



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

THANIRA THAMMY BASTOS VILCHES

RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS DE IMAGENS
ORBITAIS E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO NO RIO DOCE

VITÓRIA
2013

THANIRA THAMMY BASTOS VILCHES

RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS DAS IMAGENS
ORBITAIS E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EM
SUSPENSÃO NO RIO DOCE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, área de concentração em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^o Ph.D. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça.

VITÓRIA
2013

Dedico este trabalho
Aos meus pais,
Tarceli Dimas Ferreira Vilches (*in memoriam*)
e Nadia Maria Bastos Vilches.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que não me deixou desistir nos momentos que eu me senti angustiada e desanimada.

Ao professor Antônio Sérgio Ferreira Mendonça, pela oportunidade, confiança e compreensão durante a realização desse trabalho.

Ao apoio institucional da Universidade Federal do Espírito Santo através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA/UFES).

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) por conceder minha bolsa de estudos.

À minha família, principalmente minha mãe Nádia, pela torcida e compreensão nos momentos que eu estava ausente, mesmo estando presente, e meus irmãos Thábita e Thiago, pela ajuda operacional.

Aos anjos que contribuíram enormemente para conclusão deste trabalho: Ericson Hayakawa, Mauro Antônio Homem Antunes e Arnaldo de Queiroz da Silva.

Aos amigos que contribuíram durante minha caminhada no mestrado, em especial: Lívia Meneghel, Diego Figueiredo, Ely Takeshita e Thiago Marchezi.

E a todas as pessoas, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Martin Luther King

RESUMO

O transporte de sólidos em suspensão, causado por erosão, é um dos problemas que limitam o uso da água, podendo causar assoreamento nos rios. A concentração de sólidos suspensos pode ser avaliada através do sensoriamento remoto, pois a reflectância da cena, na faixa do visível e do infravermelho, é positivamente influenciada. Desta forma, este trabalho visa o conhecimento da variabilidade das concentrações de sedimentos em suspensão no trecho do rio Doce localizada no ES, através de análises de dados espectrais contidos nas imagens orbitais e de resultados de medições em campo. Para tanto, foram avaliados dados concentrações de sólidos suspensos em amostras coletadas em Regência e Colatina, e imagens TM do satélite LANDSAT 5. Para obtenção dos valores de reflectância, foram realizadas as seguintes operações: correção geométrica, conversão dos NDs para valores de FRB aparente, correção atmosférica com uso do modelo 6S (FRB superfície), e transformação de NCs em valores de reflectância. Os resultados mostraram que nas imagens corrigidas dos efeitos atmosféricos, os valores da curva de ND referentes aos FRBs aparentes são superiores aos valores da curva FRB de superfície na região do visível, devido ao fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética. Nas regiões do infravermelho próximo, ocorreu o inverso, uma vez que há absorção da radiação eletromagnética pela atmosfera. Quanto aos sólidos suspensos, foram encontradas correlações positivas entre a reflectância e a concentração dos sólidos suspensos, apesar das dificuldades de obtenção de dados concomitantes das datas de imagens orbitais com datas da coleta de campo. Para os dados de Regência, a melhor correlação ocorreu para banda 1, que se localiza na faixa do visível, da curva dos FRB de superfície, sugerindo menor transporte de sedimentos suspensos. Para Colatina, ocorreu para banda 4, que se encontra na faixa do infravermelho próximo, também para curva dos FRB de superfície, sugerindo maior transporte de sedimentos nesse trecho do rio Doce, para as datas de amostragem. Conclui-se que a reflectância que melhor representa a curva espectral da água é de superfície e os dados correlacionados seguiram o padrão de quanto menores as reflectâncias, menores as concentrações de sólidos suspensos na água.

Palavras-chave: Hidrossedimentologia, Sensoriamento Remoto, Fator de Reflectância Bidirecional, Sólidos Suspensos.

ABSTRACT

Suspended solids transport excess, caused by erosion, may limit water use and cause rivers siltation. Suspended solids concentration may be assessed by remote sensing because the reflectance of the scenes, in the visible and infrared ranges, is positively influenced. This work aims at the understanding of the variability of suspended sediments concentrations in a Doce river stretch located in Espírito Santo state, Brazil, through spectral analysis of satellite images data and analysis of field measurements results. There were analyzed suspended solids concentrations for samples collected in Regência and Colatina Doce river sections and images captured by LANDSAT 5 TM satellite. To obtain reflectance values, the following operations were performed: geometric correction, conversion of DN values to apparent FRB values, atmospheric correction, using the 6S model (FRB surface), and transformation of NCs values. The results showed that, for the images corrected from atmospheric effects, the values of the ND curve related to the apparent FRB are higher than the values of the surface's FRB curve in the visible region, due to the electromagnetic radiation scattering phenomenon. In the near-infrared regions, the reverse was observed, because of the absorption of electromagnetic radiation by the atmosphere. It was observed positive correlation between reflectance and suspended solids concentration, despite the difficulties in obtaining data from same satellite images and field sample collection dates. For Regência data, the best correlation was obtained for band 1, located in the visible range of the surface's FRB curve, suggesting less suspended sediment transport. For Colatina, the best correlation occurred for band 4, located in the near-infrared range of the same surface's FRB curve, indicating greater sediment transport in this part of the Doce river during the sampling dates. It was concluded that the surface reflectance best represents the water spectral curve and that the correlated data showed the following pattern: smaller reflectance corresponds to lower water suspended solids concentration.

Keywords: Sedimentology water, Remote Sensing, Bi-directional Reflectance Factor, Suspended Solids.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional das Águas

EM - Energia Eletromagnética

FRB - Fator de Reflectância Bidirecional

FRBa – Fator de Reflectância Bidirecional Aparente

FRBs – Fator de Reflectância Bidirecional de Superfície

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LEGAL - Linguagem Espaço Geográfica baseada em Álgebra

MDT - Modelo Digital do Terreno

MSS - Multispectral Scanner Subsystem

ND - Número Digital

NTU – Turbidez Nefelométrica

REM - Radiação Eletromagnética

RGB - Red, Green e Blue

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SPRING - Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas

ST – Sem Tratamento

TM - Thematic Mapper

UFRRJ – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Interferência atmosférica na superfície da Terra. Fonte: Figueiredo, 2005.....	22
Figura 02 – Gráfico da reflectância de determinadas superfícies. Fonte: Fitz, 2008.....	23
Figura 03 - Principais regiões do espectro EM, com seus respectivos intervalos de comprimento de onda.. Fonte: IBGE, 2000.....	24
Figura 04 – Gráfico do comportamento espectral da água. Fonte: IBGE, 2000.....	25
Figura 05 – Fator de reflectância bidirecional (FRB) de massas de água com alta concentração de partículas em suspensão (linha superior) e mais baixa concentração (linha inferior). Fonte: Novo, 2008.....	26
Figura 06 – Interação da irradiância com o corpo d'água. Fonte: Jensen, 2009.....	27
Figura 07 – Ilustração do método de correção atmosférica por análise do histograma. Fonte: Novo, 2008.....	33
Figura 08 – Interpolação da intensidade – Reamostragem (vizinho mais próximo). Fonte: IBGE, 2000.....	36
Figura 09 - Resumo das características dos Satélites Landsat (1 a 5). Fonte: Adaptado de Engesat.....	38
Figura 10 - Localização da Bacia do Rio Doce. Fonte: Ecoplan; Lume, 2010a.....	43
Figura 11 – Localização dos pontos de coleta no Rio Doce.....	45
Figura 12 – Composições das bandas 3, 4 e 5 (RGB) nas datas de (a) 19/04/2009, (b) 22/08/2008 em Regência – ES; (c) 27/10/2006 e (d) 19/06/2011 em Colatina – ES.....	51
Figura 13 – Curvas de reflectância para água, asfalto, concreto, vegetação de gramado e solo exposto. Fonte: Antunes, 2003.....	55
Figura 14 – Variação da dispersão da radiância em função da quantidade de sedimentos suspensos. Fonte: Alföldi (1982) adaptado por Hayakawa (2007).....	63
Figura 15 - Relação entre a concentração de sedimentos totais e a velocidade de fluxo (r^2 de 0,97). Fonte: Montanher et al (2009).....	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Relação entre as vazões e os sólidos suspensos encontrados em Regência.....	52
Gráfico 02 – Relação entre as vazões e os sólidos suspensos encontrados em Colatina.....	52
Gráfico 03 – Reflectância da água no rio Doce nas imagens sem correção e corrigidas pelo modelo 6S, em Regência – ES.	53
Gráfico 04 – Reflectância da água no rio Doce nas imagens sem correção e corrigidas pelo modelo 6S, em Colatina – ES.....	54
Gráfico 05 – Dinâmica dos NDs da água na foz do Rio Doce em Regência – ES	56
Gráfico 06 – Dinâmica dos NDs da água no Rio Doce em Colatina – ES	56
Gráfico 7 – Relação entre a reflectância da banda 1 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.	59
Gráfico 8 – Relação entre a reflectância da banda 2 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.	59
Gráfico 9 – Relação entre a reflectância da banda 3 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.	59
Gráfico 10 – Relação entre a reflectância da banda 4 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.	60
Gráfico 11 – Relação entre a reflectância da banda 1 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.	60
Gráfico 12 – Relação entre a reflectância da banda 2 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.	60
Gráfico 13 – Relação entre a reflectância da banda 3 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.	61
Gráfico 14 – Relação entre a reflectância da banda 4 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.	61
Gráfico 15 – Relação entre a Reflectância de Superfície e concentrações de sólidos suspensos para as bandas 1, 2, 3 e 4 em Regência – ES.	64
Gráfico 16 – Relação entre a Reflectância de Superfície e concentrações de sólidos suspensos para as bandas 1, 2, 3 e 4 em Colatina – ES.....	64
Gráfico 17 – Comportamento das Reflectância de Superfície para diferentes vazões em Colatina – ES.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Modelos de atmosfera gasosa e de aerossóis utilizadas no 6S e os números correspondentes da opção	34
Tabela 02 – Características e aplicações das bandas Landsat 5 TM.....	39
Tabela 03 – Intervalo espectral, intervalo de radiância após calibração do sensor ($L_{min\lambda}$ e $L_{max\lambda}$) e irradiância solar ($E_{sol\lambda}$)	41
Tabela 04 – Características gerais da bacia do rio Doce.....	42
Tabela 05 – Coordenadas dos pontos de coleta em Regência e Colatina.	44
Tabela 06 – Dados hidrossedimentológicos disponíveis em Regência - ES (Foz do Rio Doce)	46
Tabela 07 – Dados hidrossedimentológicos na estação fluviométrica em Colatina - ES.....	46
Tabela 08 – Dados de vazão na estação fluviométrica de Colatina-ES.....	46
Tabela 09 – Resultados das medidas em campo de concentrações de Sólidos Suspensos e Vazões	50
Tabela 10 – Reflectâncias (%) das bandas relacionadas com as datas, para as imagens de Regência – ES.....	57
Tabela 11 – Reflectâncias (%) das bandas relacionadas com as datas, para as imagens de Colatina – ES.....	58
Tabela 12 – Coeficientes de correlação das bandas 1,2,3 e 4 (Regência – ES)	61
Tabela 13 – Coeficientes de correlação das bandas 1,2,3 e 4 (Colatina – ES)	62

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL.....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA	17
3.1.1 Dinâmica hidrológica.....	20
3.2 FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO.....	21
3.2.1 Radiação Eletromagnética (REM) e a interferência da atmosférica.....	21
3.2.1.1 Espectro Eletromagnético	23
3.2.2 Comportamento espectral da água.....	24
3.2.3 Utilização de imagens orbitais para avaliação de sedimentos.....	27
3.2.3.1 Conversão de ND para valores físicos.....	28
3.2.3.2 Correção atmosférica.....	31
3.2.3.3 Correção geométrica.....	35
3.2.4 Programa LANDSAT.....	37
3.2.4.1 Radiometria de imagens TM.....	41
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	42
4.2 METODOLOGIA	44
4.2.1 Correção geométrica	47
4.2.2 Correção radiométrica.....	48
4.2.2.1 Reflectância aparente	48
4.2.2.2 Reflectância de Superfície	48
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 RESULTADOS DOS TRATAMENTOS DE IMAGENS	52
5.2 RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS E SÓLIDOS SUSPENSOS.....	57
5.3 RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS E VAZÃO	65
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
APÊNDICE	74

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Segundo a Política Nacional de Recursos Hídricos, a água é um bem de domínio público, limitado e dotado de valor econômico. Sua disponibilidade está relacionada não somente com a quantidade disponível, mas também com sua qualidade, uma vez que padrões mínimos restringem seus usos.

Um dos fatores que interferem diretamente na qualidade e na quantidade de água é a descarga sólida em suspensão. Os sedimentos muitas vezes atuam como veículos de transporte de microrganismos, podem conter partículas tóxicas e, sobretudo, intensificar o assoreamento dos rios, evidenciando importantes processos e estágios de degradação do meio ambiente. Também afetam o abastecimento para consumo humano, recreação e uso industrial. Podem ainda impedir a transmissão de radiação solar e reduzir a fotossíntese em vegetação aquática submersa e fitoplâncton próximo ao substrato (JENSEN, 2009).

A erosão é a principal fonte de contribuição das partículas suspensas em cursos d'água. Esse fenômeno pode ser causado por diversos fatores, tais como remoção de cobertura vegetal de solos, principalmente em regiões montanhosas, que diminuem a infiltração da água e aumentam o escoamento superficial, contribuindo para maior lixiviação; construções, que provocam movimentação de terra; agricultura, que, conforme tipo de cultura e manejo de solo pode causar exposição da superfície do solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

Uma das conseqüências do fenômeno da erosão é o assoreamento dos rios, problema que atinge a bacia hidrográfica do rio Doce, em especial o seu baixo curso, que recebe alta carga de sedimentos provenientes das áreas a montante. O desmatamento generalizado e o mau uso dos solos têm conduzido a região a um intenso processo de erosão (ECOPLAN; LUME, 2010a).

A concentração de sedimentos em suspensão é o parâmetro de qualidade de água mais importante para estudos de erosão (RITCHIE & SCHIEBE, 2000). Para estimativa de parâmetros relacionados com o transporte desses sedimentos a partir de medições *in situ*, existem vários métodos, como por exemplo, transparência, com o uso de um disco de Secchi ou, turbidez, com aparelhos portáteis, que fornecem resultados em unidades de turbidez nefelométrica (NTU). Porém, muitas vezes,

essas medidas são pontuais e não são suficientes em quantidade para criação de um mapa de distribuição estatisticamente significativo (KROGER & LAW, 2005 apud JENSEN, 2009). Ou seja, além da cobertura insuficiente, esse sistema de monitoramento também não responde com agilidade às necessidades de informação devido à demora entre a coleta e sua disponibilidade para uso. É nesse contexto que a tecnologia de sensoriamento remoto se insere como fonte de informação a ser integrada às convencionais (NOVO, 2007).

Os sólidos suspensos podem ser detectados através de sensoriamento remoto. Esse método pode ser usado para inventariar e monitorar a extensão espacial de constituintes inorgânicos em corpos d'água e, geralmente, requer a obtenção de dados *in situ* de concentrações de sedimentos em suspensão e correlação dessas medidas com dados de sensores remotos para obter uma relação quantitativa (JENSEN, 2009).

Muitos estudos encontraram relações significativas entre a concentração de sedimentos em suspensão em corpos de águas interiores medidas *in situ* e a reflectância espectral atmosféricamente corrigida derivada a partir de dados de sensoriamento remoto (VRIELING, 2006). Isso acontece porque a reflectância da superfície de água na faixa do visível e do infravermelho é positivamente influenciado por sedimentos em suspensão (RITCHIE et al., 1976).

Dessa forma, muitas pesquisas têm buscado desenvolver métodos de sensoriamento remoto que possam obter medidas espaciais quantitativas desta importante variável (JENSEN, 2009). Porém, embora essa tecnologia esteja disponível e seja amplamente utilizada em vários campos do conhecimento, como é o caso da gestão da produção agrícola, previsão meteorológica, sistema de alerta de fogo e de desflorestamento, seu uso pela comunidade gestora de recursos hídricos é ainda insipiente.

Segundo Novo (2007) isso acontece por vários motivos, como por exemplo, a ausência de um sistema de observação da Terra configurado com o objetivo único de dar suporte ao monitoramento das propriedades das águas doces. Outro aspecto relevante é a falta generalizada de conhecimentos mais básicos sobre a tecnologia, o que muitas vezes faz com que os potenciais usuários criem expectativas irrealistas sobre o seu potencial, levando a um posterior descrédito.

Esse tipo de aplicação, utilizando o sensoriamento remoto como apoio ao monitoramento ambiental, possibilita redução de custos e pode contribuir para o entendimento da hidrodinâmica do sistema. A solução de problemas relacionados com sedimentos em bacias hidrográficas, como a do rio Doce, envolve grande aporte de recursos, sendo necessária a definição de prioridades, para aumento da relação benefício-custo de investimentos.

Nesse sentido, o presente estudo visa maior conhecimento a respeito da variabilidade espacial e temporal de sedimentos em suspensão na calha principal do rio Doce localizada no estado do ES, por meio da análise de dados espectrais contidos nas imagens orbitais TM - LANDSAT 5 e de resultados de medições em campo.

CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Ampliar o conhecimento a respeito da variabilidade das concentrações de sedimentos em suspensão no trecho do rio Doce localizado no estado do ES, através de análises de dados espectrais contidos nas imagens orbitais TM - LANDSAT 5 e de resultados de medições em campo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conhecer a variabilidade da reflectância da superfície da água observada em diferentes passagens do satélite;
- Estudar o uso do sensoriamento remoto na estimativa de concentrações de sedimentos suspensos em rios;
- Analisar correlação entre dados espectrais de imagens orbitais com dados hidrossedimentológicos obtidos em campo;

CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA

Vestena (2009) afirma que o conhecimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica fornece informações que fundamentam a tomada de decisões e subsidiam um planejamento de manejo de uso racional dos recursos naturais. Ou seja, além de ser uma importante ferramenta de apoio para estudos ambientais, é fundamental para a análise de viabilidade de diversas atividades econômicas (LOUREIRO, 2005).

Os processos hidrossedimentológicos são complexos e compreendem a desagregação (“erosão” na definição estrita), o transporte, a sedimentação e a consolidação de sedimentos (VESTENA, 2009).

A erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo, sendo comumente diferenciada de acordo com o agente erosivo: vento, água, gelo, gravidade; tipo ou origem: erosão por embate, erosão laminar, erosão em córregos, erosão em sulcos profundos ou ravinas; e natureza: geológica e acelerada (LINO, 2009).

Segundo Malutta (2012), a água é um dos principais geradores do desprendimento de partículas de rochas e solos que irão contribuir para a produção de sedimentos de uma bacia. Porém, a produção de sedimentos depende de uma série de fatores naturais (precipitação, tipo de solo, relevo), mas é determinada pelo uso do solo. De acordo com o tipo de solo, seu uso e ocupação e as características morfométricas das bacias, é possível inferir sobre a tendência ao aporte de sedimentos (CARVALHO, 2008).

Lino (2009) afirma que os fatores que propiciam a erosão resultam em alterações no ambiente aquático, principalmente, porque:

i) causam assoreamento e obstrução dos cursos d'água, contribuindo para a ocorrência de cheias e prejudicando a navegação;

ii) provocam a redução da capacidade de armazenamento dos reservatórios, devido ao assoreamento, com prejuízos para o abastecimento público e industrial, a recreação e outros usos;

iii) influem na qualidade de água, alterando, principalmente a sua turbidez, e contribuindo para a elevação do custo do tratamento da mesma. O solo carregado pode conter produtos químicos, como pesticidas e fertilizantes, os quais vão causar a poluição da água;

iv) causam problemas ecológicos ao ambiente aquático, devido ao aumento da turbidez ou à deposição de materiais nos leitos dos cursos d'água e reservatórios.

