



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14638-TDI/1202

**O USO DA FUSÃO DE IMAGENS MULTISENORES POR MEIO
DA TRANSFORMADA WAVELET NA CARACTERIZAÇÃO DA
PLUMA TERMAL COSTEIRA DA USINA NUCLEAR DE
ANGRA DOS REIS**

Eduardo Viegas Dalle Lucca

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. João Antônio Lorenzetti, aprovada em 15 de setembro de 2006.

INPE
São José dos Campos
2007

528.711.7

Lucca, E. V. D.

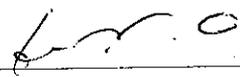
O uso da fusão de imagens multisensores por meio da transformada wavelet na caracterização da pluma termal costeira da usina nuclear de Angra dos Reis / Eduardo Viegas Dalle Lucca. – São José dos Campos: INPE, 2006.

150p. ; (INPE-14638-TDI/1202).

1.Sensoriamento remoto. 2.Imagem termal. 3.pluma termal.
4.Fusão de imagem. 5.Ondeletas. 6.Transformada ondeleta discreta. 7.Análise em múltiplas resoluções. 8. Angra dos Reis.
I.Título.

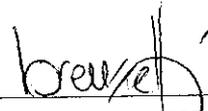
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Sensoriamento Remoto

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



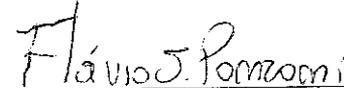
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. João Antonio Lorenzetti



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Nelson Jesus Ferreira



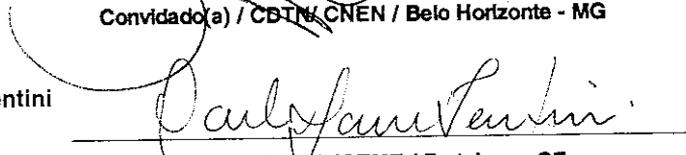
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Jefferson Vianna Bandeira



Convidado(a) / CBTN / CNEN / Belo Horizonte - MG

Dr. Carlos Alexandre Domingos Lentini



Convidado(a) / FUNCEME / Fortaleza - CE

Aluno (a): Eduardo Viegas Dalle Lucca

São José dos Campos, 15 de setembro de 2006

“O homem terá que se elevar sobre a Terra - ao topo da atmosfera e além - para somente então compreender o mundo em que vive”.

SÓCRATES, 450 a.C.

À minha esposa Alyne e à minha filha Renata pelo carinho, amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao CTA (Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial) e ao IEAv (Instituto de Estudos Avançados) por conceder-me a oportunidade de aprimoramento técnico-científico e profissional.

Ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), pela contribuição na formação científica ampla e profunda e pelos conhecimentos compartilhados.

Aos companheiros da Divisão de Geointeligência do IEAv pelo apoio, motivação e compreensão pela ausência.

Ao meu orientador Dr. João Antônio Lorenzetti, pela orientação segura, pela motivação, pelo conhecimento passado e pelas revisões e sugestões em todas as etapas desta pesquisa.

À Dra. Leila Maria Garcia Fonseca, pela orientação, apoio na realização deste trabalho e principalmente pelos importantes conhecimentos e experiência passados nas fases de elaboração da metodologia e discussão dos resultados.

Aos professores Flávio Ponzoni e Nelson Jesus pelas sugestões e experiências transmitidas na elaboração da proposta deste trabalho.

Ao Dr. Camilo, pela orientação imprescindível nos aspectos estatísticos do trabalho.

À ELETRONUCLEAR, através do Sr Giovanni, pelo suporte na obtenção de dados de campo e informações sobre a Central Nuclear de Angra dos Reis.

Aos amigos Jefferson, Lécio e Dângele da equipe do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN/CNEN pela realização do trabalho de campo.

À equipe do IAE, Castro, Hildo, Evandro e Roberto, pela Sondagem Meteorológica de altitude no dia do experimento e pelas previsões meteorológicas seguras.

Aos companheiros do 1º/6ºGav e do 2º/6ºGav, através da FAEII, por ceder o sensor, a aeronave e a equipagem para obtenção das imagens do HSS.

Ao ERSDAC (Earth remote Sensing Data Analysys Center) pela cessão das imagens do sensor ASTER.

Ao estagiário do INPE Nicolas Despres, pela paciência e dedicação na implementação do aplicativo *Wavefusion*.

Aos meus amigos de trabalho Souza, Xavier, Correia e Orlando, pela ajuda na etapa de registro das imagens, pelas sugestões e dúvidas tiradas.

À Tenente Diana pela ajuda na revisão criteriosa das referências bibliográficas.

Ao Sr Lélío, do IAI, pelo carinho, atenção, profissionalismo e entusiasmo em ajudar os alunos na preparação das apresentações.

A todos os meus familiares, em especial meus pais, meu irmão, minha esposa Alyne e minha filha Renata, pelo incentivo, participação e compreensão nos momentos de ausência e também por acreditarem na importância do estudo.

RESUMO

Este trabalho examina o emprego de imagens obtidas na faixa espectral do infravermelho termal através de diferentes sensores com o propósito de fornecer subsídios para cientistas interessados em estudar fenômenos termais de escala local que ocorrem em ambientes marinhos complexos como as zonas costeiras. O fenômeno em estudo é a pluma termal (variações de temperatura associadas com a descarga de água aquecida) que ocorre nas adjacências da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, Brasil. As imagens termais (expressas em temperatura) empregadas são as obtidas através do sensor orbital ASTER, com 90 m de resolução espacial, e do aerotransportado HSS (*HyperSpectral scanner System*), esta com resolução espacial nominal de 7,62 m. As imagens foram obtidas numa mesma data e hora. Em uma primeira etapa, os dados obtidos com cada um dos sensores são avaliados individualmente com a finalidade de verificar sua aplicabilidade para o estudo da dinâmica da pluma termal, sua morfologia, gradientes de temperatura, características e relação com forçantes ambientais. Outra etapa envolve o emprego de métodos de fusão de imagens para obtenção de um produto híbrido, derivado da integração de dados dos sensores empregados, que reúna as melhores características de cada um, onde se deseja provar a hipótese de que o uso sinérgico dos dados pode produzir resultados mais adequados e úteis que aqueles obtidos individualmente, reduzindo o volume de dados, superando limitações individuais de cada sensor e reunindo toda informação essencial num único produto. Para tanto foi desenvolvido um algoritmo de fusão (*Wavefusion*) cujo objetivo é permitir a combinação, numa única imagem, da informação espacial dos dados obtidos através do sensor HSS com a informação espectral (temperatura absoluta da superfície do mar) derivada do ASTER. O algoritmo utiliza transformada *wavelet* para descrever e decompor uma imagem em diferentes escalas, gerando uma pirâmide em múltiplas resoluções. Os resultados indicaram que as imagens termais obtidas pelos dois sensores (HSS e ASTER) são adequadas e permitem analisar e caracterizar feições termais de escala local sobre ambientes marinhos e zonas costeiras. Também se constatou que as imagens obtidas por estes sensores possuem características complementares e suplementares que podem ser agrupadas em uma imagem híbrida obtida por processos de fusão. Além disso, foi possível combinar em uma única imagem os conteúdos espectral e espacial extraídos de duas imagens distintas através de processos de fusão que empregam transformadas *wavelets*. Testes qualitativos e quantitativos indicaram que o ganho de informação espacial ocorre sem alterar a média dos valores originais da imagem do ASTER, evidenciando a utilidade da transformada *wavelet* em processos de fusão objetivando melhoria da resolução espacial quando a informação espectral de uma das imagens precisa ser preservada.

**IMAGE FUSION USING WAVELET TRANSFORM TO CHARACTERIZE
THE THERMAL PLUME PRODUCED BY NUCLEAR POWER PLANT IN
ANGRA DOS REIS**

ABSTRACT

This study examines the use of thermal images obtained from different sensors (different spatial resolutions) at local spatial scales to provide useful tools for scientists interested in smaller-size geophysical phenomena and in complex environmental such as costal zones. The phenomenon in study is the heated effluent jet (plume) produced by the surface discharge a nuclear power plant in Angra dos Reis, Brazil. The images utilized are those obtained from orbital ASTER and airborne HSS (HyperSpectral Scanner System) sensors. The images were acquired almost simultaneously and were analyzed for overlapping concurrent ground-coverage. ASTER TIR scenes had a spatial resolution of 90 m and HSS imagery had a nominal resolution of 7,62m. The fusion algorithm was based on wavelet multiresolution analysis. The wavelet transform enables an image to be examined at different frequency and scale intervals. We used discrete wavelet transform (DWT) for decomposition the two-dimensional (image) signal. The high frequency, small-scale spatial detail in the higher resolution HSS scene was extracted using the high pass filters of the wavelet transform. The result of the low pass filtering of the higher resolution image was completely replaced by the lower resolution ASTER scene. This modified wavelet transform of the higher resolution image was then inverted back. For the low-resolution scene this process resulted in the increased spatial resolution and added high frequency detail. The enhanced spatial resolution was gained without altering the mean magnitudes of lower resolution SST values (ASTER original data). This spectral preserving capacity makes the wavelet method particularly useful when the quality of data is different between the sensors and the measurement accuracy of the lower resolution sensor had to be preserved.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	25
1.1 Contexto e natureza do trabalho	25
1.2 Motivação	27
1.3 Objetivos e hipóteses	29
1.4 Estrutura do trabalho.....	30
CAPÍTULO 2 - SENSORIAMENTO REMOTO NO INFRAVERMELHO.....	33
2.1 Principais sensores que operam no infravermelho termal.....	33
2.2 Obtenção da TSM através de sensores termais.....	36
2.2.1 Métodos tradicionais baseados em dados de campo.....	39
2.2.2 Método multicanal.....	40
2.2.3 Método multivisada.....	42
2.2.4 Método múltiplas alturas	44
2.2.5 Método da separação entre temperatura e emissividade.....	45
CAPÍTULO 3 - FUSÃO DE IMAGENS MULTISENORES	47
3.1 Fusão através de composição colorida RGB	48
3.2 Fusão através de transformação IHS	48
3.3 Fusão através de combinações aritméticas	50
3.4 Fusão através de análise por componentes principais	51
3.5 Fusão através de filtragem passa altas	53
CAPÍTULO 4 - FUSÃO ATRAVÉS DE TRANSFORMADA WAVELET.....	55
4.1 Filtragem espacial de frequências e análise em múltiplas resoluções	56
4.2 O que são funções <i>wavelets</i>	58
4.3 Principais funções <i>wavelets</i>	60
4.4 A transformada <i>wavelet</i>	63
4.5 Implementação da transformada <i>wavelet</i> no processo de fusão de imagens	66
4.6 Principais métodos de fusão empregando transformada <i>wavelet</i>	69
CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
5.1 Seleção da área de estudo	77
5.2 Obtenção dos dados de entrada.....	79
5.2.1 Obtenção dos dados de campo.....	79
5.2.2 Obtenção das imagens com o sensor HSS.....	81
5.2.2.1 O sensor HSS.....	81
5.2.2.2 Aquisição e processamento dos dados através do sensor HSS.....	84
5.2.3 Obtenção das imagens com o sensor ASTER.....	86

5.2.3.1 O satélite TERRA e o sensor ASTER.....	86
5.2.3.2 Obtenção e processamento dos dados do sensor ASTER.....	88
5.3 Alinhamento dos dados para o processo de fusão	90
5.4 Fusão das imagens dos sensores HSS e ASTER.....	95
5.4.1 O algoritmo <i>Wavefusion</i>	96
5.4.2 Usando o <i>Wavefusion</i> para fusão das imagens	97
5.5 Avaliação dos resultados	100
5.5.1 Avaliação dos resultados individuais.....	100
5.5.2 Avaliação dos resultados da fusão.....	100
5.5.2.1 Avaliação qualitativa dos resultados da fusão.....	101
5.5.2.2 Avaliação quantitativa dos resultados da fusão.....	101
5.5.2.2.1 Avaliação dos histogramas.....	101
5.5.2.2.2 Avaliação das médias e variâncias.....	102
5.5.2.2.3 Avaliação da média e variância da imagem diferença.....	102
5.5.2.2.4 Avaliação utilizando dados de campo.....	103
5.5.2.2.5 Avaliação utilizando amostras aleatórias pareadas.....	103
CAPÍTULO 6- RESULTADOS E DISCUSSÕES	107
6.1 Resultados obtidos nas medidas de campo.....	107
6.2 Resultados obtidos com o sensor HSS.....	108
6.3 Resultados obtidos com o sensor ASTER.....	112
6.4 Resultados da fusão das imagens HSS e ASTER.....	115
6.4.1 Avaliação qualitativa	116
6.4.2 Avaliação quantitativa	118
6.4.2.1 Avaliação dos histogramas.....	119
6.4.2.2 Avaliação das médias e variâncias.....	121
6.4.2.3 Avaliação da média e da variância da imagem diferença.....	124
6.4.2.4 Avaliação utilizando dados de campo.....	125
6.4.2.5 Avaliação utilizando amostras aleatórias pareadas.....	128
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
APÊNDICE A.....	145

LISTA DE FIGURAS

- 2.1 – Componentes da radiação medida por um sensor termal.
- 4.1 – Variação do valor do nível digital ao longo de uma linha de uma imagem.
- 4.2 – Representação de onda (*wave*) senoidal e *wavelet*
- 4.3 – Função *wavelet* mãe e a função de escala de Haar.
- 4.4 – Função *wavelet* mãe e a função de escala da família Daubechies (ordens 2, 3, 4 e 20).
- 4.5 – Função *wavelet* mãe e a função de escala das famílias Symmlet (ordens 1 e 5) e Coiflets (ordens 3 e 7).
- 4.6 – Processo de aplicação da transformada *wavelet* sobre uma função unidimensional.
- 4.7 – Decomposição piramidal de uma imagem de um nível para outro.
- 5.1 – Composição colorida com as bandas 3, 2, e 1 do sensor ASTER da área de estudo.
- 5.2 – Distribuição espacial dos pontos para medição da temperatura superficial.
- 5.3 – Módulos do sensor HSS e a plataforma C-98B.
- 5.4 – Esquema óptico e ilustração do processo de varredura do sensor HSS.
- 5.5 – Órbitas diurnas adjacentes do sensor ASTER sobre a área de estudo.
- 5.6 – Comparação dos valores de temperatura derivados da imagem 2B03 original e os derivados da imagem 2B03 reamostrada para 88 m.
- 5.7 – Imagens do HSS (11m) e do produto 2B03 do ASTER reamostrada para 88m.
- 5.8 – Interfaces gráficas do algoritmo *Wavefusion*.
- 5.9 – Representação da análise em múltiplas resoluções da imagem do HSS.
- 6.1 – Isotermas obtidas através de interpolação e extrapolação dos dados superficiais de temperatura da água medidos com o Thermopoint 20EM.
- 6.2 – Composição colorida com os canais 7 (0,628 μ m), 4 (0,541 μ m) e 1 (0,456 μ m) do sensor HSS.
- 6.3 – Composição colorida com os canais 7 (0,628 μ m), 4 (0,541 μ m) e 1 (0,456 μ m) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. Imagem da primeira componente principal (CP1) dos seis canais do IVT. Composição colorida utilizando-se a imagem CP1 (vermelho) e os canais 7 (verde) e 4 (azul), respectivamente.
- 6.4 – Duas cenas da área de estudo obtidas através do sensor ASTER no dia 09/out/2003 às 10:17h local.
- 6.5 – Valores de temperatura obtidos em campo e derivados das imagens do HSS e do ASTER.
- 6.6 – Imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e as sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Brislawn2, Silva66, Haar, Symmlet04 e db03.
- 6.7 – Histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2.
- 6.8 – Histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 reamostradas para 88 de resolução espacial.

- 6.9 – Valores de temperatura derivados da imagem de entrada ASTER 2B03 e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2.
- 6.10 – Regressões lineares entre os valores de temperatura derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2.
- 6.11 – Regressões lineares entre os valores de temperatura dos 100 pontos derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles pareados obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2.

LISTA DE TABELAS

- 5.1 – Características dos canais termais do sensor HSS.
- 5.2 – Características do sensor ASTER.
- 5.3 – Funções *wavelets* implementadas no algoritmo *wavefusion*.
- 6.1 – Resumo da avaliação qualitativa.
- 6.2 – Valores de média e desvio padrão das imagens de entrada e sintéticas com 11 e 88 metros de resolução espacial.
- 6.3 – Valores de média e desvio padrão das imagens diferença.
- 6.4 – Coeficientes das regressões e valores do teste estatístico.
- 6.5 – Coeficientes das regressões e valores do teste estatístico (amostra aleatória de 100 pontos na água).

LISTA DE SÍMBOLOS

\Re - Conjunto dos números reais

π - Número PI

ε Emissividade

ρ Reflectância

M Emitância

L Radiância

T Temperatura

λ Comprimento de onda

τ Transmitância

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTER	- Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer
ATSR	- Along-Track Scanning Radiometer
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
CDTN	- Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEM	- Comissão Nacional de Energia Nuclear
DAR	- Data Acquisition Request
ENVI	- Environment for Visualizing Images
ERSDAC	- Earth Remote Sensing Data Analysys Center
ETM+	- Enhanced Thematic Mapper
FOV	- Field Of View
GFOV	- Ground-projected Field Of View
GIFOV	- Ground-projected Instantaneous Field Of View
GPS	- Global Positioning System
HDF	- Hierarchial Data Format
IFOV	- Instantaneous Field Of View
HSS	- HyperSpectral Scanner System
IFOV	- Instantaneous Field Of View
MODIS	- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
NETD	- Noise Equivalent Temperature Difference
SIVAM	- Sistema de Vigilância da Amazônia
SWIR	- Short-wave InfraRed
TSM	- Temperatura da superfície do mar

TIR - Thermal InfraRed

VNIR - Visible and Near InfraRed

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Contexto e Natureza do Trabalho

Ao longo dos últimos anos o avanço tecnológico na área de sensoriamento remoto tornou disponível um crescente número de modernos e sofisticados sistemas sensores capazes de gerar imagens em diferentes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas. Muitas das plataformas orbitais lançadas recentemente levam a bordo diversos sensores com características distintas e essa tendência deve persistir nos próximos anos.

Esse salto tecnológico também impulsionou o desenvolvimento de sensores que operam nas faixas espectrais do infravermelho médio e termal, os quais são extremamente importantes pela característica singular de seus dados e pelo elevado leque de aplicações que proporcionam. Atualmente, esses sensores já possuem resoluções espaciais e espectrais que permitem a investigação de importantes processos térmicos de escala local que ocorrem em ambientes marinhos e zonas costeiras, tais como as ressurgências, os vórtices de mesoescala e as plumas termais decorrentes de poluição e despejo de água de rios na região costeira.

Processos termais de maior escala que ocorrem nos oceanos como os vórtices, as ressurgências, dentre outros, têm sido estudados com dados gerados pelo sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) dos satélites da série NOAA, o qual possui dois canais no infravermelho termal com resolução espacial de 1,1 Km através dos quais é possível derivar a temperatura superficial da água do mar com acurácia média de 0,5K (BARTON, 1995). Nessa mesma categoria de sensor podemos citar o MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o ATSR (*Along-Track Scanning Radiometer*). Infelizmente, embora possuam excelentes características radiométrica e temporal, a resolução espacial desses sensores não é adequada para o estudo de fenômenos que ocorrem em escalas local e regional. Essa limitação pode ser

superada com dados dos sensores TM (*Thematic Mapper*) e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) a bordo dos satélites da série LANDSAT, os quais possuem uma única banda no infravermelho termal com resolução espacial de 120m e 60m, respectivamente. Cabe ressaltar que o ETM+ está fora de operação desde 2002.

O lançamento do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), a bordo da plataforma TERRA, em meados de 1999, abriu uma grande possibilidade para o emprego de sensores orbitais no entendimento dos fenômenos termais de pequena escala em virtude de suas excelentes características espaciais, espectrais e radiométricas. Possui cinco canais no infravermelho termal com resolução espacial de 90 m, através das quais é possível a derivação operacional da temperatura superficial dos alvos com acurácia de 0,5 K (GILLESPIE *et al.*, 1998).

O emprego de sensores termais instalados em plataformas aéreas é, sem dúvida, o mais desejável para mapear feições térmicas de pequena escala em virtude da melhor resolução espacial e temporal que podem oferecer. Entretanto, esses tipos de sensores ainda estão bastante restritos ao emprego militar em função de seu elevado custo e pelo potencial de aplicação de seus dados. Como exemplo podemos citar o sensor HSS (*HyperSpectral Scanner*) que equipa uma das aeronaves recentemente adquirida dentro do projeto SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia). Possui 50 canais, sendo seis no infravermelho termal, e pode gerar imagens nos espectros visível e infravermelho termal com resoluções espaciais inferiores a 10 m.

Como podemos notar, existem atualmente sensores que operam na faixa espectral do infravermelho disponíveis com características que tendem a tornar viáveis estudos visando a caracterização de fenômenos termais locais e a tendência é que esse quadro evolua em um futuro próximo, tanto em qualidade quanto em quantidade.

A comunidade científica rapidamente incorporou essa disponibilidade de dados em suas metodologias de análise, fato que acabou impulsionando o desenvolvimento de técnicas de processamento que fossem capazes de explorar a natureza multisensor, multispectral, multiresolução e multitemporal dos dados de sensoriamento remoto, dentre elas a fusão de imagens multisensores.

Diversos métodos de fusão de imagens têm sido disponibilizados em aplicativos comerciais para combinar imagens de sensores distintos de forma a se obter um produto híbrido com as melhores características individuais de cada uma das imagens de entrada (POHL, 1999; YÉSOU *et al.*, 1993; CHAVEZ *et al.*, 1991; ZHOU *et al.*, 1998; CLICHE *et al.*, 1985; TROYA, 1999; MARCELINO *et al.*, 2003). Entretanto, muitos desses métodos têm sido desenvolvidos e testados com foco nos dados obtidos por sensores operando no espectro visível e raramente são voltados para aplicações práticas e operacionais. Além disso, o maior problema com alguns desses métodos é que, embora sejam capazes de melhorar a característica espacial, freqüentemente introduzem distorções no conteúdo espectral dos pixels originais da imagem.

Mais recentemente, abordagens para fusão de imagens que empregam o conceito de análise em múltiplas resoluções através da transformada *wavelet* têm sido propostas (LI *et al.*, 1995; GARGUET-DUPORT *et al.*, 1996; YOCKY, 1996; ZHOU *et al.*, 1998; RANCHIN e WALD, 2000; VENTURA, 2002; DU *et al.*, 2003). A principal vantagem dessas abordagens é a capacidade de preservar a informação espectral das imagens de entrada no produto final.

1.2 – Motivação

Em meados de 2001 o CDTN/CNEM consultou o INPE sobre um possível estudo com objetivo de investigar a possibilidade do emprego de dados de sensoriamento remoto para mapear e caracterizar a temperatura da água do mar nas vizinhanças das Centrais Nucleares. Posteriormente esse interesse derivou para o estudo da pluma termal (variações de temperatura associadas com a descarga de água aquecida) marinha gerada nas adjacências da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto em Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, Brasil.

Devido ao elevado custo e tempo necessário para fazer o mapeamento desses fenômenos, os quais apresentam um caráter dinâmico, através de metodologias convencionais utilizando embarcações, torna-se imperativo o emprego sensores remotos aeroembarcados e/ou orbitais para esse propósito. De fato, os dados gerados através desses sensores são muito vantajosos comparativamente aos convencionais, uma vez

que proporcionam uma visão sinóptica do fenômeno, com relativa frequência e rapidez, além do custo geralmente inferior. Pesquisas conduzidas por Stevenson *et al.* (1983a,b) já apontavam para o potencial do uso de sensores remotos para esse tipo de aplicação.

Por volta da mesma época, o INPE teve um Anúncio de Oportunidade aprovado pela NASA através do ERSDAC (*Earth Remote Sensing Data Analysis Center*) para adquirir e utilizar imagens dos canais termais do sensor ASTER com intuito de mapear a pluma termal. Em paralelo, pesquisadores do CTA (Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial) através do IEAv (Instituto de Estudos Avançados), estavam realizando uma campanha de avaliação do sensor HSS. Uma das metas dessa campanha era verificar o desempenho geométrico e radiométrico dos canais termais do sensor. Viu-se aí a oportunidade de empregar conjuntamente os dados dos dois sensores (ASTER e HSS) para a aplicação pretendida, já que a área de estudo também reunia as características desejáveis para testar o desempenho dos canais termais do sensor HSS.

A combinação desses fatores isolados, ou seja, a necessidade de mapear a pluma termal adjacente a Central Nuclear de Angra dos Reis, a disponibilidade de dados de diferentes sensores próprios para estudo de fenômenos termais locais, o estágio atual de desenvolvimento das rotinas de processamento de imagens, especialmente no campo da fusão de imagens e a necessidade de pesquisa na esfera da caracterização de fenômenos termais locais motivaram o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, cabe ressaltar que o estudo de fenômenos termais no Brasil (ou mesmo no exterior) tem se restringido àqueles de maior escala, principalmente pela, até então, carência de sensores adequados para esse propósito. O mapeamento de feições termais em escalas locais ou regionais exige sensores com melhores resoluções espaciais, radiométricas, espectrais e até temporais. Além disso, a motivação de trabalhar com fusão de imagens é ampla. Uma delas é a variedade de sensores atuais e planejados, o que abre incontáveis possibilidades de fusão/integração de dados. Por outro lado, temos de ter em mente a idéia que a fusão serve para combinar dados de diferentes sensores para prover mais informações, e assim reduzir, através da síntese, o volume de informação na fase de análise.

1.3 – Objetivos e Hipóteses

Dentro do contexto exposto, em contraposição a escassez de trabalhos anteriores e face à relevância do imageamento na faixa espectral do infravermelho termal, o objetivo geral deste trabalho é investigar o uso isolado de sensores remotos, orbitais e aeroembarcado, para a detecção e a caracterização da pluma termal que ocorre nas adjacências da Central Nuclear de Angra dos Reis. Além disso, pretende-se testar e viabilizar uma metodologia que permita integrar, de modo sinérgico, esses dados através de processos de fusão.

Com base nos objetivos propostos foram formuladas duas hipóteses básicas: a primeira é que é possível detectar e caracterizar feições termais de escala local (pluma) a partir das imagens individuais obtidas pelos sensores HSS e ASTER e a segunda é que o uso sinérgico destas imagens, através de processos de fusão, pode produzir resultados mais adequados e úteis que aqueles obtidos individualmente, reduzindo o volume de dados, superando limitações individuais e reunindo toda informação essencial em um único produto.

Para testar essas hipóteses e atingir os objetivos do trabalho, foi proposta uma abordagem onde foram empregadas imagens obtidas simultaneamente pelo sensor orbital ASTER e pelo aeroembarcado (HSS), além de medidas *in situ* da temperatura superficial da água do mar (TSM) sobre a pluma de água quente gerada pela descarga, no oceano, de água aquecida proveniente da refrigeração dos reatores da Usina Nuclear de Angra dos Reis, a qual possui as características de um fenômeno termal de escala local.

Em uma primeira etapa, os dados obtidos com cada um dos sensores foram avaliados individualmente com a finalidade de verificar sua aplicabilidade para o estudo da dinâmica da pluma termal, sua morfologia, gradientes de temperatura, características e relação com forçantes ambientais. O objetivo dessa etapa foi verificar a primeira hipótese.

A outra etapa teve por objetivo verificar a segunda hipótese e envolveu o emprego de métodos de fusão de imagens através da transformada *wavelet* para obtenção de uma imagem híbrida, obtida da combinação das imagens individuais dos sensores empregados e que reunisse as melhores características de cada uma delas. Neste caso, o interesse foi combinar em uma única imagem a informação espacial da imagem do HSS com a informação espectral da imagem do ASTER.

Com base nas hipóteses formuladas e nos objetivos gerais, foram definidos ainda os seguintes objetivos específicos:

- 1) Apresentar para a comunidade científica as características e potencialidades dos sensores HSS e ASTER para mapeamento da pluma termal;
- 2) Verificar a adequação e a aplicabilidade (avaliar e validar) dos dados derivados dos sensores ASTER e HSS para caracterização da pluma termal que ocorre nas adjacências da Usina Nuclear de Angra dos Reis, atendendo a necessidade de resolver um problema prático;
- 3) Identificar a influência das diferentes características espaciais, espectrais e radiométricas dos sensores empregados para esse tipo de aplicação;
- 4) Explorar o potencial do uso das técnicas de fusão de imagens, mais especificamente as baseadas em transformada *wavelet* e análise em múltiplas resoluções, para integrar imagens termais de diferentes sensores com propósito de fornecer subsídios a pesquisadores interessados em estudar fenômenos termais locais que ocorrem em ambientes marinhos e zonas costeiras.

1.4 – Estrutura do Trabalho

Para orientar a leitura deste trabalho, este se encontra estruturado da forma descrita a seguir.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral e a fundamentação teórica básica sobre imageamento na faixa espectral do infravermelho termal, alguns dos principais sensores

operando nesta faixa espectral e os principais métodos empregados para derivar a temperatura superficial dos alvos. No Capítulo 3 são discutidos aspectos sobre fusão de imagens multisensores, a definição, os objetivos e as principais metodologias empregadas. No Capítulo 4 são tratados aspectos sobre a transformada *wavelet* e seu emprego em processos de fusão de imagens. No Capítulo 5 são abordados os meios e os métodos empregados para aquisição dos dados e dos resultados. No Capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2

SENSORIAMENTO REMOTO NO INFRAVERMELHO TERMAL

O objetivo deste Capítulo é oferecer uma descrição resumida de como os sensores remotos que operam na faixa espectral do infravermelho termal adquirem seus dados e como esses dados são processados para estimar o valor da temperatura superficial, mais especificamente a temperatura da superfície do mar (TSM).

A TSM é uma variável fundamental para validação de modelos acoplados de oceano-atmosfera, uma vez que todos os processos de troca de gases e de calor ocorrem através da camada milimétrica que separa o oceano da atmosfera. Essa camada superficial modulada pela temperatura é também responsável pelos processos de transferência de calor latente do mar para a atmosfera de modo que seu conhecimento é de vital importância para estudos climáticos em geral. Um caso conhecido de aplicação da TSM é o monitoramento do fenômeno *El Niño*. Dados de TSM obtidos por sensores orbitais também têm sido utilizados para estudos de dinâmica oceânica e de processos tais como ressurgências costeiras, vórtices de mesoescala, produtividade primária, poluição marinha, frentes oceânicas, dentre outros.

2.1 – Principais Sensores que Operam no Infravermelho Termal

Devido à crescente importância e necessidade da derivação da temperatura superficial a partir de sensores remotos, diversos sensores, tanto orbitais quanto aerotransportados, estão em operação e muitos estão disponíveis aos usuários interessados.

Estimativas globais de TSM através de sensoriamento remoto vêm sendo feitas a partir dos satélites ambientais NOAA desde a década de 70, particularmente a partir dos satélites operacionais de órbita polar TIROS-N. Desde o lançamento do sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) a bordo do satélite NOAA-7, em junho

de 1981, a estimativa da TSM para os oceanos tem sido feita de forma operacional e consistente.

O AVHRR é o sensor mais amplamente utilizado para as estimativas de TSM. Possui três canais no infravermelho termal (IVT) (3,7 μm , 10,8 μm e 12 μm) com resolução espacial de 1,1 Km (nadir) e permite derivar a temperatura superficial da água do mar com acurácia média de 0,5 K (BARTON, 1995). Os satélites da série NOAA possuem uma órbita heliosíncrona e passam pelo mesmo local diariamente na mesma hora solar. A órbita é quase-polar e a uma altitude de 850 km. A NOAA opera dois satélites ao mesmo tempo, com órbitas separadas por aproximadamente 90 graus em longitude. Isso confere uma grande resolução temporal, uma vez que um mesmo local é visitado a cada seis horas. A largura da faixa imageada é de aproximadamente 3000 km.

O ATSR (*Along-Track Scanning Radiometer*) foi lançado a bordo do satélite ambiental ERS-1 e ERS-2 em 1991 e 1995, respectivamente. Atualmente uma nova versão do sensor está a bordo do satélite ENVISAT, lançado em 2002, e denomina-se AATSR (*Advanced ATSR*). A órbita é heliosíncrona, quase-polar e a uma altitude de 850 km. Possui três canais no IVT (3,7 μm , 10,8 μm e 12 μm), os mesmos do AVHRR, mas com resolução espacial de 1,0 Km (nadir). O ATSR foi planejado e construído para reduzir tanto quanto possível as incertezas na derivação da TSM a partir de sensores orbitais. Possui um sofisticado sistema de varredura cônica que permite imagear um mesmo alvo próximo ao nadir (entre 0 e 22°) e em visada oblíqua (~ 55°). A resolução temporal é de 3 dias.

O GLI (*Global Imager*) foi desenvolvido pela agência espacial japonesa para estudos da cor do mar e da TSM. Sucessor do OCTS (*Ocean Color and temperature scanner*), voou a bordo do satélite ADEOS-II (*Advanced Earth Observing Satellite – II*) entre 2002 e 2003. Possuía sete canais no infravermelho termal com resolução espacial de 1,1 km.

O MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) foi lançado a bordo dos satélites TERRA (1999) e AQUA (2002) como parte da missão EOS (*Earth Observing*

System) da NASA. Possui 36 bandas espectrais na faixa espectral compreendida entre 0,4 μm e 14 μm com 1 km de resolução espacial. A inclusão de canais termais entre 3,5 e 4 μm lhe confere uma melhor correção para a atenuação do vapor d'água nos algoritmos noturnos, especialmente em regiões tropicais.

O satélite TERRA inclui também o sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer*) o qual possui cinco canais no infravermelho termal com resolução espacial de 90 m, além de um sofisticado sistema de calibração dos detectores.

Os sensores TM (*Thematic Mapper*) e ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) a bordo dos satélites da série LANDSAT possuem uma única banda no infravermelho termal com resolução espacial de 120 m e 60 m, respectivamente. Devido ao fato de possuírem apenas uma banda no IVT, não existem algoritmos operacionais para determinação da temperatura superficial dos alvos imageados, restringindo a aplicação de seus dados para estudos apenas qualitativos.

O satélite meteorológico GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) possui três canais no infravermelho com resolução espacial de 4 km. Os satélites desta série possuem órbita geossíncrona a cerca de 36000 km da Terra, o que lhe confere uma altíssima resolução temporal (de 1 hora).

Como exemplo de sensor aerotransportado pode ser citado o sensor HSS (*HyperSpectral Scanner*) que equipa uma das aeronaves recentemente adquirida dentro do projeto SIVAM. Possui 50 canais (sendo seis no infravermelho termal) e pode gerar imagens termais com resolução espacial inferior a 10 m.

Por fim, cabe ressaltar que também é possível determinar a temperatura da superfície do oceano a partir de dados obtidos por sensores que operam na faixa espectral das microondas como, por exemplo, o TMI (*TRMM Microwave Imager*), o MIMR (*Multifrequency Imaging Microwave Radiometer*) e o AMSR (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*). Apesar da possibilidade de imageamento independentemente

das condições atmosféricas e da iluminação solar, estes tipos de sensores possuem, ainda, resolução espacial adequada apenas para estudos de escala global.

