de aula. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Acesso em: 05 nov. 2008.

GÜRTLER, S.; LUIZ, A. J. B.; EPIPHANIO, J. C. N. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2003. p. 109-116.

GÜRTLER, S.; EPIPHANIO, J. C. N.; LUIZ, A. J. B.; FORMAGGIO, A. R. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ Landsat. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 57/02, 2005.

HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multirate, multisensor images. *Remote Sensing of Environment*, v. 35, p. 11-27, 1991.

HELDER, D. L.; QUIRK, B. K.; HOOD, J. J. A technique for the reduction of banding in Landsat Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 58, n. 10, p. 1425-1431, 1992.

HIDROWEB – Sistema de informações hidrológicas da Agência Nacional de Águas.. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>>. Acesso em: 15 fev. 2008.

HOLYER, R. J. Towards universal multispectral suspended sediment algorithms. *Remote Sensing of Environment*, v. 7, p. 323-338, 1978.

INPE. *Introdução ao sensoriamento remoto*. São José dos Campos: INPE, 2001. 68 p. Apostila. Disponível em: <http://www.agro.unitau.br/sensor_remoto/apofla.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2009.

INPE. Informações oficiais sobre o programa CBERS. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br>>. Acesso em: 10 jun. 2009.

IBGE. *Introdução ao processamento digital de imagens*. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. 92p. Manuais técnicos em Geociências.

KIRK, J. T. O. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1994 apud MILLER, R. L.; MCKEE, B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 259-266, 2004.

KRITIKOS, H.; YORINKS, L.; SMITH, H. Suspended solids analysis using ERTS-A data. *Remote Sensing of Environment*, v. 3, p. 69-78, 1974.

LACERDA, L. D. *A zona costeira: o domínio das interações*. [S.I.: s.n., 200-]. Não paginado. Disponível em: <<http://www.institutomilenioestuários.com.br/zonacosteira.html>>. Acesso em: 25 out. 2007.

LATORRE, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; SHIMABUKURO, Y. E. Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. *Espaço & Geografia*. 5(1): 153-178, 2002.

LEICA GEOSYSTEMS GEOSPATIAL IMAGING. *ERDAS Field Guide*. Georgia: Leica Geosystems Geospatial Imaging, 2005, p.159. 705 p.

LEONARDI, S. S.; SOUZA, S. M.; FONSECA, L. M. G. Comparação do desempenho de algoritmos de normalização radiométrica de imagens de satélite. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2063-2069.

LIANG, S. Atmospheric correction of Landsat ETM+ land surface imagery – part I: methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 11, p. 2490-2498, 2001.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. *Remote sensing and image interpretation*. 3rd ed. New York : Wiley & Sons, 1994. 750 p.

LONDE L. R.; NOVO, E. M. L. M.; CALIJURI, M. C. Avanços no estudo do comportamento espectral do fitoplâncton e identificação remota de algas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 389-396.

LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. *Geographic Information Systems and Science*. Second Edition. New York: Wiley, 2005. 517 p.

LORENZZETTI, J. A.; NEGRI, E.; KNOPERES, B.; MEDEIROS, P. R. P. *Uso de imagens Landsat como subsídio ao estudo da dispersão de sedimentos na região da foz do rio São Francisco*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3429-3436.

LUIZ, A. J. B.; GÜRTLER, S.; GLERIANI, J. M.; EPIPHANIO, J. C. N.; CAMPOS, R. C. Reflectância a partir do número digital de imagens ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2071-2078.

MANTOVANI, J. E. *Comportamento espectral da água: faixas espectrais de maior sensibilidade ao fitoplâncton na presença de matéria orgânica dissolvida e de matéria inorgânica particulada*. 1993. 99 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 1993.

MANTOVANI, J. E.; NOVO, E. M. L. M. *Comportamento espectral da matéria orgânica dissolvida*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8, 1996, Salvador. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 1996. p. 917-923.

MATHER, P. M. *Computer processing of remotely-sensed images: An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, 1999. ANTUNES, M. A. H.; FREIRE, R. M. B.; BOTELHO, A. S.; TONIOLLI, L. H. Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2003.

McCLUNEY, W. R. Remote measurement of water color. *Remote Sensing of Environment*, v. 5, p. 3-33, 1976.

MERTEN, G.H.; MINELLA, J. P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável*, Porto Alegre, v. 3, n. 4, 2002.

MERTES, L. A. K.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, v. 43, p. 281-301, 1993.

MITCHELL, A. *The ESRI Guide to GIS Analysis – Volume 1: Geographic Patterns and Relationships*. Redlands, California: ESRI Press, 1999. 186 p.

MILLER, R. L.; MCKEE, B. A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, v. 93, p. 259-266, 2004.

MISHRA, A. K. Retrieval of suspended sediment concentration in the estuarine waters using IRS-1C WiFS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 6, p. 83-95, 2004.

MOBLEY, C. D. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press, 1994 apud NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da água. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETO, J. S. (Org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais*. Brasília, DF: UNB; Planaltina, Embrapa Cerrados, p. 203-224, 2001.

MOLLERI, G. S. F.; KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M.; PONZONI, F. J.; FONSECA, L. M. G. Comparação entre as respostas espectrais dos sensores MODIS/TERRA e WFI/CBERS-2 para o monitoramento do material em suspensão na foz do Rio Amazonas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p. 977-984.

MORAES, E. C. *Fundamentos de sensoriamento remoto*. São José dos Campos: Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE, [200-]. 22p. Apostila de Sensoriamento Remoto. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/html/APOSTILA_PDF/CAP1_ECMoraes.pdf>. Acesso em: 27 out. 2008.

MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; SLATER, P. N.; TEILLET, P. M. Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment*, v. 41, p. 169-184, 1992.

MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2003. 307p.

MOREIRA, M. A.; CARDOSO, V.; FREITAS, R. M.; RUDORFF, B. F. Comparação da resposta espectral de alvos em imagens CBERS-2/CCD e Landsat-5/TM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1027-1034.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*, v. 22, n. 4, p. 709-722, 1977.

MUEHE, D.; VALENTINI, E. *O litoral do estado do Rio de Janeiro - uma caracterização físico-ambiental*. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar, v. 1, 1998. 93 p.

MUNDAY, J. C. Jr.; ALFÖLDI, T. T. Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurements. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, p. 169-183, 1979.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. Detecção de processos costeiros associados a transporte de sedimentos em um evento pós-frontal na costa do Paraná utilizando Landsat7/ETM+. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2001. p. 831-834.

NOVO, E. M. L. M.; HANSOM, J. D.; CURRAN, P. J. The effect of sediment type on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n° 7, p. 1283-1289, 1989 a.

NOVO, E. M. L. M.; HANSOM, J. D.; CURRAN, P. J. The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration. *International Journal of Remote Sensing*, v. 10, n. 8, p. 1357-1372, 1989 b.

NOVO, E. M. L. M.; STEFFEN, C. A.; BRAGA, C. Z. F. Results of a laboratory experiment on relating spectral reflectance to total suspended solids. *Remote Sensing of Environment*, v. 36, p. 67-72, 1991.

NOVO, E. M. L. M. *Sensoriamento remoto: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.

NOVO, E. M. L. M. Comportamento espectral da água. In: MENESSES, P. R.; MADEIRA NETO, J. S. (Org.). *Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais*. Brasília, DF: UNB; Planaltina, Embrapa Cerrados, p. 203-224, 2001.

PEREIRA, G.; OLIVEIRA, L. G. L.; PONZONI, F. J.; ADAMI, M.; MORAES, E. C. *Comparação temporal de medidas radiométricas: uma abordagem metodológica*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6375-6381.