Uma das causas que explicam o fenômeno da erosão se refere à “ruralização” de uma região, ou seja, a transformação de um local anteriormente com vegetação natural em área com pastagem ou alguma cultura agrícola, onde o regime hidrológico é alterado com menor intensidade, uma vez que usualmente espera-se que ainda ocorra infiltração no solo, a qual tende a aumentar conforme aumenta a porcentagem de cobertura vegetal (viva ou morta) sobre a superfície do solo (SILVA et al. 2007).

Contudo, pode haver grande exposição da superfície do solo à força erosiva das gotas de chuva e, adicionalmente, pode ocorrer a formação de enxurradas que, com o solo exposto, carregam grandes quantidades de sedimentos para os cursos d'água. Os tipos de erosão podem ser diversos, com diferentes intensidades, conforme características do solo, da topografia e da chuva, entre outros fatores (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990).

Uma importante questão relacionada com a erosão está no uso inadequado dos solos agrícolas que vem causando a perda gradual da sua capacidade produtiva e a contaminação dos recursos hídricos por sedimentos e poluentes de origem difusa, decorrentes do processo erosivo aos quais esses solos estão sujeitos (LELIS, 2010).

Outro problema ambiental está relacionado com as estradas vicinais que podem desencadear processos erosivos, pois durante os períodos de chuva, as estradas funcionam como canais, transportando água e sedimento, assoreando e poluindo mananciais. Esta degradação ambiental ocorre em todas as fases:

construção, manutenção e principalmente durante a utilização, sobretudo em estradas sem pavimentação e com qualidade técnica inferior, que compreende estradas secundárias, terciárias, divisoras, contornos, ramais e aceiros (CAMARGO CORRÊA, 2005).

Os sedimentos resultantes do processo de erosão acabam sendo transportados principalmente pela ação do escoamento da água e influenciados pelas condições locais e a granulometria (VESTENA, 2009). Segundo Christofoletti (1981) apud Silva (2007), as formas de transporte sólido são normalmente divididas em três grupos:

Carga sólida do leito ou de arrasto: são partículas de sedimento que rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água, junto ao leito. As partículas estão em contato com o leito praticamente todo o tempo.

Carga sólida saltitante: são partículas que pulam ao longo do curso de água por efeito da correnteza ou devido ao impacto de outras partículas.

Carga sólida em suspensão: são as partículas que estão suportadas pelas componentes verticais ascensionais das velocidades do escoamento turbulento, enquanto são transportadas longitudinalmente pelas componentes horizontais dessas velocidades. Essas partículas são suficientemente pequenas para permanecerem em suspensão, subindo e descendo no seio do fluido. Geralmente esse grupo de sedimento representa maior quantidade de carga sólida do curso d'água, podendo corresponder a 99% de toda a carga sólida.

Já com relação à distribuição granulométrica existente nos cursos d'água de uma bacia hidrográfica, é possível observar que as cabeceiras dos rios são compostas por sedimentos de tamanhos maiores, como pedras pedregulhos e seixos, sendo que nessas regiões predominam fracamente processos de remoção de material. À medida que os sedimentos são transportados, parte deles paulatinamente se deposita no leito do canal de drenagem e parte se fraciona, transformando-se em sedimentos de granulometria menor. Assim, observa-se que as areias grossas, média e fina vão sendo gradativamente carregadas nessa ordem para jusante, para o baixo curso (CARVALHO, 1994 apud SILVA, 2007).

3.1.1 Dinâmica hidrológica

A avaliação das alterações sobre os processos decorrentes de intervenções humanas no uso e cobertura do solo, em uma determinada região, deve considerar a bacia como o espaço geográfico de ação e, um instrumento para esta avaliação, constitui na análise do comportamento hidrológico de corpos hídricos por meio de suas séries históricas de vazão. Este procedimento permite a avaliação da disponibilidade hídrica e a detecção de mudanças de regime significativas (CRUZ, 2010).

Os registros históricos de séries de vazão em uma bacia reúnem as respostas do sistema hídrico às intervenções antrópicas ocorridas na área de drenagem ao longo dos anos, que influenciam a disponibilidade hídrica de um rio. Eles subsidiam muitas análises sobre o comportamento de determinado rio, principalmente em relação à descarga de sedimentos. Conhecer a precipitação também é uma forma de quantificar a entrada de água na bacia hidrográfica, e o potencial de erosão hídrica de determinado local ou região pode ser caracterizado por meio da avaliação da erosividade das chuvas e sua distribuição temporal (COGO, 2003).

A relação entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão apresenta padrões temporais complexos durante eventos de chuva governados pela geomorfologia, uso e manejo do solo e precipitação. Este fato tem implicações relevantes no entendimento e na descrição dos processos erosivos e de produção de sedimentos em bacias (MINELLA et al, 2011).

Feitosa (2011) observou a influência da precipitação nos resultados de descarga sólida mensais em rios monitorados e concluiu que os meses que apresentaram maiores descargas sólidas corresponderam aos meses mais chuvosos e, conseqüentemente, às maiores vazões médias. Verifica-se que cerca de 70% a 90% de todo o sedimento transportado pelos cursos d'água ocorre no período de chuvas, principalmente durante as fortes precipitações (CARVALHO, 1994 apud SILVA, 2007), podendo chegar a 95% do total anual em apenas poucos dias.

3.2 FUNDAMENTOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades que permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos (MORAES, 2002). É o meio pelo qual os dados do objeto são transmitidos ao sensor, transformando-se, através da sua frequência, intensidade e polarização, em informação (ROCHA, 2000).

Estas atividades envolvem a detecção, aquisição e análise (interpretação e extração de informações) da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos. A energia eletromagnética utilizada na obtenção dos dados por sensoriamento remoto é também denominada de radiação eletromagnética (MORAES, 2002).

3.2.1 Radiação Eletromagnética (REM) e a interferência da atmosférica

Todos os materiais (naturais ou artificiais) da superfície da terra, com temperatura superior a zero absoluto, ou zero Kelvin (0 K), podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente Radiação Eletromagnética - REM. A energia eletromagnética (EM) mais familiar e mais importante em sensoriamento remoto é a energia solar. O fluxo radiante que deixa o objeto em direção ao sensor é denominado radiância do alvo. O fluxo de energia EM, ao incidir sobre um objeto, sofre interações com o material que o compõe, podendo ser parcialmente refletido, absorvido ou transmitido pelo objeto (Figura 01). A reflectância espectral de um objeto é dada pela razão entre a energia EM refletida pela energia incidente na superfície do mesmo (IBGE, 2000).

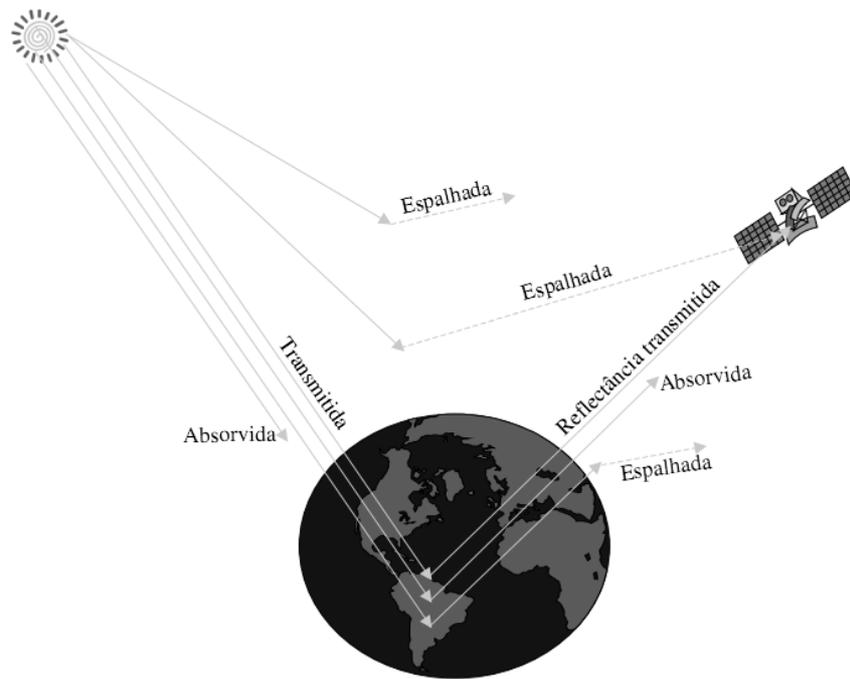


Figura 01 - Interferência atmosférica na superfície da Terra. Fonte: Figueiredo, 2005.

A existência de certos elementos na atmosfera terrestre exerce influência significativa em determinadas faixas do espectro eletromagnético. As chamadas bandas de absorção atmosférica podem gerar dois tipos básicos de fenômenos: a absorção da energia propriamente dita, proporcionada pela presença de elementos como gases, aerossóis e vapor d'água; e sua dispersão, por meio de um espalhamento de energia provocado pelas características das ondas e pelo tamanho dos componentes atmosféricos (FITZ, 2008).

Após interagir com os objetos da superfície terrestre, essa radiação é detectada pelos sensores a bordo de satélites. Um sensor imageador produz uma imagem bidimensional da radiância, emitância ou retroespalhamento destas trocas energéticas, num determinado instante, naquele espaço físico, tornando-se apto a extração de informações sobre aquela região (ROCHA, 2000).

Por essa razão as imagens de um alvo, captadas em diferentes faixas do espectro eletromagnético, apresentam reflectâncias específicas, de acordo com o material encontrado. A figura 02 apresenta as reflectâncias da água, do solo e da vegetação presentes na superfície terrestre.

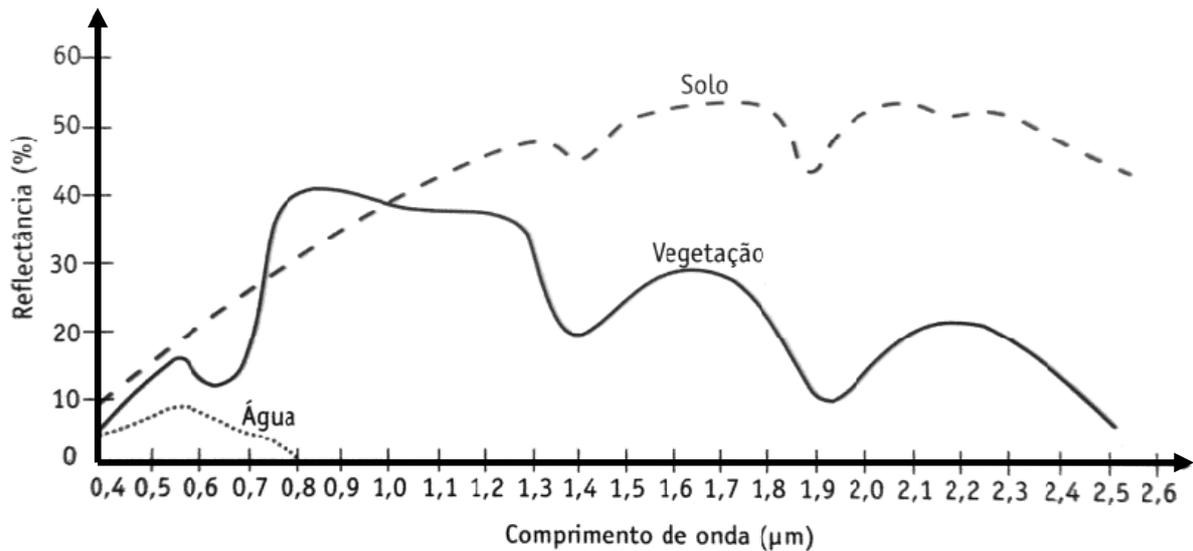


Figura 02 – Gráfico da reflectância de determinadas superfícies. Fonte: Fitz, 2008.

A imagem digital produzida pelos sensores remotos é constituída por um arranjo de elementos, os pixels, sob a forma de uma malha ou grid. Cada pixel representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície da Terra estando associado a um determinado nível de brilho, ou seja, aos tons de cinza ou ainda ao nível de radiância em um determinado ponto da imagem, que varia entre zero e 255, sendo o zero equivalente ao preto e o 255 ao branco (NASSER, 2001). O nível de cinza é também conhecido por ND, “número digital”.

O ND de um pixel representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor, para a área da superfície da Terra correspondente ao tamanho do pixel. Deve ser ressaltado que o ND de um pixel corresponde sempre à média da intensidade da energia refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes nesse pixel. Uma imagem digital pode então ser vista como uma matriz, de dimensões x linhas por y colunas, com cada elemento possuindo um atributo z (nível de cinza). No caso das imagens de sensoriamento remoto, essas matrizes possuem dimensões de até alguns milhares de linhas e de colunas (CRÓSTA, 1993).

3.2.1.1 Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético pode ser dividido segundo comprimentos de onda, conforme ilustrado na Figura 03.

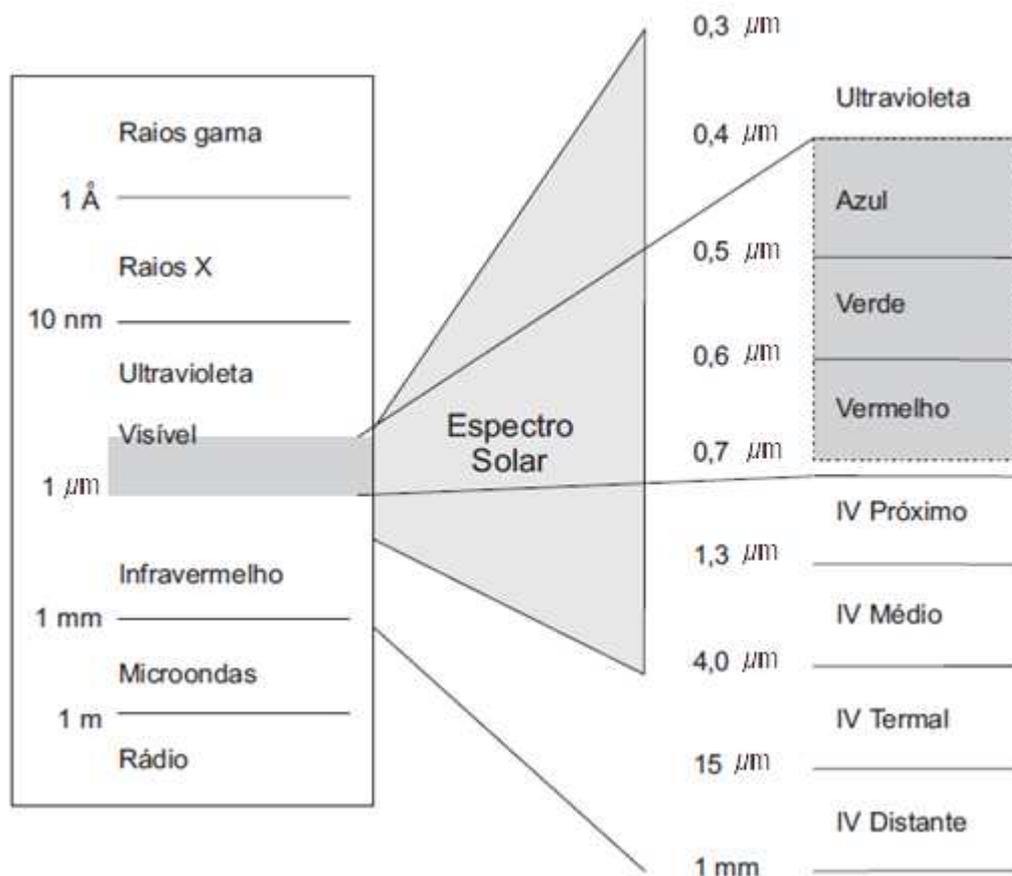


Figura 03 - Principais regiões do espectro EM, com seus respectivos intervalos de comprimento de onda.. FONTE: IBGE, 2000.

3.2.2 Comportamento espectral da água

A água apresenta um comportamento espectral distinto conforme o estado físico que se encontra (Figura 04). A água líquida absorve toda a radiação eletromagnética abaixo de 380 nm e acima de 700 nm. Nesta faixa espectral, ou seja, onde a reflectância é zero, a absorção é total. Mesmo na faixa espectral de 380 nm a 700 nm, a reflectância da água na forma líquida é relativamente pequena, ultrapassando pouco mais de 5% (MOREIRA, 2003).

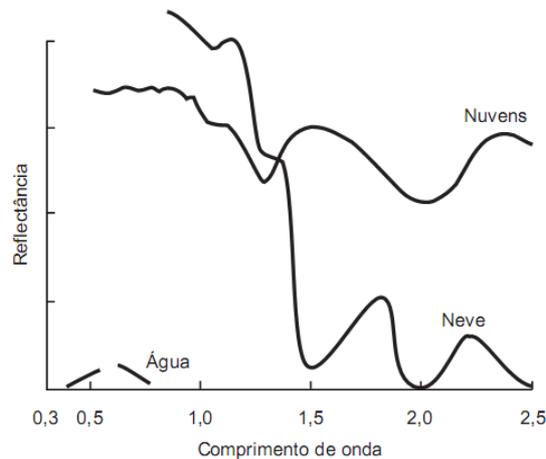


Figura 04 – Gráfico do comportamento espectral da água. Fonte: IBGE, 2000.

A água pura tem baixa reflectância mesmo na região do visível do espectro. Quanto mais pura (sem constituintes suspensos ou dissolvidos), mais baixa é sua reflectância, devido ao pequeno coeficiente de espalhamento e elevada transmitância (NOVO, 2008). E é por isso que a água limpa absorve essa energia, sendo representado, em preto, nas imagens obtidas nas regiões do visível e infravermelho. Já a água turbida, com poluentes ou materiais em suspensão (água barrenta), é representada em tons de cinza no visível, ou em cores, dependendo da associação de cores às imagens originais (FLORENZANO, 2007).

A figura 05 mostra o impacto do aumento da concentração de partículas inorgânicas sobre o comportamento espectral da água. Quanto maior a concentração de partículas inorgânicas suspensas na coluna d'água, maior o coeficiente de espalhamento do volume de água, e maior a reflectância. A partir de concentrações de 5 mg/L a forma do espectro se caracteriza por um crescente aumento da reflectância em direção a comprimentos de onda mais longos (NOVO, 2008).

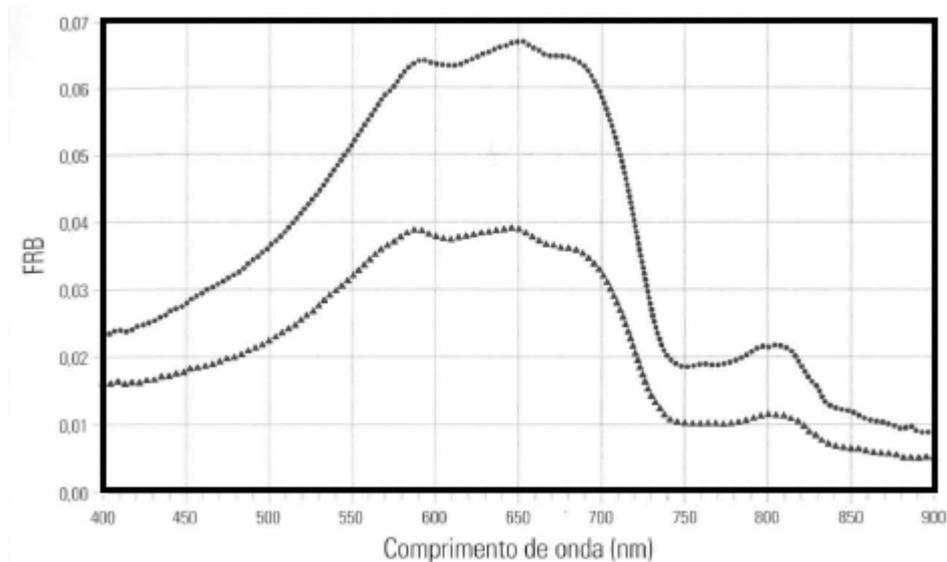


Figura 05 – Fator de reflectância bidirecional (FRB) de massas de água com alta concentração de partículas em suspensão (linha superior) e mais baixa concentração (linha inferior). Fonte: Novo, 2008.