2.2 – Obtenção da TSM Através de Sensores Termiais

A determinação da TSM é baseada na lei de radiação de Planck, a qual relaciona a emitância $M(\lambda, T)$ de um corpo negro (emissividade igual a 1) com a sua temperatura (T) para um dado comprimento de onda (λ). Entretanto, os objetos naturais não são corpos negros e possuem emissividade (razão entre a radiação emitida por um objeto e a emitida por um corpo negro na mesma temperatura e num dado comprimento de onda) menor que 1. Para esses objetos, a função de Planck deve ser multiplicada pelo valor da emissividade $e(\lambda)$. A medida observada pelo sensor é a radiância $L(\lambda, T)$, a qual, para superfícies Lambertianas (emitem radiação uniformemente em todas as direções), como pode ser considerado o oceano no IVT, está relacionada com a emitância $M(\lambda, T)$ através da seguinte relação (ROBINSON, 1985):

$$M(\lambda, T) = \frac{\rho L(\lambda, T)}{e(\lambda)}. \quad (2.1)$$

Assim, sabendo-se o valor da radiância $L(\lambda, T)$ e da emissividade $e(\lambda)$ de uma dada superfície, pode-se determinar sua emitância $M(\lambda, T)$ e, através da inversão da função de Planck, calcular sua temperatura real. Para a superfície do mar no IVT, o valor da emissividade é aproximadamente 0,98 (quase um corpo negro) e varia muito pouco, na faixa espectral de 3 a 14 μm , com a temperatura, comprimento de onda, rugosidade da superfície e com ângulos de visada menores que 50°.

Entretanto, para que esta formulação seja aplicável, é necessário levar em conta, na radiância medida pelo sensor, os efeitos causados pela atmosfera interveniente entre o alvo e o sensor, os quais são uma das maiores fontes de incerteza na derivação da TSM a partir de sensoriamento remoto. A presença de nuvens é extremamente crítica e inviabiliza a derivação da temperatura de superfícies encobertas. Em condições de céu claro, o maior efeito é o da absorção pelo vapor d'água, o qual é altamente variável no

espaço e no tempo. Outros absorvedores são o dióxido de carbono e o ozônio. Devido a influência conjunta destes componentes, existem apenas duas janelas atmosféricas (3 a 5 e 8 a 14 μm) utilizadas para derivar a TSM a partir de sensores infravermelho, cabendo salientar que a janela de 3 a 5 μm , embora seja menos afetada pelos efeitos do vapor d'água, é normalmente utilizada somente para cenas noturnas para evitar contaminação por radiação solar diurna refletida pela superfície do oceano.

Considerando-se uma atmosfera em equilíbrio termodinâmico, livre de nuvens e ainda que a superfície reflète radiação incidente isotropicamente, a radiância medida por um sensor corresponde à soma de três termos: (1) a radiância emitida pela superfície e atenuada pela atmosfera, (2) a radiância emitida pela atmosfera na direção do sensor e (3) a radiância emitida pela atmosfera para baixo, a qual é refletida pela superfície na direção do sensor (Figura 2.1).

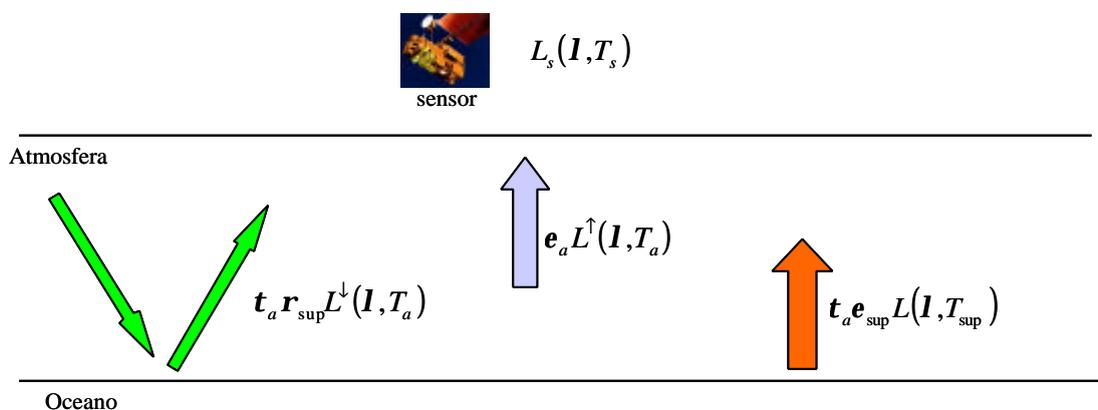


FIGURA 2.1 – Componentes da radiação medida por um sensor termal.

Esses termos, para um dado comprimento de onda, podem ser relacionados e expressos a partir da seguinte equação (SCHOTT, 1997):

$$L_s(\mathbf{l}, T_s) = t_a e_{\text{sup}} L(\mathbf{l}, T_{\text{sup}}) + e_a L^{\uparrow}(\mathbf{l}, T_a) + t_a r_{\text{sup}} L^{\downarrow}(\mathbf{l}, T_a), \quad (2.2)$$

onde $L_s(\mathbf{I}, T_s)$ é a radiância medida pelo sensor associada a um corpo negro de temperatura T_s ; $L(\mathbf{I}, T_{\text{sup}})$ é a radiância de corpo negro da superfície a uma temperatura T_{sup} ; $L^\uparrow(\mathbf{I}, T_a)$ é a radiância de corpo negro da atmosfera a uma temperatura média T_a e emitida para cima; $L^\downarrow(\mathbf{I}, T_a)$ é a radiância da atmosfera emitida para baixo; t_a é a transmitância da atmosfera; e_{sup} e e_a são as emissividades da superfície e da atmosfera, respectivamente, e r_{sup} é a reflectância da superfície.

De acordo com a lei de Kirchoff, a emissividade da atmosfera (e_a) é igual a $1 - t_a$ e a emissividade da superfície é igual a $1 - r_{\text{sup}}$. Como o coeficiente de reflexão da água é pequeno na faixa espectral do infravermelho termal, o último termo da equação (1) é muito próximo de zero e pode ser eliminado. Desta forma, a equação de transferência radiativa pode ser reduzida para:

$$L_s(\mathbf{I}, T_s) = t_a L(\mathbf{I}, T_{\text{sup}}) + (1 - t_a) L^\uparrow(\mathbf{I}, T_a), \quad (2.3)$$

e assim, conhecendo-se $L_s(\mathbf{I}, T_s)$ (medida do sensor), t_a e $L^\uparrow(\mathbf{I}, T_a)$, é possível determinar o valor da radiância da superfície sem os efeitos da atmosfera $L(\mathbf{I}, T_{\text{sup}})$ e a partir deste calcular a temperatura da superfície baseado na função de Planck. O desafio então passa a ser a determinação dos parâmetros t_a e $L^\uparrow(\mathbf{I}, T_a)$ para que a equação (2.3) possa ser resolvida.

A diversidade de metodologias para derivação da TSM está diretamente relacionada com as diferentes abordagens utilizadas para determinar estes valores ou inferir sob seus efeitos na medida obtida pelo sensor. Um aspecto relevante é a necessidade de emprego de sensores calibrados para que seja possível converter o sinal medido remotamente (normalmente expressos em valores de níveis digitais) para valores de radiância.

2.2.1 – Métodos Tradicionais Baseados em Dados de Campo

Existem basicamente duas abordagens que utilizam dados de campo obtidos simultaneamente ao imageamento para geração de mapas de temperatura da superfície do oceano. Numa delas, os dados de campo são medidas de temperatura tomadas em pontos da superfície simultaneamente ao seu imageamento. A idéia é estabelecer uma correlação direta entre os valores da temperatura superficial obtidos em campo com os respectivos valores obtidos na imagem (ND). Nesta abordagem a etapa de correção dos efeitos atmosféricos é descartada e os valores de TSM podem ser obtidos através de regressão linear direta entre os valores medidos pelo sensor e os obtidos nas medidas em campo. Este tipo de método pode ser aplicado para sensores com apenas um canal termal (ETM+, por exemplo), mesmo os desprovido de sistema de calibração. Fica explícita a consideração de que os coeficientes da regressão são igualmente aplicáveis para toda a imagem (atmosfera espacialmente uniforme). Requer que os pontos amostrados sejam espacialmente distribuídos e contenham todo o campo dinâmico de variação da grandeza sendo medida.

Na outra abordagem, os dados de campo são medidas de parâmetros necessários para calcular e corrigir efetivamente os efeitos causados pela atmosfera (por exemplo, o valor da transmitância atmosférica e o da radiação emitida pela própria atmosfera) e são normalmente obtidos através de sondagens atmosféricas feitas simultaneamente ao imageamento, onde são levantados parâmetros de concentração de vapor d'água, temperatura e pressão em cada nível (perfil atmosférico). Estes dados servem para alimentar modelos de transferência radiativa como, por exemplo, o MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance*), usados para correção dos efeitos atmosféricos. Estes modelos são especialmente atrativos em virtude de poderem ser aplicados para qualquer tipo de imagem, isto é, não requerem sofisticação do sensor empregado (visada múltipla ou diversidade de bandas). Algumas vezes os dados de campo são estimados através de padrões já estabelecidos nestes modelos. A acurácia desta abordagem depende da qualidade dos dados obtidos sobre a atmosfera. Schott (1997) sugere acurácia menor que 1°C se a sondagem atmosférica ocorrer

simultaneamente ao imageamento. Esta é a abordagem mais direta para a estimativa da TSM.

2.2.2 – Método Multicanal

O método multicanal baseia-se no princípio de que a atmosfera atua diferentemente em bandas espectrais distintas. Considera-se que a transmitância da atmosfera é diferente para cada canal e que esta diferença é, principalmente, devido à absorção pelo vapor d'água. Por esta razão esta abordagem também é conhecida como técnica de absorção diferencial.

Segundo Schott (1997), em atmosferas e para faixas espectrais onde predominam efeitos de absorção, a transmitância em um dado canal pode ser expressa em função do coeficiente de absorção (ou extinção). Partindo de modelos de transferência radiativa (Equação 2.2), o mesmo mostrou que a temperatura de brilho e o coeficiente de absorção possuem uma relação linear em um dado canal e que, conhecendo-se os valores destes dois termos em dois canais distintos, é possível, através de regressão linear, derivar o valor da temperatura superficial (coeficiente linear da regressão). Esta abordagem teórica pode ser utilizada independentemente de dados de campo para derivar a TSM a partir de sensores multiespectrais.

Entretanto, o método multicanal tem sido empregado atualmente de modo empírico, onde dados de sensores (temperatura de brilho ou radiância) são utilizados conjuntamente com dados de campo para derivar coeficientes de algoritmos desenvolvidos para derivar a TSM.

Esta abordagem, que vem sendo utilizada desde 1981 com as medidas obtidas pelo sensor AVHRR e mais recentemente com as do sensor MODIS, teve início com o trabalho de McMillin (1975), que mostrou que uma simples combinação linear de radiâncias medidas em dois canais poderia fornecer uma boa estimativa da radiância emitida pela superfície e, como conseqüência, sua temperatura. Mais tarde McMillin e Crosby (1984) comprovaram uma relação linear direta entre a TSM e as temperaturas de brilho medidas em dois canais, a qual, segundo Barton (1995), pode ser expressa em uma equação da forma:

$$TSM = aT_i + b(T_i - T_j) + c, \quad (2.4)$$

onde T_i e T_j representam as temperaturas de brilho nos canais i e j e a , b e c são coeficientes determinados empiricamente. No caso dos dados obtidos pelo AVHRR, a determinação destes coeficientes é feita através de regressão linear entre temperaturas de brilho obtidas pelo sensor e temperaturas obtidas *in situ* por bóias de deriva. Para os dados do MODIS, a determinação dos coeficientes é feita empregando-se modelos de transferência radiativa e um conjunto representativo de perfis atmosféricos, obtidos em cinco ângulos zenitais distintos. Os algoritmos MCSST (*Multi Channel Sea Surface temperature*), o CPSST (*Cross Product SST*) e o NLST (*Non Linear SST*) desenvolvidos para derivar TSM a partir dos dados do sensor AVHRR empregam esta formulação. Nos dois últimos algoritmos, a relação entre TSM e temperatura de brilho é tratada com não linear. Outra variação do algoritmo inclui a utilização de um termo de correção para o ângulo de visada do sensor (quanto maior o ângulo de visada, maior o caminho percorrido pela radiação e, portanto, maior a atenuação pelo vapor d'água) (SINGH, 1984).

Os algoritmos que empregam três canais (3,7 μm , 11 μm e 12 μm) são chamados *triple window*, sendo utilizados somente para cenas noturnas para evitar contaminação no canal 3,7 μm por radiação solar diurna refletida pela superfície do oceano. Entre os algoritmos que empregam dois canais, tem-se o *dual window*, que utiliza canais em diferentes janelas atmosféricas (3,7 μm e 11 μm), e o *split window* que utiliza canais dentro da mesma janela atmosférica (11 μm e 12 μm). Segundo Barton (1995), a acurácia global dos algoritmos MCSST é de $\pm 0,7^\circ\text{C}$. A do MODIS é $0,45^\circ\text{C}$ no nadir e $0,56^\circ\text{C}$ a 45° .

As incertezas na medida da TSM através desta metodologia estão associadas ao nível de ruído dos detectores, presença de pequenas nuvens não detectáveis pelo campo de visada do sensor, efeitos atmosféricos não modelados no método e presença de aerossóis. No caso do AVHRR, deve-se ainda levar em consideração que os coeficientes dos algoritmos são determinados através de relação entre a temperatura de superfície

obtida pelo sensor (temperatura de pele ou *skin*) e a temperatura medida por bóias de deriva, as quais medem a temperatura a uma certa profundidade (temperatura de balde ou *bulk*). Segundo Emery *et al.* (1995), a temperatura de pele é em média 0,3°C mais fria que a temperatura de balde.

2.2.3 – Método Multivisada

Desenvolvido inicialmente para emprego a partir de dados coletados por sensores aeroembarcados, o método multivisada baseia-se no fato de que as radiâncias medidas de um mesmo alvo através de dois ângulos de visada distintos, num mesmo canal, variam somente devido a diferença de trajetória (alvo-sensor) percorrida pela radiação.

Aplicações deste método para dados obtidos com sensores aeroembarcados foram sugeridas por Byrnes e Schott (1986) e Schott (1979). A estratégia consiste em imagear uma mesma área a partir de dois ângulos de visada distintos e conhecidos, sendo um deles, por simplicidade, igual a zero (visada vertical). Para tanto, a aeronave deve imagear a mesma cena em duas passagens paralelas na mesma altura. A distância entre as duas faixas é calculada em função do ângulo da visada oblíqua e da faixa de varredura total do sensor, uma vez que os alvos de interesse devem aparecer em ambas as passagens.

Analisando-se as duas imagens geradas, selecionam-se pontos comuns entre as mesmas que possuam valores de radiância distintos e anotam-se as radiâncias medidas nas visadas vertical e oblíqua. Através da regressão linear destas medidas e seguindo um modelo de transferência radiativa apropriado, é possível extrair os valores da transmitância atmosférica (coeficiente angular da regressão) e da radiação emitida pela atmosfera na direção do sensor, necessários para corrigir os efeitos causados pela atmosfera usando a equação (2.3). Segundo Schott (1979), esta metodologia permite estimar valores de TSM com acurácia de 0,5°C e pode ser aplicada para qualquer área plana de emissividade conhecida.

Vantagens deste método, quando aplicado a sensores aeroembarcados, incluem a não necessidade de dados de campo (medições de temperatura, sondagem atmosférica), a

aplicabilidade em situações onde não se pode variar altura sobre a cena e a possibilidade de poder ser usado com dados de sensores limitados a apenas um canal termal.

Com o lançamento do sensor ATSR no satélite ERS-1 em 1991, tornou-se disponível o primeiro sensor orbital capaz de imagear uma mesma área a partir de dois ângulos de visada distintos. O ATSR foi planejado e construído para reduzir tanto quanto possível as incertezas no cálculo da TSM a partir de sensores orbitais. Possui um sofisticado sistema de varredura cônica que permite imagear um mesmo alvo próximo ao nadir (entre 0 e 22°) e em visada oblíqua (~ 55°), além de possuir detectores com baixo nível de ruído em seus três canais termais e um preciso sistema de calibração interna composto por dois corpos negros de temperatura controlada.

Mesmo com a adição dos dois ângulos de visada para os três canais (seis combinações possíveis), a metodologia para derivar o valor da TSM a partir dos dados deste sensor segue uma formulação básica que ainda usa uma combinação linear de uma seleção de temperaturas de brilho. Neste método, a temperatura da superfície (T_s) obtida pelo sensor pode ser expressa em uma equação da forma:

$$T_s = a + b_{i,n}T_{i,n} + cb_{i,o}T_{i,o}, \quad (2.5)$$

onde i representa o canal empregado, $T_{i,n}$ e $T_{i,o}$ representam as temperaturas de brilho no canal i para visada nadir e para a visada oblíqua, respectivamente. Os termos a , b e c são coeficientes. Os algoritmos operacionais para dados do ATSR foram desenvolvidos antes do lançamento usando modelo de transferência radiativa e dados de sondagem atmosférica para determinação dos coeficientes. Na sua formulação considera-se que a atmosfera é horizontalmente homogênea na escala requerida para acomodar os dois ângulos de visada e que a variação angular da emissividade é desprezível para ângulos inferiores a 60°.

Os algoritmos operacionais, quatro no total, são descritos em Závody *et al.*, (1995). Cada algoritmo pode ser aplicado para três tipos de região (tropical, média latitude e polar) e diferentes épocas do ano. Outra característica destes algoritmos é a inclusão de

uma rotina que envolve uma série de testes para identificação de pixels livre de nuvens. Através destes algoritmos é possível estimar a temperatura de “pele” do oceano com acurácia de 0,3°C (BARTON *et al.*, 1995). Outra vantagem associada às características do ATSR é que a metodologia multicanal também pode ser aplicada juntamente com a multivisada. Simulações mostraram que o uso combinado destas metodologias produz resultados melhores que os obtidos por qualquer um dos métodos isoladamente.

2.2.4 – Método das Múltiplas Alturas

Este método é aplicável para derivação da TSM a partir de dados obtidos por sensores aerotransportados e utiliza o mesmo princípio do método multivisada, só que neste caso as diferentes trajetórias da radiação na atmosfera são exploradas através da variação de altura da plataforma. Schott (1975) emprega esta metodologia para medição da temperatura de superfícies aquáticas afetadas por descargas de água utilizada para resfriamento de reatores nucleares. Mais tarde, Schott (1979) desenvolveu uma combinação desta metodologia com o método multivisada para a mesma aplicação.

A estratégia consiste em imagear uma mesma área em diferentes alturas (no mínimo quatro, sendo uma delas o mais baixo possível) e visada próxima a vertical. Analisando as imagens, seleciona-se pontos com diferentes valores de radiância e que sejam comuns em todas as imagens. As radiâncias medidas são plotadas em função da altura em que foram obtidas e então extrapoladas para a altura zero, obtendo-se então a radiância real do alvo. De fato, a radiância extrapolada para a altitude zero é empregada como dado de campo.

Através da regressão linear destas medidas (radiância no sensor e radiância extrapolada para altura zero) e seguindo um modelo de transferência radiativa apropriado, é possível extrair os valores da transmitância atmosférica (coeficiente angular da regressão) e da radiação emitida pela atmosfera na direção do sensor (coeficiente linear), necessários para se proceder a correção dos efeitos causados pela atmosfera. Segundo Schott (1979), esta metodologia pode derivar valores de TSM com acurácia de 0,4°C. Vantagens deste método incluem a não necessidade de dados de campo e a acurácia.

2.2.5 – Método da Separação entre Temperatura e Emissividade

Os métodos multicanal e multivariado são baseados no conhecimento *a priori* da emissividade da superfície do oceano. Algoritmos do tipo TES (*Temperature and Emissivity Separation*) têm sido desenvolvidos para estimar a temperatura da superfície sobre qualquer tipo de alvo (aquáticos e terrestres) onde o valor da emissividade não é conhecido *a priori*. Neste caso, a temperatura e a emissividade devem ser derivadas conjuntamente, o que é uma tarefa difícil, visto que o número de indeterminações é maior que o de medidas obtidas pelo sensor (para um sensor de N canais, haverá $N+1$ variáveis: N emissividades e a temperatura).

Diversas metodologias para estimar a emissividade (ou razão entre as mesmas) a partir de sensores orbitais têm sido apresentadas: canal de referência, emissividade normalizada, razão espectral, resíduos alfa, máxima-mínima diferença de emissividade, dentre outros, todas citadas por (DASH *et al.*, 2002). Esta variedade de abordagens resulta das diferentes considerações assumidas para contornar o problema da indeterminação.

Um algoritmo do tipo TES foi especialmente desenvolvido para derivar como produtos operacionais a temperatura da superfície, apresentada em uma única imagem, e a emissividade, calculada para cada uma das bandas do sensor, da superfície a partir dos dados do sensor ASTER (GILLESPIE *et al.*, 1998). Sua concepção agrupa três técnicas distintas que operam em módulos separados: emissividade normalizada, razão de emissividades e máxima-mínima diferença entre as razões de emissividade. Simulações numéricas sugerem que este algoritmo é capaz de derivar valores de temperatura com acurácia de $1,5^{\circ}\text{C}$ e emissividades com acurácia de 0,015.

Os dados de entrada para aplicação do algoritmo TES são os derivados da correção atmosférica dos dados dos canais infravermelho (radiância da superfície) a partir de um algoritmo operacional também especialmente concebido para os dados do sensor ASTER (THOME *et al.*, 1998). A correção dos efeitos atmosféricos dos canais termais baseia-se em um modelo de transferência radiativa e na aquisição de todos os parâmetros da atmosfera necessários para corrigir seus efeitos (temperatura, vapor

d'água, aerossóis, etc.) obtidos no mesmo local e hora do imageamento. O modelo de transferência radiativa adotado é o MODTRAN 3. As fontes dos dados para correção atmosférica são os sensores MODIS e MISR, ambos incorporados juntamente com o sensor ASTER na plataforma TERRA.

As metodologias de correção atmosférica e de derivação da temperatura superficial propostas para os dados do ASTER são vantajosas em relação às propostas para o AVHRR e ATSR por permitirem a obtenção da temperatura superficial sobre qualquer área, sendo extremamente úteis não só para estudos do oceano, mas também para estudos da vegetação, solos, dentre outros. Para as aplicações oceânicas, em geral não é necessário o uso da abordagem TES, pois como colocado anteriormente, o valor da emissividade é praticamente constante e conhecido na faixa do infravermelho termal.

As metodologias discutidas até aqui permitem explorar de forma individual os dados gerados por diferentes sensores termais. A seguir veremos algumas abordagens que vêm sendo propostas para explorar de forma sinérgica as informações obtidas de diferentes fontes.

CAPÍTULO 3

FUSÃO DE IMAGENS MULTISENSORES

No escopo do processamento de imagens, a fusão, integração ou mesclagem é a combinação de duas ou mais imagens diferentes (de uma mesma cena) para formar uma nova imagem usando um certo algoritmo (POHL e GENDEREN, 1998). O objetivo é reunir nessa nova imagem as melhores características de cada dado original necessárias para uma determinada aplicação (POHL e TOURON, 1999). Na realidade, o processo de fusão visa explorar as informações redundantes e principalmente as complementares de imagens geradas por sensores com características espaciais, espectrais, radiométricas e temporais distintas, gerando uma informação mais adequada para percepção humana ou para processamentos decorrentes como, por exemplo, a classificação.

Ainda de acordo com Pohl e Touron (1999), as metodologias de fusão de dados são mais amplamente aplicadas para a “fusão de resolução” (*resolution merge* ou *image sharpening*), que consiste na integração de imagens espectrais de baixa resolução espacial com imagens pancromáticas de alta resolução espacial visando o benefício das resoluções espacial e espectral em uma única imagem, como por exemplo, a fusão das bandas espectrais (XS) e pancromática (XP) do SPOT (GARGUET-DUPOINT *et al.*, 1996). Outra aplicação comum é a integração de imagens geradas por sensores ópticos e imagens de radar de abertura sintética (VAN DER SANDEN *et al.*, 2000).

Métodos de fusão de imagens têm sido formulados para serem empregados em aplicações tais como melhoria da qualidade visual de imagens (CHAVEZ *et al.*, 1991), correções geométricas, integração de dados, detecção de mudanças através de dados multitemporais, mapeamento topográfico e atualização de mapas, identificação de áreas urbanas e uso da terra, agricultura, mapeamento florestal, geologia, entre outras (POHL, 1996). Resultados dessas aplicações mostram que o processo de fusão pode produzir

dados mais precisos, úteis, confiáveis e com menor ambigüidade. A seguir serão descritos alguns métodos tradicionais de fusão de imagens.

3.1 – Fusão Através de Composição Colorida RGB

A composição colorida é um dos métodos de fusão mais simples e ocorre no nível pixel, isto é, o valor de um pixel na imagem final é determinado a partir dos valores dos pixels correspondentes das imagens de entrada. Explorando as propriedades aditivas do sistema de cores dos monitores de vídeo, é possível combinar as características desejadas de até três imagens (bandas), designando uma delas para cada canal cromático do sistema RGB (POHL, 1999). Juntas elas formam uma composição colorida que facilita a interpretação de imagens multiespectrais devido à variação nas cores baseadas nos valores presentes em cada canal. As possibilidades de combinação são grandes e dependendo da seleção dos canais, a imagem resultante da fusão ressaltará diferentes feições. Segundo Yésou *et al.* (1993), a determinação da composição colorida ideal pode ser feita empiricamente ou por métodos estatísticos como o OIF (*Optimum Index Factor*) proposto por (CHAVEZ *et al.*, 1991).

Através desse método pode-se obter um destaque de áreas de interesse usando a composição colorida mais adequada (ZOBRIST *et al.*, 1979). Em muitos casos, o método RGB é aplicado em combinação com outros métodos, como veremos adiante. Cabe ressaltar que nessa metodologia os dados de entrada são simplesmente integrados visando uma melhora visual pura e que não ocorre interpolação real dos dados de entrada. Uma desvantagem desse método é que apenas três imagens de entrada podem ser utilizadas.

3.2 – Fusão Através de Transformação IHS

Segundo Crósta (1993), o espaço de cores conhecido por IHS (*Intensit, Hue, Saturation,*) é uma forma alternativa ao espaço RGB. Nesse espaço, as cores são definidas por três atributos: matiz (*Hue – H*), saturação (*Saturation – S*) e intensidade (*Intensity - I*). Esses atributos descrevem a formação de cores de uma maneira muito mais próxima àquela pela qual o sistema visual humano as percebe e podem ser

analisados e manipulados individualmente, ao contrário do sistema RGB, onde eles são intrinsecamente interligados.

O matiz de um objeto (H) é a medida do comprimento de onda médio da luz que ele reflete ou emite, definindo a cor do objeto. A saturação (S) ou pureza expressa o intervalo de comprimentos de onda ao redor do comprimento de onda médio no qual a energia é refletida ou emitida. A intensidade (I) é a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo responsável pela sensação de brilho.

Através de algoritmos matemáticos é possível relacionar e converter os espaços de cores RGB e HSI. Essa conversão é utilizada para produzir composições coloridas com menor correlação, realçar feições e também para combinar diferentes tipos de imagens.

O método de fusão baseado em transformação HSI é um dos mais populares e tornou-se um procedimento padrão no processo de análise de imagens. Como no RGB, ocorre no nível pixel. Seu princípio baseia-se no fato de que a transformação IHS é capaz de separar a informação espacial (I) da informação espectral (H, S) de uma imagem representada no espaço RGB, e que essas podem ser analisadas e processadas individualmente. Em tese, toda a informação espectral de uma composição colorida, no espaço RGB, é direcionada para os canais de matiz e saturação no processo de transformação. Logo, o canal de intensidade contém apenas a informação espacial e pode, portanto, ser substituído por uma imagem equivalente de melhor resolução espacial. A aplicação da transformação inversa produz uma imagem colorida no espaço RGB, que contém a informação espectral da imagem colorida original e a informação espacial da imagem de melhor resolução espacial que foi inserida.

Chavez *et al.* (1991); Zhou *et al.* (1998); Yésou *et al.* (1993) e Yocky (1996) utilizaram essa abordagem para fusão de imagens espectrais do sensor TM (*Thematic Mapper*) e pancromática do sensor HRV (SPOT) com objetivo de melhorar a resolução espacial das imagens espectrais. No processo, três bandas multiespectrais do TM são combinadas no espaço de cores RGB e em seguida essa composição colorida é transformada para o espaço de cores HSI usando as equações descritas em (CARPER *et al.*, 1990; CHAVEZ *et al.*, 1991). A etapa de fusão é feita substituindo-se a componente

intensidade (I) pela imagem pancromática (quarta banda). O produto final é gerado invertendo-se a transformação para o espaço RGB novamente. Normalmente uma etapa de uniformização de média e variância entre a imagem pancromática e a componente intensidade é realizada antes da inversão. Segundo Chavez *et al.* (1991), a substituição da imagem intensidade pela pancromática se justifica porque as duas imagens são aproximadamente iguais do ponto de vista espectral.

Uma questão importante nesse método é a escolha das três bandas multiespectrais que são selecionadas para formar a composição colorida RGB de entrada. Essa seleção depende fortemente da aplicação pretendida e geralmente é feita baseada em conhecimento *a priori*. Outra forma de aplicação do método é a proposta por Yésou *et al.* (1993) e consiste no uso de diferentes imagens de entrada para modulação direta dos canais I, H e S. Nesse caso, uma imagem de alta resolução (pancromática) modula a componente I e duas TMs (4 e 5) são empregadas para modular as componentes H e S.

Diversos autores apontam que o método de fusão baseado na transformação IHS é capaz de incorporar os detalhes da imagem pancromática na imagem multiespectral. Entretanto, as características espectrais das imagens multiespectrais são comprometidas pela perda de contraste e alteração da intensidade das cores (YOCKY, 1996; GARGUET-DUPORT, 1997). Por este motivo Pellemans *et al.* (1993) mostrou que esta técnica não é adequada para estudos de vegetação. Uma vantagem do método IHS em relação ao RGB é a possibilidade de usar quatro bandas ao invés de apenas três.

3.3 – Fusão Através de Combinações Aritméticas

A combinação numérica dos valores de níveis de cinza das imagens através de operações aritméticas tem sido utilizada para diversos fins, uma vez que as possibilidades de combinações são numerosas. Operações de soma e multiplicação são úteis para melhoria de contraste enquanto que diferença e razão são adequadas em análises de detecção de mudanças. Como as anteriores, esta metodologia também ocorre no nível de pixel.

Yésou *et al.* (1993) utilizaram uma abordagem baseada em multiplicação e adição de bandas para fusão das bandas espectrais do sensor TM com a pancromática do sensor HRV do SPOT, onde o objetivo é a melhoria da resolução espacial e preservação das características espectrais. Concluiu que este método apresenta vantagem relativa ao HSI por permitir um melhor controle sobre os distúrbios da informação espectral.

Cliche *et al.* (1985) também utilizaram esta abordagem para integrar as bandas espectrais (XS) do SPOT à banda pancromática (XP). Um outro exemplo é a transformação de Brovey, uma combinação aritmética que inclui razão em uma fórmula que normaliza as bandas espectrais usadas para visualização no espaço RGB e multiplica o resultado por outra imagem de resolução superior para adicionar componentes de intensidade ou brilho na imagem (POHL, 1999).

3.4 – Fusão Através de Análise por Componentes Principais

A análise ou transformação por Componentes Principais (ACP), ou ainda transformação *Karhunen Loeve*, é um processo estatístico que transforma um conjunto de N imagens correlacionadas em um novo conjunto de N imagens não correlacionadas (POHL, 1999) e pode ser usada, dentre outras, para redução do volume de dados e fusão de imagens (YÉSOU *et al.*, 1993). Este novo conjunto de imagens (componentes) tem as seguintes características: a primeira delas, chamada de 1ª Componente Principal ou CP1, contém a informação que é altamente correlacionada com as das imagens utilizadas na transformação, isto é, contém de modo geral a informação comum dos dados de entrada (SCHOWENGERDT, 1997). A soma das variâncias de todas as CPs é igual a variância total das imagens e cada sucessiva CP, a partir da primeira, possui menor variância.

Segundo Shettigara (1992), a idéia básica para empregar a ACP para processos de fusão de imagens é substituir a CP1 por uma imagem equivalente de melhor resolução espacial e através da transformação inversa, obter a fusão de informações. Chavez *et al.* (1991) e Zhou *et al.* (1998) utilizam esta abordagem para fusão de imagens espectrais do sensor TM e pancromática do sensor HRV (SPOT). A partir de duas ou mais imagens espectrais aplica-se a transformação para gerar as respectivas componentes principais. O próximo passo é substituir a CP1 pela imagem pancromática e inverter a

transformação para obter uma imagem final com as informações espaciais e espectrais combinadas. Normalmente uma etapa de uniformização de média e variância entre a imagem pancromática e a CP1 é realizada antes da inversão.

A razão pela qual a imagem de alta resolução (pancromática) substitui a CP1 é que esta contém a informação que é comum a todas as bandas de entrada enquanto que a informação espectral é única para cada banda e estará presente nas outras componentes. Por este motivo é importante que a faixa espectral da imagem pancromática compreenda as das outras bandas envolvidas (alinhamento dos dados). A CP1 possui a máxima variância, a qual pode maximizar o efeito da imagem de alta resolução na imagem final. Este método também é conhecido por substituição da principal componente (Shettigara, 1992), o qual utiliza esta técnica para fusão das bandas TM1, TM2 e TM3 com a pancromática do sensor IRS (5m).

Segundo Pohl e Genderen (1998), a transformação por componentes principais pode empregar todas as bandas disponíveis de conjunto de imagens de entrada ou somente uma seleção de bandas que são escolhidas baseado em um conhecimento *a priori* ou no tipo de aplicação desejado. Zhou *et al.* (1998) usam as bandas 1 a 7 do sensor TM no processo de fusão destas com a pancromática do HRV (SPOT). Entretanto, no caso das bandas do sensor TM, as três primeiras componentes contêm aproximadamente 98% da variância total dos dados e são suficientes para representar a informação. Destaca ainda que embora este método possa ser empregado com várias bandas simultaneamente, no caso do TM isto pode ter um impacto negativo.

Para fusão dos mesmos dados, Chavez *et al.* (1991) notou que usando todas as bandas TM ou algum subconjunto destas, a suposição de similaridade entre a CP1 obtida e a imagem pancromática permanece válida. Verificou também que, para o mesmo conjunto de dados, a CP1 resultante é mais correlacionada com a imagem pancromática que a componente intensidade obtida pelo método IHS e, por esta razão, o método baseado nas componentes principais distorce menos as características espectrais dos dados de entrada que o método IHS.

Troya (1999) e Marcelino *et al.* (2003) empregam uma variação da transformação por componentes principais em conjunto com o método RGB. Após a uniformização de média e variância, a transformação é aplicada usando uma imagem espectral e uma pancromática de cada vez, gerando duas componentes. Este processo é repetido para os outros pares e, ao final, a CPI obtida de cada transformação é direcionada para os canais B, G e R, respectivamente.

Outra possibilidade é empregar a metodologia da APC com um conjunto de imagens obtidas por sensores distintos (POHL e GENDEREN, 1999). As imagens dos diferentes sensores são combinadas em um arquivo e a transformação é calculada a partir de todos os canais.

3.5 – Fusão Através de Filtragem “Passa Altas”

Chavez *et al.* (1991) e Zhou *et al.* (1998) empregam este método para realizar a fusão dos canais espectrais do sensor TM com o canal pancromático do sensor HRV do SPOT. No método, um filtro passa altas é aplicado na imagem de alta resolução espacial. O resultado desta filtragem contém as informações das componentes de alta frequência que são fortemente relacionadas com a informação espacial. O Processo de fusão consiste então em somar o resultado da filtragem pixel a pixel na imagem de menor resolução. Segundo o autor, este método, comparativamente aos métodos HSI e ACP, é o que menos distorce as características espectrais no produto final, além de produzir resultados com resolução espacial comparável aos obtidos pelos referidos métodos.

Zhou *et al.* (1998) destaca que o método mantém as componentes de baixa frequência da imagem espectral TM e as de alta frequência da XP. Entretanto, por usar filtro de tamanho fixo fica difícil encontrar um filtro ótimo aplicável para os diferentes tipos e tamanhos de alvos da superfície.