RIBEIRO, G. P. *Tecnologias digitais de geoprocessamento no suporte à análise espaço-temporal em ambiente costeiro*. 2005. 215 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2005.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas. *Diagnóstico preliminar das condições hidrossedimentológicas do rio Paraíba do Sul e de seus principais afluentes*. PS-RE-29-RO, Projeto BRA/96/017, MPO / SEPURB / PQA-ABC-PNUD-UFRJ-COPPE. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 1997. 95 p. Relatório técnico.

RIO DE JANEIRO (Estado). Secretaria de Estado de Meio Ambiente, Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas. *Análise ambiental*. Projeto BRA/96/017, PS-RE-074-R0, MPO / SEPURB / PQA-ABC-PNUD-UFRJ-COPPE. Rio de Janeiro: Fundação COPPETEC, 1999. 213 p. Relatório técnico.

RIMMER, J. C.; COLLINS, M. B.; PATTIARATCHI, C. B. Mapping of water quality in coastal waters using Airborne Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 1, p. 85-102, 1987.

RITCHIE, J. C.; SCHIEBE, F. R.; McHENRY, J. R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 8, p. 85-102, 1976.

RITCHIE, J. C.; COOPER, C. M.; YONGQING, J. Using Landsat Multispectral Scanner Data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, v. 23, p. 65-81, 1987.

RITCHIE, J. C.; COOPER, C. M. Comparison of measured suspended sediment concentrations with suspended sediments concentration estimated from Landsat MSS data. *International Journal of Remote Sensing*, v.9, n. 3, p. 379-387, 1988.

ROUSE, L. J.; COLEMAN, J. M. Circulation observations in the Louisiana Bight using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 5, p. 55-66, 1976.

RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; SCHALLES, J. F.; PEAKE, J. S. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690 nm. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 62, n. 2, p. 195-200, 1996.

SEMADS. *Bacias hidrográficas e rios fluminenses - síntese informativa por macrorregião ambiental*. 1. ed. Rio de Janeiro: SEMADS, v. 1, 2001. 73 p.

SETTI, A. A.; LIMA, E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I. C. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2. ed. Brasília: ANEEL / ANA, 2001. 207 p.

SILVA, P. G.; GRAÇA, P. M. L. A.; SANTOS, J. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Avaliação da correção atmosférica e retificação radiométrica em estudos multitemporais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2135-2142.

SONG, C.; WOODCOCK, C. E.; SETO, K. C.; PAX-LENNEY, M.; MACOMBER, S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment*, v. 75, p.230-244, 2001.

TANRÉ, D.; DEROO, C.; DUHAUT, P.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J.; PERBOS, J.; DESCHAMPS, P. Y. Description of a computer code to simulated the satellite signal in the solar spectrum: The 5S code. *International Journal of Remote Sensing*, v.11, n. 4, p. 659-668, 1990.

TASSAN, S. A numerical model for the detection of sediment concentration in stratified river plumes using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 18, n. 12, p. 2699-2705, 1997.

USGS. Apresenta informações oficiais sobre o programa Landsat. Disponível em: <<http://landsat.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 jan. 2009.

VERMOTE, E.; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J. J. *Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S): 6S user's guide version 2*. NASA-GSFC, Greenbelt, Maryland, 1997. 134 p.

_____. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

WARRICK, J. A.; MERTES, L. A. K.; SIEGEL, D. A.; MACKENZIE, C. Estimating suspended sediment concentrations in turbid coastal waters of the Santa Barbara Channel with SeaWiFS. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 10, p. 1995-2002, 2004.

WITTE, W. G.; WHITLOCK, C. H.; USRY, J. W.; MORRIS, W. D.; GURGANUS, E. Laboratory measurements of physical, chemical, and optical characteristics of Lake Chicot sediment waters. *NASA Technical Paper 1941*, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 32 p., 1981.

WITTE, W. G.; WHITLOCK, C. H.; MORRIS, W. D.; GURGANUS, E. Laboratory upwelled radiance and reflectance spectra of kerr research reservoir sediment waters. *NASA Technical Paper 1993*, Langley Research Center, Hampton, Virginia, 31 p., 1982.

WHITLOCK, C. H.; USRY, J. W.; WITTE, W. G.; GURGANUS, E. Laboratory measurements of upwell radiance and reflectance spectra of calvert, ball, jordan and feldspar soil sediments. *NASA Technical Paper 1039*. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 36 p., 1977.

WHITLOCK, C. H.; WITTE, W. G.; GURGANUS, E.; USRY, J. W. Laboratory and field measurements of upwelled radiance and reflectance spectra of suspended James river sediments near Hopewell, Virginia. *NASA Technical Paper 1292*. Langley Research Center, Hampton, Virginia, 31 p., 1978.

WHITLOCK, C. H.; KUO, C. Y.; LECROY, S. R. Criteria for the use of regression analysis for the remote sensing of sediment and pollutants. *Remote Sensing of Environment*, v. 12, p. 151-168, 1982.

ZULLO JÚNIOR, J. *Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações*. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1994.

APÊNDICE – MAPAS TEMÁTICOS

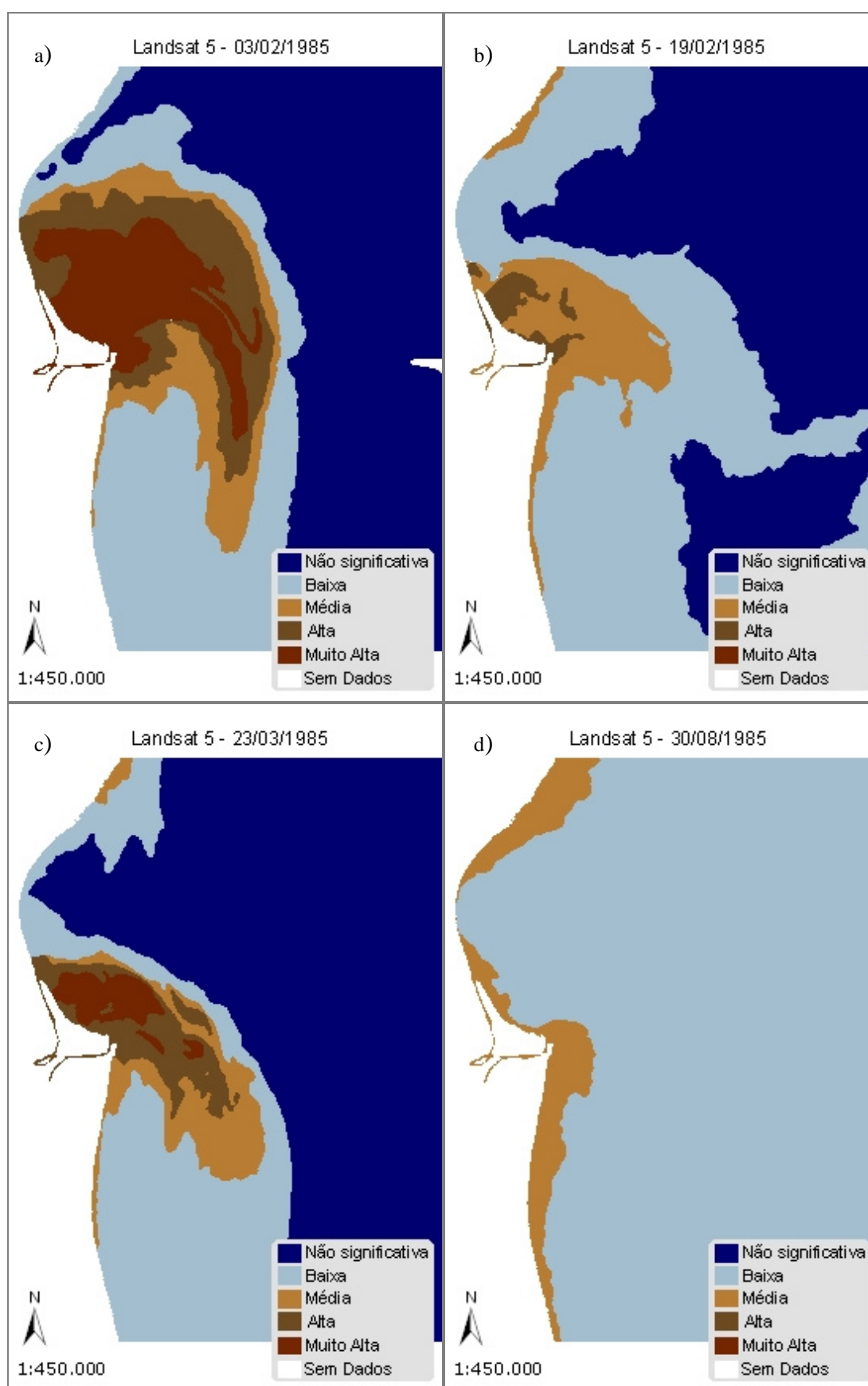


Figura 65 – Mapas temáticos: a) 03/02/1985; b) 19/02/1985; c) 23/03/1985; d) 30/08/1985.