Segundo Jensen (2009), a radiância total registrada por um sensor a bordo de um satélite é uma função da energia eletromagnética proveniente de quatro fontes resultantes da radiação solar e atmosférica descendente. A primeira porção da radiância é a que nunca atinge realmente a superfície da água. A segunda alcança a interface ar-água, mas penetra apenas cerca de 1 mm na água sendo, portanto, essencialmente refletida. A terceira é a radiação que de fato penetra a interface ar-água, interage com a água e seus constituintes orgânicos e inorgânicos e então emerge da coluna d'água sem interagir com o fundo. Ela fornece informação valiosa sobre as características da composição da coluna d'água. E a última porção é a que penetra a interface ar-água, alcança o fundo do corpo d'água e é propagada de volta na coluna d'água até o sensor (Figura 06).

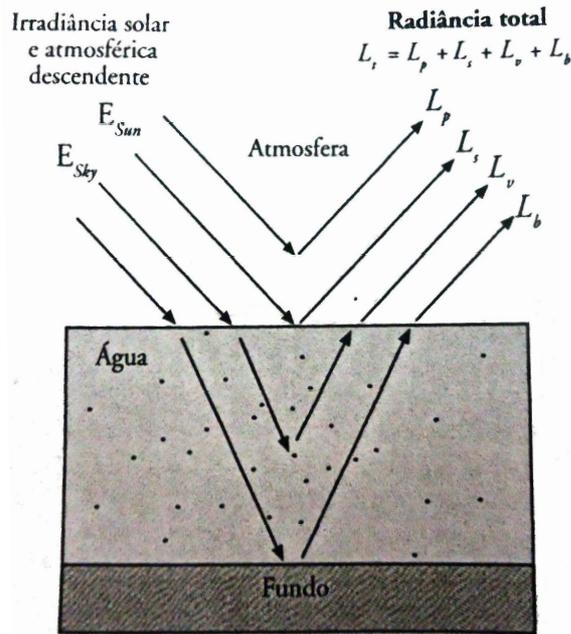


Figura 06 – Interação da irradiância com o corpo d'água. Fonte: Jensen, 2009.

Porém, o objetivo da maioria dos estudos de sensoriamento remoto aquático é extrair a radiância de interesse das outras componentes registradas pelo sistema sensor (DOXARAM et al, 2002 apud JENSEN, 2009), e é por isso que para obtenção desses dados é necessário cuidadoso processamento digital de imagens, que inclui entre outros tipos de tratamento, a correção atmosférica, a correção radiométrica, redução do efeito *sunlint* e demais reflexões da superfície, e da reflectância do fundo de rios (JENSEN, 2009).

3.2.3 Utilização de imagens orbitais para avaliação de sedimentos

As imagens obtidas por sensores remotos são o produto de interações da radiação com a atmosfera e com a superfície. Porém, na maioria das aplicações, o alvo de interesse é a superfície e o sinal da atmosfera pode ser considerado como um ruído que atrapalha na obtenção de informações sobre os alvos de interesse (ANTUNES et al., 2003). Essas imagens geradas contêm erros geométricos e radiométricos inerentes ao processo de aquisição. Os erros radiométricos originam-se de falhas instrumentais, e limitações próprias do processo de imageamento. Já os erros geométricos são causados por diferentes fatores como o posicionamento do

satélite, os movimentos da Terra, a curvatura da Terra, a largura da faixa imageada, etc. (NOVO, 2008). Sendo assim, todos estes erros precisam ser atenuados.

Segundo Antunes et al. (2003), a determinação de cada componente do efeito atmosférico na irradiância sobre a superfície e na radiância que chega ao sensor consiste na solução da equação fundamental da transferência radiativa. A maior ou menor contribuição de cada componente vai depender das condições atmosféricas locais e da situação do alvo, como altitude e latitude, além da época de aquisição da imagem.

Desta forma, para estimar concentrações de sedimentos em suspensão com dados de sensoriamento remoto, devem ser investigadas as características de absorção e espalhamento da água em suas áreas geográficas de interesse (JENSEN, 2009). Por isso, as imagens devem ser processadas em diversas etapas para atenuação dos efeitos de espalhamento e absorção atmosférica.

3.2.3.1 Conversão de ND para valores físicos

Os pré-processamentos radiométricos visam transformar os valores digitais calibrados. Os valores transformados serão uma melhor representação da radiância da cena, tanto absoluta quanto relativa, numa mesma escala de 0 a 255 níveis de cinza. Mesmo sem constituírem, propriamente, algoritmos de correção, as transformações dos números digitais para valores de radiâncias e reflectâncias aparentes têm contribuído significativamente para melhorar a qualidade dos dados em várias aplicações (BENTZ, 1990).

Os fatores que afetam os valores digitais dos pixels em uma imagem podem gerar dois tipos de erro: a distribuição de níveis digitais dentro de uma imagem não corresponde à distribuição de radiância ou brilho da cena imageada; e a variação relativa de nível digital num dado pixel nas diferentes bandas não corresponde ao comportamento espectral dos alvos da cena. Os dois tipos de erros podem ser resultantes tanto da interferência da atmosfera quanto dos instrumentos utilizados na aquisição dos dados (NOVO, 2008).

A conversão desses números digitais para valores de parâmetros físicos tem como objetivo permitir a caracterização espectral de objetos, bem como permitir a elaboração de cálculos que incluem dados de imagens de diferentes bandas espectrais ou de diferentes sensores. Cada sensor, em cada banda espectral, tem seu próprio critério para discretizar os valores de radiância medidos na escala específica de sua resolução radiométrica (8 bits, 10 bits, 16 bits, etc). Assim, as imagens resultantes, mesmo para um mesmo sensor, mas em diferentes bandas, não apresentam necessariamente compatibilidade entre os NDs (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Devido a essa limitação, são necessárias conversões dos NDs para valores físicos mediante o conhecimento de algumas características tanto do sensor que gera as imagens, quanto das condições ambientais nas quais as imagens foram geradas.

É importante destacar que o valor da radiância é medido em nível orbital e por não referir-se exclusivamente ao brilho do objeto observado, recebe a denominação de radiância aparente (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

A transformação do ND para radiância aparente foi proposta por Markham e Barker (1986). Em primeiro lugar, os números digitais são convertidos para valores de Radiância Bidirecional aparente com o uso dos parâmetros de calibração obtidos em missões de calibração antes do lançamento do satélite. A equação que transforma os números digitais em radiâncias (em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), é dada pela Equação 1:

$$L_{\lambda} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_{cal\max} - Q_{cal\min}} (Q_{cal\max} - Q_{cal\min}) + L_{\min} \quad (1)$$

Sendo os valores de L_{\max} e L_{\min} , os valores máximos e mínimos de radiância ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$), fornecidas através da calibração do sensor. Esses valores são constantemente atualizados, de forma a permitir conversões seguras dos ND em valores de radiância aparente e podem ser encontrados na Tabela 04 da seção 3.2.4.1. O $Q_{cal\min}$ e $Q_{cal\max}$ são os valores mínimos e máximos de níveis de cinza utilizados na quantização dos dados. No caso de um sensor com resolução radiométrica de 8 bits, $Q_{cal\min}$ assume o valor 1 e $Q_{cal\max}$ assume o valor 255.

Uma vez convertidos para radiância aparente, assume-se que os dados contidos nas imagens de diferentes bandas de um mesmo sensor ou de sensores diferentes podem então ser comparados entre si. Contudo, como a radiância é um parâmetro radiométrico dependente da intensidade da radiação emitida pela fonte, ela deixa de ser o parâmetro mais apropriado para avaliações das propriedades espectrais de objetos. Sendo assim, a reflectância passa a assumir papel de destaque nesses tipos de estudo, lembrando que esta propriedade espectral de um objeto é expressa pelos Fatores de Reflectância, que para valores de Radiância Bidirecional aparente é chamado de Fator de Reflectância Bidirecional aparente (FRB aparente) (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Os valores de Radiância Bidirecional aparente são utilizados para o cálculo de FRB aparente segundo a Equação 2:

$$\rho_{ap} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{E_{sol} \times \cos \theta_s} \quad (2)$$

Onde,

π = ângulo sólido em Esterradiano;

d = distância Sol –Terra em unidades astronômicas;

L_{λ} = Radiância Bidirecional aparente;

E_{sol} = Irradiância média do sol no topo da atmosfera para uma dada banda em $W/(m^2 \cdot \mu m)$;

θ_s = ângulo zenital solar

A transformação dos números digitais para valores de radiância compensa as diferenças entre ganhos e “off-sets” (intervalos de sensibilidade) de cada banda espectral, enquanto a conversão desses valores de radiância em valores de reflectância compensa diferenças quanto à irradiância solar no topo da atmosfera e ao ângulo de incidência da radiação sobre o alvo, no momento da aquisição da imagem. A distância Sol-Terra varia diariamente, estando o sol mais próximo em janeiro de cada ano e mais afastado em julho para o hemisfério sul (BENTZ, 1990).

Portanto, com as imagens orbitais cujos NDs estão convertidos para FRB aparente, é possível realizar operações aritméticas utilizando dados de imagens de diferentes bandas espectrais, para um mesmo sensor ou sensores diferentes, uma vez que os novos NDs representam um parâmetro físico apresentado em uma mesma escala. Apesar disso, ainda não é possível a caracterização espectral de um objeto existente na superfície terrestre, uma vez que intrínsecos aos valores de FRB aparente encontram-se os efeitos da atmosfera. Para que tal caracterização seja possível, faz-se necessário eliminar ou minimizar os efeitos da atmosfera sobre os valores de FRB aparente (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

3.2.3.2 Correção atmosférica

A correção dos efeitos atmosféricos é importante em três casos específicos: quando o usuário quer recuperar o valor da grandeza radiométrica medida, ou seja, quando deseja conhecer a reflectância, emitância ou retroespalhamento do objeto em estudo, para poder utilizar estes valores em modelos empíricos ou teóricos; quando o usuário precisa utilizar algoritmos que se baseiam em operações aritméticas entre bandas; e/ou quando o usuário quer comparar imagens de diferentes datas em termos das propriedades dos objetos da cena (NOVO, 2008).

Há duas formas comuns para minimizar o efeito da atmosfera sobre os dados orbitais aplicadas sobre valores de Radiância aparente ou FRB aparente. A primeira delas é mediante a aplicação de um método que foi proposto por Chávez (1988) o qual é denominado comumente de Correção Atmosférica pelo Pixel Escuro (ou Dark Object Subtraction – DOS). É um método de correção do espalhamento atmosférico no qual a interferência atmosférica é estimada diretamente a partir dos números digitais da imagem de satélite, sendo ignorada a absorção atmosférica. Para a aplicação desta técnica não há a necessidade de se obter dados sobre as condições atmosféricas na data de obtenção das imagens (SANCHES et al, 2011). Ou seja, no método DOS, a correção atmosférica é realizada sem um embasamento físico que permita a aplicação em condições variadas tanto de superfície como de atmosfera (ANTUNES, 2003).

Uma alternativa para correção atmosférica são os modelos de transferência radiativa como o *Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm* (MODTRAN) e o *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (modelo 6S) implementados em programas computacionais que possuem opções de entrada de dados provenientes da caracterização da atmosfera, principalmente em relação às concentrações de vapor d'água, ozônio (O₃), profundidade óptica e tipo e concentração de aerossóis (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Os modelos de transferência radiativa para a atmosfera permitem a realização de correções com a utilização de parâmetros da atmosfera local e por consequência permitem um melhor embasamento físico nas correções (ANTUNES, 2003).

A principal vantagem da aplicação de um modelo de transferência radiativa é que este considera também o fenômeno de absorção da radiação eletromagnética, o que implica em resultados frequentemente mais confiáveis quando o interesse é correlacionar os valores de FRB presentes nas imagens com parâmetros geofísicos ou biofísicos de objetos existentes na superfície terrestre (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

O modelo 6S foi desenvolvido originalmente por Vermote et al (1997) e adaptado por Antunes et al (2003) para a correção atmosférica de imagens obtidas por sensores remotos, podendo ser obtido através do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

O processamento com o modelo 6S não só corrige os efeitos de espalhamento e de absorção atmosférica, como também normaliza as variações sazonais na irradiância solar, garantindo que as modificações detectadas entre datas diferentes sejam relativas a variações no comportamento dos objetos da cena imageada, e não das condições do imageamento (BARBOSA, 2005).

Estudo realizado por Antunes et al (2003) avaliou o desempenho do modelo 6S para condições variadas de alvos, atmosfera e altitude. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de corrigir as imagens de satélites para os efeitos atmosféricos e os testes estatísticos revelaram que as diferenças entre os valores de reflectância da superfície (corrigida para atmosfera) e reflectância planetária (sem correção) foram significativas. O parâmetro utilizado para essa conclusão é o fato de os valores de reflectância sem correção não serem característicos dos alvos e após

as correções atmosféricas os valores de reflectância passaram a ser representativos destes alvos, assemelhando-se mais às curvas espectrais dos mesmos.

A figura 07 ilustra esse processo de correção atmosférica. Pode-se observar que devido ao efeito atmosférico a imagem original apresenta níveis digitais que incorporam não só a radiância do alvo, mas também a radiância da atmosfera. Como o número digital mínimo da banda de interesse é 40, isto significa que para remover o efeito atmosférico da atmosfera, é preciso subtrair o valor de 40 de todos os valores digitais de todos os pixels da cena (NOVO, 2008).

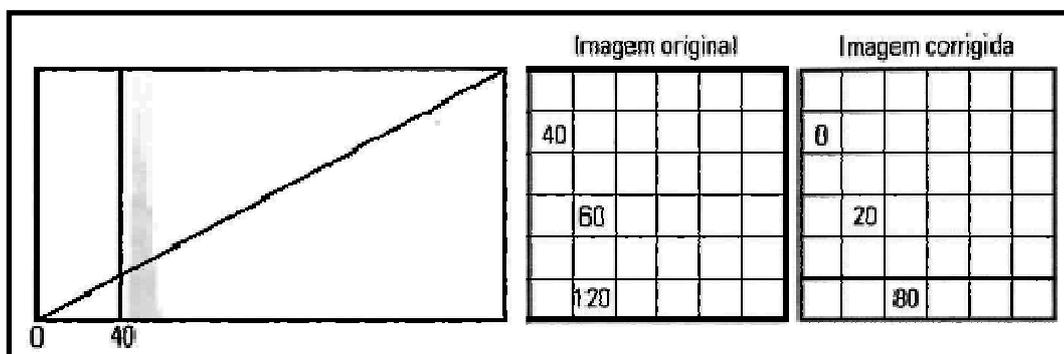


Figura 07 – Ilustração do método de correção atmosférica por análise do histograma. Fonte: Novo, 2008.

Ainda segundo Antunes et al, o modelo 6S permite a escolha da configuração geométrica de satélites específicos, como Landsat 5 e Landsat 7, e as condições de iluminação são obtidas a partir da data, hora e das coordenadas da imagem. Os modelos de atmosfera e de aerossóis podem ser escolhidos de um grupo de modelos pré-estabelecidos ou o usuário pode estabelecer as características da atmosfera através de sondagens (Tabela 01).

Tabela 01 - Modelos de atmosfera gasosa e de aerossóis utilizadas no 6S e os números correspondentes da opção

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 (de radiosonda)
Modelo de aerossóis:	
➤ 0	Sem aerossóis
➤ 1	Continental
➤ 2	Marítimo
➤ 3	Urbano
➤ 4	Modelo do usuário
➤ 5	Modelo de deserto
➤ 6	Queima de biomassa (queimadas)
➤ 7	Estratosférico
➤ 8-12	Modelos do usuário

Fonte: Antunes et al, 2003.

A concentração de aerossóis é obtida a partir da visibilidade horizontal, dada em quilômetros. Além destes parâmetros deve ser fornecida a altitude do terreno e a localização de sensor, se a bordo de satélite ou a altitude do mesmo se este estiver a bordo de aeronave. Estes dados deverão estar em reflectância ou radiância escalonadas de 0 a 255 (ANTUNES et al, 2003). Deve-se fornecer também o tamanho da imagem em bytes, que é igual ao número de pixels da imagem (linhas x colunas). A acurácia da correção realizada depende, entretanto, da validade do modelo atmosférico escolhido em relação àquele presente na região durante a aquisição da cena (LORENZZETTI et al 2007).

Para esse tipo de análise também se faz necessário considerar alguns fatores, além de época da coleta e aquisição das imagens. Moreira (2003) afirma que, devido à faixa espectral de atuação dos principais sensores óticos, a presença de nuvens sobre a área de interesse é o fator que limita a escolha da melhor data de passagem do satélite para obter imagens. As nuvens impedem que chegue até o sensor a energia refletida pelos alvos da superfície terrestre na região do visível e do infravermelho próximo.

Ao final das etapas, o resultado é a denominada Reflectância de superfície, ou seja, assume-se que os FRB resultantes referem-se à estimadores da Reflectância Bidirecional dos objetos presentes na superfície terrestre sendo possível então, a caracterização espectral dos mesmos (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

3.2.3.3 Correção geométrica

A correção geométrica produz o georreferenciamento da imagem, ou seja, estabelece uma relação geométrica entre os pixels da imagem e as coordenadas cartográficas da área correspondente. Através da correção de precisão a imagem adquire propriedades de um mapa, com todos os pixels referenciados a um sistema de Projeção Cartográfica (IBGE, 2000). Essa projeção permite representar a curvatura da Terra em uma superfície plana, preservando certas características, tais como forma dos objetos, área, distâncias e distorções (NOVO, 2008).

Este processo inicia-se com a obtenção das coordenadas de pontos de controle obtidos na imagem que está no sistema no qual se pretende georreferenciar. Esses pontos são locais de fácil identificação como intersecções de estradas e de rios, entre outros. As coordenadas podem ser obtidas em campo, a partir de levantamentos topográficos ou GPS (Sistema de Posicionamento Global), ou ainda por meio de mesas digitalizadoras, ou outras imagens ou mapas georreferenciados em papel como cartas do IBGE ou digitais, como as ortofotos digitais. Estas são fotografias retificadas a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT), as quais são isentas de distorções geométricas e deslocamentos devido ao relevo.

Em resumo, o processo de correção geométrica compreende:

- Determinação das relações entre os sistemas de coordenadas de um mapa ou de imagem corrigida (imagem de referência) e da imagem a ser corrigida (imagem de ajuste);

- Determinação de uma nova malha de linhas e colunas, orientadas, segundo um Sistema de Projeção Geográfica. Este processo envolve a determinação de uma nova posição para centros dos pixels na imagem corrigida (interpolação espacial); e
- Determinação da intensidade dos pixels na imagem corrigida (interpolação de intensidade). As três técnicas mais comuns de reamostragem são: *vizinho mais próximo*, onde adota o nível de cinza do pixel (na imagem de ajuste) mais próximo do novo centro (Figura 08); *interpolação bilinear*, onde adota o valor médio dos quatro pixels (janela de 2 x 2) mais próximos do novo centro; e *convolução cúbica*, que usa o valor médio dos 16 pixels (janela de 4 x 4) mais próximos.