CAPÍTULO 4

FUSÃO DE IMAGENS ATRAVÉS DE TRANSFORMADA WAVELET

A transformada *wavelet* é uma ferramenta matemática que permite decompor e descrever uma imagem em diferentes escalas, gerando uma pirâmide em múltiplas resoluções. Este procedimento, conhecido também como análise em múltiplas resoluções (AMR) de uma imagem, é uma das etapas do processo de fusão. Neste tipo de transformação, a imagem original passa a ser expressa por coeficientes que representam os componentes de alta e de baixa frequência presentes na imagem. É possível obter estes coeficientes em várias resoluções. A grande vantagem desta decomposição é que ela pode ser invertida e, melhor ainda, que é possível alterar os coeficientes antes do processo de inversão, isto é, ainda no domínio das frequências. É justamente esta alteração dos coeficientes que vai promover o processo de fusão após a transformação inversa e retorno para o domínio espacial.

O objetivo deste Capítulo é fundamentar aspectos básicos sobre funções e transformada *wavelet* dentro do contexto da suas aplicações em processos de fusão de imagens, este apenas um no amplo espectro de emprego desta ferramenta matemática. Também não tem a pretensão de ser extensivo por razões de amplitude e profundidade do tema. Serão citadas algumas importantes referências bem como artigos que fundamentam o assunto.

Desta forma, nas próximas seções definiremos o que são funções *wavelets*, os principais exemplos e algumas de suas características e propriedades. Em seguida abordaremos aspectos da transformada *wavelet* e sua aplicação e implementação em processos de análise em múltiplas resoluções. Por fim serão apresentadas algumas metodologias discutindo como esta ferramenta é utilizada nos processos de fusão de imagens.

Antes, porém, serão abordados alguns tópicos sobre transformação (filtragem) espacial e análise em múltiplas resoluções, que são os principais fundamentos para o entendimento da transformada *wavelet* no domínio dos processos de fusão de imagens.

4.1 - Filtragem Espacial e Análise em Múltiplas Resoluções (AMR)

Um sensor imageador remoto mede uma quantidade de energia eletromagnética emitida ou refletida por uma superfície (alvo), após ter sido parcialmente alterada por processos atmosféricos, e grava esta informação em formato analógico ou digital normalmente como uma função do espaço. Uma imagem digital é uma função bidimensional $f(x,y)$ que representa a variação da grandeza física medida no espaço e em um determinado tempo. Os valores digitais de uma linha ou coluna desta imagem podem ser vistos como uma função de uma variável (unidimensional).

Considerando-se uma linha de uma imagem digital é possível observar que o valor do nível digital varia bastante em função da distância ao longo do eixo das abscissas, por exemplo. Quando plotamos estas variações em um gráfico como o da Figura 4.1, o que se obtém é geralmente uma curva complexa. Essa curva pode ser decomposta em um conjunto de curvas componentes com diferentes frequências e amplitudes, fornecendo uma idéia da distribuição espacial de frequências da imagem.

Observando-se a Figura 4.1 verifica-se que uma imagem é composta por elementos espaciais de diferentes escalas (tamanhos) e que existem áreas da imagem com valores distintos de número digital. Os limites entre estas áreas são conhecidos como bordas e geralmente ocupam pequenas porções da imagem, sendo mais estreitos que largos.

Segundo Crósta (1993), por variarem muito em áreas pequenas, são chamados de feições de alta frequência. No gráfico eles são representados por um gradiente bastante elevado. Alguns exemplos de feições deste tipo incluem os limites entre diferentes tipos de cobertura do solo, limites entre água e terra em zonas costeiras, redes de transporte, malha urbana, etc. Já limites gradacionais, que variam mais suavemente com a distância, são chamados de feições de baixa frequência (área de monocultura em terreno plano, por exemplo). Cabe ressaltar que a noção de alta ou baixa frequência é uma função da resolução da imagem.

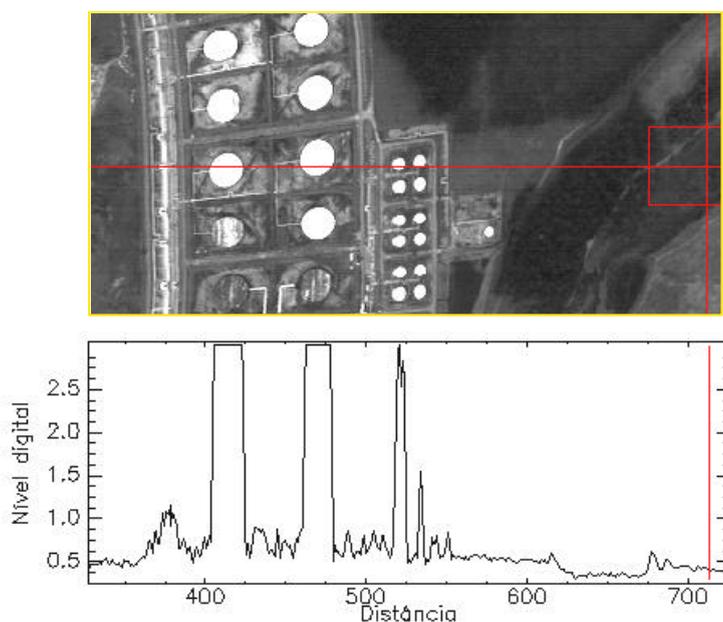


FIGURA 4.1 – Variações do valor do nível digital ao longo de uma linha (eixo das abscissas) de uma imagem. Esta variação pode ser entendida como uma função unidimensional e representada por uma curva complexa.

As técnicas de transformação ou filtragem espacial de frequências consistem em extrair, realçar ou suprimir seletivamente as feições de altas, médias e baixas frequências presentes em uma imagem. São operações de área ou vizinhança e podem ser implementadas através do processo de convolução, que opera no domínio espacial da imagem, ou através da transformada de Fourier e mais recentemente da transformada *wavelet*, ambas operando no domínio das frequências que compõe a imagem.

A convolução permite acessar a informação espacial local de uma imagem, isto é, ao redor de uma vizinhança de um dado pixel. Já as transformadas *wavelet* e de Fourier podem processar toda a imagem para detectar estruturas espaciais globais. A transformada *wavelet* proporciona ainda uma representação da imagem que permite acessar informação sobre uma ampla faixa de escalas, de local a global (SCHOWENGERDT, 1997).

A base da filtragem espacial de frequências é a decomposição de uma imagem em uma soma de suas versões passa alta e passa baixa. Para entender melhor este processo, suponha que uma imagem $I(x,y)$ seja processada de modo que cada pixel de saída seja a média dos pixels numa vizinhança, digamos, de (3x3). O resultado é uma versão

suavizada da imagem original. Subtraindo-se este resultado da imagem original obtém-se uma imagem que representa a diferença entre o valor original do pixel e a média de sua vizinhança (3x3). A imagem suavizada é chamada de versão passa baixa (PB) ou aproximação e a diferença entre esta e a imagem original é a versão passa alta (PA). Matematicamente, $I(x,y) = PB(x,y) + PA(x,y)$, a qual é válida para qualquer vizinhança. Se quiséssemos ver esta imagem em outra escala, bastaria variar a vizinhança do pixel. Conforme se aumenta a vizinhança (tamanho do filtro), a versão PB isola sucessivamente estruturas mais e mais largas enquanto que a versão PA discriminará estruturas menores não contidas na versão PB, para manter a relação.

Esta variação da escala ou resolução da imagem nos conduz ao conceito de análise em múltiplas resoluções (AMR), onde o objetivo é analisar uma imagem em diferentes resoluções por meio de uma análise em frequência da imagem original, criando uma pirâmide em múltiplas resoluções.

Essas pirâmides são úteis para analisar uma imagem em escalas locais, intermediárias e globais. Segundo Showengerdt (1997), uma pirâmide pode ser definida como $I_n = REDUCE(I_{n-1})$, onde I_n é a imagem no nível n e $REDUCE$ é qualquer operação na imagem no nível anterior I_{n-1} que reduz seu tamanho para I_n . Por exemplo, $REDUCE$ pode ser a média de uma janela de vizinhança dois, com uma subamostragem ao longo das linhas e colunas (reduz as dimensões da imagem pela metade). Burt e Adelson (1983) criou as pirâmides Gaussianas, nas quais a resolução vai diminuindo com o aumento do nível de decomposição, o qual representa uma banda passante subamostrada e em outra escala da imagem original. A pirâmide é obtida repetindo-se a operação na imagem resultante. Uma pirâmide em múltiplas resoluções utilizando transformada *wavelet* é construída de modo semelhante às pirâmides Gaussianas. Cada passo é uma filtragem (convolução) seguida de uma subamostragem de ordem dois.

4.2 – O Que São Wavelets?

Uma onda (*wave*) é normalmente descrita como um movimento oscilatório que varia no tempo ou espaço, como por exemplo, uma onda senoidal (energia infinita). Uma *wavelet* é uma onda pequena (pulso), ou pedaço de onda, com energia finita. A *wavelet*

ainda possui características oscilatórias de onda, mas tem duração limitada e um valor médio de zero. Comparando-se *wavelets* com ondas senoidais (Figura 4.2) verifica-se que as senóides não têm duração limitada e se estendem de menos a mais infinito. *Wavelets* tendem a ser assimétricas.

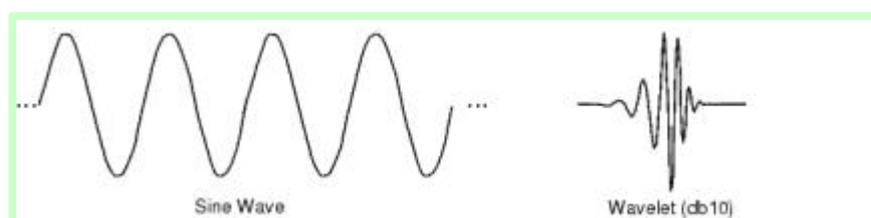


FIGURA 4.2 – Representação de onda (*wave*) senoidal e *wavelet*.
 FONTE: Adaptada de Mathworks (2005).

Wavelets são funções matemáticas. Originalmente foram empregadas como funções de base em análise de sinais (funções unidimensionais) para decompor estes sinais em componentes de diferentes frequências. Uma característica importante das funções de base *wavelet* é que elas estão relacionadas umas as outras através de simples dilatações e translações. Uma função *wavelet* original, conhecida como *wavelet* mãe, *wavelet* básica ou *wavelet* de análise é utilizada para gerar todas as funções de base (RUSKAI *et al.*, 1992).

Seja $\mathbf{y}(x) \in L^2(\mathbb{R})$ uma função *wavelet* mãe. Todas as outras funções *wavelets* são obtidas através de uma relação da forma:

$$\mathbf{y}_{a,b}(x) = |a|^{-1/2} \mathbf{y}\left(\frac{x-b}{a}\right), a \text{ e } b \in \mathfrak{R}, a \neq 0, \quad (4.1)$$

ou seja, funções formadas por simples dilatação (*scaling*) e translação (*shift*) da *wavelet* mãe. O termo dilatação refere-se à alteração do fator de escala (a). Translação, denotada pela letra b , é o “deslizamento” da função $\mathbf{y}(x)$ sobre o sinal (função) analisado.

O fator de escala permite alongar ou comprimir a forma da função *wavelet* mãe. Quanto menor o seu valor, mais comprimida é a *wavelet*. Nas formulações mais comuns, o fator de escala é discreto e potência de dois. Para aplicação do conceito de AMR, além da

função *wavelet* mãe é necessária uma segunda função com as mesmas características, denotada por $f(x) \in L^2(\mathbb{R})$, e conhecida como função escala ou também *wavelet* pai. Como veremos adiante, esta função serve para alterar a resolução da imagem de entrada e para extrair as componentes de baixa frequência presentes entre dois níveis de decomposição consecutivos.

4.3 – Principais Funções *Wavelets*

Existem diferentes tipos de funções *wavelets*. Estas funções são geralmente classificadas quanto ao suporte (compacto ou não), simetria, regularidade, ortogonalidade, momentos nulos, etc. O suporte está relacionado com o tamanho da função *wavelet*. A simetria descreve o comportamento da função em torno do ponto médio. A regularidade é uma medida aproximada do número de derivadas contínuas que a função possui. As *wavelets* podem ser ortogonais, biortogonais e não ortogonais. Funções *wavelets* ortogonais são aquelas que não tem sobreposição com outras (correlação zero) quando executando a transformada. Usando este tipo de função é possível transformar para o espaço de *wavelets* e voltar sem perda de informação. As não ortogonais têm algum tipo de sobreposição. As principais funções *wavelets* aplicadas em processamento de imagens para fins de fusão são: Haar, Daubechies, Symmlets e Coiflets.

A *wavelet* mais simples que existe é a Haar (DAUBECHIES, 1988; MALLAT, 1989). Considerada a *wavelet* “mãe de todas”, é utilizada em diversos artigos para demonstrar os princípios e a idéia fundamental sobre *wavelets*. A Haar é uma função *wavelet* descontínua e assemelha-se a uma função degrau. Possui também a denominação de Daubechies 1 (db1). É compacta, simétrica e possui um momento nulo para cada y . Na Figura 4.3 é apresentada a função *wavelet* mãe e a função de escala de Haar. Este tipo de função é ideal quando os recursos computacionais são limitados.

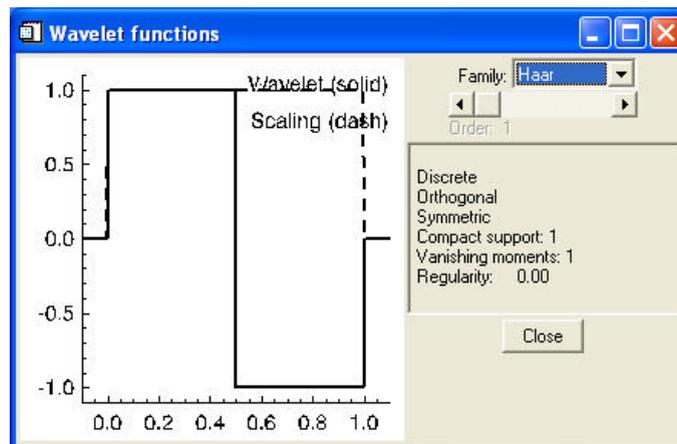


FIGURA 4.3 – Função *wavelet* mãe (linha contínua) e a função de escala (linha tracejada) de Haar.

FONTE: Adaptada de Research System (2002).

Uma família importante de *wavelets* é a proposta por (DAUBECHIES, 1988). São *wavelets* de suporte compacto. A família de funções é representada por dbN , onde N corresponde à ordem (variações dentro de uma mesma família). Como vimos, a $db1$ corresponde à função de Haar. A maioria das funções dbN são assimétricas e a regularidade aumenta com a ordem. São funções ortogonais e possuem número de momentos nulos iguais a N . Na Figura 4.4 são apresentadas as funções *wavelet* mãe e a função de escala $db2$, $db3$, $db4$ e $db20$.

As *Symlets* são *wavelets* ortogonais propostas por Daubechies (1992) como modificação da família dbN . As propriedades das duas famílias são bem similares. O objetivo foi propor mudanças em suas *wavelets* originais (dbN) tais que as mesmas fossem mais simétricas. São ortogonais.

As *Coiflets* são funções mais simétricas que as da família dbN . A função *wavelet* mãe possui $2N$ momentos iguais a zero e a função de escala tem $2N-1$ momentos iguais a zero, onde N representa a ordem da *wavelet*. São ortogonais, não simétricas e de suporte compacto.

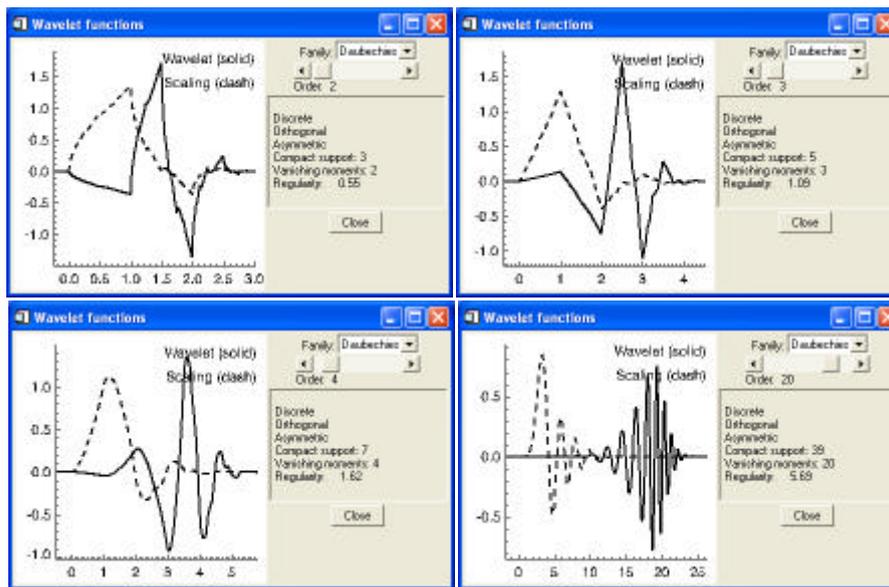


FIGURA 4.4 – Função *wavelet* mãe (linha contínua) e a função de escala (linha tracejada) da família Daubechies (ordens 2, 3, 4 e 20).
 FONTE: Adaptada de Research System (2002).

Na Figura 4.5 são apresentadas as funções *wavelet* mãe e a função de escala das famílias Coiflet (ordens 1 e 5) e Symlet (ordens 3 e 7).

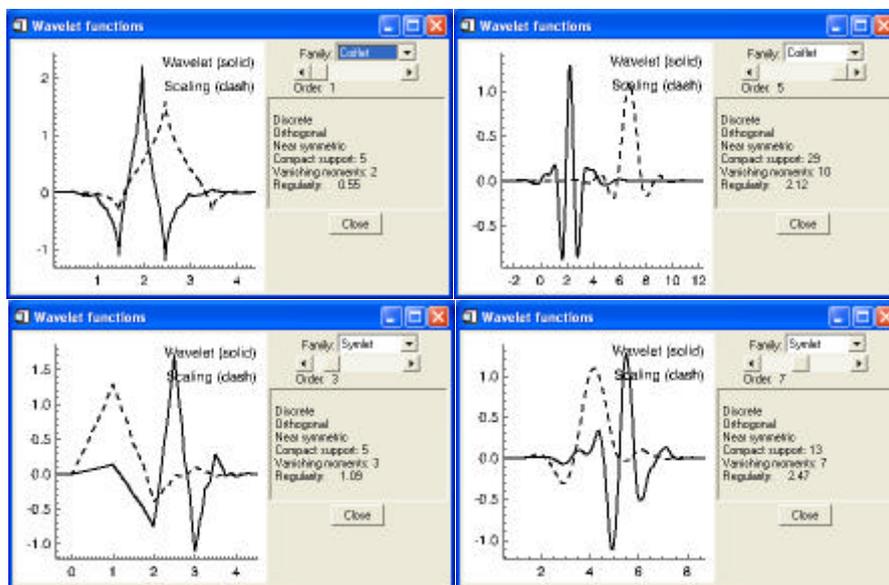


FIGURA 4.5 – Função *wavelet* mãe (linha contínua) e a função de escala (linha tracejada) das famílias Coiflet (ordens 1 e 5) e Symlet (ordens 3 e 7).
 FONTE: Adaptada de Research System (2002).

4.4 – A Transformada *Wavelet* (TW)

Funções *wavelets* são utilizadas para analisar outras funções unidimensionais ou multidimensionais da mesma forma que exponenciais complexos (funções seno e cosseno) são utilizados na análise de Fourier. A análise de Fourier consiste em decompor uma dada função (sinal) em funções senoidais de várias frequências. Similarmente, a análise *wavelet* consiste em decompor uma função complexa em versões da *wavelet* original (mãe) onde foram mudados os fatores de escala e de translação (expansão de dois parâmetros). A diferença é que as *wavelets* possuem suporte compacto, energia finita e, principalmente, a capacidade de detectar e localizar onde ocorrem as feições de altas e baixas frequências presentes na imagem. Assim, proporcionam uma representação mais precisa da imagem.

A TW permite representar uma imagem como um conjunto de coeficientes dados pelo produto interno da função original com uma função elementar de energia finita (*wavelet*), a base da transformada. Este produto interno, na verdade, corresponde a um fator de semelhança, ou seja, seu valor será maior quando existir uma maior semelhança (correlação) entre as duas funções, dentro do intervalo de tempo (ou espaço) em que está sendo feita a análise.

A transformada *wavelet* (TW) é aplicada em processos de fusão de imagens seguindo o conceito da análise em múltiplas resoluções (AMR). Neste processo é possível analisar uma imagem através de informações representadas em diferentes escalas, ou diferentes resoluções, por meio de uma análise em frequência da imagem original. Para tanto, além da função *wavelet* é utilizada também a função de escala.

A TW de uma função unidimensional $f(x)$ é dada pela série de decomposições nas quais são utilizadas a função *wavelet* $\mathbf{y}(x)$ e a função de escala $\mathbf{f}(x)$, sendo representada pela seguinte relação:

$$f(x) = \sum_k a_k \mathbf{f}(x-k) + \sum_k d_k \mathbf{y}(x-k). \quad (4.2)$$

Nesta expansão, a_k e d_k são os coeficientes da transformada em um nível de decomposição k . Os coeficientes a_k são conhecidos com aproximação e são o resultado do produto interno da função de escala $f(x)$ e a função analisada. Os coeficientes d_k são denominados de detalhes e resultam do produto interno da função *wavelet* e a função analisada.

A TW pode ser contínua (TWC) ou discreta (TWD). O que distingue os dois tipos é o conjunto de fatores de escala e posições que a função *wavelet* pode operar. A TWC pode operar em qualquer escala, do tamanho total do sinal até o nível que se deseja. Entretanto, calcular os coeficientes em todas as escalas possíveis gera muita informação redundante e aumenta o custo computacional. Melhor que isto é, por exemplo, escolher escalas que sejam potência de 2. Este tipo de análise é o que se denomina transformada *wavelet* discreta (TWD), as quais propiciam uma representação mais compacta do dado. É muito rápida e mais adequada para processamento de imagens, filtragens e quando existem matrizes grandes.

A aplicação da TWC ou da TWD sobre uma função unidimensional ocorre do seguinte modo (Figura 4.6). Inicialmente a função original é comparada com uma função *wavelet*. Calcula-se o número C que representa o grau de correlação entre a *wavelet* e a seção da curva que representa a função analisada. Quanto maior o valor de C , maior a similaridade. Note que o resultado depende da forma da *wavelet* que foi escolhida. Em seguida faz-se a translação da *wavelet* para a direita (próxima seção do sinal) e repetem-se os passos anteriores (comparação e cômputo do valor C) até que a função toda seja analisada. O próximo passo consiste em dilatar a função e repetir o procedimento para esta nova escala da função e as demais que forem realizadas. Ao final são obtidos os coeficientes produzidos em diferentes escalas e nas diferentes seções da função original.

Observe que valores elevados do fator de escala a correspondem a *wavelets* alongadas. Quanto mais alongada a *wavelet*, maior será a porção do sinal que estará sendo analisada e menores serão as feições do sinal que estarão sendo medidas. Já baixos valores do fator de escala implicam em *wavelets* comprimidas, melhores para detectar

mudanças abruptas (alta frequência). Resumindo, *wavelets* alongadas permitem detectar mudanças suaves (aproximações ou feições de baixas frequências) ao passo que *wavelets* comprimidas são mais adequadas para detecção de detalhes (altas frequências).

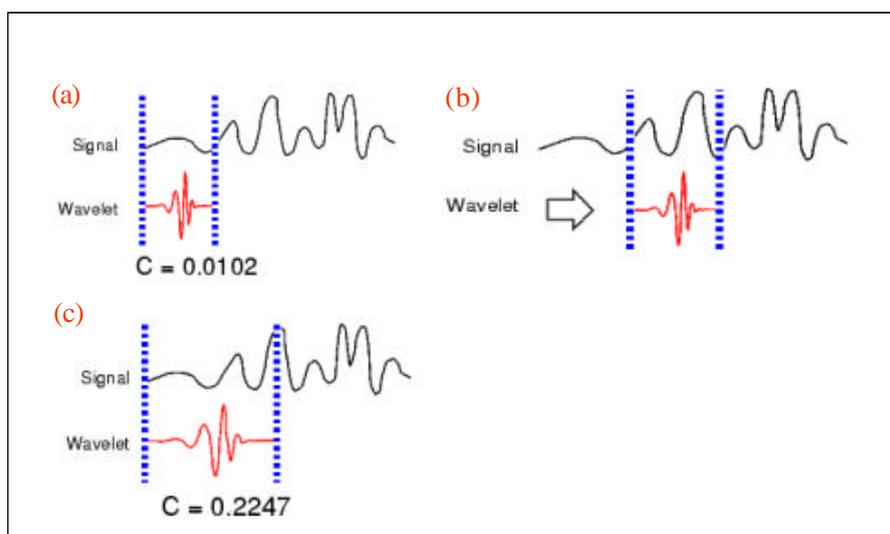


FIGURA 4.6 – Processo de aplicação da transformada *wavelet* sobre uma função unidimensional. O valor de C mede o grau de correlação entre as funções analisadas.

FONTE: Adaptada de Mathworks (2005).

Cada coeficiente representa o melhor ajuste (ou correlação) entre a função *wavelet* numa determinada escala e uma particular posição. Os coeficientes *wavelet* têm um papel importante na determinação das características estruturais de uma imagem em uma certa resolução e posição. Uma vez que as *wavelets* são compactas, os coeficientes medem apenas variações ao redor de uma pequena região da imagem. Assim, a obtenção dos coeficientes de uma porção da imagem não é afetada por coeficientes de outras regiões. Esta característica juntamente com a capacidade de localização é extremamente útil.

A transformada *wavelet* possui estrutura recursiva e a transformada inversa também pode ser aplicada para obter-se a função original a partir dos coeficientes gerados. Em muitas aplicações da TW, é necessário que a função original seja sintetizada a partir dos coeficientes *wavelets*. Para uma perfeita reconstituição, e de modo a usar o mesmo conjunto de *wavelets* para análise e síntese, e também para uma representação compacta

do sinal analisado, as *wavelets* devem satisfazer a condição de ortogonalidade. Ao se escolher um conjunto de *wavelets* para análise e outro para síntese, os dois conjuntos devem satisfazer a condição de biortogonalidade.

4.5 – Implementação da Transformada *Wavelet* em Processamento de Imagens

Grande parte do sucesso da TW é devido à existência de algoritmos rápidos para sua implementação. Estes algoritmos raramente calculam os produtos internos com as funções diretamente. Sob o ponto de vista de processamento digital de imagens, a TWD é implementada a partir de dois filtros digitais discretos. Estes filtros compõem um banco de filtros e são deduzidos a partir das funções *wavelet* mãe e de escala. O filtro da função de escala é um passa baixas e o da função *wavelet* é um passa altas (HAHN e SAMADZADEGAN, 1999).

Para o caso de uma função bidimensional (imagens), Mallat (1989) desenvolveu um eficiente algoritmo de decomposição piramidal que considera a filtragem em ambas as dimensões. Como a TWD é unitária (separável), a transformação bidimensional pode ser obtida aplicando-se a transformada unidimensional nas linhas e colunas separadamente. O algoritmo de Mallat exige que a imagem de entrada possua dimensões que sejam potência de 2.

Em cada nível da decomposição são aplicados filtros passa altas e baixas na imagem de entrada seguidos de uma subamostragem de ordem 2. Primeiramente os filtros são aplicados nas linhas com subamostragem das colunas e em seguida são aplicados nas colunas com subamostragem das linhas. Desta forma, em cada nível são geradas quatro componentes (sub-bandas), as quais são convencionalmente denominadas por (GARGUET-DUPORT *et al.*, 1996): LL, HL, LH e HH. A Figura 4.7 ilustra o processo de decomposição de uma imagem de um nível para o outro da pirâmide.

A componente LL contém uma aproximação da imagem original em uma resolução equivalente à metade da imagem original. Também é conhecida como aproximação de baixa resolução. É obtida através do filtro passa baixas associado com a função de escala, o qual será responsável por alterar a resolução da imagem. É obtida aplicando-se

o filtro passa baixa nas linhas e colunas e subamostrando a imagem por um fator de ordem dois.

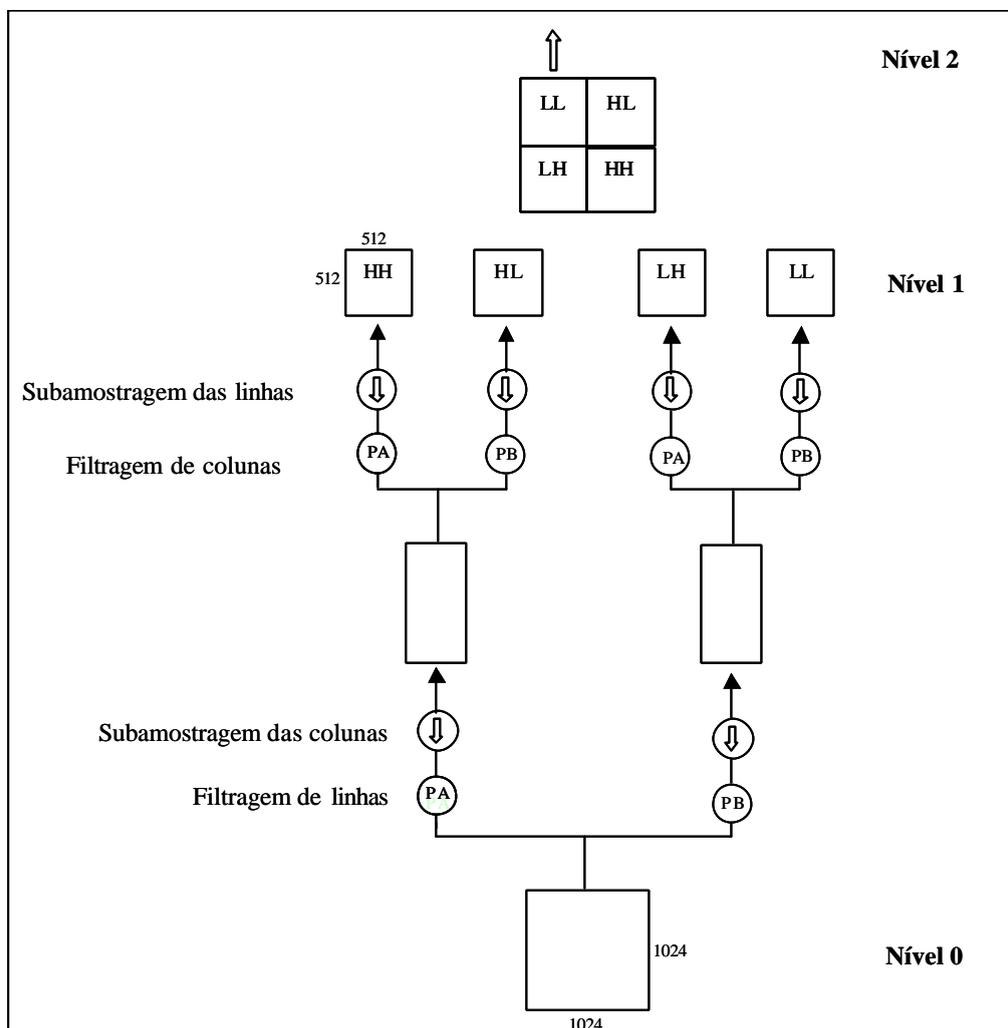


FIGURA 4.7 – Decomposição de uma imagem de dimensões de 1024x1024 pixels de um nível para outro da pirâmide. PA e PB indicam filtros passa altas e baixas, respectivamente. A subamostragem é de ordem 2. A componente LL é utilizada como dado de entrada para o próximo nível. Esta arquitetura de filtragem é denominada de banco de filtros. FONTE: Adaptada de Showengerd (1997).

A componente HL contém os detalhes verticais da imagem original e é resultado de filtragem passa altas e subamostragem de ordem dois nas linhas seguida de filtragem passa baixas e subamostragem de ordem dois nas colunas. Do mesmo modo, a componente LH contém os detalhes horizontais da imagem original e é resultado de filtragem passa baixas e subamostragem de ordem dois nas linhas seguida de filtragem

passa altas e subamostragem de ordem dois nas colunas. Finalmente, a componente HH contém os detalhes diagonais e resulta de filtragens passa altas seguidas de subamostragem de ordem dois nas linhas e colunas.

Estes detalhes (estruturas ou ainda componentes de alta frequência) existentes entre dois níveis sucessivos são obtidos com o filtro passa altas associado com a função *wavelet* mãe e são expressos por coeficientes que possuem a seguinte propriedade (LI *et al.*, 1995): quanto maior seu valor, maior é a mudança de brilho, implicando presença de feições salientes (bordas, linhas).

A decomposição em múltiplas resoluções efetua-se de forma recursiva sobre a componente LL (aproximação de baixa resolução), gerando a pirâmide em múltiplas resoluções. Em cada nível, as dimensões das imagens são reduzidas (subamostradas) por um fator de ordem dois. Por exemplo, uma imagem com dimensões de 1024x1024 pixels e tamanho de pixel igual a 10m será decomposta no primeiro nível em quatro componentes (sub-bandas) com dimensões de 512x512 e tamanho de pixel igual a 20m. A partir da imagem de aproximação deste primeiro nível gera-se o segundo, onde as componentes terão dimensões de 256x256 pixels e tamanho de pixel igual a 40m, e assim por diante.

Segundo Zhou *et al.* (1998), a decomposição pode ser entendida como um conjunto de imagens independentes onde cada pixel é expresso por coeficientes que expressam frequências espacialmente orientadas. Assim, a TWD permite decompor uma imagem em uma família de níveis hierarquicamente organizados. À medida que aumentamos o nível de decomposição, a resolução das imagens diminui no domínio espacial. A propriedade recursiva da transformação permite criar uma relação entre os coeficientes *wavelet* (aproximação e detalhes) nos diversos níveis de resolução. A cada estágio é possível parar e computar a transformada inversa. O algoritmo desenvolvido por Mallat (1989) é utilizado tanto para análise (decomposição) quanto para a síntese (reconstrução) dos sinais unidimensionais originais. A reconstrução utiliza os filtros de síntese inversos. Esta arquitetura de processamento através de filtros de análise e síntese é conhecida como banco de filtros.

A capacidade de localizar variações de uma função depende do tamanho do filtro empregado. Filtros longos (11x9) tendem a suavizar as imagens de entrada. Já filtros curtos (3x3) tendem a criar blocos na imagem processada. Alguns autores apontam que é importante escolher funções *wavelets* biortogonais para utilizar filtros de análise e síntese diferentes. Além disto, a qualidade da reconstrução da função original através da transformada inversa depende da regularidade da *wavelet* empregada. Quanto mais regular a função, maior é o efeito de suavização. Já *wavelets* irregulares tendem a produzir o efeito de blocos.

4.6 – Métodos de Fusão Através de TWD e AMR

Evidentemente que não se utiliza a TWD para decompor uma imagem em versões passa altas e passa baixas para simplesmente recompô-la novamente. A decomposição é apenas uma etapa do processo de fusão e uma aplicação natural do conceito de AMR.

Métodos de fusão baseados em AMR através de TWD consistem em, primeiramente, usar a transformada *wavelet* para decompor uma ou as duas imagens de entrada em uma pirâmide de múltiplas resoluções até um determinado nível. Após a decomposição, os coeficientes *wavelets* são manipulados de acordo com alguma regra estabelecida e só então a transformação é invertida. A fusão ocorre no domínio das frequências. A idéia é transferir componentes de alta frequência de uma imagem para outra.

Em alguns métodos, para cada nível da decomposição é criada uma imagem sintética (mapa de decisão) cujos coeficientes são determinados a partir daqueles obtidos nas pirâmides individuais de cada imagem seguindo algum critério (regra) de seleção ou combinação. Outro mecanismo pode ser substituir uma componente (aproximação de baixa resolução) por uma imagem de menor resolução espacial objetivando a fusão de resolução. O passo final consiste em inverter a transformação a partir das imagens sintéticas obtidas em cada nível para obter a imagem final que conterà uma combinação de informações derivadas das imagens de entrada. A regra de seleção pode ser executada baseada somente no valor do pixel ou sobre uma vizinhança (janelas 3x3 ou 5x5, por exemplo) do mesmo.