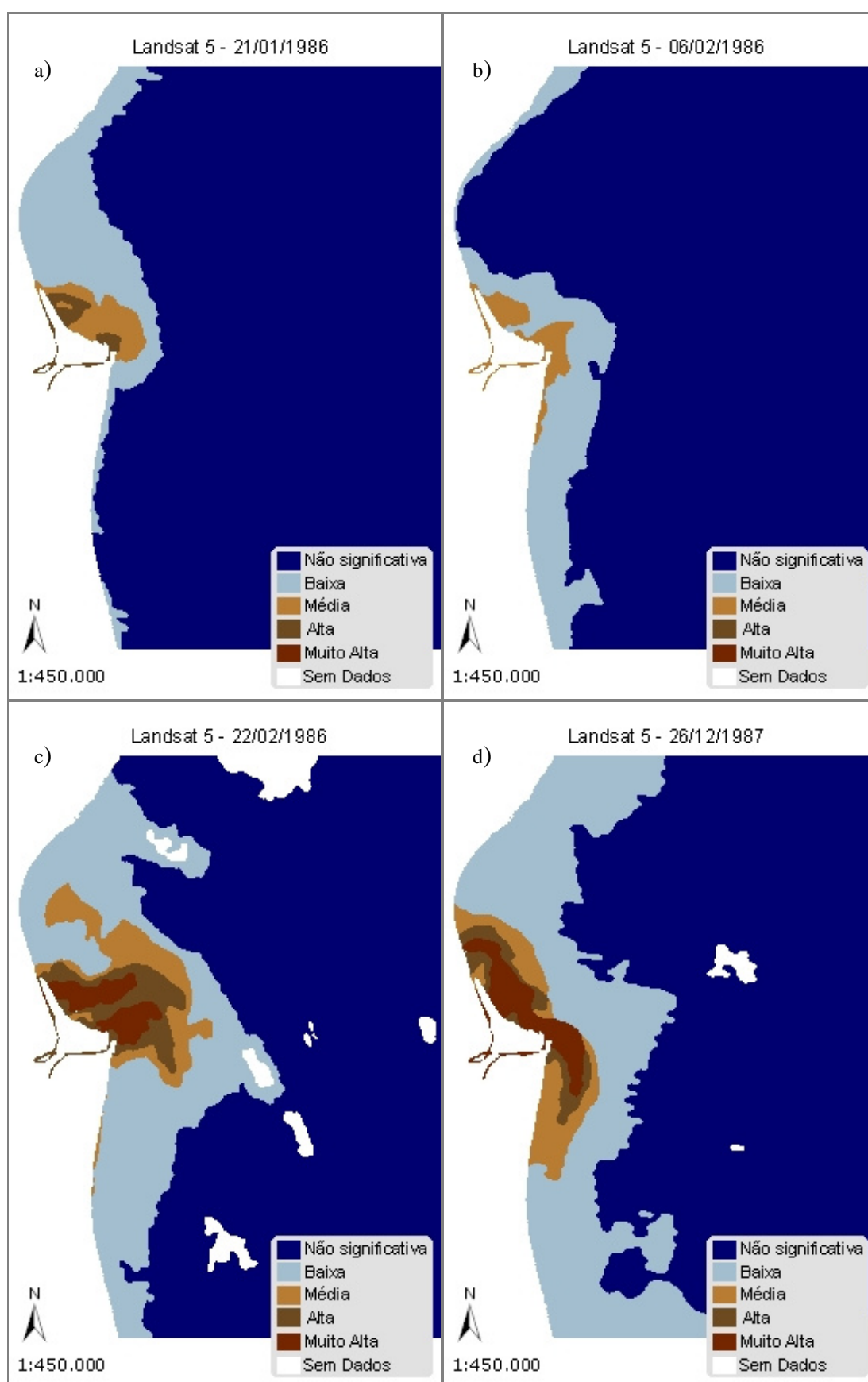


Figura 66 – Mapas temáticos: a) 21/01/1986; b) 06/02/1986; c) 22/02/1986; d) 26/12/1987.