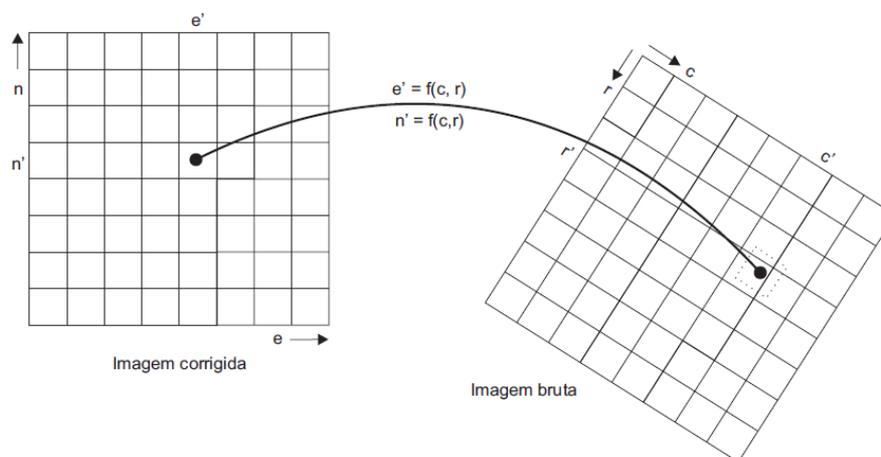


Figura 08 – Interpolação da intensidade – Reamostragem (vizinho mais próximo). Fonte: IBGE, 2000.

A vantagem do método vizinho mais próximo é que ele requer menos tempo de computação e preserva os valores originais dos pixels. Os outros dois métodos distribuem melhor o erro, porém exigem mais tempo de computação e produzem imagens suavizadas, retirando detalhes.

É importante fazer uma distinção clara entre registro e correção geométrica. O processo de correção geométrica de imagens elimina as distorções geométricas sistemáticas introduzidas na etapa de aquisição das imagens, enquanto o registro apenas usa transformações geométricas simples - usualmente transformações polinomiais - para estabelecer um mapeamento entre coordenadas de imagem e coordenadas geográficas. O registro deve ser sempre utilizado como uma técnica que busca refinar a qualidade geométrica de imagens com correção geométrica de sistema, como é o caso das imagens geradas pelo satélite Landsat (CAMARA et al, 2009).

3.2.4 Programa LANDSAT

O Programa Landsat representou no século XX um modelo de missão de sensoriamento remoto de recursos naturais, principalmente porque permitiu incorporar, em seus sucessivos satélites, características requeridas pelos usuários dos dados. Para o Brasil, esse programa foi de fundamental importância, porque possibilitou consolidar e capacitar uma ampla comunidade de usuários (NOVO, 2008).

É o maior empreendimento em execução de aquisição de imagens da Terra vista do espaço, sendo que o primeiro satélite Landsat foi lançado em 1972, e o mais recente, o Landsat 7, em 1999 (INPE, 2010).

A missão desse programa foi proporcionar a aquisição repetitiva de dados multiespectrais calibrados, com resolução espacial relativamente alta, se comparada à dos satélites para aplicações meteorológicas e oceanográficas de modo global, para permitir comparações do estado da superfície terrestre ao longo do tempo (NOVO, 2008).

O TM - Landsat 5 foi lançado em 1º de março de 1984, encerrando suas atividades em novembro de 2011. Possui uma órbita polar, circular e héliossíncrona que dura 98,20 min, estando posicionado a 705 km em relação à superfície terrestre no Equador e inclinação 98,20°. Seu período de revisita é de 16 dias. Uma imagem inteira do satélite representa no solo uma área de abrangência de 185 x 185 km (Figura 09). O satélite demora 24 s para imagear esta área (INPE, 2010).



Figura 09 - Resumo das características dos Satélites Landsat (1 a 5). Fonte: Adaptado de Engesat.

Os sensores a bordo são o MSS (Multispectral Scanner Subsystem) e o TM (Thematic Mapper). O sensor TM foi um sistema avançado de varredura multiespectral, na época em que o satélite foi lançado pela primeira vez, há um quarto de século. Foi concebido para proporcionar resolução espacial mais fina, melhor discriminação espectral entre objetos da superfície terrestre, maior fidelidade geométrica e melhor precisão radiométrica em relação ao sensor MSS. Seu sistema é composto por um conjunto de subsistemas configurados para permitir o imageamento do terreno com fidelidade geométrica (NOVO, 2008).

Sendo assim, a resolução espacial do Landsat - TM é de 30 x 30 m, com exceção da banda 6 que é 120 x 120 m e a resolução radiométrica é de 1 byte ou 8 bits, o que significa que possui 256 níveis de cinza (INPE, 2010).

Cada banda está relacionada a um intervalo espectral, tendo assim características e aplicações diferenciadas, conforme disposto na Tabela 02.

Tabela 02 – Características e aplicações das bandas Landsat 5 TM

Banda	Principais características e aplicações
1	Apresenta grande penetração em corpos de água, com elevada transparência, permitindo estudos batimétricos. Sofre absorção pela clorofila e pigmentos fotossintéticos auxiliares (carotenóides). Apresenta sensibilidade a plumas de fumaça oriundas de queimadas ou atividade industrial. Pode apresentar atenuação pela atmosfera.
2	Apresenta grande sensibilidade à presença de sedimentos em suspensão, possibilitando sua análise em termos de quantidade e qualidade. Boa penetração em corpos de água.
3	A vegetação verde, densa e uniforme, apresenta grande absorção, ficando escura, permitindo bom contraste entre as áreas ocupadas com vegetação (ex.: solo exposto, estradas e áreas urbanas). Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal (ex.: campo, cerrado e floresta). Permite análise da variação litológica em regiões com pouca cobertura vegetal. Permite o mapeamento da drenagem através da visualização da mata galeria e entalhe dos cursos dos rios em regiões com pouca cobertura vegetal. É a banda mais utilizada para delimitar a mancha urbana, incluindo identificação de novos loteamentos. Permite a identificação de áreas agrícolas.
4	Os corpos de água absorvem muita energia nesta banda e ficam escuros, permitindo o mapeamento da rede de drenagem e delineamento de corpos de água. A vegetação verde, densa e uniforme, reflete muita energia nesta banda, aparecendo bem clara nas imagens. Apresenta sensibilidade à rugosidade da copa das florestas (dossel florestal). Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo a obtenção de informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Serve para análise e mapeamento de feições geológicas e estruturais. Serve para separar e mapear áreas ocupadas com <i>pinus</i> e <i>eucalipto</i> . Serve para mapear áreas ocupadas com vegetação que foram queimadas. Permite a visualização de áreas ocupadas com macrófitas aquáticas (ex.: aguapé). Permite a identificação de áreas agrícolas.
5	Apresenta sensibilidade ao teor de umidade das plantas, servindo para observar estresse na vegetação, causado por desequilíbrio hídrico. Esta banda sofre perturbações em caso de ocorrer excesso de chuva antes da obtenção da cena pelo satélite.
6	Apresenta sensibilidade aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, servindo para detectar propriedades termais de rochas, solos, vegetação e água.
7	Apresenta sensibilidade à morfologia do terreno, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia. Esta banda serve para identificar minerais com íons hidroxilas. Potencialmente favorável à discriminação de produtos de alteração hidrotermal.

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As imagens digitais geradas pelos sensores remotos, por registrarem dados em várias faixas de espectro EM, permitem a combinação de bandas. A forma mais usual de combinação é através da combinação de três imagens, cada uma colocada num plano das cores primárias: vermelho, verde e azul (Red, Green e Blue - RGB), resultando numa composição colorida. Através desta técnica, a imagem terá seus níveis de cinza convertidos em níveis de vermelho, verde ou azul, onde cada pixel terá a cor resultante da combinação da intensidade das cores primárias expressa pelo nível de cinza (IBGE, 2000).

As composições para imagens coloridas (RGB) estudadas por Rosa et al, (2011) são:

- Bandas 3, 2 e 1 (imagens em "cor natural") e Bandas 4, 3 e 2 (falsa cor) : Os corpos d'água apresentam cor escura, com formas curvilíneas irregulares;
- Bandas 5, 4 e 3: mostra diferenciação da água e análise hidrográfica.
- Bandas 7, 4 e 3: é possível diferenciar a vegetação, solo e água com nitidez, sendo a melhor composição para distinção dos recursos naturais.

As imagens geradas pelo sensor TM do Landsat 5 possuem correção geométrica de sistema que se baseia no uso de parâmetros físicos inerentes à situação de aquisição de cada imagem (efemérides e atitude da plataforma, sistema de imageamento do sensor e modelo de referência para a Terra). Ou seja, os pixels já observam um posicionamento relativo condizente com certo sistema de projeção cartográfica, restando, via de regra, uma translação residual oriunda da incerteza na posição do satélite, portanto não necessita ser modelada por transformações polinomiais. Por isso, apenas um único ponto de controle é suficiente, podendo ser utilizado mais de um para melhor refinamento (CAMARA et al, 1996). O programa SPRING é capaz de acessar a equação de navegação, que é a relação entre as coordenadas de imagem e as coordenadas de projeção, oriunda da correção de sistema e passa a refinar as translações (em X e Y) dessa equação na medida em que os pontos de controle vão sendo adquiridos.

3.2.4.1 Radiometria de imagens TM

Procedimento muito realizado com dados orbitais é a conversão dos números digitais das imagens em valores físicos como Radiância e/ou Reflectância (aparente ou de superfície). Essa conversão pode ser efetuada com a utilização de valores de L_{\min} e L_{\max} (valores máximos e mínimos de radiância em cada banda espectral) específico para dados TM 5, conforme apresentado em Chander et al (2009) conforme Tabela 03:

Tabela 03 – Intervalo espectral, intervalo de radiância após calibração do sensor ($L_{\min\lambda}$ e $L_{\max\lambda}$) e irradiância solar ($E_{\text{sol}\lambda}$)

Sensores Landsat 5 TM ($Q_{\text{calmin}}=1$ e $Q_{\text{calmax}} = 255$)				
Bandas	Intervalo espectral	$L_{\min\lambda}$	$L_{\max\lambda}$	$E_{\text{sol}\lambda}$
	μm	$\text{W}/(\text{Esterradiano}/\text{m}^2/\mu\text{m})$		$\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$
1	0,452 - 0,518	-1,52	193	1983
2	0,528 - 0,609	-2,84	365	1796
3	0,626 - 0,693	-1,17	264	1536
4	0,776 - 0,904	-1,51	221	1031
5	1,567 - 1,784	-0,37	30,2	220
6	10,45 - 12,42	1,2378	15,3032	N/A
7	2,097 - 2,349	-0,15	16,5	83,44

Fonte: Adaptado de Chander et al (2009).

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Doce situa-se na região Sudeste, entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste (ECOPLAN; LUME, 2010a). É um rio interestadual, com aproximadamente 850 km de extensão, tendo sua nascente na Serra da Mantiqueira no município de Ressaquinha - MG, a 1200 m de altitude do nível do mar, e sua foz se localiza em Regência no município de Linhares - ES (LAGE et al. 2005).

Possui uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km², dos quais 86% pertencem ao Estado de Minas Gerais e o restante ao Espírito Santo, abrangendo um total de 230 municípios (ECOPLAN; LUME, 2010a). No âmbito do Estado do Espírito Santo, o Rio Doce é o maior rio sendo que os 26 municípios capixabas pertencentes à bacia possuem um total de 739.403 habitantes (IBGE, 2000 apud BARRETO-NETO et al 2009), quase um quarto da população capixaba (Tabela 04).

Tabela 04 – Características gerais da bacia do rio Doce

Características Gerais da Bacia do Rio Doce	
Área da bacia	86.715 km ²
Extensão do curso principal	Aprox. 850 km
Nº de municípios	230
População na bacia	Aprox. 3.294.000 habitantes
Principais atividades econômicas	Mineração Siderurgia Silvicultura Agropecuária
Principais problemas relacionados à gestão dos recursos hídricos	Contaminação por esgotos domésticos Erosão e assoreamento

Fonte: Adaptado de Ecoplan; Lume, 2010a.

Os principais limites geográficos da bacia são: ao norte as Serras Negra e dos Aimorés; a oeste a Serra do Espinhaço; a sudoeste e ao sul a Serra da Mantiqueira; a sudeste: a Serra do Caparaó; a leste o Oceano Atlântico (LAGE et al. 2005) conforme figura 10.



Figura 10 - Localização da Bacia do Rio Doce. Fonte: Ecoplan; Lume, 2010a.

Os principais afluentes do rio Doce pela margem esquerda são os rios do Carmo, Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande, em Minas Gerais; São José e Pancas no Espírito Santo. Já pela margem direita são os rios Casca, Matipó, Caratinga/Cuieté e Manhuaçu em Minas Gerais; Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce no Espírito Santo (ECOPLAN; LUME, 2010a).

Na região encontra-se instalado o maior complexo siderúrgico da América Latina, que, associado a empresas de mineração e empresas reflorestadoras, são responsáveis por grande parte das exportações brasileiras de minério de ferro, aço e celulose, sendo, portanto, de grande importância para a região onde estão instaladas (ECOPLAN; LUME, 2010a).

A atividade econômica da bacia do rio Doce é bastante diversificada, destacando-se, além da mineração, a agropecuária, a agroindústria, a indústria, o comércio e serviços de apoio aos complexos industriais, além da geração de energia

elétrica. Há também um desmatamento generalizado e mau uso dos solos, seja para a monocultura do eucalipto como para agricultura ou pastagem, que conduz a região a um intenso processo de erosão (ECOPLAN; LUME, 2010a).

A urbanização da bacia também contribui significativamente para os impactos nos cursos d'água, principalmente pela quase inexistência de sistemas de tratamento de esgotos agravado pela freqüente ocorrência de inundações (ECOPLAN; LUME, 2010a).

4.2 METODOLOGIA

Foram avaliados dados hidrossedimentológicos do rio Doce obtidos na foz, em Regência, nos anos de 2008 e 2009, coletados durante execução de projeto desenvolvido pelo laboratório LAHIDRO do GEARH - Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos da Universidade Federal do Espírito Santo, com apoio do CNPq e da FAPES. Também foram utilizados registros da estação fluviométrica nº 56994500 localizada em Colatina, para os anos entre 2000 e 2011 (Figura 11), disponíveis na Hidroweb no site da Agência Nacional das Águas (ANA). As coordenadas dos pontos de amostragem Regência e Colatina são apresentadas na Tabela 05.

Tabela 05 – Coordenadas dos pontos de coleta em Regência e Colatina.

<i>Ponto de Coleta</i>	<i>Coordenada UTM (SIRGAS2000)</i>	
	<i>Este (m)</i>	<i>Norte (m)</i>
Regência - ES	416.033	7.831.909
Colatina - ES	328.826	7.839.347

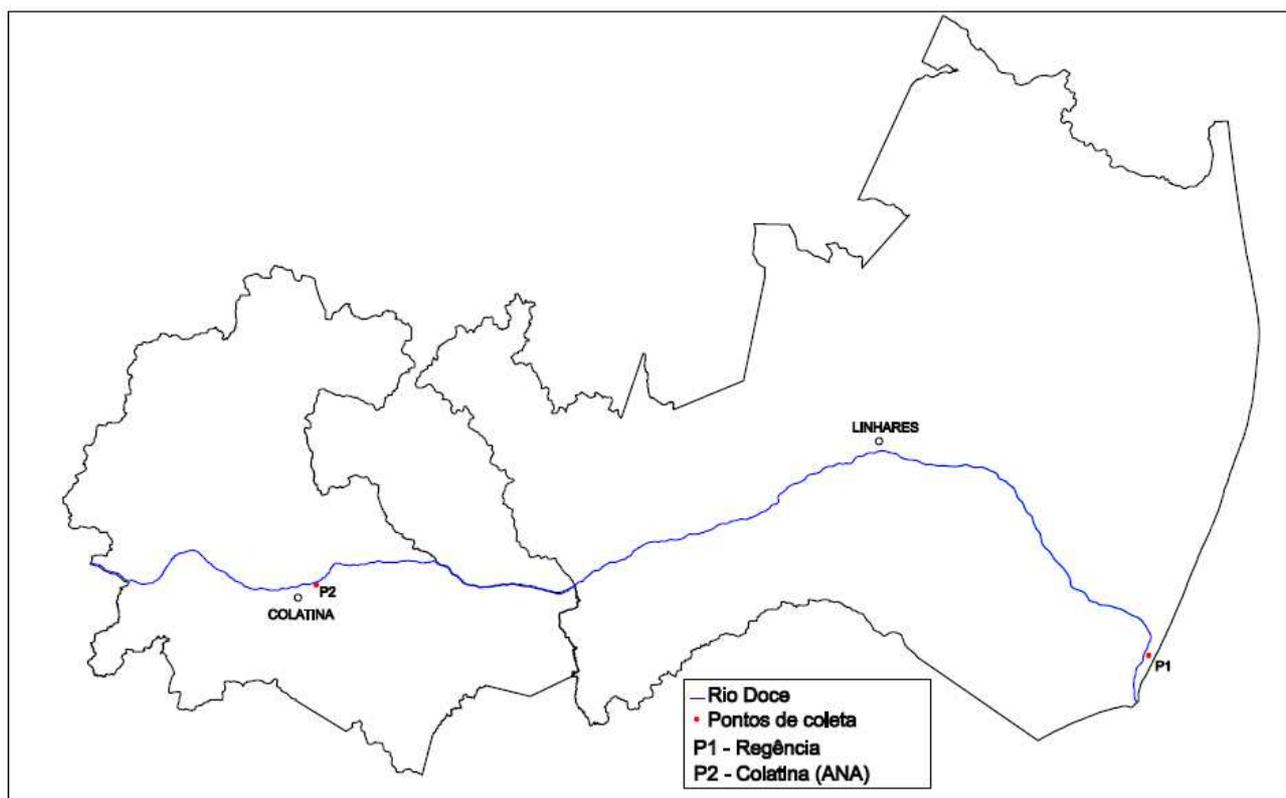


Figura 11 – Localização dos pontos de coleta no Rio Doce.

Para Colatina, também foram analisados dados de vazão para o mesmo período, tendo sido selecionados meses com menores e maiores vazões, para observação do comportamento das curvas espectrais nessas situações. Para Regência, isso não foi possível devido à inexistência de séries históricas das vazões.

As datas foram escolhidas de acordo com a disponibilidade dos dados hidrossedimentológicos e de imagens do satélite Landsat TM - 5, disponíveis no catálogo de imagens no endereço do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), procurando a ocorrência de dados e imagens em datas próximas, assim como apresentado em Lorenzzetti et al (2007). Datas muito distantes ou com imagens cobertas por nuvens foram descartadas (Tabelas 06, 07 e 08).

Tabela 06 – Dados hidrossedimentológicos disponíveis em Regência - ES (Foz do Rio Doce)

<i>Data da Coleta</i>	<i>Data da Imagem de Satélite</i>
9/9/2008	22/8/2008
4/1/2009	12/12/2008
18/3/2009	19/4/2009
28/7/2009	8/7/2009

Tabela 07 – Dados hidrossedimentológicos na estação fluviométrica em Colatina - ES

<i>Data da Coleta</i>	<i>Data da Imagem de Satélite</i>
14/7/2000	22/7/2000
17/9/2000	24/9/2000
20/9/2001	11/9/2001
6/10/2006	27/10/2006
24/3/2008	22/3/2008
12/07/2011	19/06/2011

Tabela 08 – Dados de vazão na estação fluviométrica de Colatina-ES

<i>Mês</i>	<i>Data da Imagem de Satélite</i>
10/2008	16/10/2008
09/2001	11/9/2001
06/2001	23/6/2001
05/2001	22/5/2001
08/2000	7/8/2000
08/2009	16/8/2009
08/2007	27/8/2007
07/2006	23/7/2006
07/2000	22/7/2000
09/2004	3/9/2004
02/2008	3/2/2008
01/2001	30/1/2001
03/2004	11/3/2004
02/2005	26/2/2005
02/2007	16/2/2007
03/2005	30/3/2005

O processamento das imagens foi feito com o software SPRING 5.1.8 (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), por se tratar de um sistema de fácil acesso, sem custo, com linguagem espacial de programação chamada LEGAL (Linguagem Espaço Geográfica baseada em Álgebra) e que possibilita ao usuário operar um banco de dados sem limitações de escala, projeção ou fuso, além de integrar, em um único programa, dados de sensoriamento remoto num SIG (Sistema de Informação Geográfica).