Diversos métodos de fusão de imagens que empregam o conceito da transformada *wavelet* têm sido propostos (LI *et al.*, 1995; GARGUET-DUPORT *et al.*, 1996; YOCKY, 1996; ZHOU *et al.*, 1998; VENTURA, 2002 e DU *et al.*, 2003).

O método proposto por Garguet-Duport *et al.* (1996) é um dos mais simples e é empregado para fusão das bandas espectrais XS1, XS2 e XS3 (20 m) e pancromática (10 m) do sensor HRV (*High-Resolution Visible*) do satélite SPOT. Inicialmente uma imagem pancromática com dimensões de 1024x1024 é registrada e tem sua média e variância uniformizada com cada uma das bandas espectrais, cujas dimensões são de 512x512. Neste processo são geradas três imagens pancromáticas “ajustadas”. Cada uma delas é decomposta em apenas um nível usando-se a transformada *wavelet*, gerando as quatro componentes (LL, HL, LH e HH) com resolução espacial de 20 metros e dimensões de 512x512. A componente LL é uma versão da pancromática reamostrada para 20 m e as demais componentes apresentam os detalhes presentes entre os dois níveis. A fusão ocorre substituindo-se a componente LL pela imagem XS original (que possui as dimensões compatíveis com as da LL) correspondente e invertendo-se a transformação. O processo é repetido para as demais bandas obtendo-se então três imagens espectrais com resolução espacial de 10 metros.

Em resumo, a transformação *wavelet* propicia extrair os detalhes (informação espacial) da imagem pancromática e injetar estes detalhes na imagem espectral. A informação espectral da XS é preservada porque somente os detalhes na escala entre 10 e 20 metros foram adicionadas à mesma.

Yocky (1996) e Zhou *et al.* (1998) usaram uma variante deste método para fusão das bandas espectrais TM (30 m) e a pancromática (XP) do SPOT (10 m). Neste caso as duas imagens são decompostas em pirâmides de múltiplas resoluções. Para tanto, as imagens de entrada devem possuir a mesma dimensão e assim, após o registro e o ajuste de brilho e contraste, a imagem TM é reamostrada para ter o mesmo tamanho de pixel e as mesmas dimensões da XP (1024x1024). Yocky (1996) observa que embora as imagens de diferentes tamanhos possam ser decompostas em suas respectivas pirâmides, no processo de fusão a imagem aproximação de baixa resolução (LL) e a que

a substituídas devem ter as mesmas dimensões. As duas imagens são decompostas em cinco níveis utilizando-se a transformada *wavelet*. No último nível, a imagem de aproximação de baixa resolução da decomposição da imagem pancromática é substituída pela correspondente da TM. A fusão ocorre invertendo-se (somente) a transformação da pirâmide da imagem pancromática para produzir a imagem espectral com os detalhes espaciais da imagem pancromática, isto é, uma TM com 10 m. O processo é repetido para as demais bandas.

Yocky (1996) aponta que neste processo os coeficientes de detalhes derivados da decomposição da imagem espectral (TM) não são utilizados, pois somente a aproximação de baixa resolução é injetada na pirâmide de decomposição da imagem XP, que é a única a sofrer a transformação inversa. Para tanto propõe duas abordagens para utilização dos componentes de detalhes das duas imagens (inclui os da TM), a cada nível, para realizar a fusão. Numa delas, a aditiva, os coeficientes de detalhes das duas imagens (HL, LH e HH), a cada nível, são somados em uma imagem sintética que sofre a transformação inversa. Na outra, a seletiva, é possível controlar até que nível a adição proposta acima pode ser executada. Segundo o autor, existe um nível ótimo, o qual corresponde ao nível em que a componente de baixa resolução derivada da decomposição da imagem XP atinge a resolução espacial original da TM (neste caso seria no nível 2). Também conclui que quanto maior for o nível de decomposição em que ocorre a fusão, maior será a quantidade de informação da XP adicionada no produto final, embora a informação espectral continue a mesma.

Li *et al.* (1995) também consideram os componentes de detalhes das duas imagens, a cada nível, para realizar a fusão. No processo, uma nova pirâmide é sintetizada onde os coeficientes de detalhes, a cada nível, são escolhidos dentre os coeficientes correspondentes nas pirâmides originais usando um critério de seleção baseado no que os autores definem como medida de atividade e que é expressa em termos de variância. Para determinação do valor atribuído a um pixel da pirâmide sintetizada, calcula-se a variância (sobre uma janela de 3x3 ou 5x5) ao redor do pixel analisado nas duas pirâmides. Se estes valores são próximos nas posições correspondentes, a média dos

dois é considerada, caso contrário seleciona-se o de maior valor absoluto para ser inserido na imagem sintética de cada nível.

Ranchin e Wald (2000) utilizam uma relação linear obtida estatisticamente a partir da imagem de aproximação no último nível e da imagem original de menor resolução para combinar os coeficientes de detalhes. Depois de encontrada esta relação, os coeficientes dos níveis anteriores são normalizados baseados na mesma. Ventura (2002) também propõe um critério de seleção de coeficientes que objetiva minimizar a influência dos coeficientes de detalhes da imagem espectral que são acrescentados à imagem sintética. Propõe também uma rotina para reamostragem (usando interpolador vizinho mais próximo) das imagens antes da decomposição de forma que as mesmas possuam dimensões adequadas para iniciar o processo.

Du *et al.* (2003) propõe um método que enfatiza a conservação das informações contidas nas imagens de entrada, que, segundo o autor, deve ser um requerimento universal nos processos de fusão. Neste método, as imagens com diferentes tamanhos de pixel não necessitam ser reamostradas para uma grade comum antes da transformação e, desta forma, o tamanho de seus pixels e os componentes de alta frequência são preservados. O registro das imagens ocorre numa escala comum após o processo de decomposição da imagem de melhor resolução. Este método é usado para fusão das imagens ScanSAR (RADARSAT-1) com resolução espacial de 50m e AVHRR com resolução espacial de 1000m. A imagem SAR é reamostrada para 100 metros de resolução para redução do ruído speckle. A imagem AVHRR também foi reamostrada para possuir tamanho de pixel igual a 800 metros (quase original). Uma área comum das duas imagens foi selecionada, sendo que a SAR possuía dimensões de 2048x2048 e a AVHRR 256x256.

Somente a imagem ScanSAR é decomposta em três níveis (1024x1024, 512x512 e 256x256). Neste último nível, a imagem aproximação de baixa resolução possui dimensões de 256x256 e tamanho de pixel igual a 800 metros, ou seja, compatível com as do AVHRR original e estas então são registradas. Um algoritmo de multiplicação é usado para fusão dos coeficientes. Os coeficientes de aproximação da imagem SAR são

multiplicados pela imagem AVHRR registrada e normalizados pelo valor médio da imagem AVHRR. Os coeficientes de detalhes utilizados são apenas os da imagem SAR, uma vez que a imagem AVHRR não possui informação espacial em escalas menores que 800m. A inversão da transformação é feita a partir da imagem sintética gerada usando esta regra.

Garguet-Duport *et al.* (1996) e Zhou *et al.* (1998) citam que a maior vantagem do método baseado em decomposição por *wavelets* é a mínima distorção das características espectrais e que o mesmo produz melhor resultado espectral e espacial comparativamente aos obtidos pelos métodos HSI, ACP e transformação Brovey. Li *et al.* (1995) também demonstrou que as transformações *wavelet* produzem resultados qualitativos superiores aos obtidos por transformação através de pirâmides Laplacianas, a qual também possibilita decompor uma imagem em múltiplas resoluções e é empregada na metodologia para fusão de imagens proposta por (BURT e ADELSON, 1983).

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS

A seleção e a obtenção dos dados necessários, bem como a definição da metodologia proposta foram norteadas pela aplicação prática do trabalho, ou seja, caracterizar fenômenos termais de escala local sobre ambientes marinhos e zonas costeiras através de imagens obtidas por sensores remotos. Emprega-se ainda uma abordagem multisensor onde as imagens termais geradas pelos diferentes sensores são combinadas de modo sinérgico empregando-se uma metodologia de fusão de imagens baseada em transformada *wavelet*.

Segundo Pohl e Tournon (1999), a seleção de um método para fusão de imagens depende da aplicação (área de estudo) e também das características do conjunto de dados disponíveis. Entretanto, é possível sumarizar uma seqüência geral de passos comuns necessários para se realizar este processo. Para Wald *et al.* (1997), o conjunto de imagens deve representar a mesma cena e possuir algum tipo de conformidade ou alinhamento. As correções específicas e pré-processamentos nas imagens de entrada devem ser feitos antes do processo de fusão. A regra geral é primeiro obter para cada imagem a melhor característica geométrica e radiométrica (espectral) possível. Toda melhoria (correção atmosférica, redução de ruído *speckle* etc.) nos dados feita antes do processo de fusão melhora o resultado final (POHL e GENDEREN, 1998).

Para que as imagens sejam coincidentes no espaço e possam representar a mesma cena elas devem ser registradas. A maior dificuldade nesta fase está relacionada com a resolução espacial dessas imagens, porque, geralmente, estas são provenientes de sensores diferentes. Em casos onde a relação entre as resoluções supera a proporção de 1:5, a identificação de pontos comuns é dificultada, pois feições visíveis na imagem de melhor resolução podem não ser visíveis na outra imagem. Pohl e Genderen (1998) ressaltam que muitas metodologias exigem que os dados de entrada sejam registrados

com acurácia sub-pixel. Zhou *et al.* (1998) propõem que a reamostragem no processo de registro deva ser feita preferencialmente usando interpolador por vizinho mais próximo para evitar distorção espectral. Alguns métodos empregam ainda etapas de reamostragem da imagem de menor resolução espacial para igualar suas dimensões às da outra imagem.

Outro tipo de alinhamento freqüente consiste na compatibilização do brilho e contraste (uniformização de média e variância) das imagens de entrada. Deve-se considerar ainda a necessidade de uniformização das resoluções radiométricas (número de bits) dos sensores. Segundo Schowengerdt (1997), a qualidade do produto da fusão de imagens multisensores é melhor quando as imagens são adquiridas o mais que possível no mesmo dia e hora e sobre áreas que não possuam grandes variações de relevo. Além disto, para reduzir fatores relacionados aos sensores, as bandas espectrais devem ser o mais coincidentes possível.

Cabe ressaltar que as etapas descritas acima podem variar em função da abordagem utilizada para a fusão. No caso de aplicação de transformada *wavelet*, os dados de entrada devem ainda possuir dimensões que sejam potência de 2.

Levando em consideração os aspectos descritos acima, foi estabelecida uma metodologia que pode ser resumida nos seguintes passos:

- 1) Seleção da área de estudo.
- 2) Obtenção dos dados (imagens e dados de campo).
- 3) Alinhamento das imagens para o processo de fusão (georreferenciamento, registro, corte da área comum, ajuste de média e variância e definição das dimensões das imagens).
- 4) Fusão das imagens (desenvolvimento e aplicação do algoritmo Wavefusion).
- 5) Avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos.

5.1 Seleção da Área de Estudo

Na costa sudeste do Brasil, na cidade de Angra dos Reis, a cerca de 100 km da cidade do Rio de Janeiro, existem atualmente duas usinas nucleares em funcionamento: Angra I (600MW) e Angra II (1300MW). Instaladas próximo ao mar, as usinas captam água em uma enseada semifechada para utilizá-la como fluido refrigerador de seus reatores. Em condições normais, a água aquecida proveniente do resfriamento dos reatores e com fluxo de 40 e 80 metros cúbicos por segundo, respectivamente, é escoada através de um túnel de 400 m de comprimento no Saco da Piraquara de Fora, situada em lado oposto à área de captação, separada por uma península. A descarga da água aquecida (pluma termal) constitui-se numa anomalia local que pode alcançar alguns quilômetros quadrados. Sua porção mais quente chega a atingir 8°C acima da temperatura da água do ambiente marinho adjacente (BANDEIRA *et al.*, 2003).

Além desse aspecto, em ocorrências eventuais, o vento, a maré e as correntes marinhas podem deslocar a pluma de descarga em direção ao lado da enseada onde ocorre a captação. A detecção e a caracterização desse fenômeno trazem, portanto, informações importantes para a adequada tomada de decisões. A Figura 5.1 ilustra a área de estudo com as localizações da Central Nuclear e dos pontos de tomada e descarga de água usada na refrigeração dos reatores.

Em outubro de 2003 foi iniciado um trabalho de pesquisa para o monitoramento da pluma termal que ocorre nas adjacências da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, em Angra dos Reis, RJ, a partir de imagens obtidas com os sensores ASTER e HSS (LUCCA *et al.*, 2005). Desde meados de 1980, época em que a usina entrou em operação, essa tarefa vem sendo realizada com metodologias convencionais empregando-se embarcações e medições pontuais de temperatura *in situ*, procedimento tão mais lento e oneroso quanto maior for a área amostrada ou a densidade de pontos amostrais realizada.

A pluma termal apresenta características vantajosas para este tipo de estudo por ser de pequena escala e por ocorrer em uma superfície homogênea, de emissividade praticamente constante e conhecida ($\epsilon \sim 0,986$) a priori na faixa do infravermelho termal

de interesse (8-12 μm) e comportamento de superfície Lambertiana (emissão isotrópica). Assim, nessa faixa do espectro, o oceano pode ser assumido praticamente como um corpo negro. Outra característica vantajosa da pluma como alvo do experimento é o fato dessa possuir gradientes horizontais de temperatura em sua extensão, proporcionando um conjunto diversificado de alvos com temperaturas distintas dentro da área imageada. Isso será útil na verificação da habilidade dos sensores em discriminar estes gradientes de temperatura e, desta forma, avaliar o desempenho radiométrico dos mesmos.

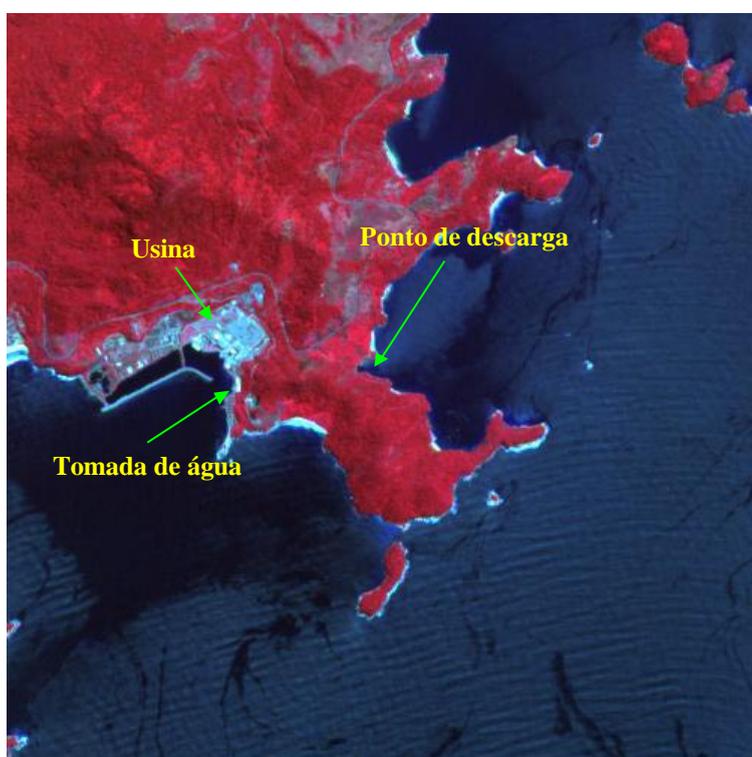


FIGURA 5.1 – Composição colorida com as bandas 3, 2, e 1 do sensor ASTER da área de estudo com as localizações da Central Nuclear e dos pontos de tomada e descarga de água usada na refrigeração dos reatores.

Assim, a área de estudo foi escolhida por apresentar um fenômeno termal de escala local (característica desejável para a aplicação da metodologia proposta) e por ocorrer em uma zona costeira. A necessidade de mapear a pluma termal tem como objetivo fornecer subsídios para cientistas interessados em estudar fenômenos termais de escala local que ocorrem em ambientes marinhos complexos como as zonas costeiras. O resultado desse esforço pode ser extremamente útil para fins de monitoramento,

previsão das características de dispersão das plumas decorrentes do processo de refrigeração dos reatores, elaboração de planos de contingência para a região e ainda servir de subsídio na seleção de áreas propícias para construção de novas usinas.

5.2 Obtenção dos Dados de Entrada

Para estudar o fenômeno termal e a aplicação de técnicas de fusão de imagens são empregadas neste trabalho imagens obtidas com os canais termais dos sensores ASTER e HSS. O primeiro é um sensor orbital a bordo da plataforma TERRA-1. O outro, um aerotransportado que equipa uma aeronave do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia). As imagens foram adquiridas no dia 09 de outubro de 2003 durante campanha de imageamento realizada nas adjacências da Central Nuclear. O sobrevôo da área com o sensor HSS foi feito no período da manhã (linhas de vôo executadas entre 09:30 e 11:00h, horário local) para coincidir com a passagem do sensor ASTER (10:17h) e no período da tarde (linhas de vôo executadas entre 15:00 e 16:00h). O sobrevôo da tarde teve por objetivo o monitoramento da mesma área para um experimento de dispersão com Rodamina WT. Simultaneamente ao sobrevôo da aeronave foram realizadas medições de temperatura superficial da água do mar na região da pluma térmica originada das usinas.

Durante a obtenção das imagens somente o reator de Angra II estava em operação. As condições atmosféricas na hora e local dos sobrevôos sobre a área de estudo estavam plenamente satisfatórias, sem nuvens, visibilidade acima de 25 km e o vento de sudoeste com velocidades inferiores a 2m/s.

5.2.1 Obtenção dos Dados de Campo (TSM)

As medidas da temperatura superficial em pontos dentro da pluma foram feitas com apoio da ELETRONUCLEAR e por equipes do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) de Belo Horizonte, pertencente a CNEM. Os equipamentos utilizados foram dois Termocondutivímetros WTW com acurácia de 0,1°C e um radiômetro Thermopoint 20EM, operando entre 8 e 14 μm e acurácia de 1°C. Os primeiros foram utilizados para medir os valores da temperatura a

profundidades de 5 e 10 cm. O outro, operado manualmente a partir do barco, obteve medidas da camada superficial. Foram amostrados 24 pontos distribuídos espacialmente (para verificação dos gradientes horizontais internos de temperatura) em radiais partindo da posição mais próxima do ponto de descarga da água quente proveniente dos reatores até uma distância total de aproximadamente 5 km do local de lançamento.

A grade de coleta dos dados de temperatura *in situ* usada foi a mesma utilizada em experimentos anteriores (BANDEIRA *et al.*, 2003), cujos resultados poderiam servir como referência. A localização dos pontos durante a coleta foi feita empregando-se dois receptores GPS, um fixo e um móvel a bordo do barco, aplicando-se assim a técnica diferencial (DGPS) para aumento da precisão, obtendo-se um erro de posicionamento inferior a 8,8 m. A Figura 5.2 apresenta a distribuição espacial dos pontos selecionados para medição da temperatura superficial.

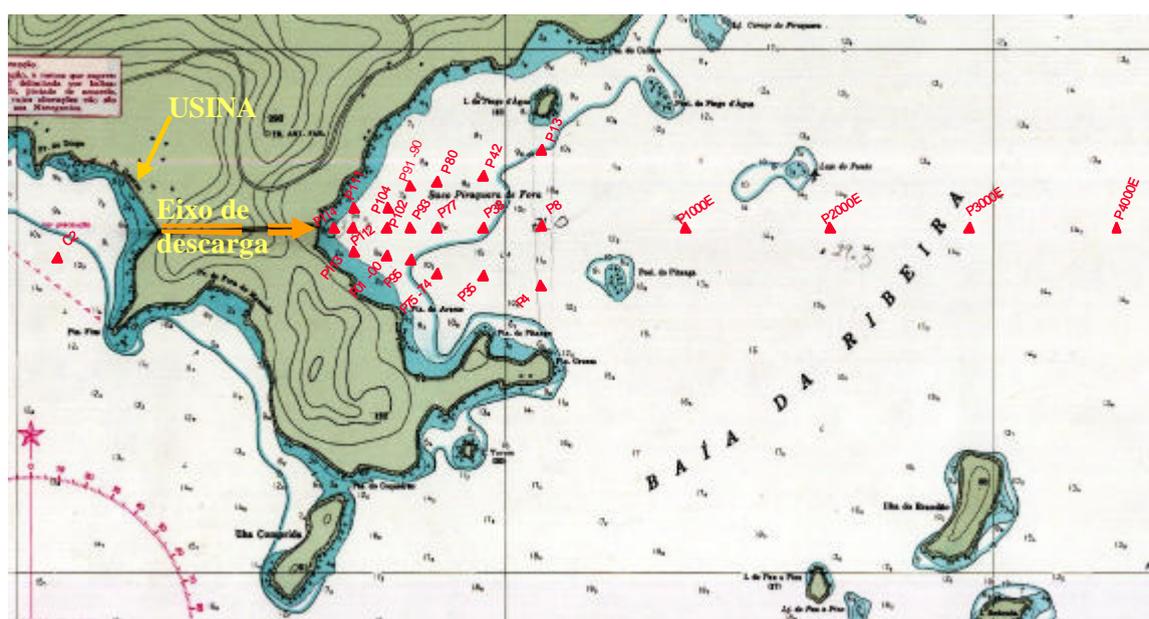


FIGURA 5.2 – Distribuição espacial dos pontos selecionados para medição da temperatura superficial.

5.2.2 Obtenção das Imagens Através do Sensor HSS

A seguir serão descritas algumas características do sensor HSS bem como aspectos do planejamento, da aquisição e do processamento para obtenção final das imagens do HSS.

5.2.2.1 O Sensor HSS

O HSS (*Hyperspectral Scanner System*), modelo AHS AA5201, é fabricado pela empresa SenSyTech Inc e foi recebido em dezembro de 2002 para ser utilizado em atendimento às necessidades do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazônia). O HSS está integrado à aeronave C 98-B, um CESSNA – Caravan 675 modificado para a operação do imageador. É um sensor aerotransportado de concepção modular que consiste, fisicamente, de dois conjuntos destacados de equipamentos: um módulo de controle e um módulo sensor. A Figura 5.3 apresenta uma ilustração do módulo sensor, do módulo de controle e da plataforma onde o HSS foi integrado.

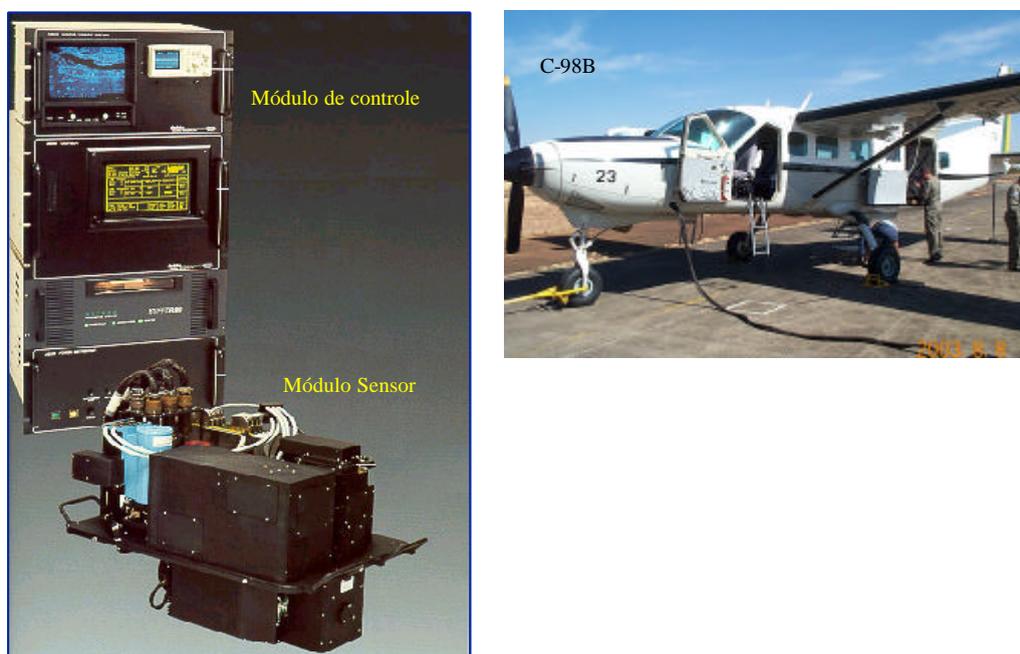


FIGURA 5.3 – Módulos do sensor HSS e a plataforma C-98B.

O módulo sensor é responsável pela captação e transdução da radiação eletromagnética em sinal elétrico analógico, e pela pré-amplificação desse sinal. Esse módulo é dividido

pelo fabricante em dois componentes: a cabeça de varredura e o espectrômetro. Mas além desses, encontra-se fisicamente adaptado sobre o chassi do espectrômetro um giroscópio, responsável por alimentar o sistema com as informações de rolagem da aeronave, as quais são utilizadas para a correção espacial, em tempo real, do posicionamento das linhas de varredura.

O módulo de controle consiste de três unidades interligadas: a de distribuição de força; a digitalizadora e a de monitoramento de gravação dos dados. Inclui os dispositivos responsáveis pela digitalização, quantização, multiplexação e gravação dos dados, além de controlar toda a distribuição de energia e de prover as interfaces de entrada de comandos e de visualização dos dados para o usuário. Esse módulo também abriga o receptor GPS (*Global Positioning System*) que está incorporado ao sistema, acomodado na unidade digitalizadora, e um gravador analógico de vídeo SVHS.

A cabeça de varredura consiste de um espelho giratório (uma face), de uma óptica coletora e de dois corpos negros de referência. O espelho varre a superfície no sentido horário, perpendicularmente à trajetória de deslocamento da plataforma, e é movimentado por um motor com possibilidade de ajuste da velocidade angular (ω) em cinco rotações pré-estabelecidas: 6,25; 12,5; 25; 50 ou 100 Hz, programáveis em vôo. A Figura 5.4 apresenta uma visão do esquema óptico e do processo de varredura do sensor HSS.

Depois de refletida no espelho giratório, a radiação é focalizada por um espelho parabólico e conduzida a uma pupila limitadora (abertura *f-stop*), que determina a abertura de entrada no espectrômetro. Essa pupila (diafragma) determina a área do detector que será exposta à radiação da superfície e, portanto, caracteriza o ângulo de visada instantâneo (*Instantaneous Field Of View* – IFOV) do sensor. Existem duas opções de pupilas disponibilizadas pelo fabricante: uma que resulta em um IFOV de 2,5 x 2,5 mrad, ou outra, de área menor, que resulta em um IFOV de 1,25 x 1,25 mrad.

Após a abertura “*f-stop*” a radiação é colimada, através de lentes, em direção ao espectrômetro. Nesse, a radiação colimada passa inicialmente por três filtros dicróicos que distribuem-na em cinco portais (*Ports*), numerados da seguinte forma: Portal 1, para

os 20 primeiros canais, onde a radiação da região do visível e parte do infravermelho próximo (IVP) (0,443 a 1,017 μm) é dispersada espectralmente, através de um prisma simples, em bandas contíguas de aproximadamente 30 nm de largura; Portal 2A, para um único canal (e portanto não possui dispositivo de dispersão) da região do infravermelho médio (IVM), centrado em 1,661 μm , com 135 nm de largura espectral; Portal 2, para 16 canais (numerados do 22 ao 37) de largura espectral aproximada de 23 nm, que abrangem continuamente a região de 2,006 a 2,377 μm (IVM), separados espectralmente através de um grade de dispersão, com o mesmo sistema projetado para os portais remanescentes; Portal 3, para 7 canais (numerados do 38 ao 44) de largura espectral aproximada de 350 nm, que abrangem continuamente a região de 3,03 a 5,44 μm ; e finalmente o Portal 4, para 6 canais (numerados de 45 a 50) quase contínuos, que abrangem a região de 7,9 a 12,43 μm , mas em larguras espectrais de banda variáveis de 500 a 1140 nm.

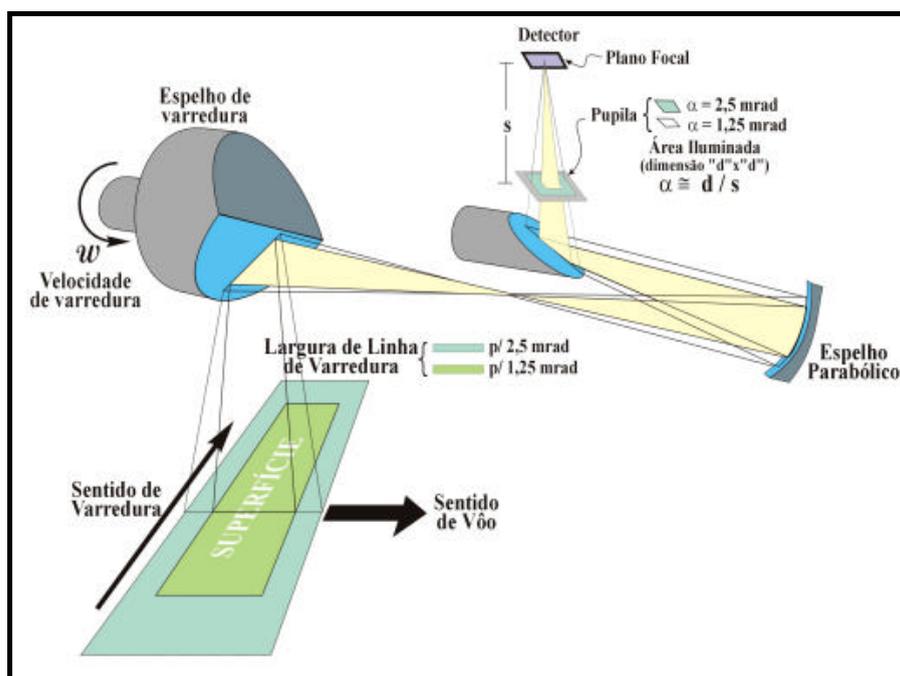


FIGURA 5.4 – Esquema óptico e ilustração do processo de varredura do sensor HSS.

FONTE: Adaptada de Moreira *et al.* (2005).

No HSS há apenas um detector para cada canal. Para os canais referentes aos Portais 1 e 2A (região do visível e do IVP) os detectores são preparados a base de cristais de

Silício. Para os Portais 2 e 3, são utilizados detectores de InSb (Antimoniato de Índio) e para o Portal 4 emprega-se o HgCdTe (Telureto de Cádmio-Mercúrio). Para o funcionamento adequado, a fim de reduzir o ruído térmico, os conjuntos dos Portais 2, 3 e 4 necessitam de refrigeração a 77 K, a qual é proporcionada por um sistema de ciclo aberto a base de nitrogênio líquido. A abrangência e a distribuição espectral dos canais termais do HSS são mostradas na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 – Características dos canais termais do sensor HSS.

Canal	Centro de Banda (mm)	Limites de Bandas (mm)	
38	3,24	3,03	3,37
39	3,53	3,36	3,71
40	3,91	3,77	4,13
41	4,17	4,06	4,50
42	4,63	4,44	4,83
43	4,98	4,80	5,15
44	5,31	5,15	5,44
45	8,18	7,90	8,41
46	8,63	8,44	8,86
47	9,10	8,93	9,33
48	9,67	9,49	10,26
49	10,54	10,31	11,26
50	11,50	11,29	12,43

FONTE: Sensytech (2002a).

Os sinais gerados pelos detectores são pré-amplificados e enviados à unidade digitalizadora, onde são aplicados os fatores de ganho e o *offset* introduzidos pelo operador e, na saída são quantizados em 12 bits, possibilitando a discretização de 4096 níveis digitais (de 0 a 4095), para serem enviados à unidade de gravação de alta densidade (mídia do tipo “*exabyte*”). Maiores informações sobre esse sensor podem ser obtidas em (MOREIRA *et al.*, 2005).

5.2.2.2 Aquisição e Processamento dos Dados do Sensor HSS

A seguir serão descritos os fatores de planejamento da aquisição das imagens e aspectos do processamento e obtenção final das imagens.

Para planejar a campanha de aquisição em Angra dos Reis com o HSS foi necessário definir as seguintes variáveis: o campo de visada instantâneo (IFOV), as alturas de vôo, a velocidade da plataforma, a frequência de varredura do espelho além das temperaturas máxima e mínima dos corpos negros internos. A partir dessas variáveis, são definidas a

resolução espacial nominal (GIFOV), a largura da faixa imageada (GFOV), a velocidade (no solo) da plataforma adequada para a perfeita composição da imagem e ainda as NETDs (*Noise Equivalent Temperature Difference*) dos canais do infravermelho termal, as quais variam em função da frequência de rotação do espelho e do IFOV selecionados.

Como os valores de NETD dos canais termais devem ser os menores possíveis para permitir a discriminação dos gradientes horizontais de temperatura da pluma, optou-se pelo IFOV de 2,5 mrad e frequência de rotação do espelho de varredura igual a 12,5 Hz, o que permitiu obter valores médios de NETD de 0,27°C para os canais da faixa espectral de 8 a 14 μm (SENSYTECH, 2002a). Essa configuração possibilitou o imageamento em diversas alturas dentro do envelope operacional da aeronave e foi mantida constante durante toda a fase de coleta de dados.

Estipulou-se o sobrevôo da área de estudo nas seguintes alturas: 3048, 2743, 2438, 2134, 1981 e 1829 metros. A primeira é o limite superior de operação da aeronave e a última é o limite inferior imposto pela relação de IFOV e frequência de rotação do espelho selecionados. A direção de imageamento foi definida no rumo magnético 073° em função da geografia local. Todas as faixas de vôo foram executadas na mesma direção para se preservar as condições de imageamento (vento, iluminação solar etc.). As temperaturas máxima e mínima dos corpos negros de referência foram definidas como 37°C e 15°C, respectivamente, pois este representa o intervalo de temperaturas superficiais extremas esperadas para a região.

Os dados obtidos foram processados através de programa de importação e processamento de dados do próprio fabricante do sensor, o qual permite gerar, como produto final, imagens dos diversos canais registradas entre si, corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada e ainda expressas em valores de radiância, para os canais no visível, ou temperatura, para os canais termais. Cabe ressaltar que a temperatura do alvo obtida após o processamento é uma temperatura de brilho que, portanto, deve ser corrigida pela emissividade (nem sempre conhecida a priori) para representar a temperatura termodinâmica do alvo imageado. Outro aspecto é

que o cômputo da temperatura de brilho não leva em conta os efeitos causados pela atmosfera presente entre o alvo e o sensor. Devido à falha do GPS interno do sensor durante o sobrevôo para aquisição das imagens, não foi possível executar a etapa de georrefenciamento automático das imagens durante o processamento.

5.2.3 Obtenção das Imagens Através do Sensor ASTER

A seguir serão descritas algumas características do sensor ASTER e aspectos da solicitação, aquisição e processamento das imagens.

5.2.3.1 O Satélite TERRA e o Sensor ASTER

O ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) é um instrumento imageador multiespectral a bordo do TERRA-1, o primeiro de uma série de satélites com múltiplos sensores dentro do projeto da *NASA's Earth Observing System* (EOS), que suporta uma série coordenada de satélites de órbita polar para observação global continuada (*long-term*) da superfície terrestre, biosfera, atmosfera e oceanos (ABRAMS *et al.*, 2002). Lançado em 18 dezembro de 1999 e com período de operação planejado de 06 anos (até 2005), possui órbita circular (a mesma que o LANDSAT-7, apenas 30 minutos atrás), quase polar, sol síncrona e a uma altitude de 705 km. Além do ASTER, o satélite TERRA-1 conduz a bordo outros quatro sensores: o MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), o MISR (*Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer*), o CERES (*Clouds and Earth's Radiant Energy System*) e o MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*).