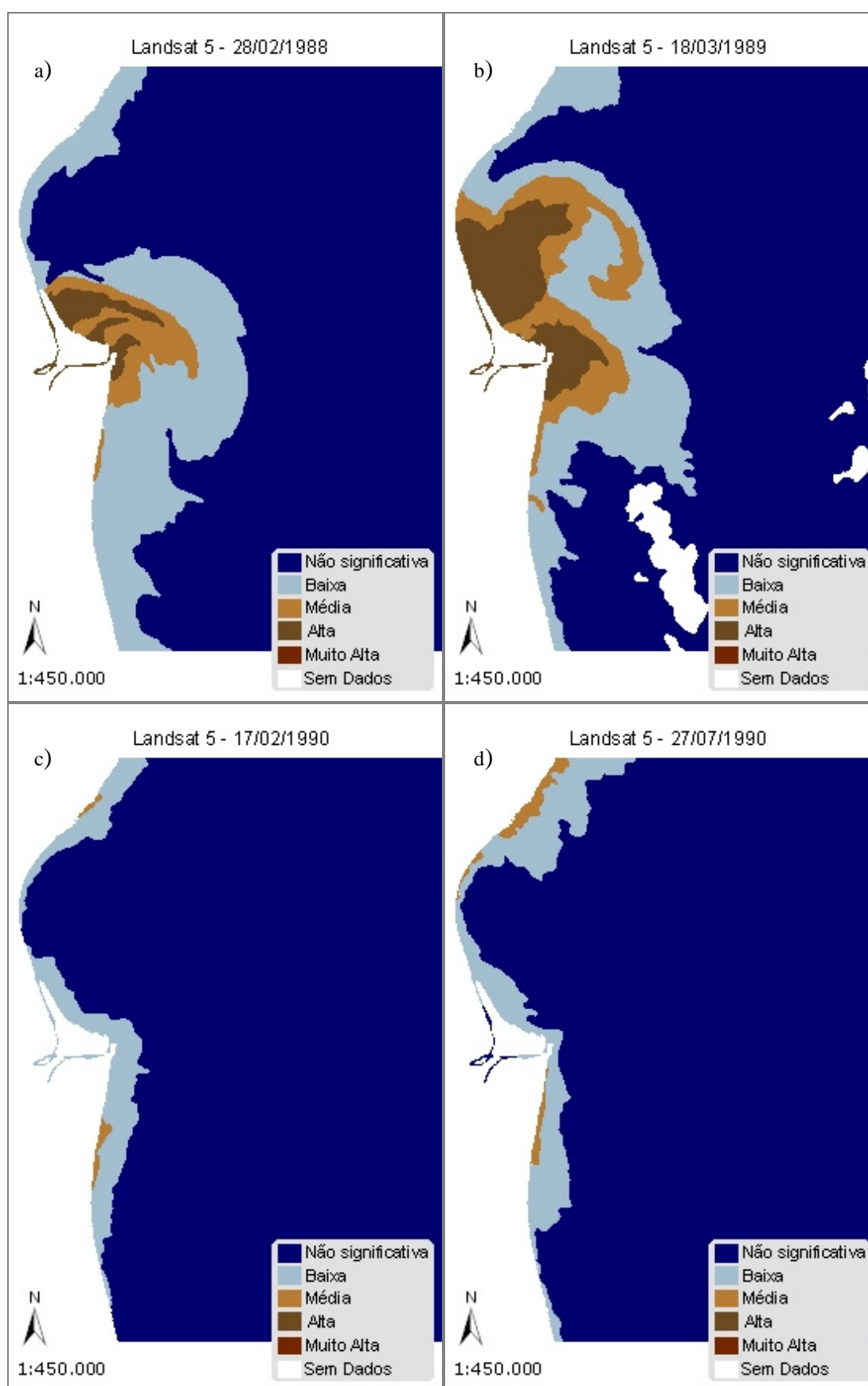


Figura 67 – Mapas temáticos: a) 28/02/1988; b) 18/03/1989; c) 17/02/1990; d) 27/07/1990.

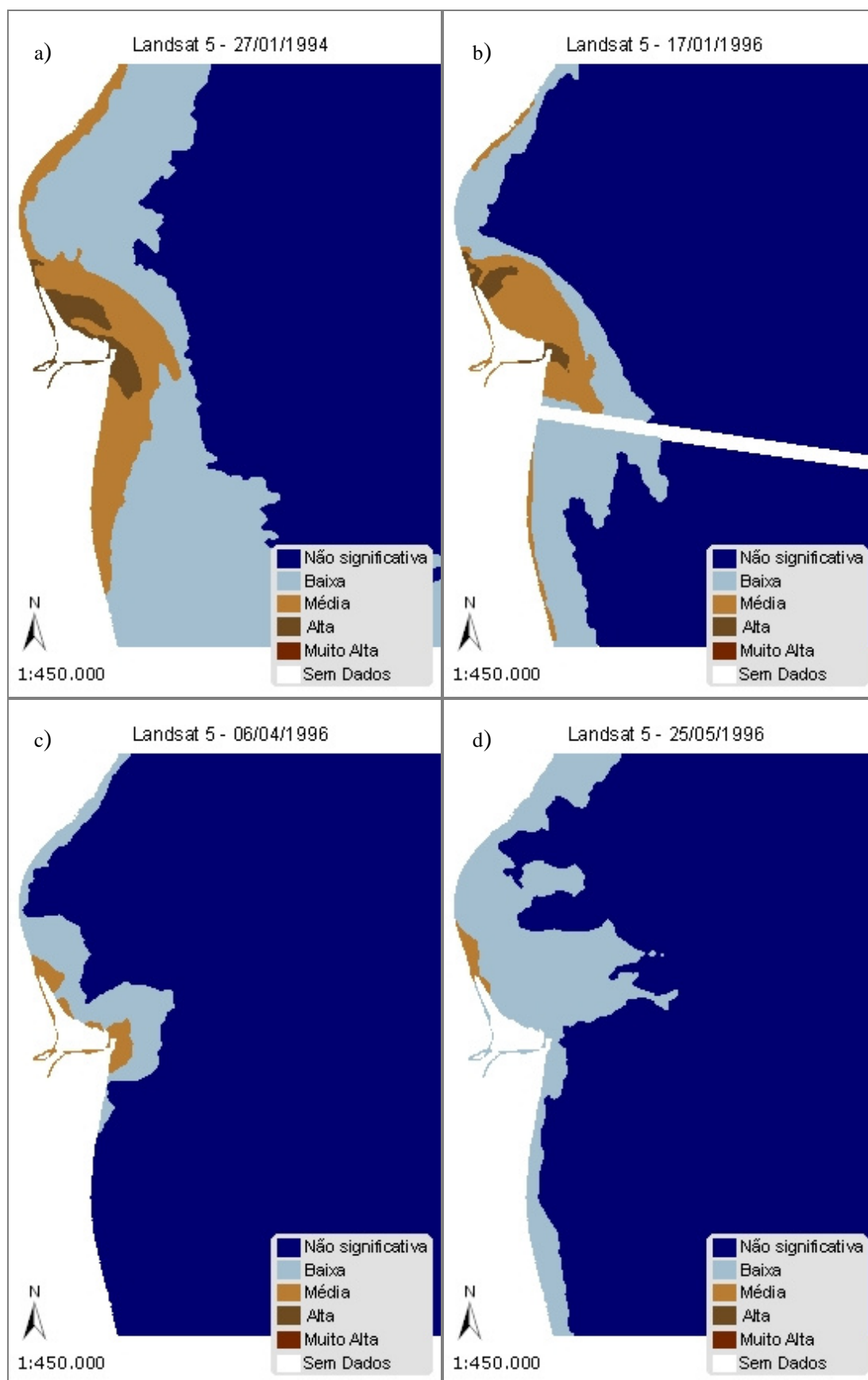


Figura 68 – Mapas temáticos: a) 27/01/1994; b) 17/01/1996; c) 06/04/1996; d) 25/05/1996.