Foram utilizadas as bandas de 1 a 3, das imagens do satélite Landsat 5 TM, pois estas estão dentro da faixa da reflectância da água, ou seja, em intervalo de comprimento de onda entre 380 nm e 700 nm. A banda 4 também foi utilizada, apesar de estar fora dessa faixa, com o objetivo de testar seu comportamento, pois nesse comprimento de onda, de 776 nm a 904 nm, os corpos de água absorvem muita energia e ficam escuros.

O tratamento das imagens, visando obtenção dos valores de reflectância, foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

4.2.1 Correção geométrica

Para a correção geométrica, utilizou-se a técnica de registro “imagem para imagem”, utilizando como referência ortofotos digitais do Espírito Santo (vôo de 2007/2008) disponíveis em órgãos estaduais, obtidas através do Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo – IDAF, para garantir que as coordenadas geográficas das imagens sejam concomitantes às mesmas coordenadas dos postos de coleta.

Foram identificados os pontos de controle na imagem digital e os mesmos localizados na ortofoto. Para que fosse utilizada a ferramenta de correção de sistema, foi necessária a transformação das imagens em formato GEOTIFF em SPG, através do módulo IMPIMA. Com esse novo formato, foi realizado o registro no SPRING. Este programa é capaz de acessar a equação de transformação das imagens Landsat. Foi necessário, portanto, apenas um ponto de controle, sendo

utilizada técnica de reamostragem por vizinho mais próximo, para preservar os valores originais dos pixels.

4.2.2 Correção radiométrica

4.2.2.1 Reflectância aparente

A primeira etapa consistiu na conversão dos números digitais (ND) para valores de reflectância aparente, ou seja, transformou-se os valores dos pixels, inicialmente discretizados em níveis de cinza para reflectância aparente com finalidade de minimizar as variações presentes durante a aquisição das cenas. Desta forma, esse procedimento permitiu realizar uma normalização dos dados para que fosse possível a comparação do comportamento espectral em outras datas. Utilizou-se $Q_{cal\ max} = 255$ e $Q_{cal\ min} = 1$ para discretizar em níveis de cinza, visto que a resolução radiométrica das imagens é 8 bits.

Foi utilizado algoritmo feito através da programação em LEGAL (APENDICE 1), onde os parâmetros utilizados para os coeficientes $L_{min\lambda}$ e $L_{max\lambda}$, que representam o intervalo de radiância após calibração do sensor, e $E_{sol\lambda}$, que representa a irradiância solar, estão disponíveis na tabela 04 adaptado de Chander et al (2009). Após rodado o algoritmo, as imagens foram exportadas em formato RAW.

4.2.2.2 Reflectância de Superfície

Para correção atmosférica de imagens de sensoriamento remoto, foi utilizado o modelo 6S, descrito por Vermote et al (1997), adaptado por Antunes et al (2003). Os modelos de atmosfera e de aerossóis foram escolhidos entre um grupo de modelos pré-estabelecidos que mais se adequasse às condições atmosféricas locais, conforme descrito em Antunes et al (2003).

Depois de exportadas as imagens de reflectância aparente para o formato RAW, e de alterados os valores considerando parâmetros de modelo atmosférico e aerossol, visibilidade, altitude média da região, localização do sensor e número de pixels da imagem, rodou-se o programa e, assim, foi gerada a imagem de reflectância de superfície. Este programa foi ativado individualmente para cada banda.

Com o término dessas etapas, realizou-se leitura dos pixels a partir das coordenadas dos pontos amostrados, utilizando as imagens retificadas para estimar a reflectância e correlacionar com a quantidade de sólidos suspensos e vazão. Adotou-se uma janela de 25 pixels (5 x 5) cujo centro possui as coordenadas de um dos elementos amostrais. Cada pixel possui uma área de 900 m² e, portanto, a janela representa uma área de 22.500 m², sendo calculado o valor médio da reflectância correspondente a cada elemento amostral.

Da imagem de reflectância real, foram extraídos valores amostrais em níveis de cinzas, que foram transformados para valores de reflectância, através da equação 3:

$$R = \frac{NC}{255} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

R = Reflectância

NC = Nível de Cinza

Para estudo do desempenho do modelo e comparação quanto aos tratamentos em todas as etapas, a leitura dos pixels foi realizada nas imagens em três situações: antes do tratamento, sendo utilizada a imagem bruta sem qualquer tipo de realce ou contraste; reflectância aparente, rodado em LEGAL; e reflectância superfície, realizado após a aparente, sendo rodado o modelo 6S.

Análises estatísticas de correlação dos dados de campo com os dados de reflectância das imagens orbitais foram realizadas no EXCEL. Para análise visual das imagens, foi utilizado composição colorida normal das bandas TM3, TM4 e TM5 (TM3 - azul, TM4 - verde e TM5 - vermelho), considerando que os componentes opticamente ativos afetam a cor da água.

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de resultados integra dados de carga suspensa, vazão e reflectância do corpo d'água. Foram focalizados dois aspectos: o efeito na reflectância das imagens de satélite após a técnica de correção e sua relação com as concentrações de sólidos suspensos e vazões.

Os dados de concentrações de sólidos suspensos, associados ao local e à data da coleta, são apresentados na Tabela 09.

Tabela 09 – Resultados das medidas em campo de concentrações de Sólidos Suspensos e Vazões

Local da coleta	Data da Coleta	Sólidos Suspensos (mg/L)	Vazão (m³/s)
Regência - ES	09/09/2008	14,3	246,33
	04/01/2009	90,7	3162,6
	18/03/2009	32,9	904,3
	28/07/2009	17,6	347,0
Colatina - ES	14/07/2000	20,45	431,0
	17/09/2000	29,7	453,63
	20/09/2001	34,05	292,33
	06/10/2006	43,77	477,49
	24/03/2008	100,76	685,09
	12/07/2011	4,67	440,76

Através da análise dos valores de vazões e concentrações de sólidos suspensos, pode-se verificar que os altos valores estão relacionados com o a maior quantidade de sedimento transportado pelos cursos d'água, ocorrendo principalmente em períodos de maiores precipitações, e por isso, as maiores vazões ocorreram nos meses de janeiro e março.

A estação chuvosa é definida para cada região geográfica em função das séries históricas. No sudeste brasileiro, o ano hidrológico ocorre de outubro a setembro, sendo que o semestre chuvoso ocorre entre outubro e março.

As Figuras 12(a) e 12(c) apresentam imagens do espelho d'água do rio Doce em épocas de cheia, com coloração mais clara, indicando altas concentrações de sólidos suspensos. Por outro lado, as Figuras 12(b) e 12(d) apresentam imagens do

espelho d'água do rio Doce em épocas de seca, com coloração mais escura, indicando baixas concentrações de sólidos suspensos. Isto porque água menos turva absorve grande parte da radiação.

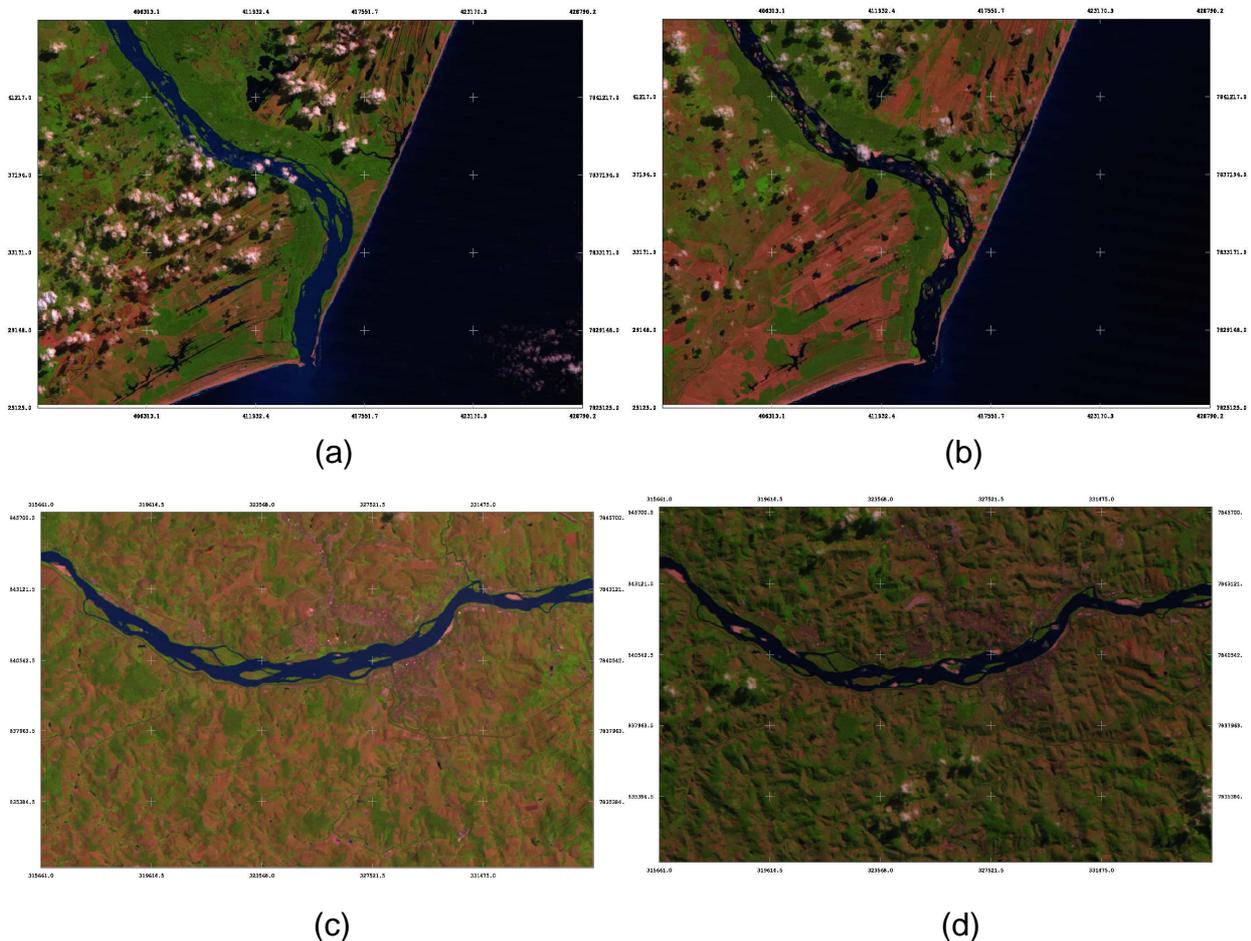


Figura 12 – Composições das bandas 3, 4 e 5 (RGB) nas datas de (a) 19/04/2009, (b) 22/08/2008 em Regência – ES; (c) 27/10/2006 e (d) 19/06/2011 em Colatina – ES.

A chuva contribui para a exposição da superfície do solo devido à força erosiva de suas gotas e transporta grandes quantidades de sedimentos para os cursos d'água, incluindo aqueles provenientes de estradas vicinais, justificando a maior quantidade de sólidos suspensos no período chuvoso. Os gráficos 01 e 02 mostram relação entre as vazões do rio, nas diversas datas, e os respectivos valores de concentração de sólidos suspensos encontrados, nos pontos de amostragem, em Regência e Colatina.

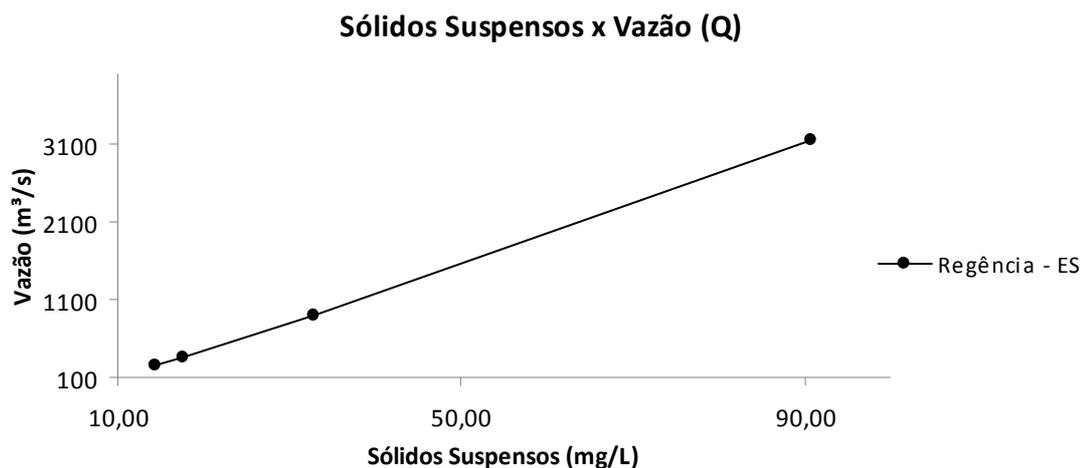


Gráfico 01 – Relação entre as vazões e os sólidos suspensos encontrados em Regência.

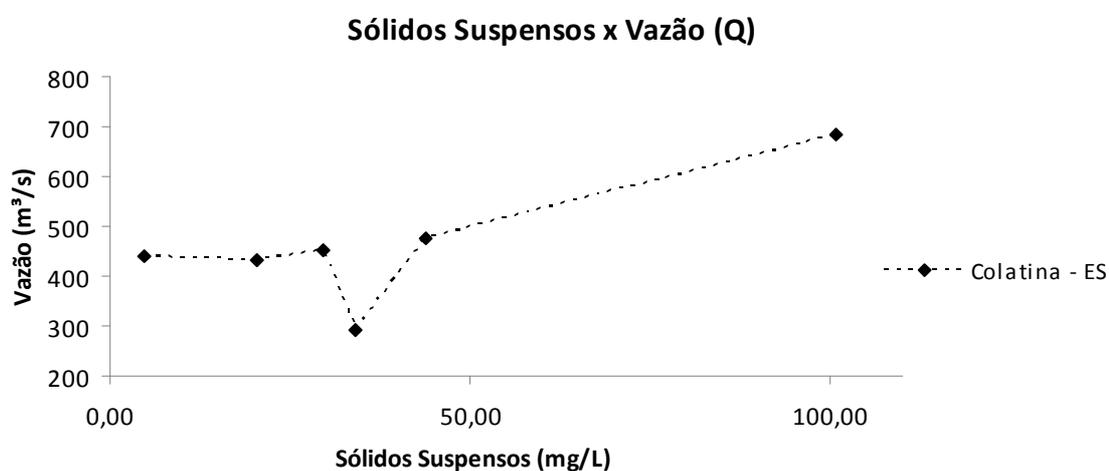


Gráfico 02 – Relação entre as vazões e os sólidos suspensos encontrados em Colatina.

A redução mostrada no Gráfico 02 corresponde ao dia 20/09/2001, no qual a vazão foi 292,33 m³/s. Este mês de setembro foi caracterizado por baixas vazões, com máxima no dia 21. A alta concentração registrada, 34,05 mg/l, pode ter sido causada por chuvas locais, principalmente nos dias 17 e 18 que antecederam a data da amostragem.

5.1 RESULTADOS DOS TRATAMENTOS DE IMAGENS

As imagens corrigidas quanto aos efeitos atmosféricos apresentam interferências mínimas para os efeitos externos causados pela atmosfera. Em

relação à reflectância das bandas TM, data e local da tomada de imagens, foi observado o mesmo padrão para a reflectância para diferentes datas, em um mesmo local, ao passo que os padrões se apresentaram diferentes considerando os dois locais de amostragem (Gráficos 03 e 04). Isso significa que as correções conseguiram normalizar as diferenças causadas por incompatibilidades de ND's nas diferentes bandas e por variações das condições atmosféricas nas tomadas das imagens ao longo do tempo.

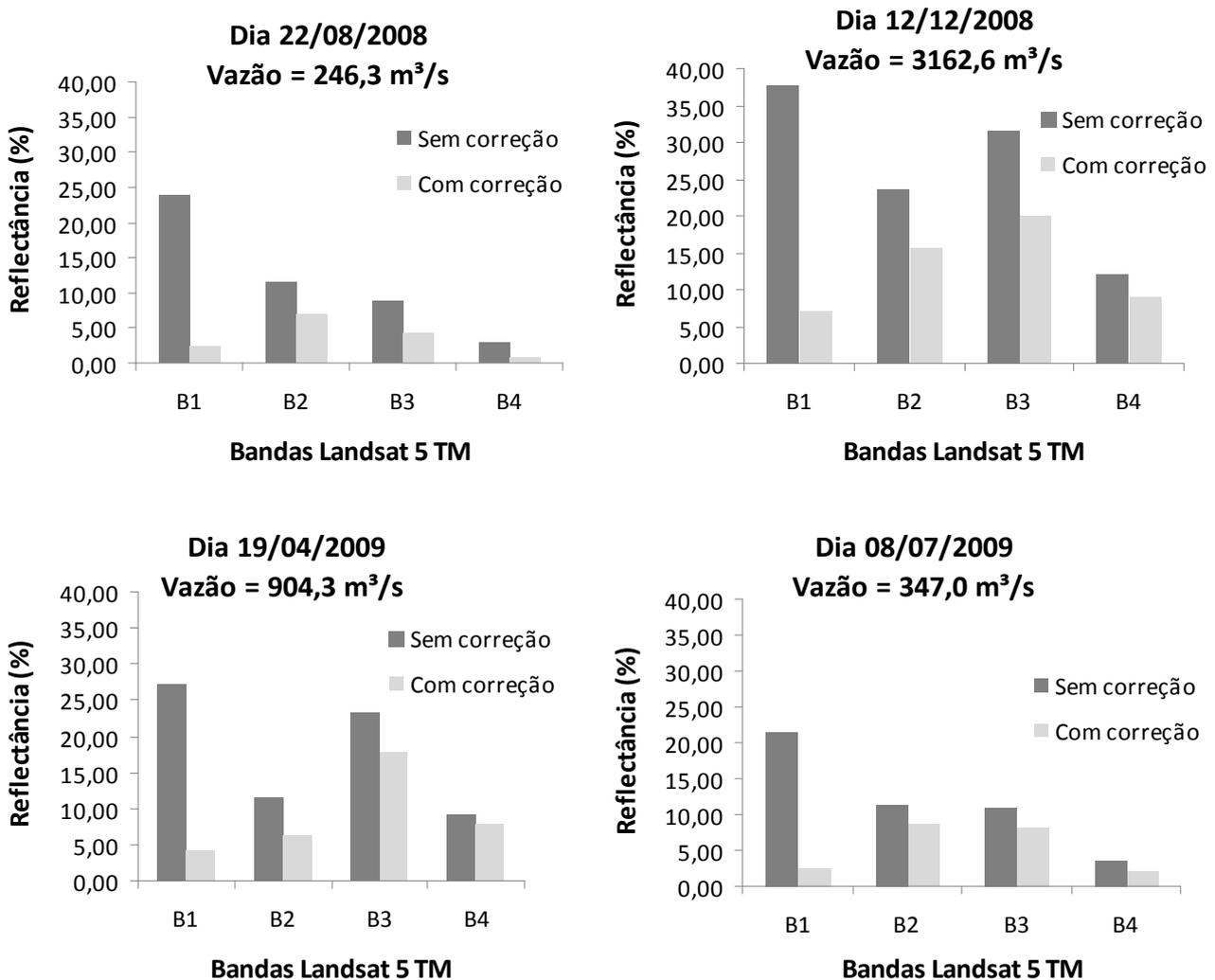


Gráfico 03 – Reflectância da água no rio Doce nas imagens sem correção e corrigidas pelo modelo 6S, em Regência – ES.