O ASTER foi desenvolvido para obter mapas detalhados da temperatura, emissividade, reflectância e elevação da superfície terrestre. Para tanto é composto por três subsistemas distintos, totalizando 14 bandas (a melhor configuração existente entre os sistemas sensores orbitais atualmente disponíveis) que variam do visível ao infravermelho termal (distante): *Visible and Near-Infrared* (VNIR), *Shortwave Infrared* (SWIR) e *Thermal Infrared* (TIR). Cada subsistema possui seu próprio telescópio e, no caso do VNIR, há ainda um outro com visada oblíqua (27,6 graus) para obtenção de pares estereoscópicos na mesma órbita. A resolução espacial, a nadir, varia com o

comprimento de onda: 15 metros nos espectros do visível e infravermelho próximo (VNIR), 30 no infravermelho médio (SWIR) e 90 no infravermelho termal (TIR).

A Tabela 5.2 apresenta as principais características do sensor ASTER. Maiores informações sobre este sensor podem ser encontradas em (FUJISADA, 1998; GILLESPIE *et al.*, 1998; ABRAMS *et al.*, 2002; ERSDAC, 2002).

TABELA 5.2 – Características do sensor ASTER

Subsistema	Banda	Faixa espectral (mm)	Resolução espacial (m)	Nível de quantização
VNIR	1	0.52-0.60	15	8 bits
	2	0.63-0.69		
	3N	0.78-0.86		
	3B	0.78-0.86		
SWIR	4	1.60-1.70	30	8 bits
	5	2.145-2.185		
	6	2.185-2.225		
	7	2.235-2.385		
	8	2.295-2.365		
	9	2.360-2.430		
TIR	10	8.125-8.475	90	12 bits
	11	8.475-8.825		
	12	8.925-9.275		
	13	10.25-10.95		
	14	10.95-11.65		

FONTE: Thome *et al.* (1998) e ERSDAC (2002).

As órbitas adjacentes do satélite TERRA-1 são espaçadas em aproximadamente 172 km enquanto que a faixa de observação do sensor é de 60 km. Logo, para que seja possível uma cobertura total do globo terrestre é necessário usar, além da visada vertical (nadir), uma visada lateral. Para tanto, o sensor tem capacidade de apontamento transversal à trajetória de vôo com uma amplitude aproximada de +/- 8.55 graus (SWIR e TIR). Para o subsistema VNIR, entretanto, a capacidade de apontamento é superior a 24 graus para possibilitar observações de urgência de forma que qualquer local do planeta possa ser observado dentro de cinco dias (ERSDAC, 2002).

Existem também vários modos de observação estabelecidos para diferentes propósitos e aplicações. Os modos básicos de operação são o completo (*Full Mode*) para observações durante o dia e para obtenção de dados em todas as bandas e o *TIR Mode*

para observações no período noturno. É possível também estabelecer um ganho, em função da aplicação e objetivo, próprio para cada uma das bandas do SWIR e do TIR.

Segundo Fujisada (1998), o sensor ASTER permite gerar dois tipos de dados: Level-1A (L1A) e Level-1B (L1B). O primeiro consiste dos dados da imagem (bruta), dos coeficientes radiométricos e geométricos e outros dados auxiliares. A imagem é mantida no formato original, pois os coeficientes não são aplicados nesse dado. No segundo (L1B), as imagens são geradas aplicando-se os coeficientes para calibração radiométrica e reamostragem geométrica. O processo de geração desse tipo de dado também inclui o registro das bandas SWIR e TIR com as do VNIR, tendo-se ao final todas as bandas registradas. Pode ainda ser gerado em diferentes projeções cartográficas e ser reamostrado pelos métodos de convolução cúbica, vizinho mais próximo ou Bilinear.

O dado L1B é produzido pelo ASTER-GDS em Tokyo, no Japão, e enviado para o ERSDAC para arquivo, distribuição e processos decorrentes, que incluem a obtenção de diversos produtos operacionais (*level-2 geophysical products*) tais como: emissividade e temperatura da superfície, radiância no sensor e na superfície, modelo digital de elevação (DEM), dentre outros.

5.2.3.2 Obtenção e Processamento dos Dados do Sensor ASTER

As imagens do ASTER foram solicitadas através de *Data Acquisition Request* (DAR) ao *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC) usando o *Information and Management Subsystem* (IMS) do *ASTER Ground Data System* (ASTER GDS). Através do DAR é possível solicitar e/ou procurar por imagens já adquiridas de uma área de interesse.

Não havia nenhuma imagem da área de estudo adquirida com o sensor ASTER no início do trabalho. Além disso, a cena a ser observada situava-se fora da faixa de 60 km que o sensor cobre ao longo de uma órbita. Logo, foi necessário apontar o sensor para que a área de estudo pudesse ser imageada.

Os ângulos de apontamento do sensor foram calculados e definidos através dos parâmetros: $LookAngleMin = +2.4$ e $LookAngleMáx = +7.28$ (apontamento para a esquerda). A Figura 5.5 mostra as órbitas adjacentes do sensor ASTER sobre a área de estudo e a ilustração do cálculo dos valores dos ângulos de apontamento. Cabe ressaltar que o apontamento do sensor também pode ser feito automaticamente bastando apenas indicar as coordenadas (cantos superiores e inferiores) da área de estudo. A órbita ponto é a 218/211. As órbitas diurnas são descendentes. Foi definido um critério para que a gravação fosse aceitável para recobrimentos de nuvens menores que 40%. Pediu-se a gravação de todas as bandas.

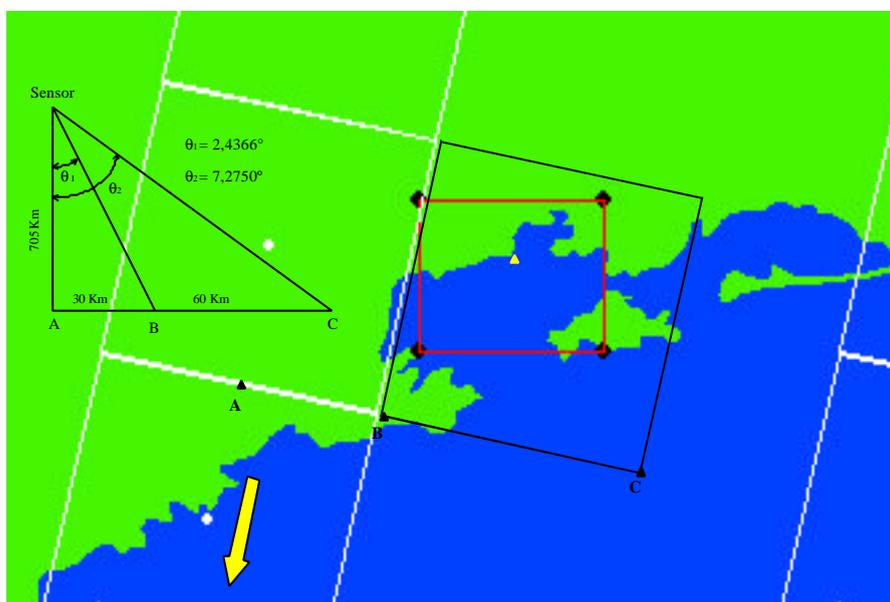


FIGURA 5.5 – Órbitas diurnas adjacentes (linhas brancas) do sensor ASTER sobre a área de estudo (retângulo vermelho) e ilustração do cálculo dos ângulos de apontamento do sensor. O retângulo preto indica a área a ser imageada através dos ângulos de apontamento definidos e o triângulo amarelo indica a localização da Usina Nuclear e do fenômeno em estudo.

FONTE: ERSDAC (2001).

Para esse trabalho, foram solicitados, além dos dados L1B, o produto 2B03 (temperatura da superfície). O produto 2B03 é uma imagem derivada dos canais TIR onde os níveis digitais expressam valores da temperatura cinética (graus K) da superfície com resolução espacial de 90 metros e processada em 12 bits. Esse resultado é derivado dos produtos 2B01 (radiância na superfície) e 2B04 (emissividade da

superfície), ambos dependentes da qualidade da correção atmosférica aplicada aos dados L1B. Segundo Gillespie *et al.* (1998), a derivação operacional da temperatura superficial dos alvos terrestres e aquáticos possui acurácia de 0,5 K. Para tanto se aplica um algoritmo desenvolvido especificamente para este propósito. Os dados L1B e o produto 2B03 foram solicitados em projeção UTM e reamostrados por vizinho mais próximo.

Os dados do ASTER são fornecidos no formato HDF-EOS (*Hierarchical Data Format*). Aplicativos comerciais de processamento de imagens tais como o ENVI versão 3.5 (RSI), IMAGINE versão 8.5 (ERDAS), PCI version 8.2 (PCI Geomatics), Matlab (Mathworks) permitem manipular esse formato de dado. Também existem aplicativos livres disponíveis na *internet*.

5.3 Alinhamento dos Dados para o Processo de Fusão

Esta fase tem como meta preparar os dados de entrada (alinhamento) para o processo de fusão e envolve etapas de seleção de dados, reamostragem, georreferenciamento, registro, corte de uma área comum e definição das dimensões das imagens de entrada.

Das imagens geradas com o sensor HSS, selecionou-se aquela obtida a 3048 m de altura, com uma resolução espacial nominal de 7,62 m, pelo fato da mesma ter sido adquirida no horário mais próximo da passagem do satélite TERRA-1 (e conseqüente imageamento com o sensor ASTER) e também porque a faixa de varredura nesta altura era a maior disponível (5685 m).

No processo de fusão através de transformada *wavelet* proposto nesse trabalho emprega-se apenas uma imagem de cada sensor. O HSS possui seis canais, ou seja, seis imagens no infravermelho termal e o ASTER possui cinco. Qual combinação utilizar?

Optou-se pela imagem do Canal 47 do sensor HSS e pela imagem do produto 2B03 do sensor ASTER. A primeira foi escolhida por apresentar a melhor característica radiométrica dentre as demais (LUCCA *et al.*, 2005). Já a imagem do produto 2B03 foi selecionada porque os valores digitais dessa imagem são expressos em termos de

temperatura absoluta. Cabe ressaltar que o processo de fusão poderia ter sido feito também com qualquer uma das cinco bandas termais do ASTER.

Devido à falha do GPS interno do sensor HSS durante o imageamento, as imagens desse sensor foram processadas sem as informações das coordenadas geográficas da cena imageada. Além disso, imagens obtidas por sensores aerotransportados estão sujeitas a erros geométricos causados por eventuais variações da plataforma durante o imageamento, tanto no eixo lateral, quanto nos eixos vertical e transversal à trajetória de voo.

Para averiguar aspectos geométricos da imagem do HSS, utilizou-se uma carta topográfica na escala de 1:10000 obtida com base em imagens do satélite IKONOS (resolução espacial de 1m) de 09/out/2000. As cartas, Itaorna (folha 5-2) e Piraquara de Fora (folha 5-4), foram digitalizadas (300 dpi, RGB), georreferenciadas por um polinômio de grau 2, usando método de reamostragem bilinear e com RMS iguais a 0,970685 m e 0,980212 m para as cartas Itaorna e Piraquara de Fora, respectivamente, e mosaicadas. Ambas estavam na projeção UTM, Datum WGS84 e Zona 23S. Como 592 pixels nessa carta equivalem a uma distância de 500 m, a resolução da carta é de 0,8445 m. Foram realizadas medidas de distâncias nas direções horizontais, verticais e diagonais em pixels na imagem HSS e medidas de distância em metros no mosaico das cartas topográficas utilizando-se feições reconhecidas nas duas imagens. No final, obteve-se uma resolução espacial média de 6,7 m, a qual passou a ser considerada ao invés da nominal.

Selecionadas as imagens, partiu-se para a etapa de registro. A dificuldade nessa fase é que as imagens de entrada selecionadas possuem resoluções espaciais muito diferentes (90 e 6,7 m). Pontos de controle facilmente identificados na imagem do HSS não são observáveis na imagem 2B03 (Figura 5.7, na página 101). A imprecisão na localização de pontos de controle acarreta erros no processo de registro que podem comprometer seriamente o resultado final da fusão.

Para minimizar os erros e aproveitando as características dos sensores empregados (cor-registro entre as bandas e resolução espacial no espectro visível), o processo de registro

foi feito de modo alternativo. Ao invés de fazer o registro entre as duas imagens termais, procedeu-se inicialmente ao registro entre as imagens obtidas nos canais do VNIR do ASTER e do HSS. Nesse caso as resoluções espaciais são de 15 e 6,7 m, respectivamente, e a localização visual de pontos de controle nas duas imagens é mais fácil.

Antes do processo de registro a imagem do HSS foi reamostrada para possuir resolução espacial de 11 metros. O fator de escala em x e y empregados foi igual a 0,60909, que equivale a razão entre o valor de tamanho do pixel admitido e o pretendido, isto é, 6,7 e 11 m, respectivamente. Ao final, obteve-se uma imagem com dimensões de 545 x 614 pixels e com 11 m de resolução espacial. Esse valor de resolução espacial foi escolhido pois ao se aplicar a transformada *wavelet* nesta imagem, a aproximação de baixa resolução terá 22 m no primeiro nível de decomposição, 44 m no segundo e 88 m no terceiro. Nesse último nível, sua resolução espacial estará próxima à original do ASTER (90 m).

Para ajustar os dados, a imagem do ASTER (2B03) foi reamostrada de 90 para 88 m. Embora o objetivo fosse não alterar a imagem 2B03, a etapa de reamostragem foi necessária para o alinhamento dos dados de entrada, permitindo resoluções espaciais compatíveis. Entretanto, a imagem pode ser considerada quase original. A reamostragem das imagens foi feita empregando-se método de reamostragem por vizinho mais próximo. A Figura 5.6 apresenta os valores de temperatura derivados da imagem 2B03 original e os derivados da imagem 2B03 reamostrada para 88 m. Os pontos amostrados são aqueles onde foram obtidas medidas de campo. Observa-se que o processo de reamostragem modifica os valores da imagem original.

Como seria necessário localizar nas imagens os pontos de coordenadas geográficas conhecidas onde foram tomadas amostras de campo, optou-se por georeferenciar a imagem do ASTER antes do processo de registro.

O georreferenciamento das imagens dos canais do VNIR, SWIR, TIR e do produto 2B03 foi feito utilizando-se o aplicativo ENVI 3.6. As informações necessárias para

georreferenciar as imagens L1B do ASTER estão contidas juntamente com as imagens nos arquivos de formato HDF-EOS. No arquivo *productmetadata.0* é possível encontrar informações sobre: coordenadas dos cantos superiores e inferiores da cena (*SceneFourCorners*), projeção cartográfica (*Map projection*), número de pixels e linhas das imagens, resolução espacial, método de reamostragem, dentre outras. É recomendado que se utilize o Datum WGS84.

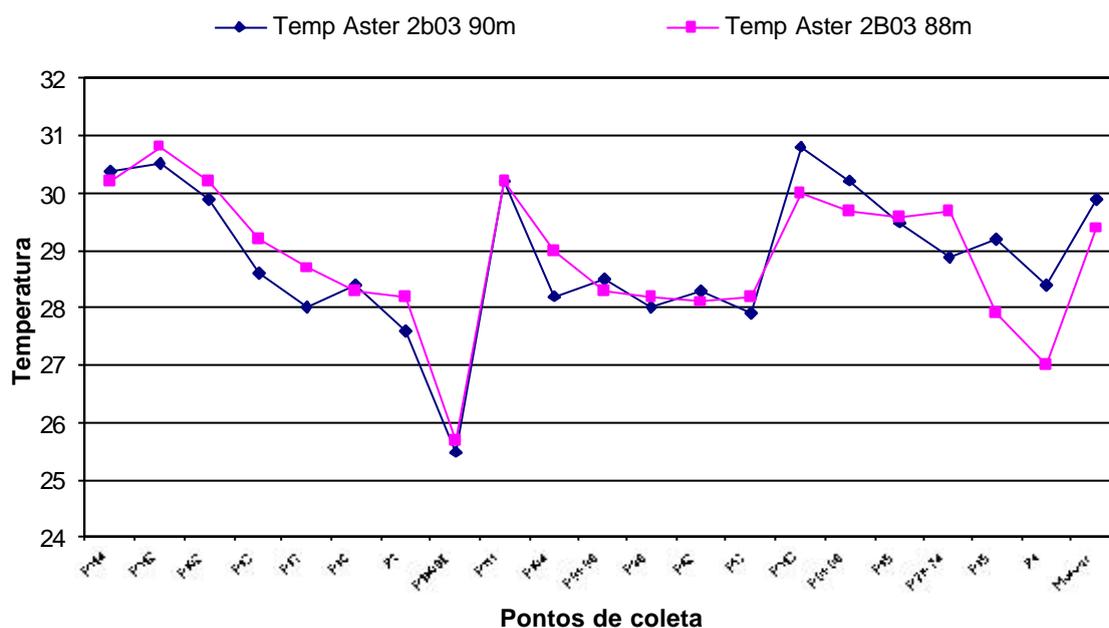


FIGURA 5.6 – Comparação dos valores de temperatura (eixo das ordenadas) derivados da imagem 2B03 original e os derivados da imagem 2B03 reamostrada para 88 m

As imagens foram georreferenciadas usando polinômio de primeiro grau, na projeção UTM, relativas ao Datum WGS-84 e reamostradas pelo método vizinho mais próximo. O georreferenciamento das imagens dos canais VNIR, SWIR e TIR foi feito separadamente pelo fato das resoluções espaciais serem diferentes. Cabe lembrar que as imagens desses canais são corrigidas. Segundo ERSDAC (2001), o erro absoluto de localização de um pixel na imagem do ASTER é menor que 50 m e o relativo, menor que 15 metros. Também não foram considerados erros de deslocamento devido ao relevo (a imagem não é ortorretificada).

A etapa do registro em si foi então feita partindo-se de uma imagem (composição colorida) dos canais do VNIR do sensor ASTER (resolução espacial de 15m) com uma obtida pelos canais do visível do HSS (11m). Esse procedimento permitiu um registro mais preciso que aquele obtido caso os dados de entrada fossem apenas as imagens dos canais termais dos sensores. Foram coletados 23 pontos de controle. Desse total foram utilizados 16, através dos quais obteve-se RMS igual a 0,6101 m, ou seja, menor que um pixel.

Utilizando o aplicativo ENVI 3.6 (RESEARCH SYSTEM, 2001) e considerando a imagem do ASTER previamente georreferenciada como base, empregou-se a opção *WARP FILE AS IMAGE TO MAP* para proceder ao registro. Com essa opção é possível transferir as informações de projeção e Datum da imagem base para a que sofrerá o processo de rotação (*WARP*) e ainda disponibiliza a opção para selecionar a resolução da imagem de saída. Utilizou-se polinômio do segundo grau, pixel de 11 m (preservar a resolução inicial) e método de reamostragem bilinear. Todas as bandas do HSS foram então registradas e passaram a ter a mesma projeção (UTM) e Datum (WGS-84) da imagem ASTER.

O passo seguinte foi selecionar uma área de interesse na imagem registrada do HSS com dimensões na base de potência de 2. Recortou-se assim uma cena de 256 x 256 pixels e anotaram-se as coordenadas dos cantos superiores e inferiores. Essas coordenadas foram utilizadas para recortar a cena equivalente na imagem 2B03 do ASTER, também previamente georreferenciada, o que resultou em uma imagem com dimensões de 32 x 32 pixels. Ao final dessas etapas, foram obtidas duas imagens de entrada que representavam a mesma cena, estavam registradas e possuíam resoluções espaciais e dimensões compatíveis para execução do processo de fusão através de transformadas *wavelets*.

Na Figura 5.7 são apresentadas as duas imagens de entrada alinhadas (geometricamente) para o processo de fusão. A Figura 5.7a é a imagem do HSS com dimensões de 256 x 256 pixels e resolução espacial de 11m. A Figura 5.7b é a imagem (ampliada seis vezes)

do produto 2B03 do ASTER reamostrada para 88 m e com dimensões de 32 x 32 pixels. Ambas estão quantizadas em 12 bits e expressas em valores de temperatura.

5.4 Fusão das Imagens dos Canais Termiais dos Sensores HSS e ASTER

Considerando-se que no escopo do processamento de imagens, a fusão, integração ou mesclagem é a combinação de duas ou mais imagens diferentes de uma mesma cena para formar uma nova imagem usando um certo algoritmo (POHL e GENDEREN, 1998), o objetivo nessa fase será reunir nessa nova imagem, também conhecida como sintética ou híbrida, as melhores características de cada dado original necessárias para o estudo da pluma termal.

Nesse caso, o que se espera é que o algoritmo de fusão seja capaz de criar uma imagem híbrida na qual estejam combinadas as informações espaciais (detalhes) da imagem do HSS com as informações espectrais (valores de temperatura) da imagem do sensor ASTER. Assim, o objetivo da fusão é obter a mais completa e precisa descrição da cena usando as melhores características espaciais e espectrais dos dados de entrada, com ênfase na manutenção do significado físico da informação espectral.

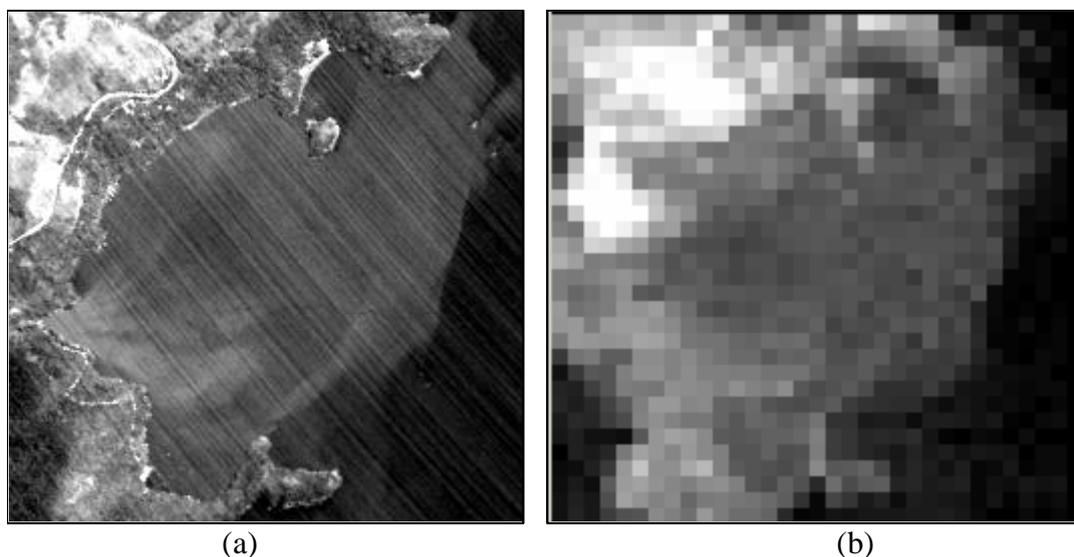


FIGURA 5.7 – (a) Imagem do canal 47 do sensor HSS com dimensões de 256 x 256 pixels e resolução espacial de 11m. (b) Imagem (ampliada 6 vezes) do produto 2B03 do ASTER, da mesma área, reamostrada para 88m e com dimensões de 32 x 32 pixels.

5.4.1 O Algoritmo *Wavefusion*

O processo de fusão das imagens foi feito utilizando o algoritmo *Wavefusion*, desenvolvido especificamente para este trabalho. O *Wavefusion* foi implementado em linguagem C++, pelo desempenho computacional e pela portabilidade para outros sistemas operacionais. O compilador utilizado foi o *Microsoft Visual C++*. O algoritmo possui uma interface amigável e roda em qualquer plataforma PC. Aceita dados de entrada em diversos formatos: bmp, tif, GeoTiff etc. Também não possui restrição quanto ao nível de quantização das imagens de entrada. Aliás, cabe ressaltar que esses dois últimos aspectos são limitantes de muitas rotinas desenvolvidas para fusão de imagens. Incorpora ainda uma função que permite equalizar a média e a variância dos dados de entrada antes do processo de fusão.

A implementação também levou em conta a possibilidade de emprego do algoritmo para outras aplicações e a adaptação para a diversidade atual e futura de sistemas sensores e respectivos dados de entrada que os mesmos possibilitam. Assim, é possível, por exemplo, usar dados multiespectrais na entrada. Foram implementados diversos filtros e é possível a inserção de outros. Também existe uma outra variação do método de fusão que prioriza a informação espacial. O aplicativo foi integrado à biblioteca TerraLib, um projeto de aplicativo livre que permite o trabalho colaborativo entre a comunidade de desenvolvimento e aplicações geográficas, e está disponível em <http://www.terralib.org>.

O algoritmo segue o mesmo princípio daquele proposto por Garguet-Duport *et al.* (1996). Nele, a transformada *wavelet* é aplicada somente em uma das imagens de entrada, sendo essa, geralmente, a imagem de melhor resolução espacial. No nível de decomposição apropriado, a componente LL (aproximação de baixa resolução) é substituída inteiramente pela imagem de entrada que possui, geralmente, a informação espectral de interesse. Após a substituição, a transformada inversa é aplicada e ao final obtém-se a imagem híbrida (ou sintética). Em resumo, a transformação *wavelet* propicia extrair os detalhes, ou informação espacial, da imagem de melhor resolução espacial e injetar esses detalhes na imagem que contém a informação espectral. A informação espectral é preservada porque somente os detalhes espaciais são adicionados à mesma.

Como o resultado da fusão depende da função de base da transformada *wavelet*, foram implementadas 31 funções de base distintas (Tabela 5.3). Foram incluídas as clássicas e outras encontradas na literatura e disponíveis em (ANTONINI *et al.*, 1992; VILLASENÖR *et al.*, 1995; DAVIS, 2005). Os filtros derivados das respectivas funções encontram-se no Anexo A.

TABELA 5.3 – Funções *wavelets* implementadas no algoritmo *Wavefusion*.

Haar	Symmlet2	Villa1	Coiflet6	Silva66	Coeff5
db2	Symmlet3	Villa2	Coiflet12	Burt57	-
db3	Symmlet4	Villa3	Coiflet18	Adelson	-
db4	Symmlet5	Villa4	Pseudocoiflet	Brislawn	-
db8	Symmlet6	Villa5	Vaidyanathan24	Brislawn2	-
db20	Symmlet7	Villa6	Antonini	Odegard	-

5.4.2 Usando o *Wavefusion* para Fusão das Imagens

A Figura 5.8 apresenta interfaces do algoritmo *Wavefusion* implementado. Após a seleção das imagens do HSS e do ASTER, optou-se por equalizar a média e a variância das imagens de entrada antes do processo de fusão, uma vez que, conforme observa Showengerdt (1997), a qualidade da fusão depende do grau de correlação entre as imagens. A imagem de referência é a de baixa resolução, logo a média e variância da imagem do HSS é que são alteradas no ajuste. O objetivo é manter as propriedades espectrais da imagem do ASTER.

Essa etapa é realizada aplicando-se uma transformação da forma (VENTURA, 2002):

$$y = ax + b, \text{ onde } a = \sqrt{\frac{\mathbf{s}_H^2}{\mathbf{s}_L^2}} \text{ e } b = \mathbf{m}_L - a\mathbf{m}_H. \quad (5.1)$$

Na transformação, a variável x representa o valor do nível digital original da imagem e y é o valor transformado. Os valores \mathbf{m}_L , \mathbf{s}_L^2 , e \mathbf{m}_H , \mathbf{s}_H^2 representam a média e a variância das imagens de baixa (ASTER) e alta (HSS) resoluções, respectivamente.

Foram realizadas as 31 (trinta e uma) fusões possíveis, cada uma correspondente a uma função de base diferente.

No caso em estudo, inicialmente a transformada *wavelet* é aplicada na imagem do HSS para criar a pirâmide em múltiplas resoluções. Como a relação entre as resoluções do HSS e do ASTER é igual a 8, são necessários três níveis de decomposição para que a aproximação de baixa resolução da imagem do HSS atinja 88m. Nesse nível, a aproximação de baixa resolução é substituída pela imagem reamostrada (quase original) do sensor ASTER e a transformação é então invertida, criando-se uma imagem sintética com 11 m de resolução espacial e dimensões de 256 x 256 pixels, ou seja, as mesmas do HSS. O tempo médio para obtenção de cada imagem sintética é de 2s. O algoritmo mostrou-se amigável, robusto e rápido.

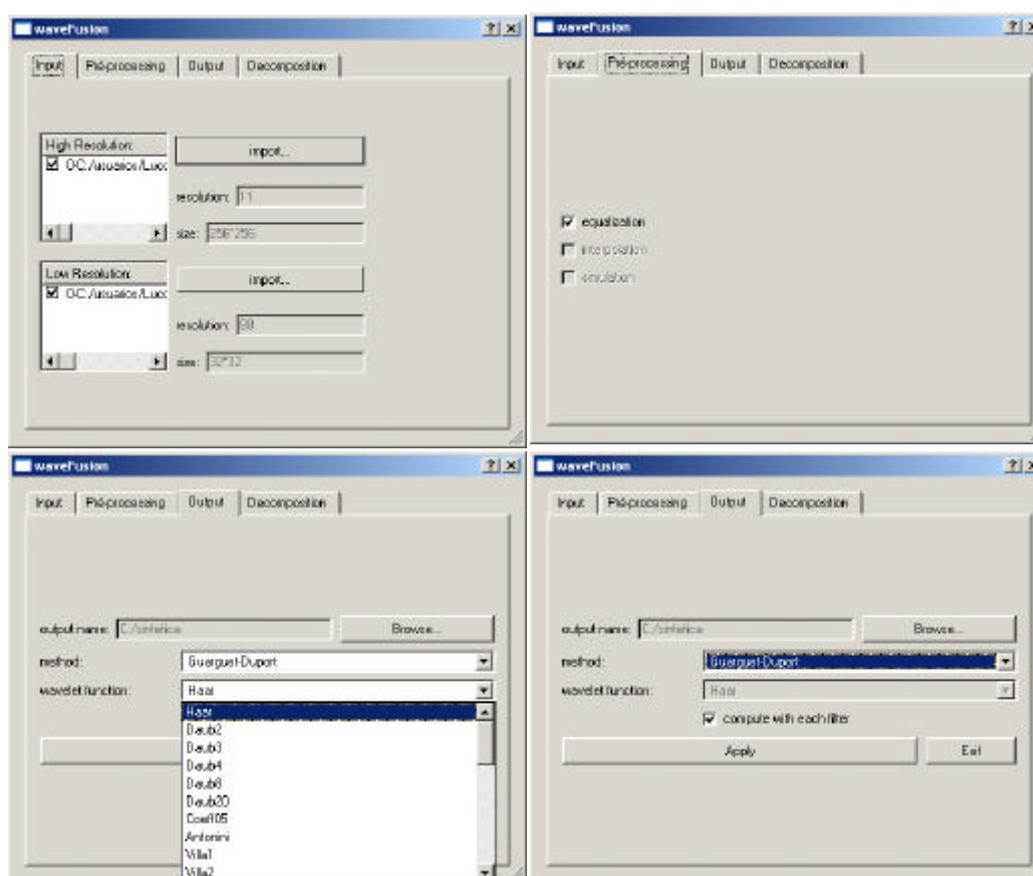


FIGURA 5.8 – Interfaces gráficas do algoritmo *Wavefusion*.

A Figura 5.9 ilustra a análise em múltiplas resoluções da imagem do HSS. Aqui são apresentados os 3 níveis de decomposição através da função de base db04. A componente LL (rever tópico 4.5) é utilizada como dado de entrada para o próximo nível. Observe que no primeiro nível de decomposição a componente HL não contém o ruído diagonal presente na imagem original. Alguns métodos para eliminar ruído em imagens podem se aproveitar dessa componente no processo.

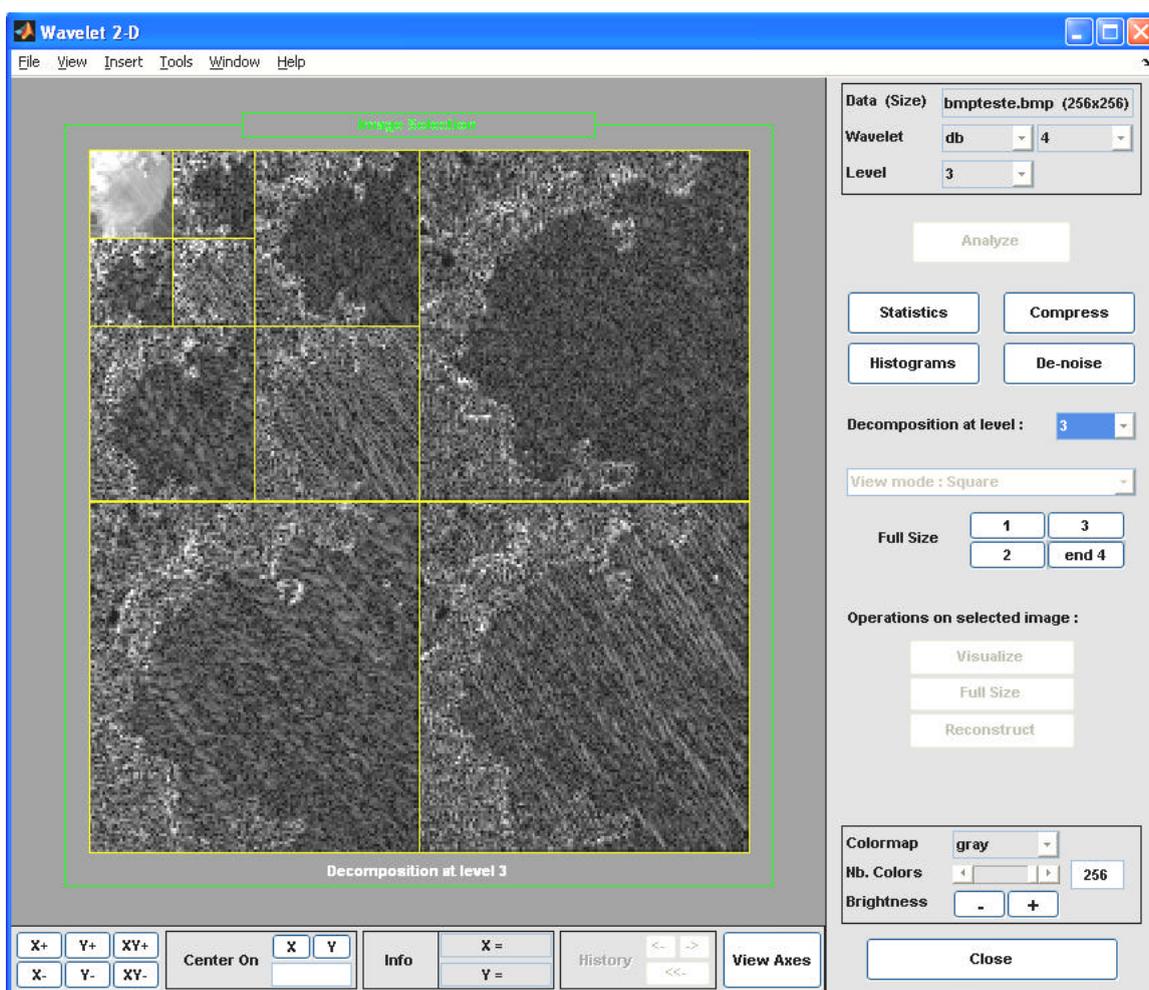


FIGURA 5.9 – Representação da análise em múltiplas resoluções da imagem do HSS. Aqui são apresentados os 3 níveis de decomposição através da função de base db04. A componente LL é utilizada como dado de entrada para o próximo nível.

FONTE: Mathworks (2005).

Ao final foram obtidas 31 imagens sintéticas, todas com dimensões de 256 x 256 pixel, 11m de resolução espacial e expressas em valores de temperatura.