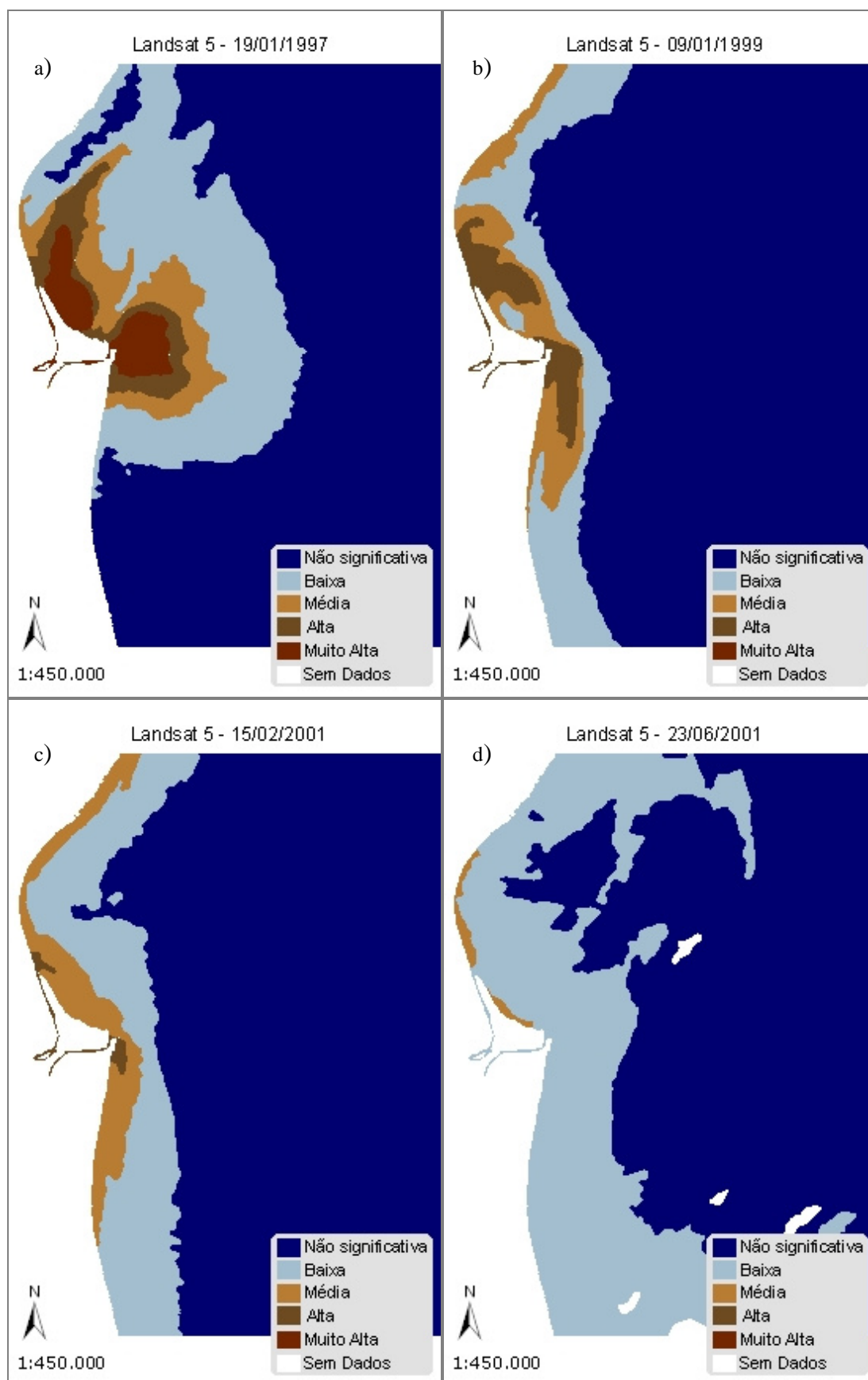


Figura 69 – Mapas temáticos: a) 19/01/1997; b) 09/01/1999; c) 15/02/2001; d) 23/06/2001.

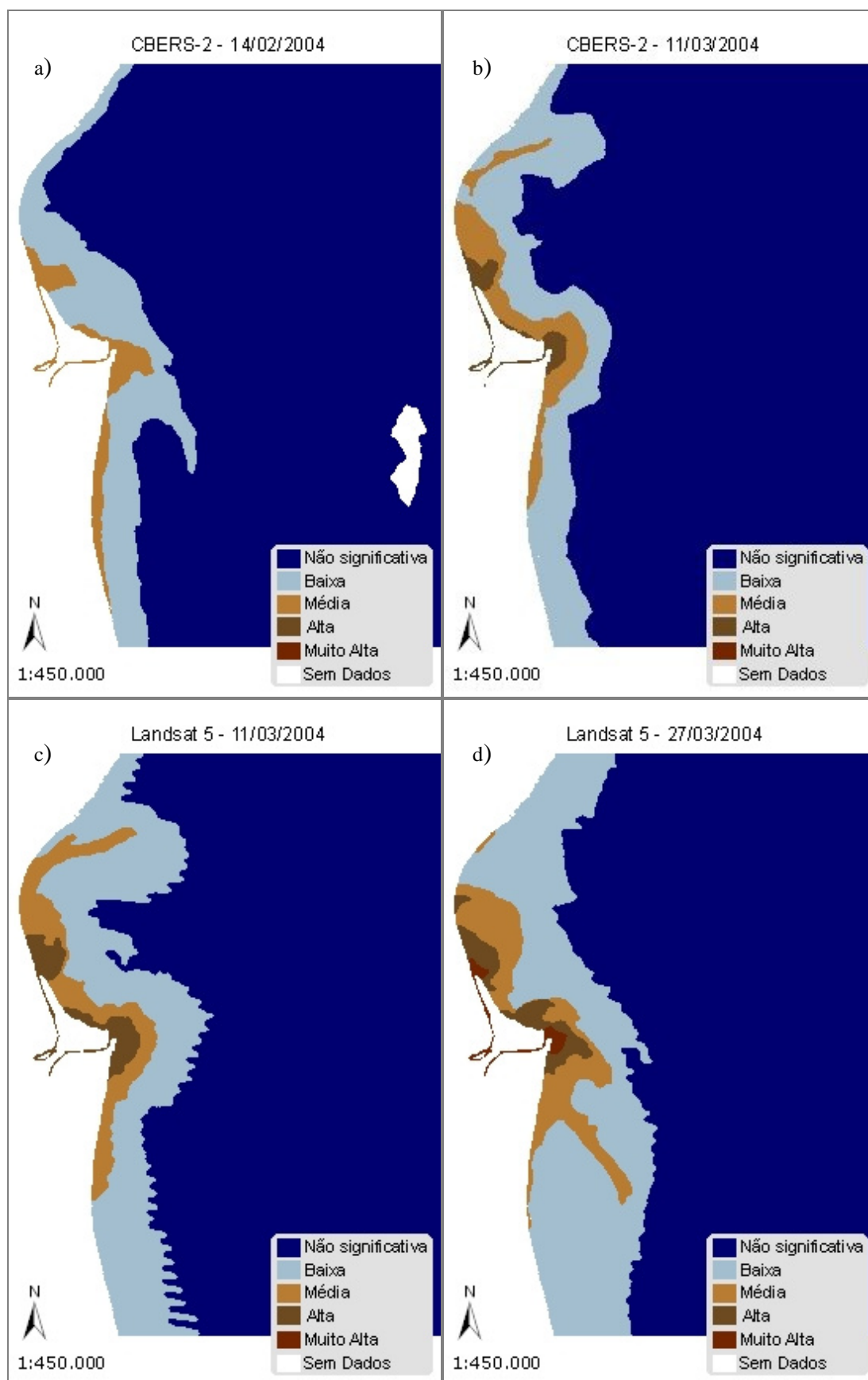


Figura 70 – Mapas temáticos: a) 14/02/2004; b) 11/03/2004; c) 11/03/2004; d) 27/03/2004.