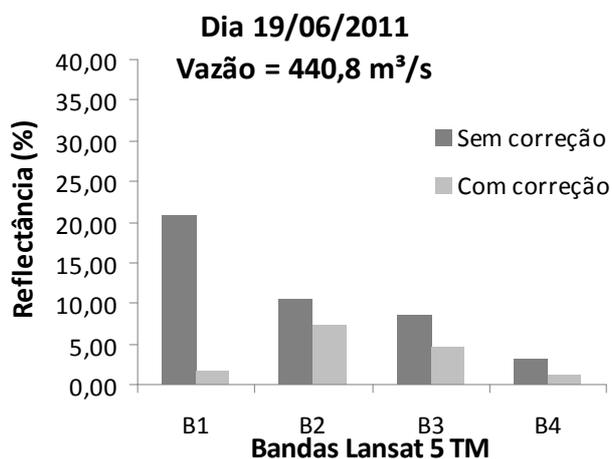
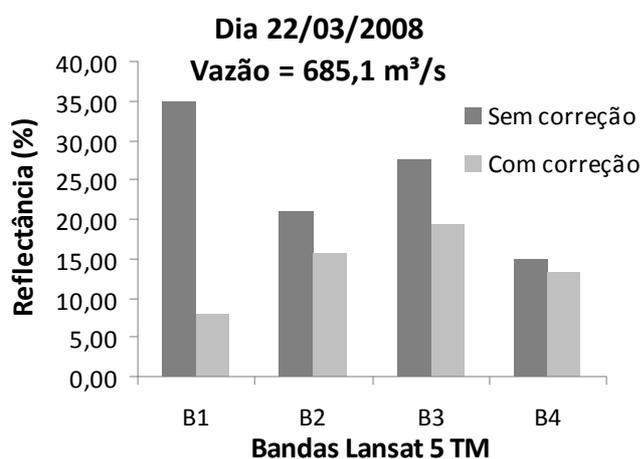
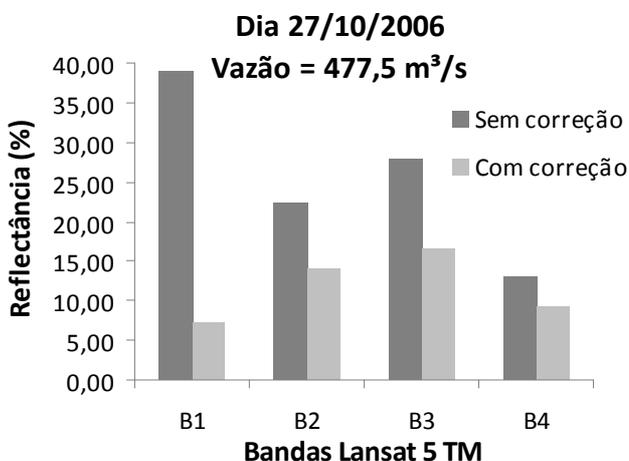
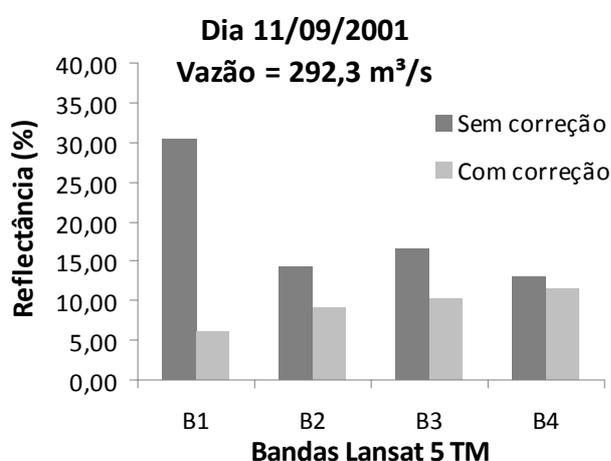
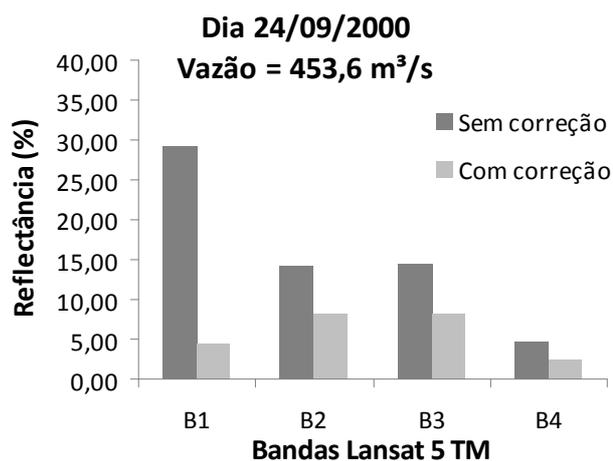
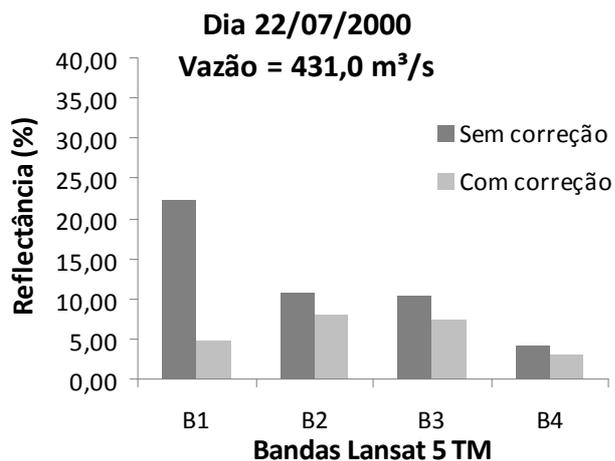


Gráfico 04 – Reflectância da água no rio Doce nas imagens sem correção e corrigidas pelo modelo 6S, em Colatina – ES.

Os gráficos 03 e 04 ainda mostram que os valores de reflectância sem correção não são característicos dos alvos e que após tratamentos realizados nas imagens de satélite, como correção atmosférica, os valores de reflectâncias

passaram a ser representativos destes alvos, passando a assemelhar-se mais à curva espectral da água (Figura 13), conforme Antunes (2003).

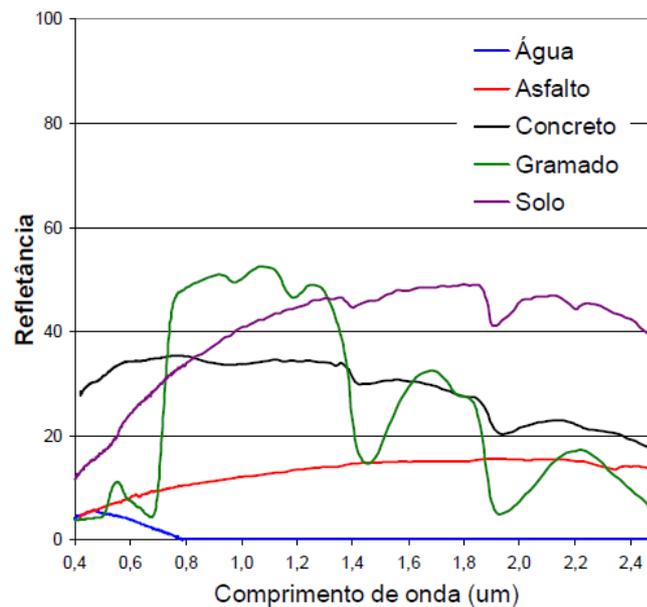


Figura 13 – Curvas de reflectância para água, asfalto, concreto, vegetação de gramado e solo exposto. Fonte: Antunes, 2003.

Após o tratamento da correção atmosférica, as bandas B2 e B3 apresentaram maiores reflectâncias, exceto em uma das datas, pois estas são bandas da região do visível e, por isso, mais sujeitas aos efeitos de espalhamento por aerossóis, e menos influenciadas por absorção de vapor d'água, assim como encontrado em Oliveira (2008).

Os gráficos 05 e 06 representam duas datas, uma para cada local, que melhor representam a transformação das reflectâncias das imagens entre os momentos antes, durante e após tratamento das correções.

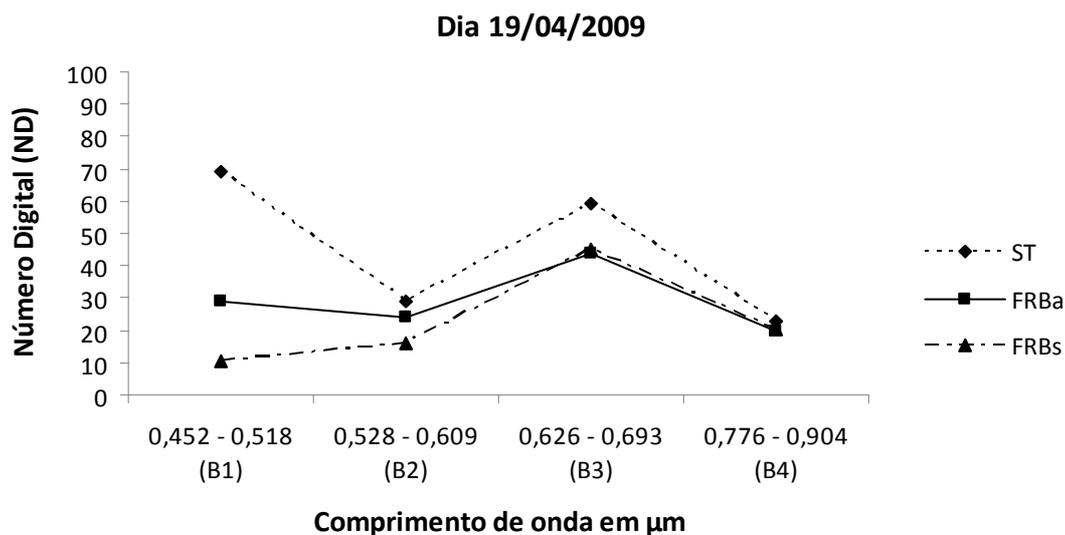


Gráfico 05 – Dinâmica dos NDs da água na foz do Rio Doce em Regência – ES (ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

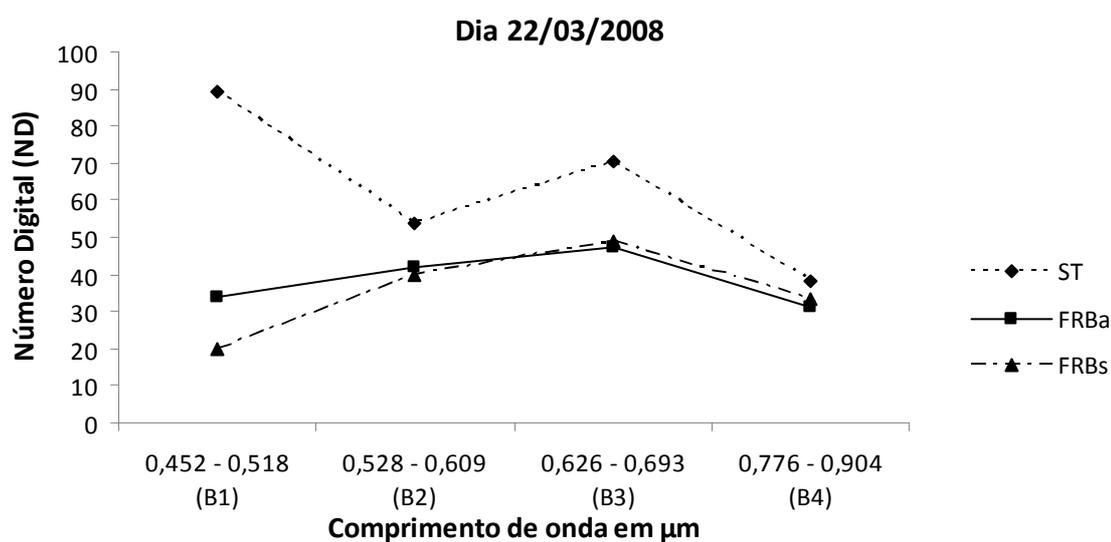


Gráfico 06 – Dinâmica dos NDs da água no Rio Doce em Colatina – ES (ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

Observa-se que os valores de ND originais (ST) apresentam-se bastante diferentes dos demais. Os valores de ND originais não servem como referência para a caracterização espectral de objetos. Observando-se a curva dos valores de ND referentes aos FRBs aparente, foi possível constatar que as maiores diferenças destes em relação àqueles FRBs de superfície se verificam na região do visível, que possui intervalo de 350 nm a 700 nm (Figura 03 do item 3.2.1.1), diminuindo nas regiões do infravermelho próximo. Na região do visível os valores de FRB aparente

são sempre superiores aos FRB de superfície devido ao fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, causado pela interferência atmosférica.

Pela análise das curvas denominadas como FRBa (Aparente) e FRBs (6S), observa-se que para a região do visível, as maiores dinâmicas dos valores de FRB foram verificadas nas bandas de menor comprimento de onda, ou seja, banda TM1, seguida da banda TM2. Nas regiões do infravermelho próximo, os valores de FRB de superfície são frequentemente superiores aos de FRB aparente, uma vez que o fenômeno dominante nessas regiões espectrais é a absorção da radiação eletromagnética pela atmosfera. Isso é válido quando da aplicação de modelos de transferência radiativa, assim como observado em Ponzoni e Shimabukuro (2010).

5.2 RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS E SÓLIDOS SUSPENSOS

Os valores de reflectância das bandas obtidos, para diferentes datas, são apresentados nas Tabelas 10 e 11, Regência e Colatina, respectivamente.

Tabela 10 – Reflectâncias (%) das bandas relacionadas com as datas, para as imagens de Regência – ES.

Tabela 10.1 – Imagens sem tratamento

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/8/2008	23,84	11,53	8,82	2,84
12/12/2008	37,58	23,53	31,64	11,98
19/4/2009	27,23	11,40	23,20	9,05
8/7/2009	21,71	11,40	11,15	3,75

Tabela 10.2 – Imagens FRB aparente

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/8/2008	10,05	9,77	6,42	2,09
12/12/2008	12,86	16,61	19,26	8,64
19/4/2009	11,26	9,44	17,18	7,84
8/7/2009	10,76	11,40	9,58	3,36

Tabela 10.3 – Imagens FRB superfície

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/8/2008	2,45	6,98	4,39	0,83
12/12/2008	7,06	15,76	19,95	8,96
19/4/2009	4,19	6,38	17,74	7,94
8/7/2009	2,54	8,74	8,05	2,18

Tabela 11 – Reflectâncias (%) das bandas relacionadas com as datas, para as imagens de Colatina – ES.

Tabela 11.1 – Imagens sem tratamento

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/7/2000	22,43	10,78	10,38	4,13
24/9/2000	29,18	14,21	14,54	4,85
11/9/2001	29,11	12,71	12,44	5,85
27/10/2006	38,90	22,27	27,83	13,11
22/3/2008	35,04	21,11	27,70	14,98
19/6/2011	20,83	10,59	8,50	3,25

Tabela 11.2 – Imagens FRB aparente

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/7/2000	10,92	10,38	8,83	3,73
24/9/2000	10,70	10,67	9,41	3,28
11/9/2001	11,29	9,95	8,31	4,30
27/10/2006	12,94	15,25	16,33	9,16
22/3/2008	13,22	16,41	18,64	12,24
19/6/2011	9,91	10,20	6,93	2,60

Tabela 11.3 – Imagens FRB superfície

Data da Imagem	Reflectâncias (%)			
	B1	B2	B3	B4
22/7/2000	4,67	8,03	7,45	2,95
24/9/2000	4,42	8,31	8,16	2,38
11/9/2001	5,41	7,53	6,87	3,56
27/10/2006	7,39	14,16	16,63	9,41
22/3/2008	7,76	15,62	19,28	13,07
19/6/2011	1,80	7,36	4,78	1,22

Os resultados por banda são apresentados nos gráficos 07 a 14, que mostram os valores de reflectância e de concentrações de sólidos suspensos correspondentes às diferentes datas. Analisando-se as quatro bandas das imagens estudadas, percebe-se que a medida da reflectância de um mesmo objeto, no caso a água do rio Doce, é diferente de acordo com cada tipo de radiação que o atinge, ou seja, de acordo com a resolução espectral de cada banda.

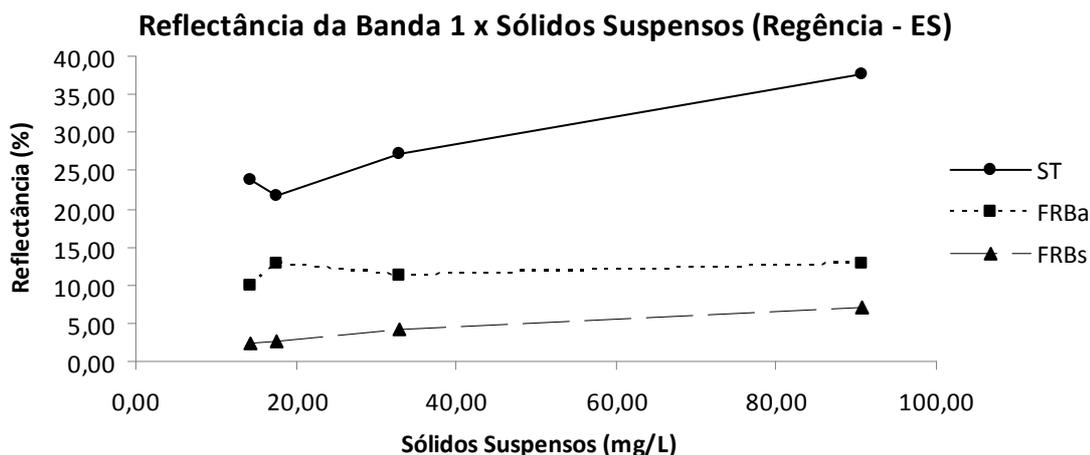


Gráfico 7 – Relação entre a reflectância da banda 1 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.

(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

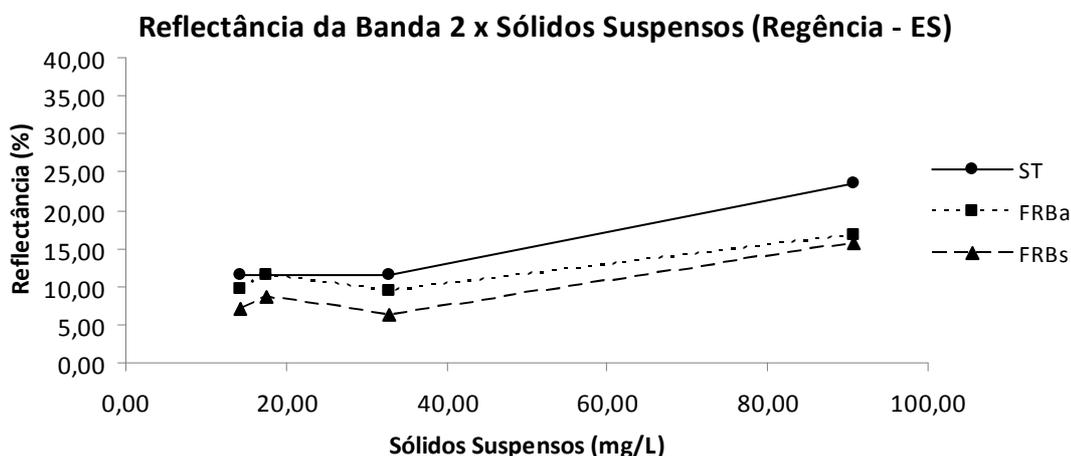


Gráfico 8 – Relação entre a reflectância da banda 2 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.