5.5 Avaliação dos Resultados

A avaliação dos resultados pode ser dividida em duas etapas: a avaliação dos resultados individuais obtidos pelos sensores e a avaliação dos resultados do processo de fusão entre as imagens.

5.5.1 Avaliação dos Resultados Individuais Obtidos pelos Sensores HSS e ASTER

Nessa primeira etapa os resultados obtidos individualmente pelos sensores são avaliados isoladamente para verificação de suas aplicabilidades específicas para o estudo da pluma termal. Aqui o objetivo é obter respostas acerca do desempenho dos sensores para gerar imagens onde seja possível detectar e caracterizar a pluma termal (forma, extensão, gradientes internos etc.). Essa etapa é feita através de análise visual e também através de comparações de valores de temperatura derivados das imagens com valores de temperatura medidos em campo. Os resultados dessa avaliação vão permitir classificar os sensores quanto à aplicabilidade dos mesmos para estudos de feições termais locais. Também serão feitas comparações entre os resultados obtidos pelos sensores HSS e ASTER.

5.5.2 Avaliação dos Resultados da Fusão das Imagens do HSS e ASTER

Nessa etapa a avaliação dos resultados consiste em verificar e quantificar o resultado obtido (imagem híbrida) nas fusões realizadas. Aqui, o objetivo é testar a eficiência do processo de fusão para combinar de modo sinérgico as informações dos dados de entrada em um produto único, o qual reúna as melhores características de cada dado original necessárias para uma determinada aplicação.

Para prover mais informação, a imagem sintética deve ser uma síntese das informações espaciais e espectrais das duas imagens de entrada. Não distorcer as características espectrais significa garantir que alvos que são espectralmente separáveis na imagem original continuem separáveis na imagem sintética. Isso é importante no processo de combinar informação espacial com espectral. Devemos manter o significado físico da informação espectral.

A avaliação das imagens sintéticas (híbridas) será feita tanto qualitativa quanto quantitativamente.

5.5.2.1 Avaliação Qualitativa dos Resultados da Fusão

A avaliação qualitativa é feita visualmente e tem por objetivo verificar a qualidade espacial das imagens sintéticas. É feita basicamente comparando-se as imagens sintéticas com a imagem original do HSS. Quanto mais detalhes comuns existirem entre uma imagem sintética e a do HSS, melhor é o resultado do ponto de vista qualitativo. Também são observados se existem feições ou estruturas criadas ou destruídas erroneamente. Embora importante, esse tipo de análise depende tanto do observador quanto da aplicação e pode, dessa forma, se tornar imprecisa devido à sua subjetividade. Entretanto, é uma análise usual e necessária. Cabe ressaltar que existem métodos quantitativos para realizar esta avaliação como, por exemplo, filtros Laplacianos para extrair detalhes das imagens comparadas e verificar a semelhança (correlação) destas. Entretanto, no caso específico deste trabalho, a análise puramente visual foi satisfatória, já que os detalhes espaciais inseridos na imagem sintética são facilmente identificáveis.

5.5.2.2 Avaliação Quantitativa dos Resultados da Fusão

A avaliação quantitativa é feita através de cálculos de histogramas, médias, variâncias, imagens diferença e testes estatísticos utilizando dados de campo e amostras aleatórias tomadas das imagens de forma pareada. O objetivo é testar se foram preservadas as características espectrais, ou seja, valores de temperatura da imagem do ASTER na imagem sintética obtida. Ressalta-se aqui que processos de avaliação de imagens obtidas por processos de fusão são complexos e dependem fortemente da aplicação e objetivo da fusão.

5.5.2.2.1 Avaliação dos Histogramas

O histograma é uma forma comum de representar a distribuição dos valores radiométricos de uma imagem, fornecendo informações importantes como a intensidade média e o espalhamento desses valores. Cabe ressaltar que o histograma não apresenta

nenhuma informação espacial da imagem. Quando se comparam histogramas é preciso considerar que o número de pixels das imagens sintéticas (256 x 256) é diferente daquele da imagem 2B03 (32 x 32). Assim, neste trabalho, o histograma da imagem original 2B03 é comparado tanto com os histogramas originais das imagens sintéticas quanto com aqueles obtidos das imagens sintéticas reamostradas para possuírem a mesma resolução da imagem 2B03. Espera-se que estes sejam semelhantes ao da imagem original, tanto na forma quanto no posicionamento dos picos.

5.5.2.2.2 Avaliação das Médias e Variâncias

A média permite avaliar o brilho de uma imagem enquanto que o desvio padrão nos fornece uma indicação do contraste. A diferença entre as médias de uma imagem sintética e a imagem original deve ser próxima de zero. Da mesma forma para a variância. Esta última fornece ainda uma indicação da quantidade de informação adicionada ou perdida no processo de fusão. Se variância da imagem sintética for, por exemplo, maior que a da original 2B03, indica que o processo de fusão adicionou informação na imagem sintética resultante.

5.5.2.2.3 Avaliação da Média e Variância da Imagem Diferença

Esta avaliação segue o mesmo princípio do teste descrito em Wald *et al.* (1997), onde são formulados critérios e métodos de avaliação da qualidade de uma imagem híbrida levando-se em conta que a principal necessidade do processo de fusão é a manutenção do conteúdo espectral. O teste consiste em reamostrar a imagem sintética para possuir a mesma resolução espacial da imagem 2B03, isto é, a imagem sintética é reamostrada de 11 para 88 metros de resolução espacial. Em seguida obtém-se a imagem diferença pixel a pixel entre a imagem 2B03 e a sintética reamostrada. Em tese, se a imagem sintética possui as mesmas propriedades espectrais da imagem de entrada 2B03, então esse processo de reamostragem a transforma em uma imagem equivalente à 2B03. Logo, a diferença pixel a pixel destas imagens deve resultar em uma uma imagem cujos valores digitais sejam iguais ou muito próximos de zero.

5.5.2.2.4 Avaliação Utilizando Dados de Campo

Esse teste quantitativo emprega os dados de temperatura da superfície do mar coletados em campo (24 pontos amostrados nas imediações da Usina Nuclear). Parte-se do princípio de que se o processo de fusão ocorreu com sucesso, então a imagem híbrida resultante contém tanto a informação espacial do HSS (detalhes) quanto o valor absoluto de temperatura da imagem 2B03 do ASTER. De outra forma, a imagem sintética seria uma imagem 2B03 na qual foram injetados apenas detalhes espaciais derivados de outra imagem e sua informação espectral não sofreu alterações. Logo, se um usuário tomar os valores de temperatura de um conjunto de pontos na imagem 2B03 e na imagem sintética, eles devem ser iguais ou próximos. Cabe ressaltar que os valores de temperatura devem ser preferencialmente tomados na imagem sintética original, isto é, com 11 m de resolução espacial.

Para avaliar o resultado são feitas regressões lineares entre os valores de temperatura dos pontos amostrados medidos na imagem de entrada (2B03) e aqueles medidos nas imagens sintéticas.

5.5.2.2.5 Avaliação Utilizando Amostras Aleatórias Pareadas

Considerando-se o fato do número de amostras de campo não ser suficiente nem ter sido feita a coleta de forma independente para a análise pretendida, seguiu-se uma abordagem similar a anterior que consiste em amostrar 100 (cem) pontos aleatórios (dentro da superfície aquática) na imagem de entrada 2B03 e tomar o valor da temperatura nestes pontos. De forma pareada, os valores de temperatura dos mesmos 100 pontos são computados nas imagens sintéticas obtidas (reamostradas para 88 metros de resolução espacial).

Tanto nas avaliações utilizando dados de campo quanto naquelas em que se empregam amostras aleatórias pareadas são feitas regressões lineares entre os valores de temperatura medidos na imagem de entrada (2B03) e aqueles medidos nas imagens sintéticas.

Aqui, parte-se do princípio que se duas imagens são semelhantes ou equivalentes, então elas são correlacionadas. Segundo Crósta (1993), duas imagens são correlacionadas quando, dado o valor do nível digital de um pixel em uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação o valor do nível digital do pixel correspondente na outra imagem. Assim, se duas imagens são absolutamente idênticas, as imagens são ditas 100% correlacionadas. Nesse caso, em um gráfico de espaço de atributos, isto é, gráfico contendo a frequência de distribuição de intensidades de duas imagens, a correlação entre as imagens se mostra como uma distribuição de pontos ao longo da diagonal principal (na direção 45°), dado que os eixos estejam na mesma escala.

Assim, caso construíssemos um gráfico de dispersão colocando-se na abscissa (eixo X) os valores de temperatura de um conjunto de pontos (pixels) de uma imagem A (imagem 2B03, por exemplo) e na ordenada (eixo Y) os valores de temperatura dos pixels correspondentes em uma imagem B (sintética, por exemplo), e considerando-se que ambas sejam equivalentes, os pontos desse gráfico deveriam estar distribuídos segundo uma reta que passa pela origem ($X=0$ e $Y=0$) e cujo coeficiente angular é igual a 1.

Entretanto, se tomarmos os valores de temperatura para um conjunto de pontos em ambas as imagens e compará-los, espera-se que haja uma pequena diferença entre os valores obtidos, uma vez que o processo de fusão está sujeito à incertezas. Estas incertezas são provenientes tanto de erros sistemáticos, quanto de erros aleatórios. Estes erros podem ser originados, por exemplo, nas etapas de registro, nos processos de reamostragem, na localização de um ponto na imagem etc.

Para a avaliação desses tipos de erros, utiliza-se o coeficiente de correlação (r) ou o coeficiente de determinação (r^2). Esses coeficientes indicam o grau de ajuste dos pontos a uma reta. O coeficiente de determinação varia entre zero e um. Quanto mais próximo da unidade estiver esse coeficiente, mais ajustados estarão os pontos à reta. O valor zero indica que não há relação entre as duas medidas. Dessa forma, caso o erro seja pequeno, espera-se que r^2 seja próximo a 1.

A avaliação desses erros é feita ajustando uma reta aos pontos observados e verificando se esta reta estimada difere significativamente daquela esperada quando nenhum erro é

encontrado (reta ideal). As etapas para a avaliação dos erros podem ser feitas adotando-se o modelo de regressão linear da forma:

$$Y_i = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 X_i + \mathbf{e}_i, \quad (5.2)$$

onde X_i e Y_i representam, respectivamente, os valores de temperatura amostrados nas imagens A e B , β_0 e β_1 representam os parâmetros do modelo, e \mathbf{e}_i é o erro casual não controlado. Os parâmetros são então estimados e comparados com os valores esperados para a reta ideal ($\beta_0=0$ e $\beta_1=1$).

Para inferir a respeito dos coeficientes do modelo de regressão linear simples adotado realiza-se um teste de hipóteses utilizando a estatística t e o cômputo do valor- p . Inicialmente é testada a hipótese do coeficiente angular da regressão linear ser igual a um ($\beta_1=1$, a reta tem inclinação de 45°). Aqui são adotadas duas hipóteses:

$$H_0: \beta_1=1$$

$$H_1: \beta_1 \neq 1$$

Da mesma forma é testada a hipótese do coeficiente linear ser igual a zero ($\beta_0=0$), indicando que a reta da regressão passa pela origem. As hipóteses adotadas são:

$$H_0: \beta_0=0 \text{ (indica que a reta passa pela origem)}$$

$$H_1: \beta_0 \neq 0$$

A estatística t é utilizada para testar estas hipóteses. Supõe-se independência e normalidade das observações.

O valor- p é derivado a partir da estatística t e indica o máximo nível de significância para o qual a hipótese nula H_0 é aceita. Quanto maior for o valor- p , maior a segurança na aceitação da hipótese nula. Neste trabalho o nível de significância especificado é de 5%. Assim, por exemplo, considerando-se que H_0 foi rejeitada ao nível de significância de 0,05, equivale a dizer que existe 5% de probabilidade de se estar rejeitando H_0 quando de fato ela é verdadeira.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no experimento de campo, as imagens obtidas individualmente pelos sensores empregados seguido de uma avaliação a respeito de suas aplicabilidades específicas para o estudo da pluma termal e por fim os resultados obtidos nos processos de fusão realizados.

6.1 Resultados Obtidos em Campo

Observando os dados de temperatura coletados em campo (tomando por referência as medidas tomadas a profundidade de 5 cm) verificou-se que o maior valor de temperatura medido foi de $32,5^{\circ}\text{C}$ nas imediações do ponto de descarga, enquanto que os menores valores, em torno de $25,5^{\circ}\text{C}$, foram medidos em pontos afastados 3 a 4 km do ponto de descarga e nas imediações do ponto de tomada de água. Deste modo, pode-se inferir que a variabilidade total de temperatura da pluma durante a campanha era da ordem de 7°C . Aqui cabe ressaltar que alguma variação em relação a estes valores deve ser esperada para medições em outras datas em função do caráter dinâmico do sistema, da interação da pluma com as forçantes oceanográficas (correntes, maré, agitação marinha) e meteorológicos (vento de superfície, temperatura do ar, estabilidade, turbulência etc.) e também do regime de operação dos reatores. Como indicado anteriormente (em 5.2), a situação da pluma observada nesse experimento é resultante da operação de apenas um dos reatores (Angra II).

Como esperado, observou-se a tendência da diminuição da temperatura com a distância do ponto de descarga. Também foram feitas três medidas no ponto mais próximo a descarga, uma às 09:41h ($32,4^{\circ}\text{C}$), outra às 11:06h ($32,6^{\circ}\text{C}$) e outra às 14:50h ($33,0^{\circ}\text{C}$), indicando uma ligeira tendência de aquecimento da superfície ao longo do período.

Na Figura 6.1 é apresentado, sobre um mapa da região, o resultado obtido através da interpolação e extrapolação dos dados superficiais de temperatura da água medidos com o radiômetro Thermopoint 20EM na manhã do dia 09/10/03. A interpolação foi feita com o *software Surfer* e considerou apenas os pontos coletados.

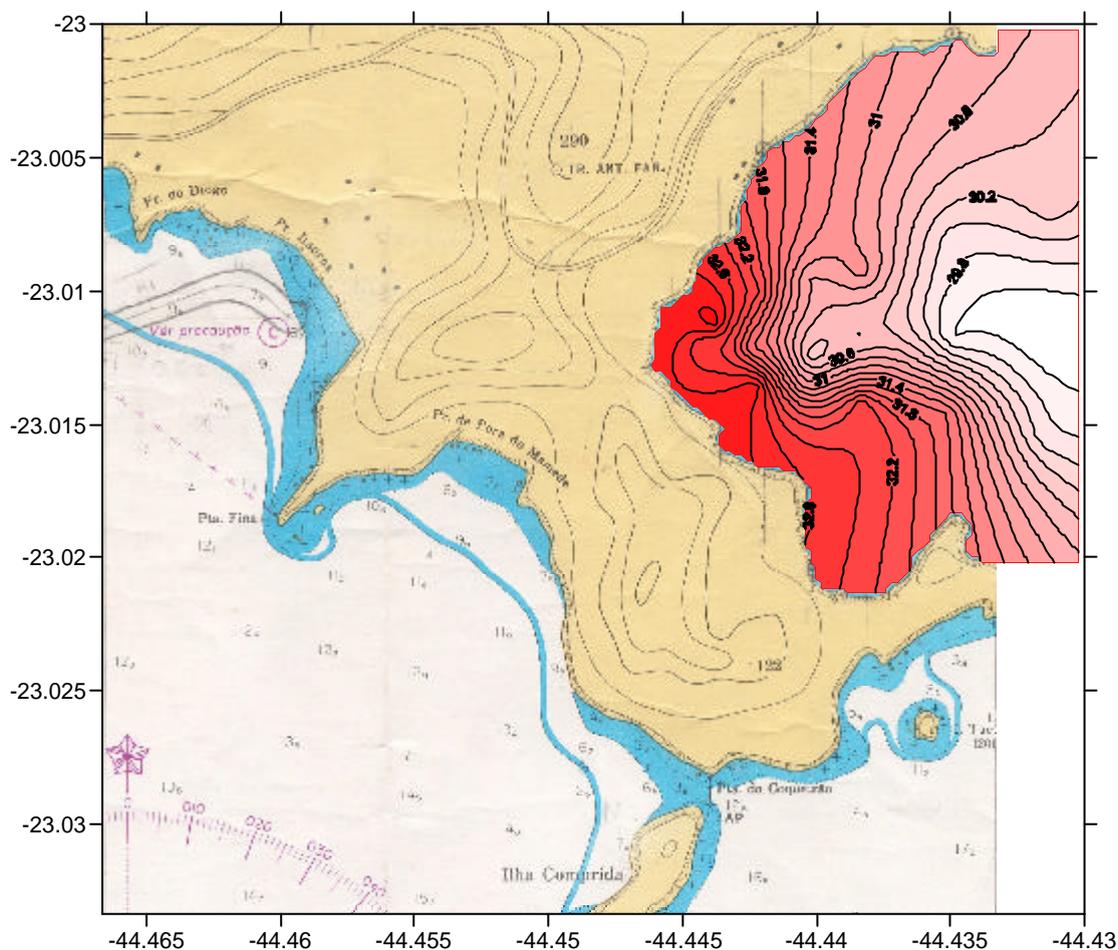


FIGURA 6.1 – Isotermas (na região em vermelho) obtidas através da interpolação e extrapolação dos dados superficiais de temperatura da água medidos com o radiômetro Thermopoint 20EM na manhã do dia 09/10/03. O retângulo branco na parte inferior direita da figura deve-se à ausência de pontos superficiais de temperatura pra realizar a interpolação.

6.2 Resultados Obtidos com o Sensor HSS

Na Figura 6.2 são apresentas duas imagens obtidas com o sensor HSS no sobrevôo sobre a área feito a 3080 metros de altura no período da manhã. A Figura 6.2a é uma

composição colorida RGB utilizando os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) em vermelho, verde e azul, respectivamente. A Figura 6.2b é uma imagem do canal 47 ($9,10\mu\text{m}$). Neste exemplo, as imagens possuem resolução espacial nominal de 7,62 m e a largura da faixa imageada é de aproximadamente 5700 m. Vê-se que, na imagem obtida a esta altura, é possível se ter uma visão sinóptica de toda a área de estudo. A resolução espacial favorece a identificação de construções, estradas, pequenas ilhas e também dos limites geográficos entre a água e a superfície terrestre, tanto na imagem do canal do visível quanto no do termal. Também é possível observar linhas horizontais (ruído) na imagem do canal termal decorrentes de instabilidade do detector.

Na Figura 6.2a, as condições de iluminação favorecem a visualização do padrão de propagação de ondas e de algumas ocorrências de derrame de óleo. A Figura 6.2b mostra claramente a área ocupada pela pluma termal bem como os gradientes internos horizontais de temperatura da superfície. Tonalidades mais claras na porção aquática da imagem estão associadas a temperaturas mais altas. A pluma está quase totalmente contida dentro da baía, ocupando uma área aproximada de $4,5\text{ km}^2$. O efeito da descarga estende-se, a partir do ponto de lançamento, por aproximadamente 2,2 km na direção do eixo de descarga (leste) e pouco mais (3 km) na direção nordeste.

A conformação da topografia da costa a leste do ponto de descarga resultou em um aprisionamento de grande parte da pluma termal no interior da baía. Entretanto, é possível observar que parte da pluma escapa deste confinamento e se estende para sudeste. Algumas imagens orbitais adquiridas em datas anteriores, quando os dois reatores estavam em operação normal, também indicaram padrão semelhante de dispersão da pluma. Também é possível verificar que as porções mais quentes da pluma ocupam uma área pequena situada nas proximidades do ponto de descarga. Segundo *Bandeira et al.* (2003), a descarga é feita através de um túnel de seção retangular (10 m de altura x 14,25 m de largura), posicionado na linha de costa, de -1 m a -11 m abaixo do nível do mar. Logo a leste das imediações do ponto de descarga, sendo o fundo rochoso, as profundidades são menores que aquela onde é descarregada a água proveniente dos reatores. Esses fatos, juntamente com a maior fluatuabilidade da água aquecida, contribuem para que haja um fluxo ascendente da água aquecida nesta região.

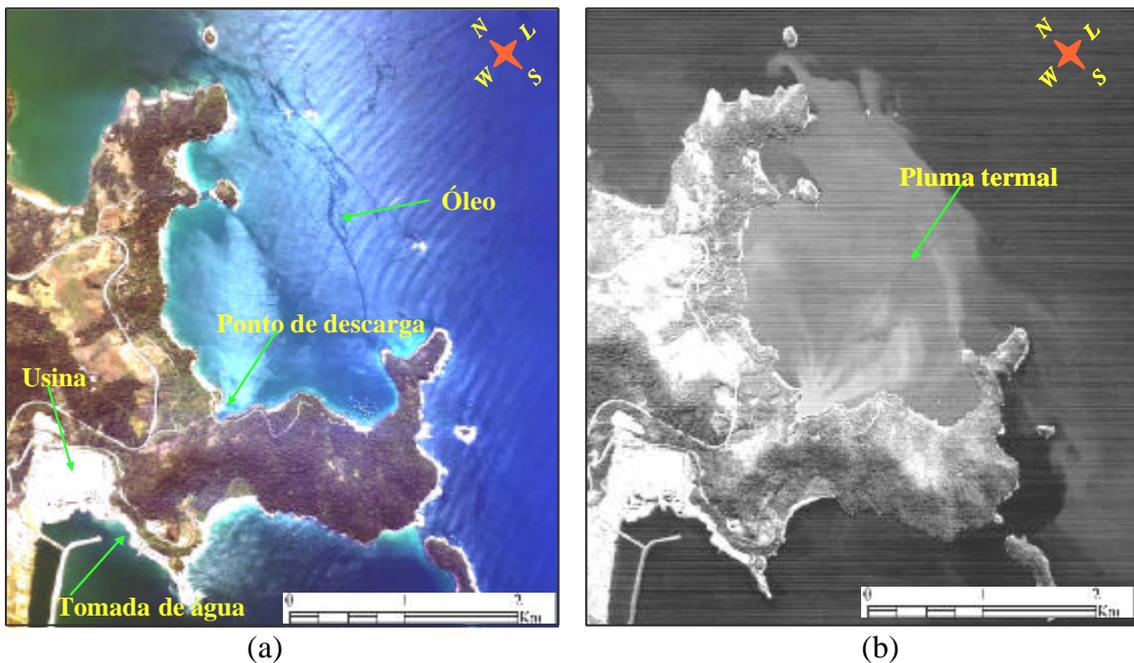


FIGURA 6.2 – (a) Composição colorida com os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. (b) Imagem do canal 47 ($9,10\mu\text{m}$). O imageamento foi feito a 3080 metros de altura no dia 09/10/2003 às 09:30h (hora local).

Uma característica vantajosa dos dados dos HSS é que todas as bandas possuem a mesma resolução espacial além de serem corrigidas. Isto favorece o uso de processos de fusão simples como o RGB na fase de análise. A Figura 6.3 refere-se ao imageamento da pluma termal realizado a 2134 metros de altura, simultaneamente a um experimento de lançamento e monitoramento de dispersão de Rodamina WT, uma substância líquida (traçador fluorescente) de cor avermelhada. Após ser lançada na água, esta substância permite, através do monitoramento temporal de sua forma, concentração e deslocamento, normalmente efetuado com uma embarcação dotada de fluorímetro, avaliar a advecção e as características de dispersão superficial do meio líquido.

A Figura 6.3a mostra uma composição colorida com os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. A Figura 6.3b apresenta a imagem da primeira componente resultante da análise por componentes principais (ACP) aplicada sobre os seis canais posicionados na faixa de 8-

12 μ m. A Figura 6.3c ilustra uma composição colorida menos usual, obtida com a imagem CP1 (vermelho) e com os canais 7 (verde) e 4 (azul). Segundo Crósta (1993) e Schowengerdt (1997), a CP1 contém a informação que é comum a todos os dados de entrada e que, neste caso, está correlacionada com os valores de temperatura. A resolução espacial da imagem é de 6 m.

A composição colorida da Figura 6.3c permite integrar informações obtidas nas diferentes porções do espectro eletromagnético. No caso, a identificação da dispersão da Rodamina obtida nos canais do visível (Figura 6.3a) pode ser combinada com aquelas obtidas no infravermelho termal (Figura 6.3b), reunindo em uma única imagem as informações de interesse e permitindo uma rápida interpretação do fenômeno através da identificação da forma, extensão, características de dispersão e gradientes internos de temperatura. Observando-se a Figura 6.3c é possível notar também que porções mais quentes da pluma (tonalidade mais avermelhada) apresentam padrão de dispersão coincidente com o marcado pela Rodamina (parte central da imagem).

Embora para muitas aplicações a forma, extensão e a distribuição espacial da temperatura sejam as informações de interesse, foi possível gerar também um mapa com os valores absolutos de temperatura seguindo uma abordagem para correção dos efeitos causados pela atmosfera que consiste na correlação direta entre os valores de temperatura obtidos nos canais termais com aqueles obtidos em campo. Tomando-se por base a imagem obtida a 3080 m (caso mais crítico), Lucca *et al.* (2005) demonstrou que é possível, através da correlação entre medidas de campo e medidas obtidas pelo sensor, derivar o valor absoluto da temperatura com uma incerteza aceitável (menor que 1°C) para o experimento em questão.

Os resultados obtidos indicam que o uso do sensor HSS é bastante adequado para detectar e caracterizar feições termais em ambientes aquáticos como a pluma termal nas adjacências da Central Nuclear de Angra dos Reis. Além das características espacial e radiométrica apropriadas para mapear o fenômeno de interesse, podem ser citadas, ainda, outras vantagens do emprego deste sensor, tais como a possibilidade de gerar imagens a qualquer hora do dia (restrito apenas pelas condições atmosféricas),

flexibilidade de operação, liberdade para definir a área de imageamento e alturas de vôo e rapidez de aquisição, uma vez disponível uma aeronave para a missão. Essas características são particularmente importantes para estudos de impacto da ação antrópica sobre o ambiente, principalmente em áreas sujeitas a freqüente cobertura de nuvens e onde os processos possam caráter dinâmico.

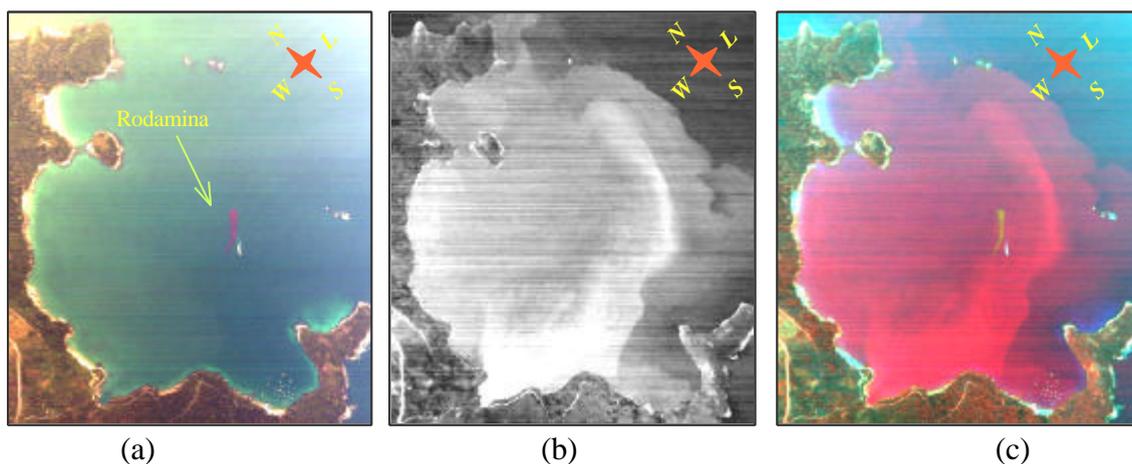


FIGURA 6.3 – (a) Composição colorida com os canais 7 ($0,628\mu\text{m}$), 4 ($0,541\mu\text{m}$) e 1 ($0,456\mu\text{m}$) do sensor HSS em vermelho, verde e azul, respectivamente. (b) Imagem da primeira componente principal (CP1) dos seis canais do IVT. (c) Composição colorida utilizando-se a imagem CP1 (vermelho) e os canais 7 (verde) e 4 (azul), respectivamente. A cena foi imageada em 09/10/2003 às 15:55h e a 2134 metros de altura.

6.3 Resultados Obtidos com o Sensor ASTER

Na Figura 6.4 são apresentadas duas cenas completas ($60 \times 60 \text{ km}$) da área de estudo obtidas através do sensor ASTER no dia 09/10/2003 às 10:17h local. A Figura 6.4a é uma composição colorida RGB utilizando os canais 3 ($0,80\mu\text{m}$), 2 ($0,66\mu\text{m}$) e 1 ($0,55\mu\text{m}$), com resolução espacial de 15m, onde estão identificadas as localizações da Central Nuclear e do ponto de descarga. A Figura 6.4b é uma imagem do canal 13 ($10,65 \mu\text{m}$), com 90 m de resolução espacial, onde os níveis de cinza representam a temperatura de brilho. Tonalidades mais claras na porção aquática da imagem são associadas a temperaturas mais altas.

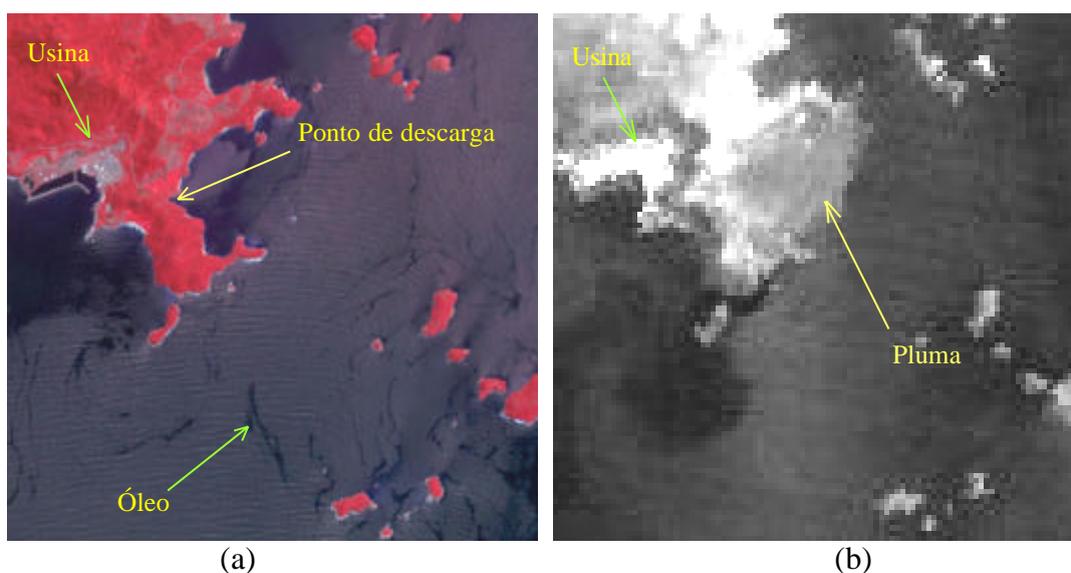


FIGURA 6.4 – Duas cenas da área de estudo obtidas através do sensor ASTER no dia 09/out/2003 às 10:17h local. A Figura 6.4a é uma composição colorida RGB utilizando os canais 3 ($0,80\mu\text{m}$), 2 ($0,66\mu\text{m}$) e 1 ($0,55\mu\text{m}$), com resolução espacial de 15m. A Figura 6.4b é a imagem do canal 13 ($10,65\mu\text{m}$), com 90m de resolução espacial, onde os níveis de cinza representam a temperatura de brilho.

Observando-se a imagem do canal termal do ASTER verifica-se que é possível detectar e caracterizar aspectos da pluma termal como a sua forma e extensão. Entretanto, a caracterização dos gradientes internos assim como a determinação da linha divisória entre a água e a porção terrestre não são favorecidas. Na Figura 6.4a, a exemplo das imagens do HSS, as condições de iluminação favorecem a visualização do padrão de propagação de ondas e de algumas ocorrências de derrame de óleo.

Muito embora sejam corrigidas, as imagens dos canais termais e as do visível do sensor ASTER possuem resoluções espaciais distintas e desse modo inviabilizam o uso imediato de processos de fusão como o RGB, por exemplo. Para integrar essas informações é necessária uma etapa de reamostragem dos dados, a qual geralmente compromete a informação espectral da imagem.

Do ponto de vista quantitativo, a partir da comparação dos dados de temperatura derivados das imagens (produto 2B03) com os coletados *in situ*, verificou-se que o erro médio na determinação do valor absoluto da TSM na região da pluma pode variar de 1 a

2°C, sendo que os maiores erros ocorrem onde a variabilidade de temperatura é maior, neste caso, nas imediações do ponto de descarga. Cabe ressaltar que estas incorreções estão associadas a erros no processo de correção atmosférica dos dados. Segundo ERSDAC (2001) e Gillespie *et al.* (1998), são necessários dados de perfis verticais de temperatura e umidade para correção atmosférica das imagens. A fonte primária desses dados é gerada pelo sensor MODIS (na mesma plataforma do sensor ASTER). Como alternativa são utilizados dados de modelo atmosférico do NCEP ou dados de climatologia. Na época da aquisição das imagens os dados do MODIS não estavam disponíveis e a correção atmosférica foi feita a partir da interpolação espacial e temporal dos dados de climatologia, diminuindo assim a precisão dos resultados.

Na Figura 6.5 são apresentados e comparados os valores de temperatura derivados das imagens do HSS (canal 47) e do ASTER (imagem 2B03) com os obtidos em campo (considerou-se a medida feita a 5 cm de profundidade).

Verifica-se a partir da Figura 6.5 que os valores de temperatura derivados da imagem 2B03 aproximam-se mais dos valores medidos em campo que aqueles derivados da imagem do HSS, isto é, do ponto de vista do conteúdo espectral, a informação fornecida pelo dado do sensor ASTER é mais precisa. Isto ocorre em virtude da correção atmosférica que é aplicada durante o processo de obtenção da imagem 2B03 e também pelas melhores características radiométricas do subsistema TIR do sensor ASTER. Os valores de temperatura derivados do canal 47 do HSS são todos mais baixos que aqueles obtidos pelo ASTER.

Comparando-se as imagens dos canais termais obtidas pelos sensores HSS e ASTER verifica-se que ambas permitem a detecção e caracterização da pluma termal que ocorre nas adjacências da Central Nuclear. As imagens do HSS possuem como principal vantagem a resolução espacial, com a qual é possível não só detectar, mas também caracterizar a forma, a extensão, bem como os gradientes horizontais de temperatura internos da pluma. Além disto, todas as bandas possuem a mesma resolução espacial e já são corrigidas. Entretanto, tais imagens estão mais sujeitas as incorreções geométricas devido às variações da plataforma durante a coleta de dados. Além disso,

na data do imageamento, não havia informações confiáveis acerca das características radiométricas dos canais termais do sensor. Já a imagem do ASTER possui como principal vantagem o fato de disponibilizar o valor absoluto (corrigido para os efeitos da atmosfera) da temperatura superficial. Entretanto, a resolução temporal (16 dias) e a necessidade de apontamento do sensor para obter imagem desta área de estudo podem restringir seu emprego.