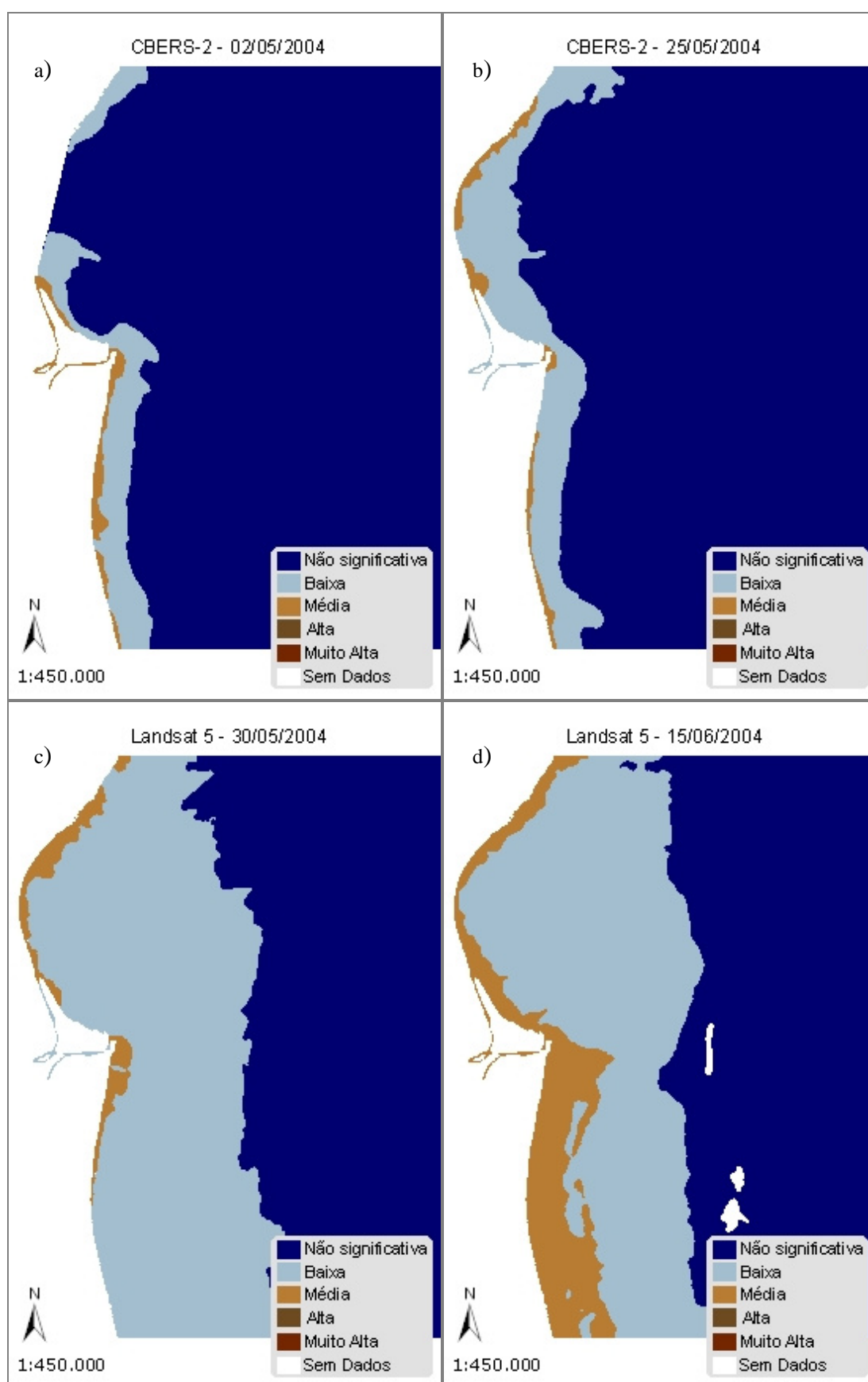


Figura 71 – Mapas temáticos: a) 02/05/2004; b) 25/05/2004; c) 30/05/2004; d) 15/06/2004.

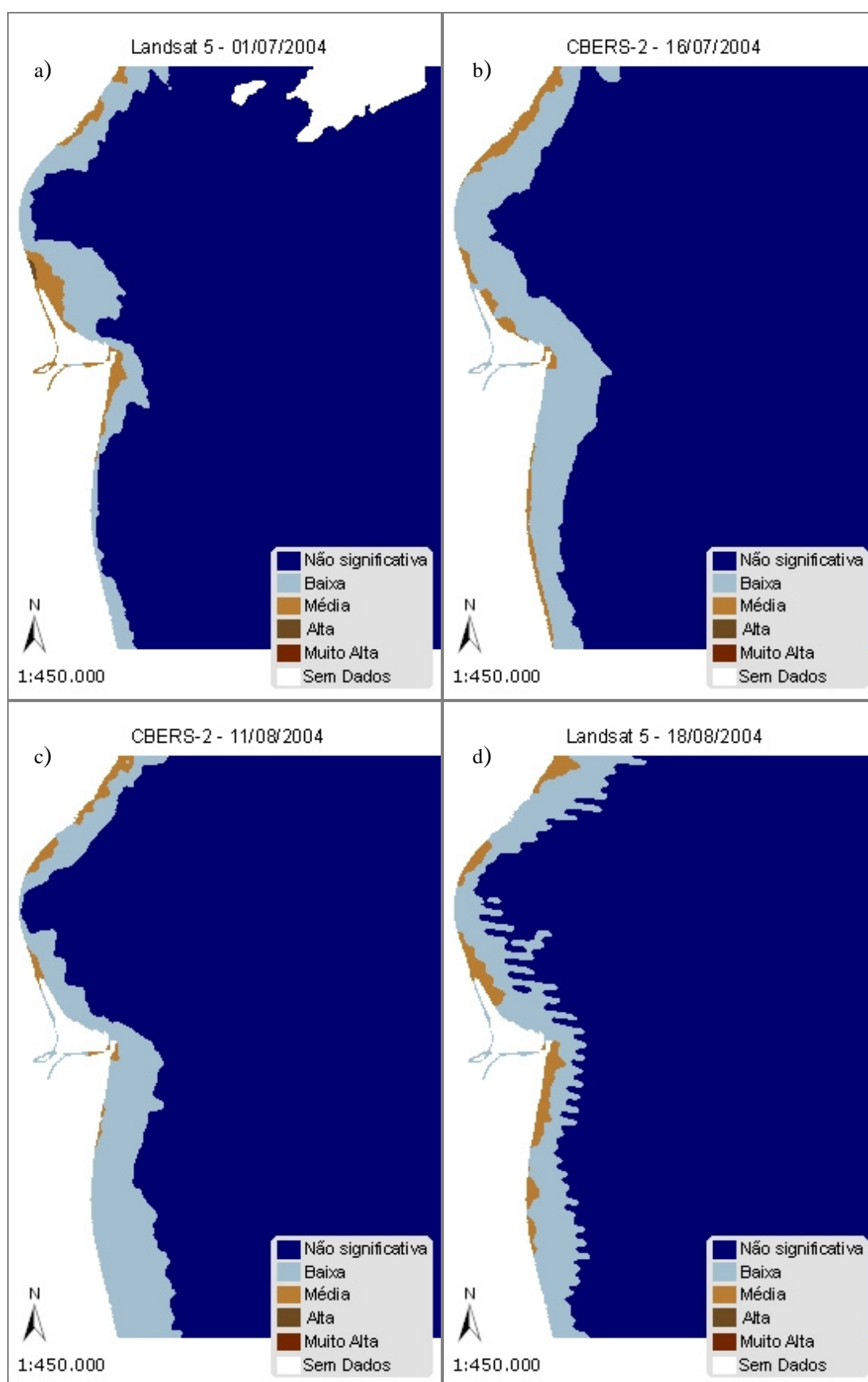


Figura 72 – Mapas temáticos: a) 01/07/2004; b) 16/07/2004; c) 11/08/2004; d) 18/08/2004.