(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

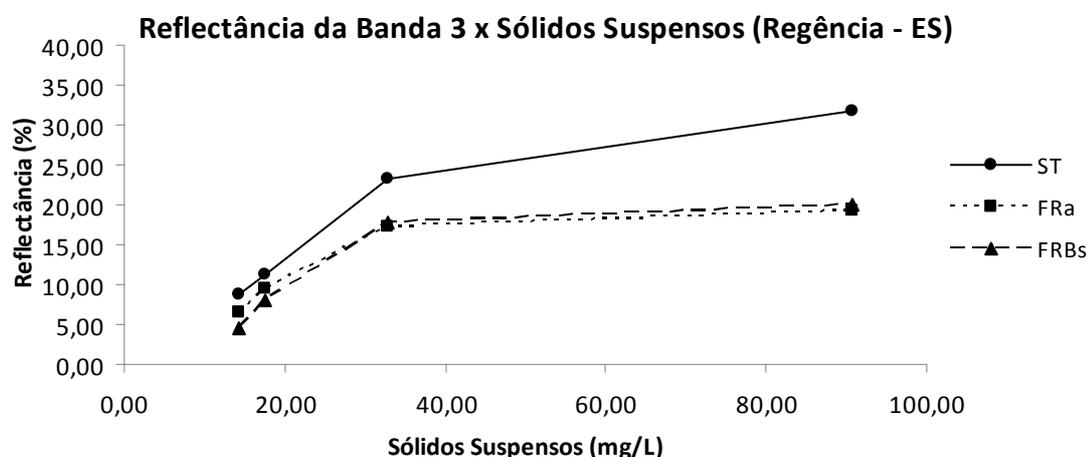


Gráfico 9 – Relação entre a reflectância da banda 3 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.

(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

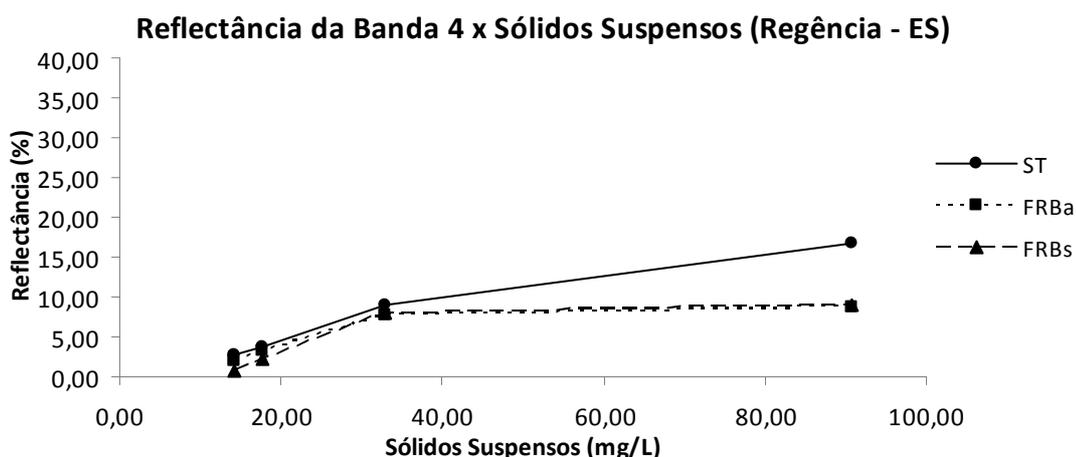


Gráfico 10 – Relação entre a reflectância da banda 4 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Regência – ES.
(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

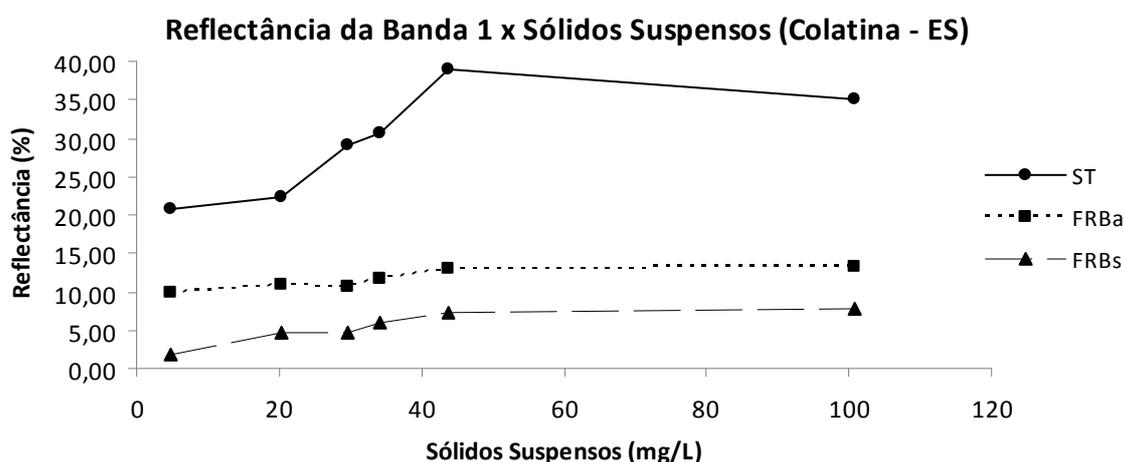


Gráfico 11 – Relação entre a reflectância da banda 1 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.
(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

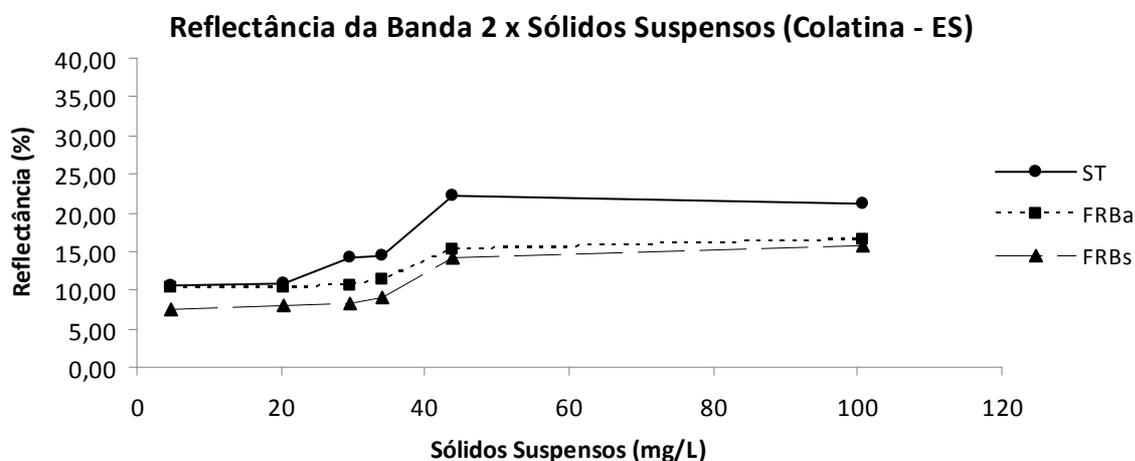


Gráfico 12 – Relação entre a reflectância da banda 2 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.
(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

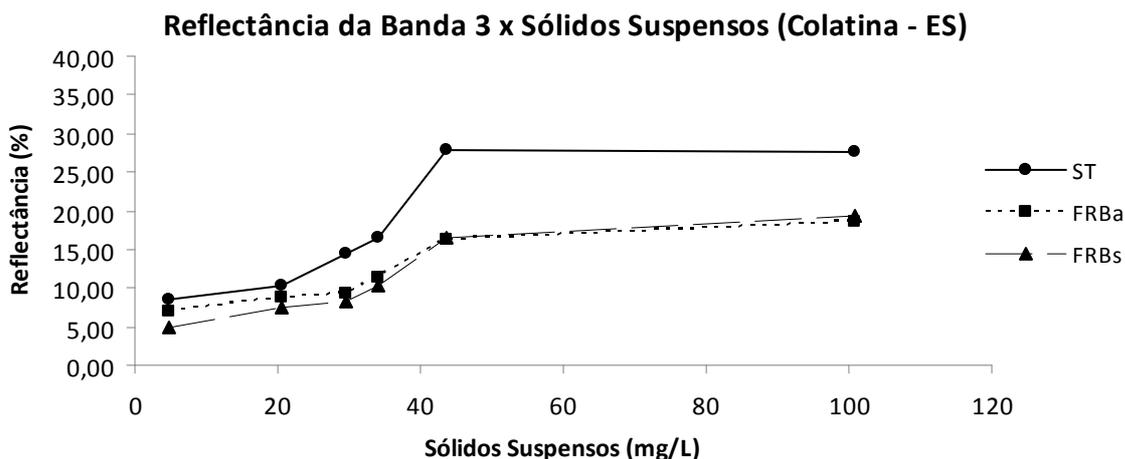


Gráfico 13 – Relação entre a reflectância da banda 3 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.

(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

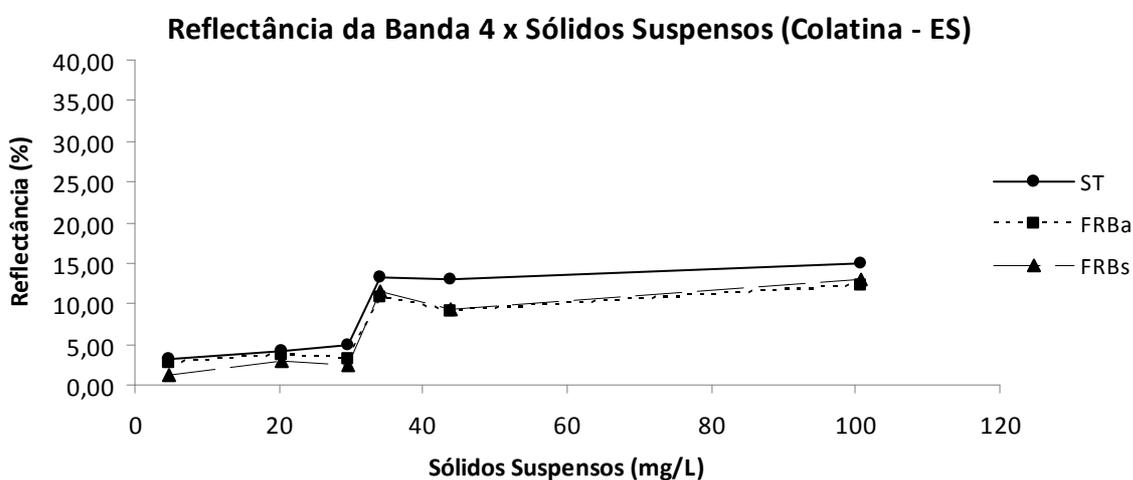


Gráfico 14 – Relação entre a reflectância da banda 4 e dados de sólidos suspensos medidos em campo, Colatina – ES.

(ST – Sem tratamento, FRBa – Reflectância Aparente, FRBs – Reflectância de Superfície)

Coeficientes de correlação são utilizados para descrever a relação entre concentrações de sólidos em suspensão e reflectância para cada um dos pontos de amostras do espectro, nas tabelas 12 e 13, a seguir:

Tabela 12 – Coeficientes de correlação das bandas 1,2,3 e 4 (Regência – ES)

Imagem	Coeficiente de Correlação e Equação			
	B1	B2	B3	B4
Sem tratamento	0,9838 (y = 0,195x + 20,006)	0,9721 (y = 0,165x + 8,032)	0,9207 (y = 0,277x + 7,927)	0,9778 (y = 0,177x + 1,242)
FRB aparente	0,9708 (y = 0,032x + 9,966)	0,9114 (y = 0,085x + 8,497)	0,8223 (y = 0,141x + 7,614)	0,8054 (y = 0,074x + 2,618)
FRB Superfície	0,9881 (y = 0,06x + 1,727)	0,9171 (y = 0,111x + 5,130)	0,8131 (y = 0,172x + 5,856)	0,8083 (y = 0,093x + 1,376)

Tabela 13 – Coeficientes de correlação das bandas 1,2,3 e 4 (Colatina – ES)

Imagem	Coeficiente de Correlação e Equação			
	B1	B2	B3	B4
Sem tratamento	0,7100 ($y = 0,15x + 23,414$)	0,7748 ($y = 0,121x + 10,581$)	0,8189 ($y = 0,214x + 8,561$)	0,8780 ($y = 0,134x + 2,504$)
FRB aparente	0,8627 ($y = 0,034x + 10,168$)	0,8420 ($y = 0,074x + 9,283$)	0,8826 ($y = 0,129x + 6,391$)	0,9204 ($y = 0,108x + 1,669$)
FRB superfície	0,8345 ($y = 0,055x + 3,099$)	0,8528 ($y = 0,095x + 6,455$)	0,8824 ($y = 0,158x + 4,383$)	0,9231 ($y = 0,131x + 0,319$)

As curvas de FRB superfície, corrigidas atmosféricamente, apresentaram melhores correlações com os dados de campo, conforme observado para dados de Colatina. Oliveira (2008) concluiu que as curvas de FRBs obtidas através de correções atmosféricas, quando comparadas com a curva de FRBa, ofereceram melhorias acentuadas na conformidade espectral com a curva de FRB obtida em campo.

Regência apresenta resultados de correlação diferentes dos esperados para as bandas B2, B3 e B4. A melhor correlação não foi apresentada pela FRB superfície para essas bandas, presumindo-se que pode ter ocorrido, devido a mudanças nas características superficiais do alvo que foram realçadas ou tornaram-se perceptíveis após a correção, assim como concluído por Bentz (1990).

Juntamente com as correlações, foram apresentadas as equações de regressão linear, definidas com base nos dados amostrados, podendo estas serem utilizadas para estimativas de valores esperados, ou seja, estimativa de concentrações de sedimentos suspensos através de dados de reflectância. Vale ressaltar que estas equações devem ser usadas com cuidado, considerando o baixo número de amostras utilizadas.

De forma geral, todas as correlações foram positivas, mostrando que as variáveis se movem juntas, ou seja, os valores altos de uma variável tendem a ser associados aos valores altos da outra. Se as variáveis não se relacionassem os valores de correlações estariam próximos de zero. Sendo assim, os valores de reflectância das imagens Sem Tratamento, FRB aparente e FRB superfície, apresentam altas correlações positivas com os sólidos suspensos.

O aumento das reflectâncias está diretamente ligado ao aumento das concentrações de sedimentos, pois este promove mudança dos picos de reflectância para comprimentos de onda maiores. Alföldi (1982) apud Hayakawa (2007) chegou a essa conclusão para corpos de água com baixas concentrações de sedimentos. Os comprimentos de ondas que melhor responderam à predição de carga suspensa foram as de onda curta, como a faixa do azul e verde, e à medida que a carga aumenta, as faixas espectrais mais sensíveis para predição de variação de transporte de sedimentos em suspensão foram as de maiores comprimentos de onda (Figura 14).

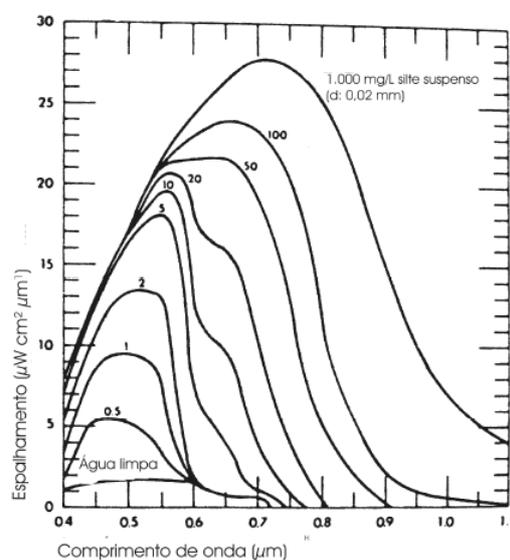


Figura 14 – Variação da dispersão da radiação em função da quantidade de sedimentos suspensos. Fonte: Alföldi (1982) adaptado por Hayakawa (2007).

De um modo geral, em Regência, a banda 1 da FRB superfície apresentou a melhor correlação. Já para Colatina, a banda 4, também da FRB superfície, apresentou melhor correlação entre concentrações de sólidos suspensos e a reflectâncias das cenas.

Provavelmente, isso ocorreu em função das cargas de sólidos suspensos observados em cada trecho estudado. Para Regência, ocorreu melhor correlação nas bandas localizadas na faixa do visível, sugerindo menor transporte de sedimentos suspensos. Para Colatina, a melhor correlação entre concentrações de sólidos suspensos e reflectâncias foi encontrada na faixa do infravermelho próximo, ou seja, na banda 4, sugerindo maior transporte de sedimentos nesse trecho do rio Doce nas datas de amostragem.

Isso ocorreu provavelmente porque as datas selecionadas para Regência correspondem principalmente aos meses de seca, ao passo que para Colatina, as datas selecionadas correspondem predominantemente aos meses mais chuvosos.

Em resumo, conforme apresentado nos gráficos 15 e 16, a reflectância que melhor representa a curva espectral da água é de superfície e os dados correlacionados seguiram o padrão de quanto menor a reflectância, menor o transporte de sólidos suspensos.

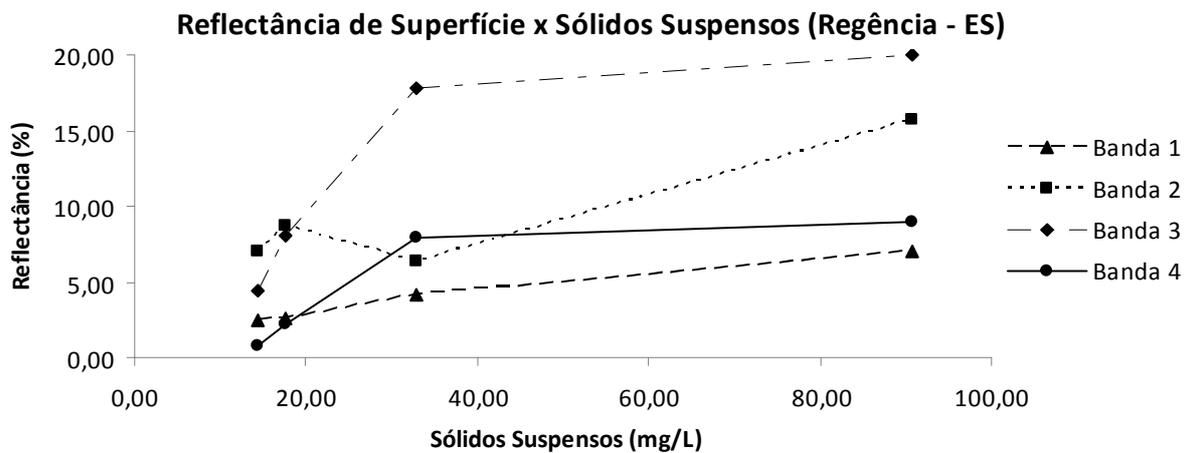


Gráfico 15 – Relação entre a Reflectância de Superfície e concentrações de sólidos suspensos para as bandas 1, 2, 3 e 4 em Regência – ES.

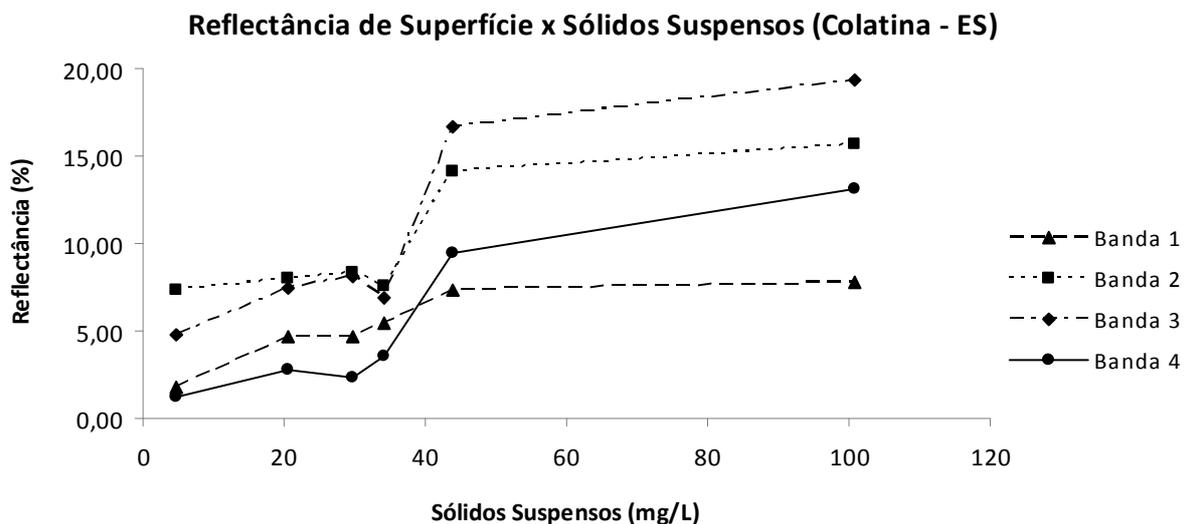


Gráfico 16 – Relação entre a Reflectância de Superfície e concentrações de sólidos suspensos para as bandas 1, 2, 3 e 4 em Colatina – ES.