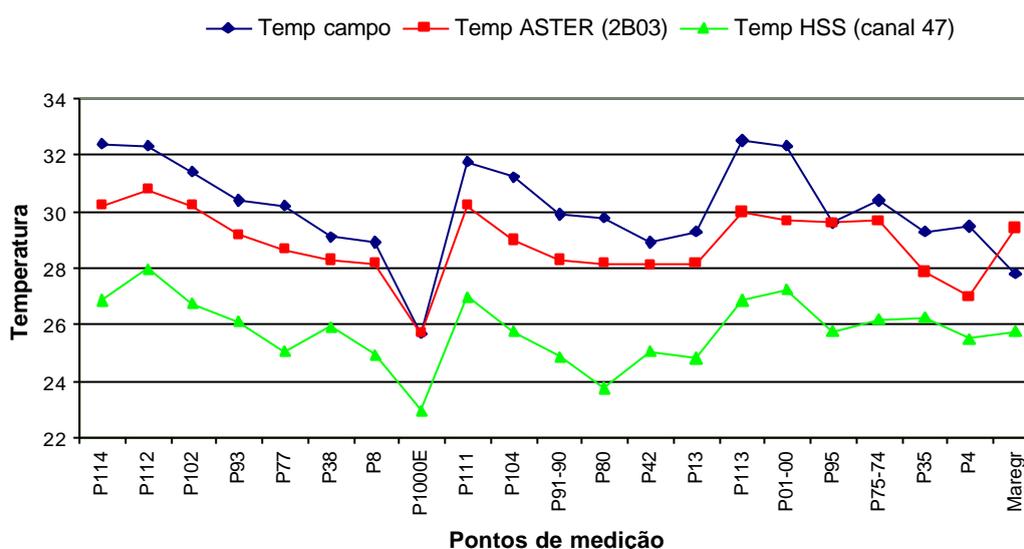


FIGURA 6.5 – Valores de temperatura obtidos em campo e derivados das imagens do HSS e do ASTER.

Do exposto, podemos afirmar que ambos os sensores são, isoladamente, adequados para o estudo em questão. Por outro lado, possuem características complementares que podem ser exploradas por metodologias de fusão. A questão que surge é: seria possível reunir, em uma única imagem, as melhores características de cada uma destas imagens, ou seja, criar uma imagem sintética a partir de processo de fusão que possua os detalhes espaciais da imagem do HSS preservando as informações espectrais da imagem 2B03? Esta questão é o assunto do próximo tópico.

6.4 Resultados da Fusão entre as Imagens do HSS e ASTER

Neste tópico são apresentados e avaliados os resultados obtidos (imagens híbridas) nas fusões realizadas. O objetivo é verificar a eficiência do processo de fusão para combinar de modo sinérgico as informações dos dados de entrada em um produto único. Nesta

fase pretende-se verificar a hipótese de que é possível reunir, sinergeticamente, em uma única imagem, informações espaciais e espectrais de diferentes fontes para produzir melhores resultados que aqueles obtidos individualmente ou simplesmente reduzir o volume de informação nas etapas de análise.

6.4.1 Avaliação Qualitativa

A avaliação qualitativa foi feita visualmente e teve por objetivo verificar a qualidade espacial das imagens sintéticas. Foi feita basicamente comparando-se as imagens sintéticas com a imagem do HSS (conforme discutido em 5.5.2.1).

A inspeção visual das 31 (trinta e uma) imagens sintéticas obtidas revelou que 05 ficaram muito boas, 12 puderam ser consideradas boas e 13 apresentaram resultados ruins. Imagens sintéticas consideradas boas e muito boas são aquelas que poderiam substituir a imagem do HSS no processo de análise sem maiores prejuízos da informação espacial (não foram acrescentadas ou perdidas informações). Cabe ressaltar que durante a comparação visual o contraste aplicado nas duas imagens comparadas foi o mesmo (linear 2%).

Como esperado, o resultado é fortemente influenciado pela função *wavelet* utilizada. No entanto, a maioria (55%) das funções implementadas no algoritmo produziu, para a aplicação proposta, resultados considerados bons e muito bons, isto é, o processo de fusão foi capaz de injetar detalhes espaciais na imagem do ASTER.

No geral, as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa (de ordens 1 a 6) apresentaram resultados bons e muito bons. Apresentam as mesmas características espaciais da imagem do HSS. As de ordens 1, 2 e 5 apresentam aspecto granuloso na feição da pluma. Há ainda a tendência de melhorar o resultado qualitativo com o aumento da ordem dessa função de base.

As funções de base Symlet de ordens 2 e 3 apresentaram resultados bons (presença de algumas granulações em partes da imagem, principalmente na pluma), mas as de ordem superior produziram um aspecto bloqueado em boa parte da imagem. O mesmo foi

verificado nos resultados obtidos com as funções de base Coiflets e de Daubechies (como esperado, já que na teoria estas funções são similares).

As demais funções produziram resultados qualitativos satisfatórios e parecidos entre si, evidenciando a capacidade em incorporar os detalhes espaciais (inclusive o ruído) da imagem do HSS na imagem sintética. Em comum também apresentam aspecto granular em porções da imagem. Qualitativamente os melhores resultados foram obtidos com as seguintes funções de base: Villa6, Silva66, Pseudocoiflet, Brislawn2, Coeff05 e Antonini. Observou-se também que tanto funções ortogonais quanto biortogonais produziram resultados satisfatórios. A Tabela 6.1 apresenta um resumo do resultado obtido na avaliação qualitativa.

TABELA 6.1 – Resumo da avaliação qualitativa.

Função <i>wavelet</i>	Ordem	Resultado	Observação
Haar	-	Regular	Efeito quadriculado em toda imagem
db2	2	Ruim	Miniblocos em toda a imagem
db3	3	Ruim	Miniblocos em toda a imagem
db4	4	Ruim	Miniblocos em toda a imagem
db8	8	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
db20	20	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Symlet2	2	Bom	
Symlet3	3	Bom	
Symlet4	4	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Symlet5	5	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Symlet6	6	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Symlet7	7	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Villa1	1	Regular	Granulações na região da pluma
Villa2	2	Regular	Granulações na região da pluma
Villa3	3	Bom	
Villa4	4	Bom	
Villa5	5	Bom	Granulações na região da pluma
Villa6	6	Muito bom	
Coiflet6	6	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Coiflet12	12	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Coiflet18	18	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Pseudocoiflet	-	Muito Bom	
Vaidyanathan24	-	Ruim	Aspecto bloqueado na região da pluma
Antonini	-	Bom	
Silva66	-	Muito Bom	
Burt57		Regular	Granulações na região da pluma
Adelson		Bom	
Brislawn		Bom	
Brislawn2		Muito Bom	
Odegard		Regular	Granulações na região da pluma
Coeff5		Muito Bom	

Na Figura 6.6 são apresentadas as imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m, esta última ampliada seis vezes) e as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Brislawn2, Silva66, Haar, Symmlet04 e db03. As quatro primeiras foram classificadas como muito boas. As duas últimas são exemplos de resultados insatisfatórios. A obtida com a função Haar é apresentada para exemplificar o que poderia ser obtido, qualitativamente, através dos aplicativos atualmente disponíveis. Além disto, esta é a função *wavelet* mais simples de todas.

Na Figura 6.6 pode-se verificar que as imagens sintéticas obtidas pelas funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 possuem basicamente quase a mesma informação espacial (detalhes) contida na imagem original do HSS. A linha da costa, feições na porção continental, as variações internas de temperatura no interior da pluma e até mesmo o ruído presente na imagem de entrada foram incorporados. Na imagem obtida com a função Coeff05 é possível notar também feições de aspecto granular no interior e adjacências da pluma termal. Nas imagens sintéticas obtidas com as funções de base Haar e db03 observam-se os aspectos quadriculado e granular em todas as porções da imagem. Já a imagem sintética obtida pela função de base Symlet04 verifica-se o aspecto blocado na porção aquática da cena imageada.

A partir destes resultados pode-se inferir que a fusão através de transformadas *wavelets* foi sim capaz de introduzir detalhes espaciais extraídos da imagem do HSS na imagem do ASTER. Resta agora saber se as características espectrais da imagem original do ASTER foram preservadas nas imagens sintéticas. Para responder esta questão, as imagens sintéticas são avaliadas quantitativamente e os resultados são apresentados no próximo tópico.

6.4.2 Avaliação Quantitativa

A avaliação quantitativa foi feita através de cálculos de histogramas, médias, variâncias, imagens diferença e testes estatísticos. O objetivo maior aqui foi saber se foram preservadas as características espectrais (valores de temperatura) da imagem do ASTER na imagem sintética obtida (conforme discutido em 5.5.2.2). Espera-se encontrar pelo menos uma imagem sintética que seja espectralmente semelhante à do ASTER.

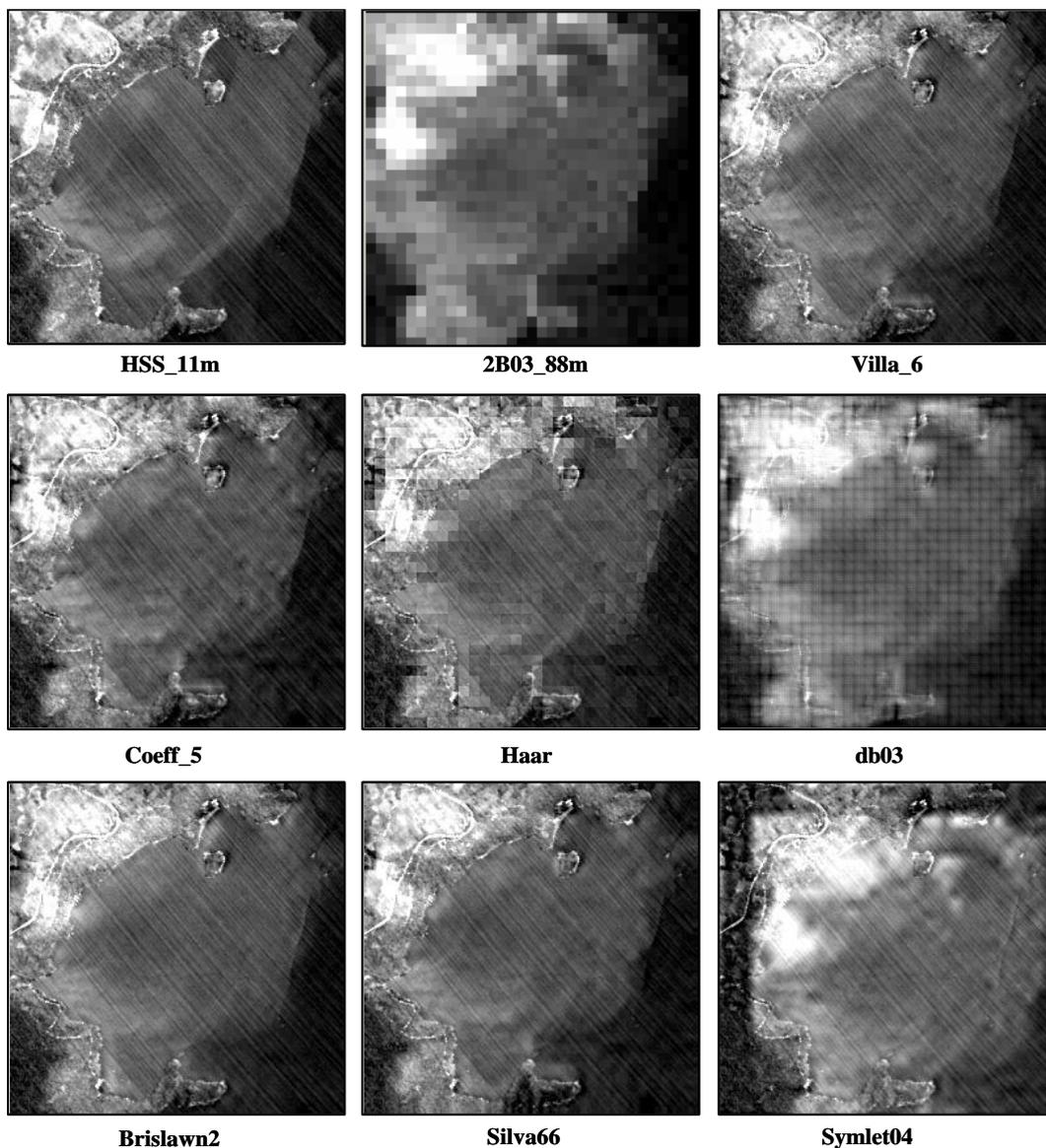


FIGURA 6.6 – Imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e as sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Brislawn2, Silva66, Haar, Symmlet04 e db03.

6.4.2.1 Avaliação dos Histogramas

Um primeiro passo para avaliar a característica espectral das imagens sintéticas foi através da comparação de seus histogramas com os das imagens de entrada, mais especificamente com o histograma original da imagem 2B03 do ASTER. Na Figura 6.7 são apresentados os histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das

imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2.

Na Figura 6.7 verifica-se inicialmente que os dados de entrada possuem uma distribuição bimodal muito parecida, estando apenas defasados quanto ao valor médio da temperatura. Os histogramas das imagens sintéticas apresentam distribuição próxima daquela da imagem de entrada ASTER. Os valores médios dos picos também estão concentrados em torno dos mesmos valores (26 e 28°C).

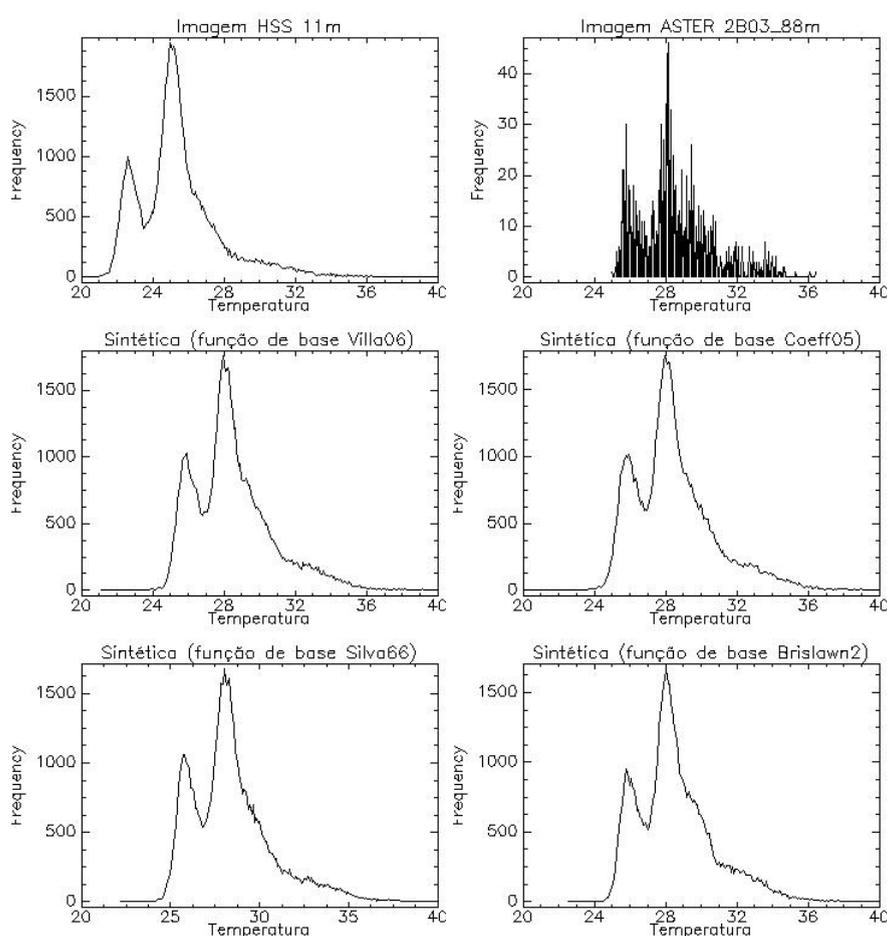


FIGURA 6.7 – Histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2. O histograma da imagem 2B03_88m (figura superior à direita) tem escala de frequência menor devido à dimensão da imagem ser de apenas 32x32 pixels.

Esta análise permite verificar que as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2, do ponto de vista da distribuição dos valores radiométricos, mantiveram as características espectrais da imagem de entrada original.

Para uma comparação mais apropriada dos histogramas, as imagens sintéticas foram reamostradas (pelo método do vizinho mais próximo) de 11 para 88 metros de resolução espacial (a mesma da imagem do ASTER). Seus histogramas foram então computados e comparados com os das imagens de entrada. Na Figura 6.8 são apresentados os histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 reamostradas para terem resolução espacial de 88m.

Na Figura 6.8 verifica-se que os histogramas de todas as imagens sintéticas reamostradas, com exceção da Coeff05, apresentam distribuição próxima daquela da imagem de entrada ASTER. A exemplo do ocorrido com os histogramas das imagens sintéticas originais, esta análise permite verificar que as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2, do ponto de vista da distribuição dos valores radiométricos, mantiveram as características espectrais da imagem de entrada original.

Entretanto, a suposição de que duas imagens são semelhantes ou equivalentes baseada apenas na informação de seus histogramas pode levar a conclusões equivocadas, uma vez que duas imagens distintas podem possuir histogramas parecidos.

6.4.2.2 Avaliação das Médias e Variâncias

Para uma melhor avaliação da fidelidade espectral das imagens sintéticas em relação ao dado de entrada original foram calculados e comparados a média, a variância e o desvio padrão das imagens sintéticas e das imagens de entrada. A Tabela 6.2 apresenta os valores de média e desvio padrão dos valores de TSM da imagem de entrada ASTER 2B03 e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2, Haar e db03. Os valores foram calculados tanto a partir das imagens

sintéticas originais (11m) quanto a partir das imagens sintéticas reamostradas para 88 metros.

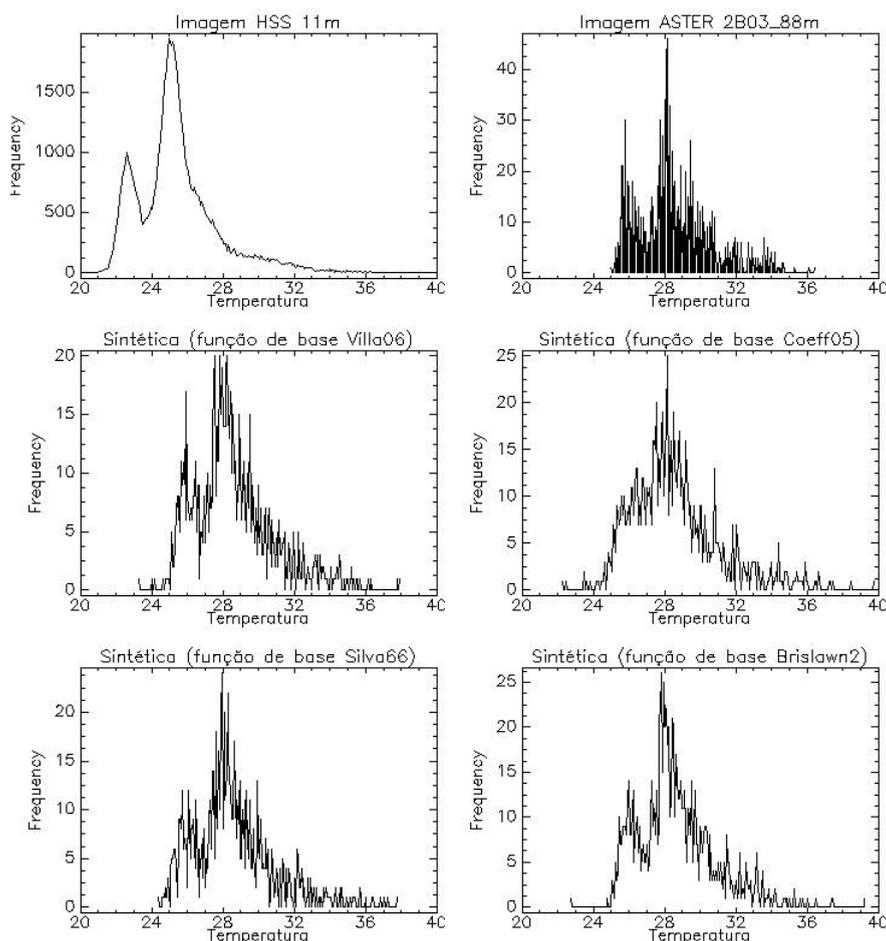


FIGURA 6.8 – Histogramas das imagens de entrada (HSS_11m e 2B03_88m) e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2 reamostradas para 88 de resolução espacial. O histograma da imagem HSS_11m (figura superior à esquerda) tem escala de frequência maior devido à dimensão da imagem ser de 256x256 pixels.

Através dos dados apresentados na Tabela 6.2 pode-se verificar que os valores de média e desvio padrão das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2 e Haar, tanto original quanto reamostradas para 88 m, são muito próximos dos obtidos na imagem 2B03. O fato das médias serem próximas indicam que as imagens sintéticas (originais e reamostradas) mantêm o brilho médio da

imagem 2B03. Já as semelhanças entre os valores de desvio padrão indicam que não houve adição ou supressão expressiva de informação espectral durante o processo. Este resultado também sugere que as características espectrais destas imagens são semelhantes e que o processo de fusão foi capaz de preservar a informação espectral da imagem original do ASTER.

TABELA 6.2 – Valores de média e desvio padrão dos valores de TSM das imagens de entrada e sintéticas com 11 e 88 m de resolução espacial.

Imagem	Média	Desvio padrão
2B03_88m	28,58	2,1
Villa06	28,50	2,2
Villa06_88m	28,58	2,2
Coeff05	28,50	2,2
Coeff05_88m	28,57	2,4
Silva66	28,43	2,2
Silva66_88m	28,51	2,2
Brislawn2	28,58	2,1
Brislawn2_88m	28,65	2,1
Haar	28,58	2,2
Haar_88m	28,67	2,3
db3	59,85	4,4
db3_88m	58,91	4,2

Aqui também cabe ressaltar que a imagem sintética obtida com a função de base Haar, muito embora não tenha apresentado bom resultado espacial (efeito quadriculado), é capaz de manter, do ponto de vista da média e da variância, as propriedades espectrais da imagem 2B03. Já na imagem sintética obtida com a função de base db03, as diferenças entre os valores de média e desvio padrão em relação aos da imagem de entrada confirmam o pobre desempenho obtido na avaliação qualitativa.

A partir de estatística que envolve teste de médias, é possível afirmar que as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Brislawn2, Coeff05 e Haar são

semelhantes ou equivalentes à imagem de entrada 2B03 com nível de significância de 5%.

6.4.2.3 Avaliação da Média e da Variância da Imagem Diferença

Considerando-se ainda que duas imagens distintas entre si podem possuir médias e variâncias semelhantes, seguiu-se outra abordagem quantitativa que consistiu em realizar um teste sugerido por Wald *et al.* (1997), conforme descrito em 5.5.2.2.3. A Tabela 6.3 apresenta os valores de média e desvio padrão dos valores de TSM da imagem diferença calculados a partir da imagem de entrada ASTER 2B03 e das imagens sintéticas reamostradas para 88 m obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66 e Brislawn2, Haar e db03.

Através dos dados apresentados na Tabela 6.3 pode-se verificar que os valores da média da imagem diferença entre a imagem de entrada 2B03 e as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2 e Haar são muito próximas de zero. Os valores do desvio padrão também apresentam a mesma tendência de serem próximos de 1. Já na imagem sintética obtida com a função de base db03, tanto a média quanto a variância indicam forte distorção das características espectrais da imagem original.

TABELA 6.3 – Valores de média e desvio padrão das imagens diferença.

	Média	Desvio padrão
2B03 – Villa6_88m	-0,0013	0,8
2B03 – Coeff5_88m	0,0036	1,1
2B03 – Silva66_88m	-0,0703	0,9
2B03 – Brislawn2_88m	-0,0755	0,9
2B03 – Haar_88m	-0,0902	0,9
2B03 – db3_88m	-30,3358	2,7

Esta análise sugere que, segundo a tese proposta, as imagens sintéticas obtidas com estas funções de base são equivalentes à imagem original do ASTER e, desta forma, o processo de fusão foi capaz de preservar o conteúdo espectral da imagem de entrada. O resultado deste teste é mais consistente e também foi coerente com os obtidos na comparação dos histogramas e das médias e desvios padrões das imagens. Cabe ressaltar que estão computadas as diferenças de todos os pixels das imagens, incluindo aí os localizados em áreas da superfície terrestre.

6.4.2.4 Avaliação Utilizando Dados de Campo

Na Figura 6.9 são mostrados os valores de temperatura derivados da imagem de entrada ASTER 2B03 e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2.

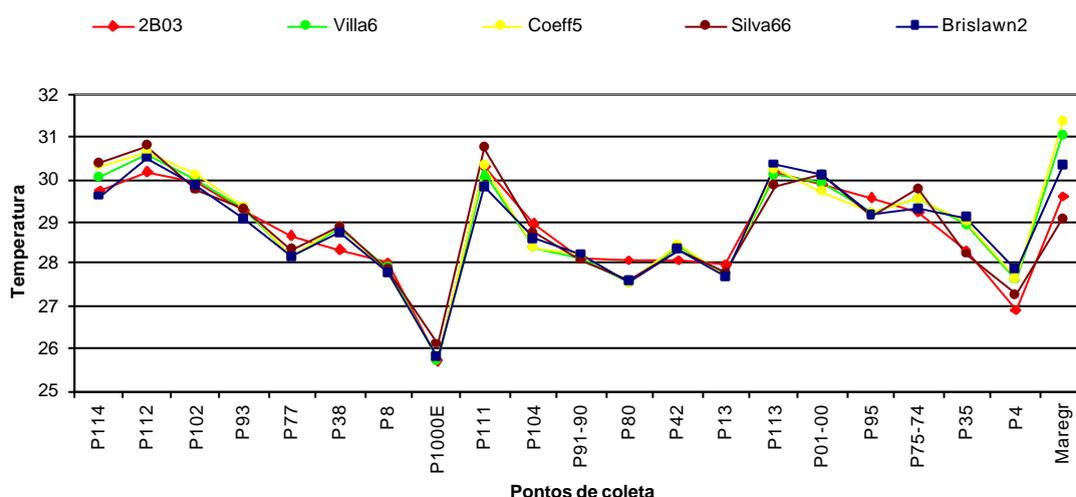


FIGURA 6.9 – Valores de temperatura derivados da imagem de entrada ASTER 2B03 e das imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2.

Esses valores foram tomados nas mesmas coordenadas dos pontos em que foram feitas as medidas de temperatura superficial *in situ*. Para evitar erros pontuais de localização de um ponto na imagem, os valores de temperatura foram obtidos tomando-se a média dos valores dentro de uma janela de 3x3 centrada na coordenada central do ponto

observado. Cabe ressaltar que os mesmos resultados foram obtidos quando foram tomados apenas os valores pontuais (de um pixel) de TSM medidos.

Verifica-se a partir da Figura 6.9 que os valores de temperatura derivados das imagens sintéticas (todos os casos) são altamente correlacionados com os medidos na imagem 2B03 para quase a totalidade dos pontos amostrados. Em muitos casos eles são coincidentes. Este fato indica que é verdadeira a hipótese de que a imagem sintética poderia substituir a imagem 2B03 quando o interesse fosse extrair da imagem o valor absoluto da temperatura nos pontos amostrados. Isto foi verificado mesmo na imagem sintética obtida com a função de base Haar, a qual, como verificado anteriormente, não apresentou um bom resultado qualitativo.

Para melhor avaliar estes resultados foram feitas regressões lineares entre os valores de temperatura derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2. A Figura 6.10 apresenta o resultado dessas regressões.

Na Tabela 6.4 são apresentados os valores dos coeficientes angulares (a), lineares (b) e de determinação (r^2) das regressões lineares entre os valores de temperatura medidos na imagem de entrada (2B03) e aqueles tomados nas imagens sintéticas obtidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2. Também são mostrados os valores da estatística t e do valor- p utilizados no teste de hipóteses sobre os coeficientes da regressão.

Analisando-se os coeficientes de determinação (r^2) pode-se verificar que existe uma boa correlação entre os valores de temperatura obtidos nas imagens 2B03 e sintéticas. Do ponto de vista dos coeficientes angulares (a) e lineares (b), os melhores resultados foram obtidos com as imagens sintéticas produzidas com as funções de base Brislawn2 e Silva66. Já o pior é o obtido com a imagem sintética obtida com a função de base Coeff05.

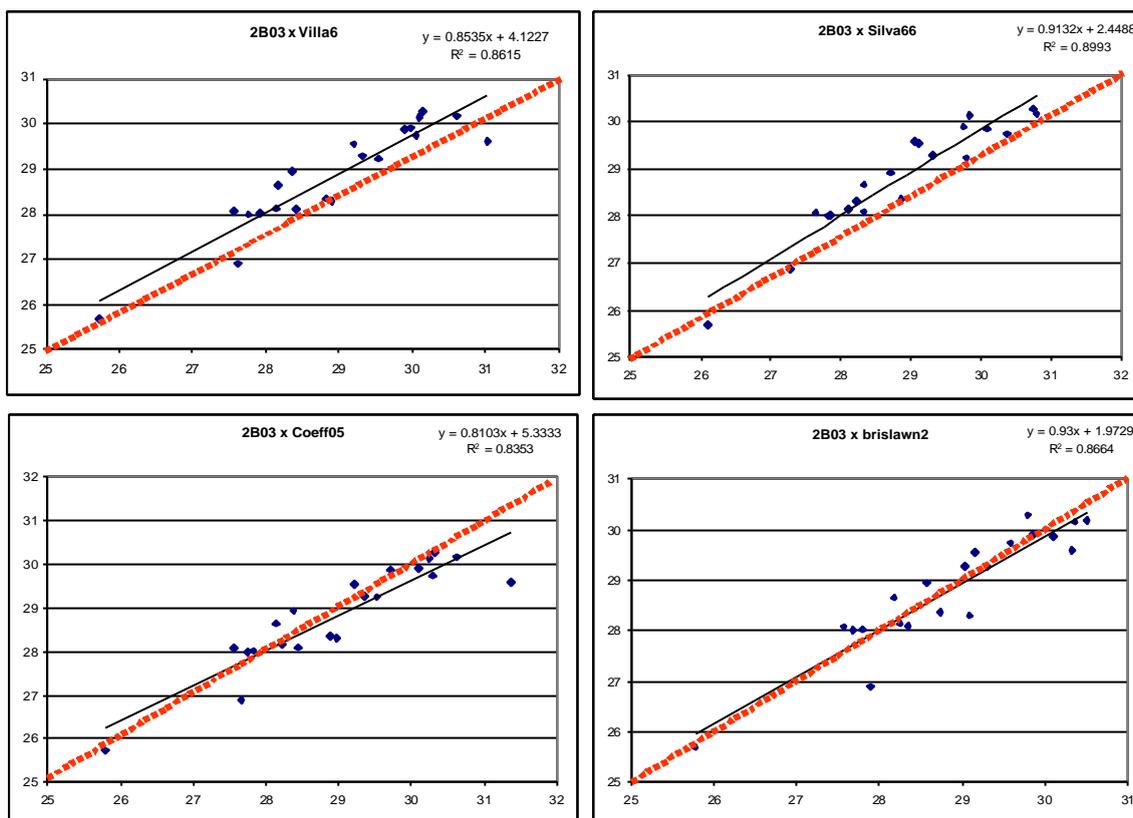


FIGURA 6.10 – Regressões lineares entre os valores de temperatura derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2. A linha cheia indica a reta ajustada aos pontos amostrados. A linha tracejada em vermelho indica a reta ideal (coeficiente angular igual a 1). A imagem de referência está associada ao eixo das abcissas e as sintéticas ao eixo das ordenadas.

Avaliando-se os valores da estatística t e do valor- p dos coeficientes angulares e lineares, pode-se verificar que as imagens sintéticas obtidas com as funções de base Brislawn2, Silva 66 e Villa06 foram equivalentes à imagem 2B03 com nível de significância superior a 5%. Mesmo a imagem sintética obtida com as funções de base Coeff05 poderia ser considerada semelhante à 2B03 com um nível de significância menor.

TABELA 6.4 – Coeficientes das regressões e valores do teste estatístico (amostras de campo).

2B03xVilla06			
a=0,05			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,8535	-1,8655	0,0776
Linear (b)	4,1226	1,8140	0,0855
Determinação (r^2)	0,8614		
2B03x Coeff05			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,8103	-2,2978	0,0330
Linear (b)	5,3332	2,2283	0,0389
Determinação (r^2)	0,8353		
2B03x Silva66			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,9132	-1,2381	0,2307
Linear (b)	2,4428	1,2095	0,2413
Determinação (r^2)	0,8993		
2B03x Brislawn2			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,9300	-0,8350	0,4140
Linear (b)	1,9729	0,8155	0,4287
Determinação (r^2)	0,8663		

6.4.2.5 Avaliação Utilizando Amostras Pareadas

Embora o resultado acima confirme os demais, considerou-se ainda o fato do número de amostras não ter sido suficiente para a análise pretendida. Além disto, o processo de coleta de amostras em campo não pode ser considerado aleatório. Para tanto, seguiu-se a abordagem descrita em 5.5.2.2.5, onde são empregadas amostras aleatórias pareadas obtidas nas imagens comparadas. As amostras foram coletadas apenas na porção aquática da cena imageada.

Para melhor avaliar estes resultados foram feitas regressões lineares entre os valores de temperatura dos 100 pontos derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles pareados obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2 (Figura 6.11).

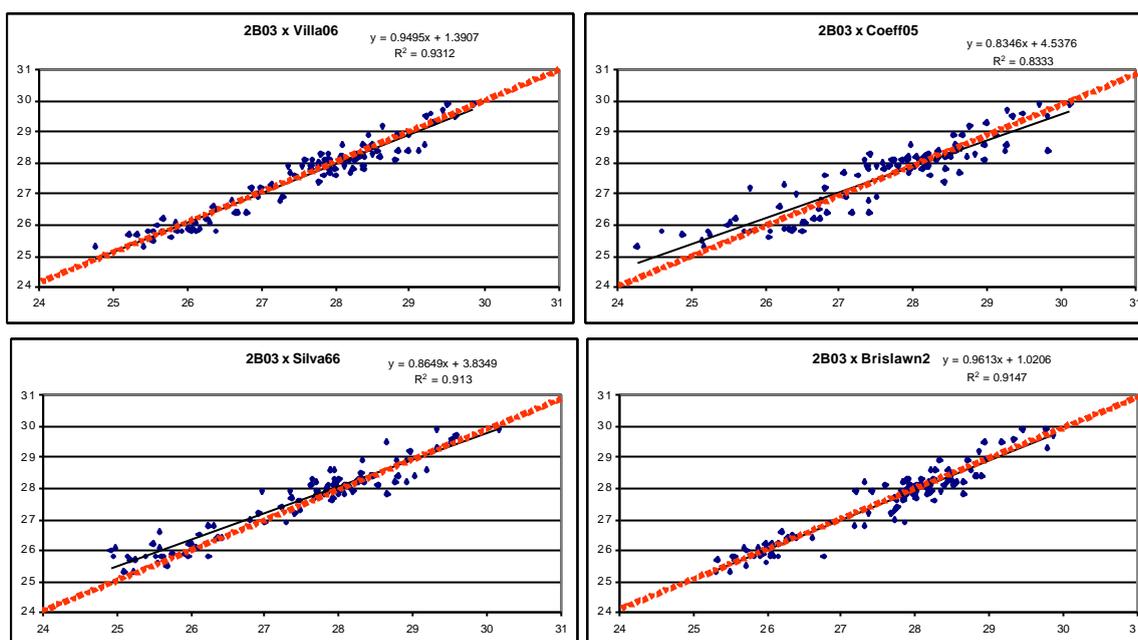


FIGURA 6.11 – Regressões lineares entre os valores de temperatura dos 100 pontos derivados da imagem de entrada (2B03) e aqueles pareados obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2. A linha cheia indica a reta ajustada aos pontos amostrados. A linha tracejada em vermelho indica a reta ideal (coeficiente angular igual a 1). A imagem de referência está associada ao eixo das abcissas e as sintéticas ao eixo das ordenadas.

Na Tabela 6.5 são apresentados os valores dos coeficientes angulares (a), lineares (b) e de determinação (r^2) das regressões lineares entre os valores de temperatura (100 pontos) obtidos da imagem de entrada (2B03) e aqueles correspondentes obtidos nas imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06, Coeff05, Silva66, Brislawn2. Também são mostrados os valores da estatística t e do valor- p .