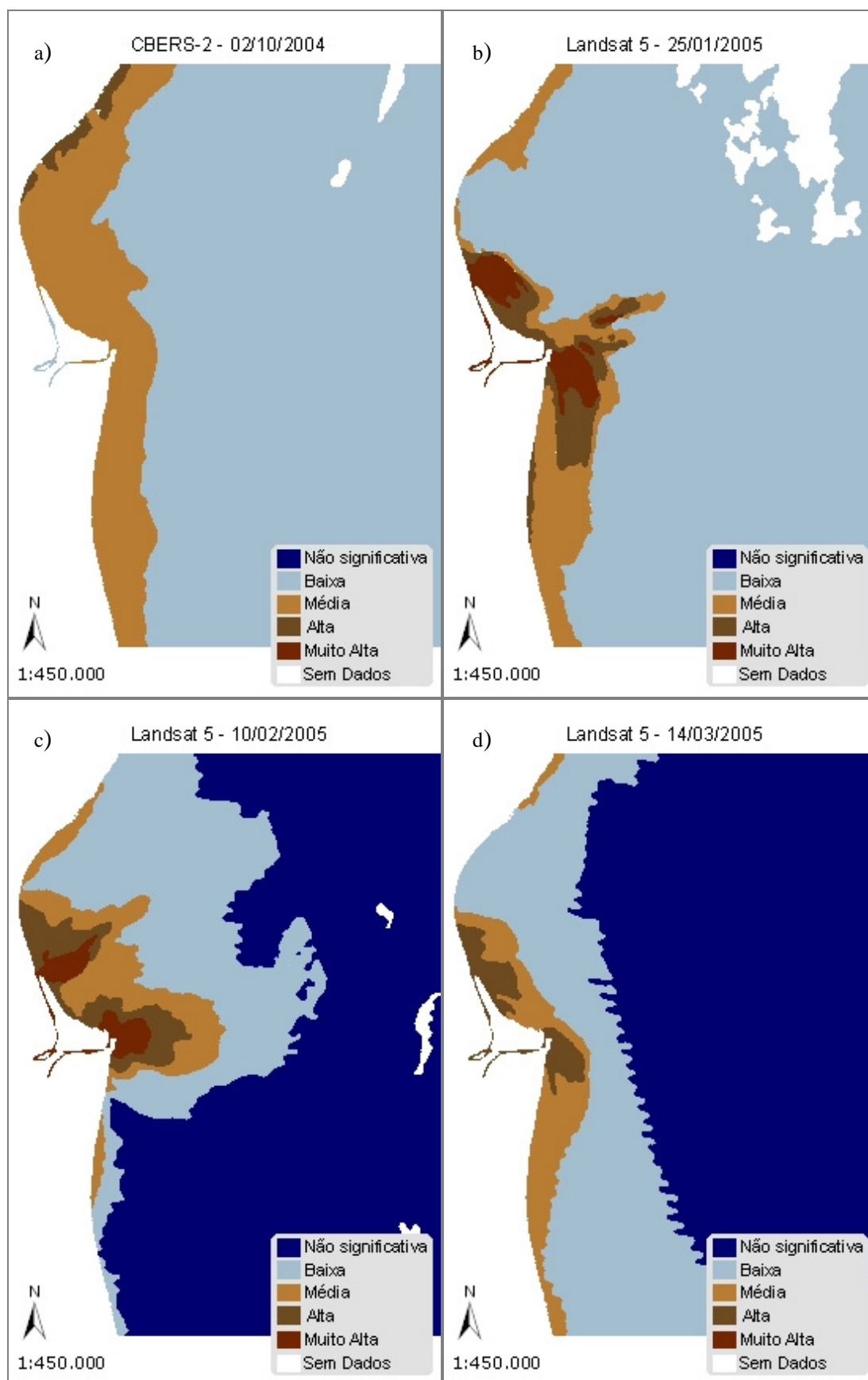


Figura 73 – Mapas temáticos: a) 02/10/2004; b) 25/01/2005; c) 10/02/2005; d) 14/03/2005.

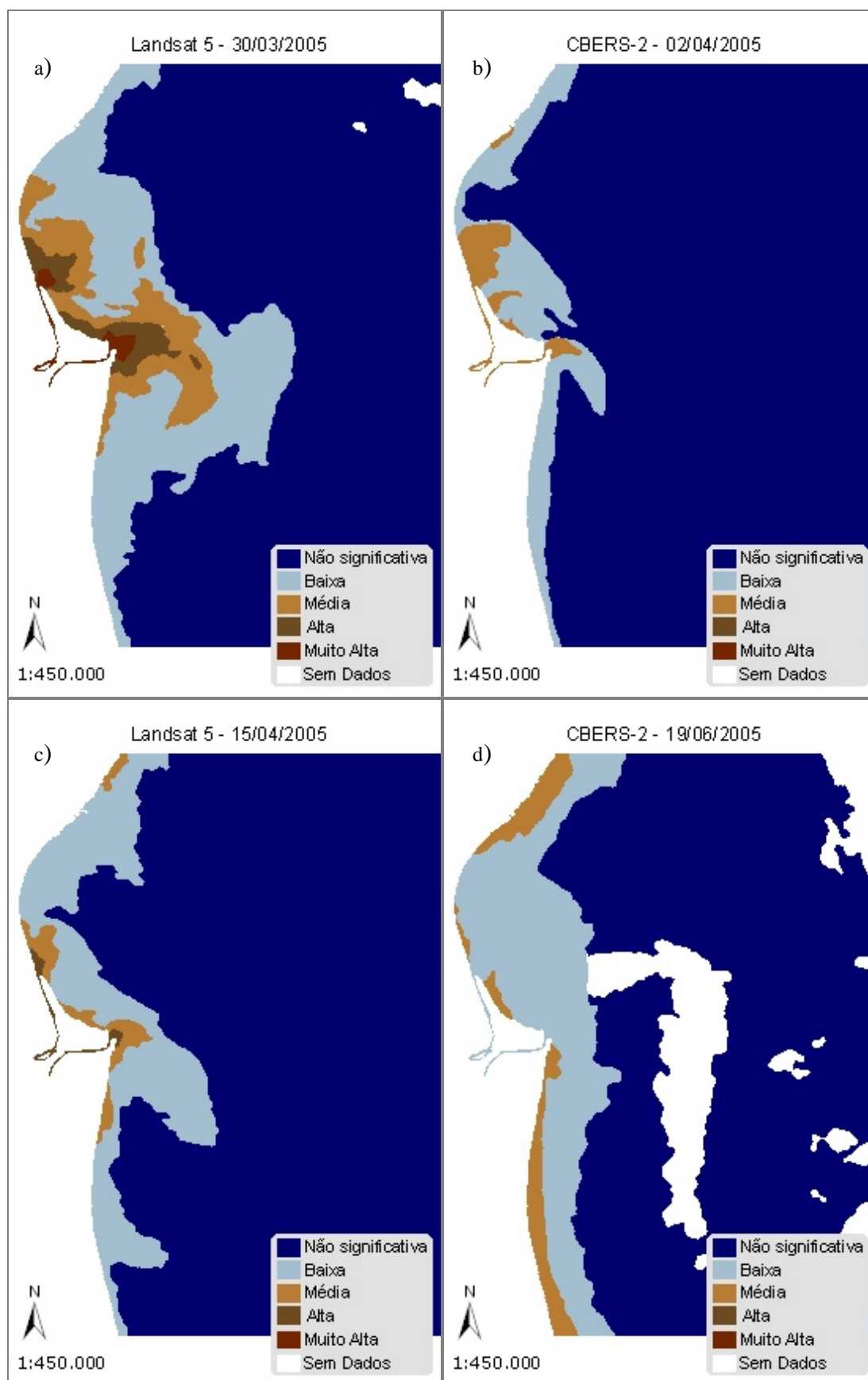


Figura 74 – Mapas temáticos: a) 30/03/2005; b) 02/04/2005; c) 15/04/2005; d) 19/06/2005.