5.3 RELAÇÃO ENTRE REFLECTÂNCIAS E VAZÃO

A relação entre reflectâncias e vazões foi analisada apenas para registros de Colatina, devido à inexistência de série histórica das vazões diárias para Regência. O gráfico 17 mostra a reflectância de superfície e seu comportamento nas diferentes faixas espectrais para diferentes vazões.

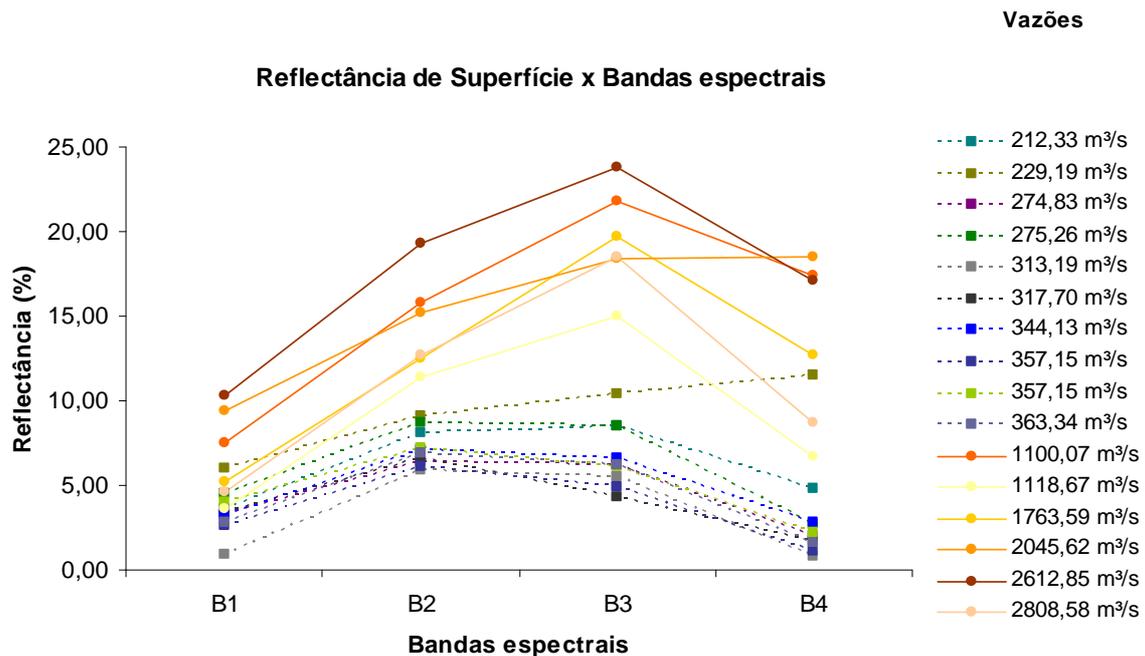


Gráfico 17 – Comportamento das Reflectância de Superfície para diferentes vazões em Colatina – ES.

As menores vazões correspondem aos menores valores de reflectância devido à baixa quantidade de sedimentos suspensos transportados. O contrário ocorre para maiores vazões, que por apresentarem maiores concentrações de sedimentos em suspensão apresentam maiores reflectâncias, pelo fato dos sólidos presentes na água refletirem a luz que incide no corpo d'água. Montanher et al (2009) também comprovou que a concentração de sedimentos totais varia ao longo do tempo de forma semelhante à vazão, diminuindo conforme a redução da velocidade de fluxo (Figura 15).

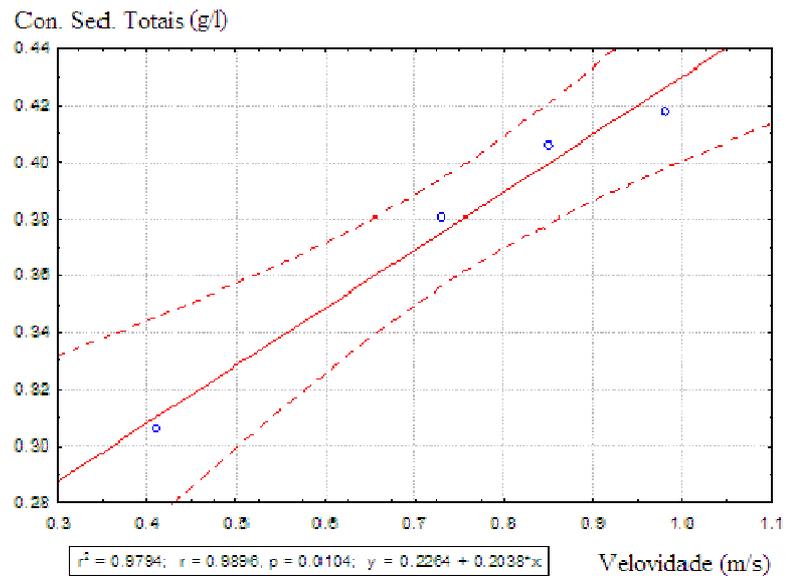


Figura 15 - Relação entre a concentração de sedimentos totais e a velocidade de fluxo (r^2 de 0,97). Fonte: Montanher et al (2009).

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A integração de dados de concentração de sólidos suspensos e reflectância mostrou a existência de significativa correlação entre estas variáveis, nos pontos monitorados do rio Doce.

O uso da ferramenta de sensoriamento remoto, utilizando um modelo de transferência radiativa no tratamento das imagens, mostrou que este foi capaz de corrigir as imagens de satélites quanto aos efeitos atmosféricos, visto que os valores de reflectância passaram a ser representativos das curvas espectrais dos alvos. Mesmo com as dificuldades de obtenção de dados concomitantes das datas de imagens orbitais com datas da coleta de campo, foi possível observar correlações positivas, principalmente em ocasiões nas quais as datas de amostragem e imagens foram próximas. Ou seja, foi observado aumento da reflectância diretamente ligado ao aumento da concentração de sedimentos que promoveu mudança do pico de reflectância, sobretudo para os maiores comprimentos de onda.

Dentre as bandas estudadas, as bandas B2 e B3 apresentaram as maiores reflectâncias, pois são bandas da região do visível e, por isso, mais sujeitas aos efeitos de espalhamento por aerossóis e menos influenciadas por absorção de vapor d'água.

Em relação às correções aplicadas nas imagens aéreas, as maiores diferenças encontradas entre as curvas dos Fatores de Reflectância Bidirecional (FRB) aparente e dos Fatores de Reflectância Bidirecional de superfície, se verificaram na região do visível, onde os valores de FRB aparente são sempre superiores, devido ao fenômeno de espalhamento da radiação eletromagnética, causado pela interferência atmosférica. O contrário ocorreu nas regiões do infravermelho próximo, onde os valores de FRB de superfície são superiores aos FRB aparente, pois o fenômeno dominante nessas regiões espectrais é a absorção da radiação eletromagnética pela atmosfera.

Considerando a concentração dos sólidos suspensos e a reflectância da cena, a melhor correlação para os dados de Regência foi encontrada na banda 1, localizada na faixa do visível, possivelmente devido ao fato dos períodos de amostragem neste ponto, consideradas nesse estudo, não terem ocorrido em períodos de altas vazões. Para Colatina, a melhor correlação foi encontrada na faixa

do infravermelho próximo, banda 4, sugerindo maior aporte de sedimentos nesse trecho do rio Doce, pois as datas selecionadas correspondem predominantemente aos meses mais chuvosos.

Conclui-se, portanto, que há relação entre a reflectância da cena obtida por imagem de satélites e a concentração de sólidos suspensos. Quanto menor é a quantidade de sedimentos em suspensão, menor a reflectância, devido à absorção da radiação eletromagnética pela água.

Recomenda-se, para futuros estudos, obtenção de maior número de amostras em diferentes datas, contemplando períodos de seca e cheia para o local escolhido e a utilização de imagens de outros satélites, como o ResourceSat-1, visto que o programa Landsat foi interrompido durante o período deste estudo.

Sugere-se, ainda, testes quanto à limites de tolerância de defasagem entre datas de imagens e amostras, relativamente a obtenção de equações concentração de sólidos suspensos-reflectância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, M. A. H.; FREIRE, R. M. B.; BOTELHO, A. S.; TONIOLLI, L. H. **Correções atmosféricas de imagens de satélites utilizando o modelo 6S**. Trabalho apresentado no XXI Congresso Brasileiro de Cartografia, Belo Horizonte, 2003. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/xxi_cbc/174-SR21.pdf>. Acesso em 18 ago. 2010.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares. **Análise do comportamento hidrológico do rio Japarutuba em Sergipe**. Trabalho apresentado no III Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, Aracaju, 2010. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2010/anais3_enrehse/Resumos_expandidos>. Acesso em: 25 out. 2012.

BARBOSA, Cláudio Clemente Faria. **Sensoriamento remoto da dinâmica da circulação da água do sistema Planície de Curuai/ Rio Amazonas**. 2005. 281 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos.

BARRETO-NETO, A. A.; ZAMPROGNO, D. P.; REIS, J. A. T. Modelagem espacial da erosão utilizando sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do Rio Doce, porção do Espírito Santo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 14., 2009, Natal. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. p. 7663-7667.

BENTZ, Cristina Maria. **Avaliação da transformação radiométrica dos dados TM/LANDSAT-5 em reflectâncias**. 1990. 164 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 1990.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990.

CAMARA G.; SOUZA, R.C.M; FREITAS U. M., GARRIDO J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, 1996.

CAMARGO CORRÊA, Carla Maria. **Perda do solo e qualidade da água procedente de estrada de uso florestal no planalto catarinense**. 2005. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

CHANDER, G.; MARKHAMB, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, United States. Volume 113. Issue 5. p.893-903. 2009.

COGO, N. P.; LEVIEN, R.; SCHWARZ, R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classe de declive e níveis de

fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Porto Alegre, p 743-753, 2003.

CRÓSTA, Álvaro Penteado. **Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Edição Revisada. Campinas: IG/UNICAMP, 1993.

CRUZ, Marcus Aurélio Soares. **Análise do comportamento hidrológico do rio Japarutuba em Sergipe**. Trabalho apresentando no III Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe, Aracaju, 2010. Disponível em: <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2010/anais3_enrehse/Resumos_expandidos>. Acesso em: 25 out. 2012.

ECOPLAN; LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce**. Volume I. Relatório Final. p.472. 2010a.

ECOPLAN; LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce**. Relatório Final. p.91. 2010b.

FEITOSA, T. B.; LOST, C. Dinâmica hidrossedimentológica de duas sub-bacias hidrográficas localizadas no Estado do Tocantins. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 9, nº 2, p. 121-129, 2011.

FIGUEIREDO, Divino. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2005.

FITZ, Paulo Roberto. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

HAYAKAWA, Ericson Hideki. **Análise da variabilidade espacial e temporal dos sedimentos suspensos do Alto Rio Paraná via imagens orbitais**: região de Porto São José – PR. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Introdução ao processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Divisão de Geração de Imagens. **Manual do Usuário do Catálogo de Imagens da DGI/INPE**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR>>. Acesso em: 15 dez. 2010.

JENSEN, John R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ª ed. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

LAGE, M. R.; CUPOLILLO, F.; ABREU, M. L. **Aspectos climáticos da bacia do rio Doce**. Trabalho apresentado no XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, São Paulo, 2005.

LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. Modelagem hidrossedimentológica de bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, vol. 5, nº. 2, p. 158-174, 2010.

LINO, João Félix de Luca. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT**. 2009. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

LOUREIRO, D. D. T.; TEIXEIRA, F. J.; MAIA, J. L.; ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F. **Estudo hidrossedimentológico e estimativa de vida útil do reservatório de Barra Bonita – SP**. Trabalho apresentado no XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Sumarios/9dec323fd0383c207c2cb3556850cd43_ae76f143c0b9c102d9b6c85a9ab171e6.pdf> Acesso em: 25 out. 2012.

LORENZZETTI, J. A.; NEGRI, E.; KNOPERS, 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. 13., 2007, Florianópolis. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3429-3436.

MALUTTA, Simone. **Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho - SC com o modelo SWAT**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. **EOSAT Landsat Technical Notes**. Nº1, 1986.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.12, p.1306–1313, 2011.

MONTANHER, O. C.; MORAIS, E. S.; SOUZA FILHO, E. E. **Transporte e concentração de sedimentos em suspensão durante a recessão de uma onda de cheia no Córrego Zororó, Mandaguaçu – PR**. Trabalho apresentado no XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. UFV, 2009. Disponível em: <http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo3/074.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2012.

MORAES, Elisabete Caria de. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: DSR/INPE, 2002. Cap. 1. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/vcsr/files/capitulo_1.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2011.

MOREIRA, Maurício Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2ª ed. Viçosa: UFV, 2003.

NASSER, Vera Lúcia. **Estudo da qualidade de água na Baía de Guanabara utilizando técnicas de sensoriamento remoto e análise geoestatística**. 2001. 183 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Programa Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NOVO, E. M. M. **Monitoramento de quantidade e qualidade da água e sensoriamento remoto**. Trabalho apresentado no XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://mtcm17.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-17%4080/2007/12.03.20.57/doc/3.pdf>>. Acesso em 06 jul. 2012.

NOVO, Evlyn Márcia Leão de Moraes. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 3ª ed. São Paulo: Blucher, 2008.

OLIVEIRA, Luiz Gonçalves Longo. **Avaliação de metodologias de caracterização atmosférica na conversão de dados radiométricos digitais em valores físicos**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

RITCHIE, J.C.; SCHIEBE, F.R. Water Quality. **Remote Sensing in Hydrology and Water Management**, Berlin, p. 287-303,351-352, 2000.

RITCHIE, J. C.; SCHIEBE, F.R.; McHENRY, J.R. Remote sensing of suspended sediments in surface waters. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 42, p.1539-1545, 1976.

ROCHA, Cezar Henrique Barra. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. 2ª ed. Juiz de Fora: UFJF, 2002.

ROSA, L.; ALVES, M. de C.; SANCHES, L. Uso de composições de bandas do satélite Landsat 5 TM para caracterizar a dinâmica da variação de áreas alagadas no Pantanal mato-grossense. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Curitiba: INPE, 2011. p.5293.

SANTOS, J. W. M. C.; DUBREUIL, V. Estimativa da distribuição temporo-espacial de material em suspensão nas águas do reservatório de Manso-MT a partir de imagens Landsat e dados de campo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14., 2009, Natal. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: INPE, 2009. p. 5421-5428.

SILVA, A. M.; CAMARGO, P. B.; SCHULZ, H. E. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. 2ª ed. São Carlos: Rima, 2007.

SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas. Versão: 5.1.8. [S.I.]: INPE, 1996. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/download.php>>. Acesso em: 03 de setembro de 2010.

VERMOTE, E. F.; TANRÉ, D.; DEUZÉ, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE, J.J. Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. **IEEE Transactions on geoscience and remote sensing**. Vol. 35. nº 3, 1997.

VESTENA, Leandro Redin. Análise da dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, p. 413-424, 2009.

VRIELING, Anton. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. **Catena**, The Netherlands. Volume 65. Issue 1. p.2-18. 2006.

APÊNDICE

APÊNDICE 1 – ALGORITMO PARA TRANSFORMAR ND DA IMAGEM TM EM REFLECTÂNCIA APARENTE

```
{
Image Im1, Im2, Im3, Im4 ("CAT_Imagem");
Image Im13, Im14, Im15, Im16 ("reflect_aparente");
Digital Im7, Im8, Im9, Im10 ("CAT_MNT");

Im1=Recupere (Nome="B1-19062011");
Im2=Recupere (Nome="B2-19062011");
Im3=Recupere (Nome="B3-19062011");
Im4=Recupere (Nome="B4-19062011");

Im7=Novo (Nome="Gr1_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Escala=50000,
Min=0, Max=255);
Im8=Novo (Nome="Gr2_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Escala=50000,
Min=0, Max=255);
Im9=Novo (Nome="Gr3_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Escala=50000,
Min=0, Max=255);
Im10=Novo (Nome="Gr4_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Escala=50000,
Min=0, Max=255);

Im13=Novo (Nome="Ra1_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im14=Novo (Nome="Ra2_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im15=Novo (Nome="Ra3_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);
Im16=Novo (Nome="Ra4_19062011_1", ResX=30, ResY=30, Nbits=8);

elev=37.4051/57.2957795130;
zen=90/57.2957795130 - elev;
pi=3.141592654;
dmax=255;
dist=1;

Lmin1=-0.152;
Lmin2=-0.284;
Lmin3=-0.117;
Lmin4=-0.151;

Lmax1=19.30;
Lmax2=36.50;
Lmax3=26.40;
Lmax4=22.10;

esun1=198.3;
esun2=179.6;
esun3=153.6;
esun4=103.1;

Im7=(( (Lmin1+(Lmax1-Lmin1)*(Digital (Im1/dmax)))*pi*dist^2)/
(esun1*cos(zen)))*255;
Im7= Im7 <= 0 ? 0 : Im7;
Im13= Imagem (Im7);
Im8=(( (Lmin2+(Lmax2-Lmin2)*(Digital (Im2/dmax)))*pi*dist^2)/
(esun2*cos(zen)))*255;
Im8= Im8 <= 0 ? 0 : Im8;
Im14= Imagem (Im8);
Im9=(( (Lmin3+(Lmax3-Lmin3)*(Digital (Im3/dmax)))*pi*dist^2)/
(esun3*cos(zen)))*255;
Im9= Im9 <= 0 ? 0 : Im9;
Im15= Imagem (Im9);
```

```

Im10=(((Lmin4+(Lmax4-Lmin4)*(Digital (Im4/dmax)))*pi*dist^2)/
(esun4*cos(zen)))*255;
Im10= Im10 <= 0 ? 0 : Im10;
Im16= Imagem (Im10);
}

```

APÊNDICE 2 - PROGRAMA 6S: TRANSFORMAÇÃO DA REFLECTÂNCIA APARENTE EM REFLECTÂNCIA DE SUPERFÍCIE

Programa - 6S

```

INPFILES.TXT
parametros.inp (DESCRITOR DE PARÂMETROS)
B1.res (RESULTADOS)
B1.raw (ARQUIVO DE ENTRADA) → imagem {B1, B2, B3, B4, B5,
B7}.RAW
B1_superficie.raw (Arquivo de saída)

```

DESCRITOR DE PARÂMETROS:

```

7 (Landsat TM geometrical conditions)
19 06 12.565 -40.661 -19.534 (month,day,hh.ddd,long.,lat.)
(hh.ddd=the decimal hour in universal time)
1 (tropical atmospheric mode)
1 (continental)
25 (visibility in km (aerosol model concentration)
-.70 (target at m above sea level)
-1000 (sensor on board of satellite)
28 (band of TM Landsat 5)
-1 (TM image with reflectance scaled between 0 and 255)
295481 (number of pixels of the image=number of bytes)

```