Através dos dados apresentados na Tabela 6.5 pode-se verificar que ainda existe uma boa correlação entre os valores de temperatura obtidos nas imagens 2B03 e sintéticas. Analisando-se os coeficientes de determinação (r^2) pode-se notar que os melhores resultados foram obtidos com as imagens sintéticas produzidas com as funções de base Villa06 e Brislawn2. O pior foi com a obtida pela função de base Coeff05. Do ponto de vista dos coeficientes angulares (a) e lineares (b), os melhores resultados são obtidos com as imagens sintéticas produzidas com as funções de base Brislawn2 e Villa06. Já o

pior é o obtido com a imagem sintética obtida com a função de base Coeff05, a exemplo do ocorrido com as amostras de campo.

TABELA 6.5 – Coeficientes das regressões e valores do teste estatístico (amostra aleatória de 100 pontos na água).

2B03x Villa06			
a=0,05			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,9494	-1,9377	0,0555
Linear (b)	1,3907	1,9370	0,0556
Determinação (r^2)	0,9312		
2B03x Coeff05			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,8346	-4,3863	$2,9053 \times 10^{-5}$
Linear (b)	4,5376	4,3664	$3,1355 \times 10^{-5}$
Determinação (r^2)	0,8332		
2B03x Silva66			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,8648	-5,0105	$2,4067 \times 10^{-6}$
Linear (b)	3,8349	5,1869	$1,1526 \times 10^{-6}$
Determinação (r^2)	0,9129		
2B03x Brislawn2			
	Coeficiente	Estatística <i>t</i>	valor- <i>p</i>
Angular (a)	0,9613	-1,3051	0,1948
Linear (b)	1,0205	1,2478	0,2150
Determinação (r^2)	0,9147		

Os valores da estatística *t* e do valor-*p* dos coeficientes angulares indicam, no entanto, que a hipótese de que existe a regressão ($a = 1$) só é aceita com nível de significância de 5% para as imagens sintéticas produzidas com as funções de base Brislawn2 e Villa06. O mesmo resultado é obtido quando se analisam os coeficientes lineares.

Não há uma razão específica para o fato das funções de base Brislawn2 e Villa06 terem apresentado melhor resultado. Conforme discutido anteriormente, não existe um procedimento padrão para escolha da função de base mais adequada para uma determinada aplicação ou para um determinado conjunto de dados de entrada. Entretanto, observou-se que as funções de base biortogonais, como é o caso da

Brislawn2, Villa06, Silva 66 e Coeff05, produzem bons resultados qualitativos e quantitativos.

O mesmo procedimento acima foi realizado tomando-se as amostras de valores de temperatura em toda a imagem, isto é, escolhendo amostras tanto em porções de água quanto na superfície terrestre. Neste caso, embora ainda haja uma boa correlação entre os valores medidos na imagem de entrada 2B03 e nas sintéticas, o teste estatístico indica que as imagens não são significativamente equivalentes em todos os casos.

A razão para isto é a forte variabilidade da temperatura dos alvos na superfície terrestre decorrente da diferença de emissividade desses alvos. Além disto, na imagem do ASTER não existem muitas das informações espaciais que estão presentes na imagem do HSS. Outro aspecto pode ser também a forte variação do relevo na parte terrestre. É uma área montanhosa e mais sujeita a incorreções geométricas, as quais são mantidas na fase de registro. Cabe lembrar que as imagens não foram ortorretificadas. Desta forma, os resultados apresentados neste trabalho só são significativos na análise de feições termais que ocorrem na superfície aquática.

Assim, após a análise qualitativa e quantitativa dos resultados pode-se afirmar que, para a porção marinha, o processo de fusão pode ocorrer com êxito, já que foi possível gerar pelo menos duas imagens híbridas que reúnem as informações de interesse dos dois dados de entrada. O ganho de informação espacial ocorre sem comprometimento da média dos valores originais da imagem ASTER. Este fato evidencia a utilidade da transformada *wavelet* em processos de fusão objetivando melhoria da resolução espacial quando a informação espectral de uma das imagens precisa ser preservada.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se o uso da transformada *wavelet* para fusão de imagens termais obtidas por diferentes sensores (orbital e aerotransportado) com o propósito de se analisar e caracterizar os fenômenos locais sobre ambientes marinhos e zonas costeiras. O objetivo dos processos de fusão foi reunir as melhores características espaciais e espectrais dos dados de entrada em uma única imagem.

Duas hipóteses foram formuladas neste trabalho: a primeira é que é possível detectar e caracterizar as feições termais de escala local a partir de imagens individuais obtidas através dos sensores HSS e ASTER, e a segunda é que o uso sinérgico destas imagens através de processos de fusão pode produzir resultados mais adequados e úteis que aqueles obtidos individualmente, reduzindo o volume de dados, superando limitações individuais e reunindo toda informação essencial em um único produto.

A partir dos resultados obtidos através da metodologia proposta, pode-se concluir que:

- 1) As imagens termais obtidas pelos dois sensores (HSS e ASTER) são adequadas e permitem isoladamente analisar e caracterizar feições termais de escala local sobre ambientes marinhos e zonas costeiras, aqui representadas pela pluma termal adjacente à Central Nuclear de Angra dos Reis. A principal vantagem do HSS é a refinada resolução espacial. Já o ASTER possui canais termais com características espectrais e radiométricas mais precisas que possibilitam prover de modo operacional o valor da temperatura superficial corrigido dos efeitos causados pela atmosfera. As imagens destes sensores possuem, desta forma, características complementares e suplementares que podem ser agrupadas em uma imagem híbrida obtida por processos de fusão.

- 2) É possível combinar em uma única imagem os conteúdos espectral e espacial extraídos de duas imagens termais distintas através de processos de fusão que empregam transformada *wavelet*. Foi possível obter mais de uma imagem híbrida resultante do processo de fusão que reunisse as informações de interesse das duas imagens de entrada (detalhes espaciais e valores de TSM). Isto implica que foi possível reduzir o volume de informações na etapa de análise. Assim, ao invés de trabalhar com cinco imagens termais do HSS e seis do ASTER, ou uma imagem de cada sensor, pode-se trabalhar apenas com a imagem sintética (conceito da redução de dados na fase de análise).
- 3) As características individuais de cada sensor (resoluções espaciais, correção entre as bandas etc) favorecem o processo de georreferenciamento e, principalmente, de registro entre as imagens de entrada (5.3). Esta última é uma fase crítica no processo de fusão de imagens.
- 4) Os resultados do imageamento mostraram que uma característica vantajosa dos dados do HSS é que todas as bandas possuem a mesma resolução espacial além de serem corrigidas. Essas características favoreceram o uso de processos de fusão simples como o RGB, o qual permite integrar informações obtidas nas diferentes porções do espectro eletromagnético, reunindo em uma única imagem as informações de interesse e permitindo uma rápida interpretação das feições investigadas. Outra vantagem do emprego deste sensor aerotransportado é a flexibilidade de operação e a liberdade para definir a área de imageamento e alturas de vôo. Essas características são particularmente importantes para estudos de impacto da ação antrópica sobre o ambiente, como no caso apresentado, principalmente em áreas sujeitas a freqüente cobertura de nuvens e onde os processos possuam caráter dinâmico.
- 5) Através da correlação entre medidas de campo e medidas obtidas pelo sensor HSS é possível derivar o valor absoluto da temperatura com uma incerteza aceitável para o experimento em questão (menor que 1°C).

- 6) A análise da imagem do canal termal do ASTER permitiu detectar e caracterizar aspectos da pluma termal como a sua forma e extensão. Entretanto, a caracterização dos gradientes horizontais de TSM no interior da pluma assim como a determinação da linha divisória entre a água e a terra não foram favorecidas. Muito embora sejam corrigidas, as imagens dos canais termais e as do visível do sensor ASTER possuem resoluções espaciais distintas e deste modo inviabilizam o uso de processos de fusão simples como o RGB, por exemplo. O erro médio na determinação do valor absoluto da TSM verificado na imagem 2B03 e na região da pluma variou de 1 a 2°C, sendo que os maiores erros ocorreram onde a variabilidade de temperatura é maior (proximidades do ponto de descarga). Esse erro também ocorreu em virtude da correção atmosférica da imagem ter sido feita dados auxiliares de climatologia, uma vez que os dados do MODIS, fonte primária de informação, estar indisponível na data do processamento do produto 2B03.
- 7) Os resultados da fusão entre as imagens do ASTER e HSS mostraram que a transformada *wavelet* é eficiente para extrair detalhes de uma imagem de alta resolução e transferi-los para outra de baixa resolução preservando o conteúdo espectral desta última.
- 8) Conforme esperado, verificou-se que a função de base empregada na transformação influencia fortemente o resultado da fusão. Assim, é desejável haver o maior número possível de funções *wavelets* implementadas para serem testadas, uma vez que cada função fornece um resultado diferente.
- 9) A aplicação do processo de fusão evidenciou que uma das dificuldades de se utilizar *wavelets* é a necessidade de preparar as imagens de entrada com dimensões e resoluções apropriadas, o que geralmente leva a processos de reamostragem das imagens que por sua vez alteram as características originais dos dados de entrada. Entretanto, o uso de reamostragem do dados de entrada não causou mudanças significativas nos resultados.

10) Por fim, cabe ressaltar que devido à rapidez na execução e o pelo fato de poder ser implementada de modo eficiente, é possível vislumbrar o uso de transformada *wavelet* para fusão de imagens de modo operacional e quase em tempo real.

Academicamente este trabalho se esgota a partir das conclusões acima. Entretanto alguns tópicos podem ainda ser explorados com maior profundidade em trabalhos futuros. Como exemplo, podemos citar a implementação de novas funções *wavelets*. Também podem ser testadas fusões de imagens termais cujo objetivo seja mapear feições termais que ocorrem sobre a superfície terrestre, onde existe uma diversidade de alvos com emissividades distintas. Por fim, pode-se ainda pensar na implementação de novas medidas quantitativas de avaliação da qualidade de produtos derivados de processos de fusão e um modo automático de obtenção das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER user handbook**. Versão 2. [S.l]: ASTER, 2002. Disponível em: <<http://science.ASTER.ersdac.or.jp>>. Acesso em: nov. 2002.

ANTONINI, M. *et al.* Image coding using wavelet transform. **IEEE Transactions on image processing**, v. 1, p. 205-220, 1992.

BANDEIRA, J. V. *et al.* The performance of a surface jet on a closed bay: the reality compared with the theory. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 6., 2003, Colombo. **Proceedings...** Colombo: COPEDEC, 2003. 1 CD-ROM.

BARTON, I. J. Satellite-derived sea surface temperatures: current status. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v.100, n. 5, p. 8777-8790, May 1995.

BURT, P. J.; ADELSON, E. H. The laplacian pyramid as a compact image code. **IEEE Transactions on Communications**, New York, NY, v. COM-31, n. 4, p. 532-540, Apr. 1983.

BYRNES, A. E.; SCHOTT, J. R. Correction of thermal imagery for atmospheric effects using aircraft measurement and atmospheric modeling techniques. **Applied Optics**, Washington, DC, v. 25, n. 15, p. 2563-2570, Aug.. 1986.

CARPER, W. J.; LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 56, n. 4, p. 459-467, Apr.. 1990.

CHAVEZ, P. S.; SIDES, S. C.; ANDERSON, J. A. Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 57, n. 3, p. 295-303, Aug.. 1991.

CLICHE, G.; BONN, F.; TEILLET, P. Integration of the SPOT pan channel into its multispectral mode for image sharpness enhancement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 51, n. 3, p. 311-316, Aug.. 1985.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1993. 170 p.

DASH, P. *et al.* Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 23, n. 13, p. 2563-2594, 2002.

DAUBECHIES, I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, v. 49, p. 909-906, Nov. 1988.

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. Philadelphia: SIAM Publishers, 1992. 357 p.

DAVIS, G. **Baseline wavelet transform coder construction kit**. Disponível em: <<http://www.geoffdavis.net/darhmouth/wavelet/wavelet.html>>. Acesso em: nov. 2005.

DJAMDJI, J.; BIJAOU, A.; MANIERE, R. Geometrical registration of images: the multiresolution approach. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 59, n. 5, p. 645-653, May 1993.

DU, Y; VACHON, P. W.; VAN DER SANDEN, J.J. Sattelite image fusion with multiscale wavelet analysis for marine applications: Preserving Spatial Information and Minimizing Artifacts (PSIMA). **Canadian journal Remote Sensing**, Ottawa, Canadá, v.29, n. 29, p. 14-23, 2003.

EHLERS, M. Multisensor image fusion techniques in remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrametry Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 46, p. 19-30, 1991.

EMERY, W. J.; WICK, G. A.; SCHLUESSEL, P. Skin and bulk sea surface temperatures: satellite measurement and corrections. In: IKEDA, M.; DOBSON, F. W. (Eds.). **Oceanographic applications of remote sensing**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. p. 145-165.

ERSDAC. **Advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer**. [online]: ERSDAC, 2002. Disponível em: <<http://www.asterweb.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: nov. 2005.

ERSDAC. **ASTER user's guide**. Versão 3.1. [S.l.]: ERSDAC, 2001. Disponível em: <<http://www.asterweb.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: nov. 2005.

ERSDAC. **DAR guideline - guide for ASTER ARO user: how to submit "data acquisition requests"**. Versão 1.0. Tokio: RSDAC, 2002. 119 p.

FONSECA, L. M. G.; MANJUNATH, B. S. Registration techniques for multisensor remotely sensed imagery. **ISPRS Journal of Photogrametry Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 62, n. 9, p. 1049-56, set. 1996.

FRANKLIN, S. E.; BLODGETT, C. F. An example of satellite multisensor data fusion. **Computers & Geoscience**, Alexandria, VA, v. 19, n. 4, p. 577-583, 1993.

FUJISADA, H. ASTER level-1 data processing algorithm: advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, NY, v. 36, n. 4, p. 1101-1112, 1998.

GARGUET-DUPORT, B. WaveMerge: a multiresolution software for merging SPOT panchromatic and SPOT multispectral data. **Environmental Modeling & Software**, Amsterdam, v. 12, n. 1, p. 85-92, 1997.

GARGUET-DUPORT, B. *et al.* The use of multiresolution analysis and wavelets transform for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 62, n. 9, p. 1057-1066, set. 1996.

GILLESPIE, A. *et al.* A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, NY, v. 36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.

GOODRUM, G.; KIDWELL, K. B.; WINSTON, W. (Eds). **NOAA KLM user's guide**. NOAA/NESDIS/NCDC/CSD/SSB, 2000. Disponível em: <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>>. Acesso em: nov. 2002.

HAHN, M.; SAMADZADEGAN, F. Integration of DTMS using wavelets. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Reston, VA, v. 32, p. 90-96, June. 1999.

JET PROPULSION LABORATORY. **ASTER** Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. NASA, 2004. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 28 jan. 2006.

KIDWELL, K. B. (Ed.). **NOAA polar orbiter data: user guide**. Washington, DC: NOAA, 1995.

LI, H.; MANJUNATH, B. S.; MITRA, S. K. Multisensor image fusion using the wavelet transform. **Graphical Models and Image Processing**. Amsterdam, v. 57, n. 3, p. 235-245, mar. 1995.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation** 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1987. 721p.

LUCCA, E. V. D. *et al.* Uso de sensor hiperespectral aerotransportado no monitoramento da pluma termal oceânica decorrente da descarga de refrigeração da Central Nuclear de Angra dos Reis. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE/Selper, 2005. 1 CD-ROM.

MALLAT, S. A Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, New York, NY, v.11, n. 7, p. 674-693, July. 1989.

MARCELINO, E. V.; *et al.* Evaluation of IHS, PCA and wavelet transform fusion techniques for the identification of landslide scars using satellite data. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., Belo Horizonte. **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2003.

MATHWORKS. **Mathlab 7.0.4**: wavelet toolbox user's guide. Version 3. [S.I]: Mathworks, 2005.

MCCLAIN, E. P. Multiple atmospheric-window techniques for satellite-derived sea surface temperatures. In: GOWER, J. F. R. (Ed.). **Oceanography from Space**. New York: Plenum Press, 1981. p.73-85.

MCMILLIN, L. M. Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, n. 80, p. 5113-5117, 1975.

MCMILLIN, L. M.; CROSBY, D.S. Theory and validation of the multiple window surface temperature technique. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 89, n. 3, p. 3655-3661, May 1984.

MORAN, M. S. A window-based technique for combining landsat thematic mapper thermal data with higher-resolution multispectral data over agricultural lands. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 56, n. 3, p. 337-342, Jan. 1990.

MOREIRA, R. C. et al. Sensor hiperspectral HSS: sumário das características técnicas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE/Selper, 2005. 1 CD-ROM.

NASA. **NOAA-M booklet**. [online]: NASA, 2002. Disponível em: <<http://www.gsfc.nasa.gov/gsf/earth/pictures/noaam/noaa-m.pdf>>. Acesso em: jul. 2002.

PELLEMANS, A. H. J. M.; JORDANS, R. W. L.; ALLEWIJN, R. Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 59, n. 1, p. 81-87, Jan. 1993.

POHL, C. **Geometric aspects of multisensor image fusion for topographic map updating in the humid tropics**. Wageningen: Wageningen University, 1996. 160 p. (ITC Publication, 39).

POHL, C. Tools and methods for fusion of images of different spatial resolution. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Reston, VA, v. 32, p. 7-11, June. 1999.

- POHL, C.; TOURON, H. Operational applications of multi-sensor image fusion. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Reston, VA, v. 32, p. 123-127, June 1999.
- POHL, C.; VAN GENDEREN, J. L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 19, n. 5, p. 823-854, 1998.
- RANCHIN, T.; WALD, L. Fusion of high spatial and spectral resolution images: the ARSIS concept and its implementation. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 66, n. 1, p. 49-61, 2000.
- RESEARCH SYSTEMS. **ENVI**: what's new in ENVI 3.5. Boulder, CO: Resarch Systems, 2001. 148 p.
- RESEARCH SYSTEMS. **ENVI**: wavelet toolkit. [S.I]: Resarch Systems, 2002.
- ROBINSON, I. S. **Satellite oceanography**: an introduction for oceanographers and remote-sensing scientists. New York: Ellis Horwood, 1985. 455 p.
- ROGERS, R. H.; WOOD, L. The history and status of merging multiple sensor data: an overview. In: **ACSM-ASPES Annual Convention**, v. 4, p. 352-360, 1990. Technical Papers.
- RUSKAI, M. B. *et al.* **Wavelets and their applications**. Boston: Jones and Bartlett Publishers, 1992. 474p.
- SARAF, A. K. IRS-1C-LISS-III and PAN data fusion: an approach to improve remote sensing based mapping techniques. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 20, n.10, Oct. 1999.
- SCAPACE, F. L.; MADDING, R. P.; GREEN, T. Scanning thermal plumes. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 41, n. 10, p. 12233-1231, 1975.
- SCHOTT, J. R. **Remote sensing**: the image chain approach. New York: Oxford University Press, 1997. 394 p.
- SCHOTT, J. R. Temperature measurement of cooling water discharged from power plants. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Reston, VA, v. 45, v. 6, p. 753-761, 1979.
- SCHOTT, J. R.; TOURIN, R. H. A completely airborne calibration of aerial infrared water temperature measurements. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE

SENSING OF ENVIRONMENT, 10., 1975, Ann Arbor, MI. **Proceedings...** Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan, 1975. p. 477-484.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing: models and methods for image processing.** San Diego: Academic Press, 1997. 522 p.

SENSYTECH. **AA5201 AHS Airborne Hyperspectral Scanner System: operator manual.** Ann Arbor, MI: SENSYTECH, v. 1, 2002a. 86p.

SENSYTECH. **AA5201 AHS Airborne Hyperspectral Scanner System: spectral calibration data.** Ann Arbor, MI: SENSYTECH, 2002b. 69 p.

SENSYTECH. **AHS Airborne Hyperspectral Scanner.** [S.l.]: SENSYTECH, 2003. Disponível em: <<http://www.sensytech.com/Imaging/ahs.html>>. Acesso em: 22 abr. 2003.

SHETTIGARA, V. K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set. **Photogrametric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 58, n. 5, p. 561-567, maio 1992.

SINGH, S. M. Removal of atmospheric effects on a pixel by pixel basis from the thermal infrared data from instruments on satellites: the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 5, n. 1, p. 161-183, 1984.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems.** Reading: Addison-Wesley, 1980. 575 p.

STEVENSON, M. R.; INOSTROZA, H. V.; STEFFEN, C. A. **Angra-2 Mission: 6-7 and 22 October 1981 – Data Report.** São José dos Campos, INPE, jul. 1883a. (INPE-2807-RA/173). 105p.

STEVENSON, M. R.; INOSTROZA, H. V.; STEFFEN, C. A. **Angra-2 Mission: 6-7 and 22 October 1981 – Technical Report.** São José dos Campos, INPE, jul. 1883b. (INPE-2863-RTR/037). 27p.

THOME, K. *et al.* Atmospheric correction of ASTER. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, NY, v. 36 n. 4, p. 1199-1211, 1998.

TROYA, H. **Fusión de imágenes satelitales IRS-1C y TM para identificación de elementos urbanos.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999. 76 p. 13º Curso Internacional de Sensoriamento Remoto.

VAN DER SANDEN, J. J.; VACHON, P. W.; GOWER, J. F. R. Combining optical and radar satellite image data for surveillance of coastal waters. In: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR MARINE AND COASTAL ENVIRONMENTS, 6., 2000, Charleston, CA. **Proceedings...** Charleston, CA: ERIM International, Inc., v. 1, 2000. p. 109-116.

VENTURA, F. N. **Fusão de imagens de sensores remotos utilizando a transformada wavelet**. 2002. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.

VENTURA, F. N.; FONSECA, L. M. G.; SANTA ROSA, A. N. C. Remotely sensed image fusion using the wavelet transform. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 29., 2002, Buenos Aires. **Proceedings...** Buenos Aires: ISPRS Foundation, 2002. 4 p. 1 CD-ROM.

VILLASEÑOR, J.; BELZER, B.; LIAO, J. Wavelet filter evaluation for image compression. **IEEE Transactions on image processing**, v. 2, p. 1053-1060, 1995.

WALD, L.; RANCHIN, T.; MANGOLINI, M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 63, n. 6, p. 691-699, June. 1997.

WALTON, C.C. Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. **Journal of Applied Meteorology**, Cambridge, UK, n. 27, p. 115-124, fev. 1988.

YÉSOU, H.; BESNUS, Y.; ROLET, J. Extration of spectral information from landsat TM data and merger with SPOT pancromatic imagery: a contribution to the study of geological structures. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 48, p. 23-36, 1993.

YOCKY, D. A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of landsat thematic mapper and spot panchromatic data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Reston, VA, v. 62, n. 9, p. 1067-1074, Sept.. 1996.

YU, Y. ; BARTON, I. J. A non regression-coefficients method of sea surface temperature retrieval from space. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 15, n. 6, p. 1189-1206, 1994.

ZÁVODY, A. M.; MUTLOW, C. T.; LLEWELLYN-JONES, D. T. A radiative transfer model for sea surface temperature retrieval for the along-track scanning radiometer. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 100, 937 p. 1995.

ZHANG, Y. A new merging method and its spectral and spatial effects. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 20, p. 2003-20014, 1999.

ZHOU, J.; CIVCO, D. L.; SILANDER, J. A. A wavelet transform method to merge landsat TM and SPOT panchromatic data. **International Journal of Remote Sensing**, Abingdon, UK, v. 19, n. 4, Apr. 1998.

ZOBRIST, A. L.; BLACKWELL, R. J.; STROMBERG, W. D. Integration of landsat, seasat and other geo-data sources. In: SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIROMENT, 13., 1979, Ann Arbor. **Proceedings...** Ann Arbor, MI, 1979, p. 271-280.

APÊNDICE A

FILTROS DERIVADOS DAS FUNÇÕES WAVELETS IMPLEMENTADAS NO ALGORITMO WAVEFUSION

```
//Baseline Wavelet Transform Coder Construction Kit
//Geoff Davis
//gdavis@cs.dartmouth.edu
//http://www.cs.dartmouth.edu/~gdavis
//Copyright 1996 Geoff Davis 9/11/96
//Permission is granted to use this software for research purposes as long as this notice
stays attached to this software.
```

```
double HaarCoeffs = { 1.0/Sqrt2, 1.0/Sqrt2 };
```

Daubechies filters

```
double Daub4Coeffs = {0.4829629131445341, 0.8365163037378077,
                      0.2241438680420134, -0.1294095225512603};
```

```
double Daub6Coeffs = { 0.3326705529500825, 0.8068915093110924,
                      0.4598775021184914, -0.1350110200102546,
                      -0.0854412738820267, 0.0352262918857095};
```

```
double Daub8Coeffs = {0.2303778133088964, 0.7148465705529154,
                      0.6308807679398587, -0.0279837694168599,
                      -0.1870348117190931, 0.0308413818355607,
                      0.0328830116668852, -0.0105974017850690};
```

```
static double Daub20Coeffs=
{0.026670057901, 0.188176800078, 0.527201188932,
 0.688459039454, 0.281172343661, -0.249846424327,
 -0.195946274377, 0.127369340336, 0.093057364604,
 -0.071394147166, -0.029457536822, 0.033212674059,
 0.003606553567, -0.010733175483, 0.001395351747,
 0.001992405295, -0.000685856695, -0.000116466855,
 0.000093588670, -0.000013264203}
```

```
double AdelsonCoeffs= {0.028220367, -0.060394127, -0.07388188,
                      0.41394752, 0.7984298, 0.41394752,
                      -0.07388188, -0.060394127, 0.028220367};
```

Filter from M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform", IEEE Transactions on Image Processing", Vol. pp. 205-220, 1992.

```
double AntoniniSynthesis=  
{-6.453888262893856e-02, - 4.068941760955867e-02, 4.180922732222124e-01,  
7.884856164056651e-01, 4.180922732222124e-01, -4.068941760955867e-02,  
-6.453888262893856e-02};
```

```
double AntoniniAnalysis=  
{3.782845550699535e-02, -2.384946501937986e-02, -1.106244044184226e-01,  
3.774028556126536e-01, 8.526986790094022e-01, 3.774028556126537e-01,  
-1.106244044184226e-01, -2.384946501937986e-02, 3.782845550699535e-02};
```

Filters from Chris Brislawn's tutorial code

```
double BrislawnAnalysis = {0.037828455506995,-0.023849465019380,  
-0.110624404418423, 0.377402855612654,  
0.852698679009403,  
0.377402855612654, -0.110624404418423,  
-0.023849465019380, 0.037828455506995 };
```

```
double BrislawnSynthesis = {-0.064538882628938, -0.040689417609558,  
0.418092273222212, 0.788485616405664,  
0.418092273222212, -0.040689417609558,  
-0.064538882628938};
```

```
double Brislawn2Analysis = {0.026913419, -0.032303352,  
-0.241109818, 0.054100420,  
0.899506092, 0.899506092,  
0.054100420, -0.241109818,  
-0.032303352, 0.026913419};
```

```
double Brislawn2Synthesis={ 0.019843545, 0.023817599,  
-0.023257840, 0.145570740,  
0.541132748, 0.541132748,  
0.145570740, -0.023257840,  
0.023817599, 0.019843545 };
```

Filters from J. Villasenor, B. Belzer, J. Liao, "Wavelet Filter Evaluation for Image Compression." IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 2, pp. 1053-1060, August 1995.

```
double Villa1Analysis =  
{3.782845550699535e-02, -2.384946501937986e-02,  
-1.106244044184226e-01, 3.774028556126536e-01,
```

8.526986790094022e-01, 3.774028556126537e-01,
-1.106244044184226e-01, -2.384946501937986e-02,
3.782845550699535e-02};

double **Villa1Synthesis**=
{-6.453888262893856e-02, -4.068941760955867e-02,
4.180922732222124e-01, 7.884856164056651e-01,
4.180922732222124e-01, -4.068941760955867e-02,
-6.453888262893856e-02};

double **Villa2Analysis** =
{-8.472827741318157e-03, 3.759210316686883e-03,
4.728175282882753e-02, -3.347508104780150e-02,
-6.887811419061032e-02, 3.832692613243884e-01,
7.672451593927493e-01, 3.832692613243889e-01,
-6.887811419061045e-02, -3.347508104780156e-02,
4.728175282882753e-02, 3.759210316686883e-03,
-8.472827741318157e-03 };

double **Villa2Synthesis** [] =
{1.418215589126359e-02, 6.292315666859828e-03,
-1.087373652243805e-01, -6.916271012030040e-02,
4.481085999263908e-01, 8.328475700934288e-01,
4.481085999263908e-01, -6.916271012030040e-02,
-1.087373652243805e-01, 6.292315666859828e-03,
1.418215589126359e-02};

double **Villa3Analysis** [] =
{-1.290777652578771e-01, 4.769893003875977e-02,
7.884856164056651e-01, 7.884856164056651e-01,
4.769893003875977e-02, -1.290777652578771e-01};

double **Villa3Synthesis** [] =
{1.891422775349768e-02, 6.989495243807747e-03,
-6.723693471890128e-02, 1.333892255971154e-01,
6.150507673110278e-01, 6.150507673110278e-01,
1.333892255971154e-01, -6.723693471890128e-02,
6.989495243807747e-03, 1.891422775349768e-02};

double **Villa4Analysis** [] =
{-1.767766952966369e-01, 3.535533905932738e-01,
1.060660171779821e+00, 3.535533905932738e-01,
-1.767766952966369e-01 };

double **Villa4Synthesis** [] = {3.535533905932738e-01,
7.071067811865476e-01,

```

3.535533905932738e-01};

double Villa5Analysis [] = { 7.071067811865476e-01, 7.071067811865476e-01};

double Villa5Synthesis [] = {-8.838834764831845e-02, 8.838834764831845e-02,
7.071067811865476e-01, 7.071067811865476e-01,
8.838834764831845e-02, -8.838834764831845e-02};

double Villa6Analysis [] = {3.314563036811943e-02, -6.629126073623885e-02,
-1.767766952966369e-01, 4.198446513295127e-01,
9.943689110435828e-01, 4.198446513295127e-01,
-1.767766952966369e-01, -6.629126073623885e-02,
3.314563036811943e-02};

double Villa6Synthesis [] = {3.535533905932738e-01, 7.071067811865476e-01,
3.535533905932738e-01};

double OdegardAnalysis[] = {5.2865768532960523e-02, -3.3418473279346828e-02,
-9.3069263703582719e-02, 3.8697186387262039e-01,
7.8751377152779212e-01, 3.8697186387262039e-01,
-9.3069263703582719e-02, -3.3418473279346828e-02,
5.2865768532960523e-02};

double OdegardSynthesis[] = {-8.6748316131711606e-02, -5.4836926902779436e-02,
4.4030170672498536e-01, 8.1678063499210640e-01,
4.4030170672498536e-01, -5.4836926902779436e-02,
-8.6748316131711606e-02};

double Coeff05Analysis[] = {-0.05*sqrt(2), 0.25*sqrt(2), 0.60*sqrt(2),
0.25*sqrt(2),-0.05*sqrt(2)};

double Coeff05Synthesis[] = {-0.0107143*sqrt(2), -0.0535714*sqrt(2),
0.2607143*sqrt(2), 0.6071429*sqrt(2),
0.2607143*sqrt(2), -0.0535714*sqrt(2),
-0.0107143*sqrt(2)};

double Symlet5Coeffs[]={
{0.0322, -0.0126, -0.0992, 0.2979, 0.8037, 0.4976, -0.0296, -0.0758};

static double PseudoCoifletAnalysis[] = {
sqrt(2) * -1.0 / 512.0,
0.0,
sqrt(2) * 18.0 / 512.0,
sqrt(2) * -16.0 / 512.0,
sqrt(2) * -63.0 / 512.0,
sqrt(2) * 144.0 / 512.0,

```

```

sqrt(2) * 348.0 / 512.0,
sqrt(2) * 144.0 / 512.0,
sqrt(2) * -63.0 / 512.0,
sqrt(2) * -16.0 / 512.0,
sqrt(2) * 18.0 / 512.0,
0.0,
sqrt(2) * -1.0 / 512.0};

```

```

static double PseudoCoifletSynthesis[] =
{sqrt(2) * -1.0 / 32.0,
0.0,
sqrt(2) * 9.0 / 32.0,
sqrt(2) * 16.0 / 32.0,
sqrt(2) * 9.0 / 32.0,
0.0,
sqrt(2) * -1.0 / 32.0 };

```

Coiflet filters from: Beylkin, Coifman, and Rokhlin "Fast Wavelet Transforms and Numerical Algorithms I", Comm. Pure Appl. Math, v. 44, Appendix A

```

#ifndef SQRT15
#define SQRT15 3.87298334620741688517927
#endif

```

```

#ifndef SQRT3
#define SQRT3 1.73205080756887729352745
#endif

```

```

#ifndef SQRT2
#define SQRT2 1.41421356237309504880168872420969808
#endif

```

```

static double Coiflet6[] = {
SQRT2 * (SQRT15 - 3) / 32.0,
SQRT2 * (1 - SQRT15) / 32.0,
SQRT2 * (6 - 2 * SQRT15) / 32.0,
SQRT2 * (2 * SQRT15 + 6) / 32.0,
SQRT2 * (SQRT15 + 13) / 32.0,
SQRT2 * (9 - SQRT15) / 32.0 };

```

```

double Coiflet12[] =
{0.0011945726958388, -0.01284557955324, 0.024804330519353,
0.050023519962135, -0.15535722285996, -0.071638282295294,
0.57046500145033, 0.75033630585287, 0.28061165190244,
-0.0074103835186718, -0.014611552521451, -0.0013587990591632 };

```

```

static double Coiflet18[] =
{-0.0016918510194918, -0.00348787621998426, 0.019191160680044,
 0.021671094636352, -0.098507213321468, -0.056997424478478,
 0.45678712217269, 0.78931940900416, 0.38055713085151,
-0.070438748794943, - 0.056514193868065, 0.036409962612716,
 0.0087601307091635, -0.011194759273835, -0.0019213354141368,
 0.0020413809772660, 0.00044583039753204, -0.00021625727664696 };

static double Silva66Analysis[] = {-0.023447261264697, -0.052757123924977,
 0.78331116637622, 0.78331116637622,
-0.052757123924977, -0.023447261264697};

static double Silva66Synthesis[] = {-0.050152151183346, 0.11284402153473,
 0.64441491083516, 0.64441491083516,
 0.11284402153473, -0.050152151183346};

Burt filter from: I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, SIAM, 1992 (Table 8.4).
static double Burt57Analysis[] = {
  SQRT2 * -1.0 / 20.0,
  SQRT2 * 5.0 / 20.0,
  SQRT2 * 12.0 / 20.0,
  SQRT2 * 5.0 / 20.0,
  SQRT2 * -1.0 / 20.0 };
static double Burt57Synthesis[] = {
  SQRT2 * -3.0 / 280.0,
  SQRT2 * -15.0 / 280.0,
  SQRT2 * 73.0 / 280.0,
  SQRT2 * 170.0 / 280.0,
  SQRT2 * 73.0 / 280.0,
  SQRT2 * -15.0 / 280.0,
  SQRT2 * -3.0 / 280.0 };

static double Vaidyanathan24Coeffs[] =
{-6.29061181907475230E-05, 3.43631904821029190E-04,
-4.53956619637219290E-04, -9.44897136321949270E-04,
2.84383454683556460E-03, 7.08137504052444710E-04,
-8.83910340861387800E-03, 3.15384705589700400E-03,
1.96872150100727140E-02, -1.48534480052300990E-02,
-3.54703986072834530E-02, 3.87426192934114400E-02,
5.58925236913735480E-02, -7.77097509019694100E-02,
-8.39288843661128300E-02, 1.31971661416977720E-01,
1.35084227129481260E-01, -1.94450471766478170E-01,
-2.63494802488459910E-01, 2.01612161775308660E-01,
6.35601059872214940E-01, /* Maximum absolute value. */
5.72797793210734320E-01, 2.50184129504662180E-01,
4.57993341109767180E-02};

```