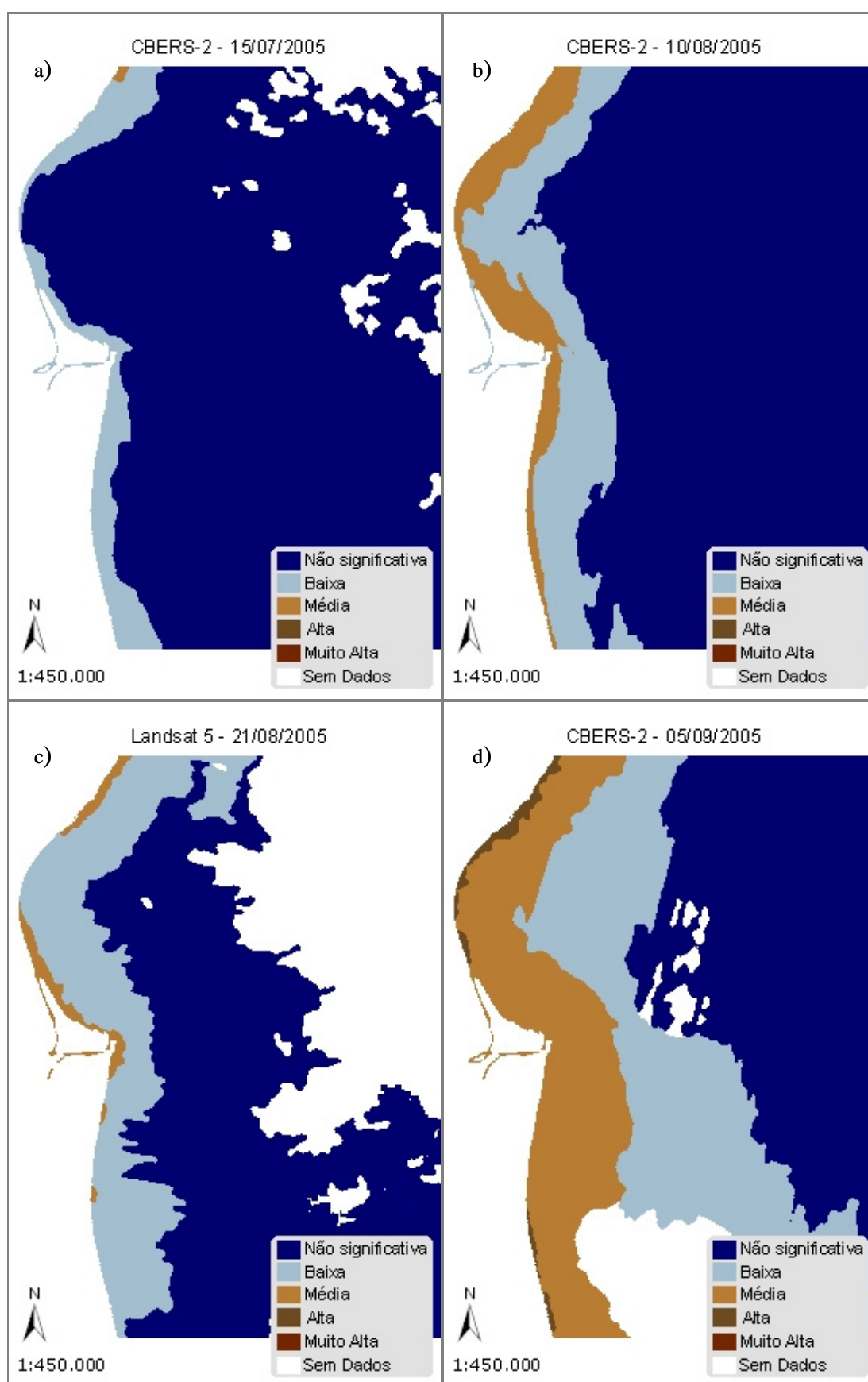


Figura 75 – Mapas temáticos: a) 15/07/2005; b) 10/08/2005; c) 21/08/2005; d) 05/09/2005.

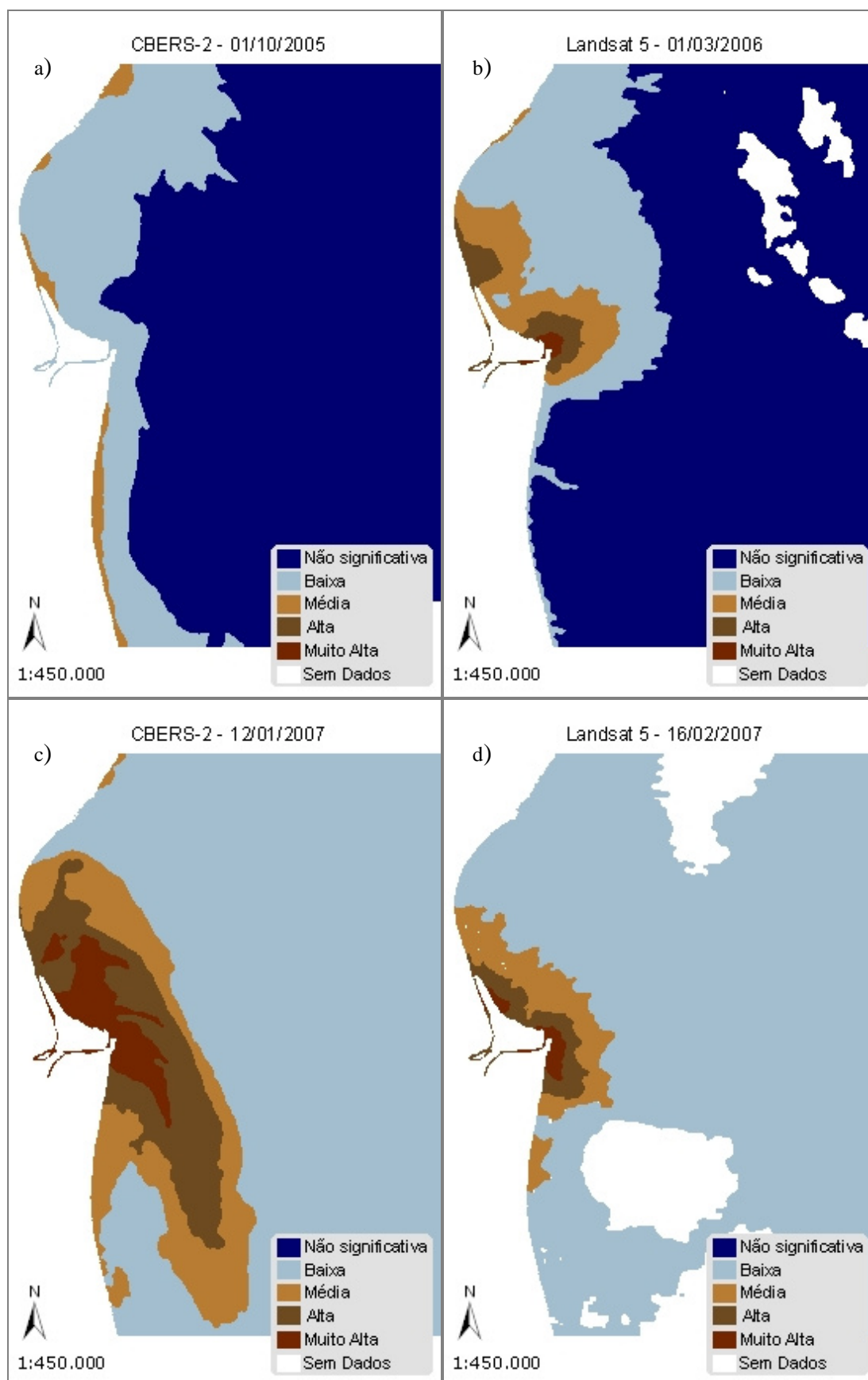


Figura 76 – Mapas temáticos: a) 01/10/2005; b) 01/03/2006; c) 12/01/2007; d) 16/02/2007.

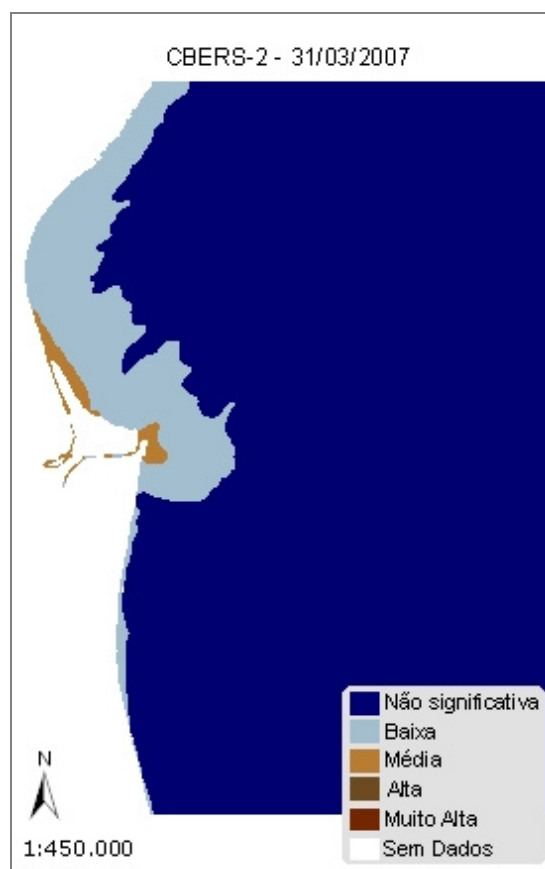


Figura 77 – Mapa temático de 31/03/2007.