



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.21.01.21-TDI

**ESTIMATIVA DE TEMPERATURA E EMISSIVIDADE  
COM IMAGENS DO SENSOR HSS (HYPERSPETRAL  
SCANNER SYSTEM) E SUAS RELAÇÕES COM  
MATERIAIS URBANOS**

Leidiane do Livramento Andrade

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Sensoria-  
mento Remoto, orientada pelo Dr.  
Lênio Soares Galvão, aprovada em  
21 de dezembro de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ARAGU2>>

INPE  
São José dos Campos  
2011

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):****Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**Membros:**

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.21.01.21-TDI

**ESTIMATIVA DE TEMPERATURA E EMISSIVIDADE  
COM IMAGENS DO SENSOR HSS (HYPERSPETRAL  
SCANNER SYSTEM) E SUAS RELAÇÕES COM  
MATERIAIS URBANOS**

Leidiane do Livramento Andrade

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Sensoria-  
mento Remoto, orientada pelo Dr.  
Lênio Soares Galvão, aprovada em  
21 de dezembro de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3ARAGU2>

INPE  
São José dos Campos  
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Andrade, Leidiane do Livramento.

An24e Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do Sensor HSS (Hyperspectral Scanner System) e suas relações com materiais urbanos / Leidiane do Livramento Andrade. – São José dos Campos : INPE, 2011.

xxiv + 84 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/11.21.01.21-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientador : Dr. Lênio Soares Galvão.

1. emissividade. 2. temperatura. 3. Sensor HSS. 4. calibração. I.Título.

CDU 528.551.525

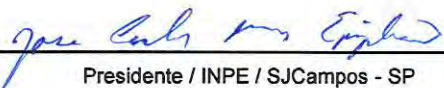
---

Copyright © 2011 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2011 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dr. José Carlos Neves Epiphânio

  
Presidente / INPE / SJCampos - SP


Dr. Lênio Soares Galvão

  
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP


Dr. Ruy Morgado de Castro

  
Orientador(a) / IEAv/CTA / São José dos Campos - SP

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo

  
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa

  
Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

( ) unanimidade

Aluno (a): Leidiane do Livramento Andrade

São José dos Campos, 21 de dezembro de 2011



*A minha filha Heloíse, meu esposo Ralf e meus familiares.*





## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos orientadores, Dr. Lênio Soares Galvão e Dr. Ruy Morgado de Castro, pela orientação, dedicação e ensinamentos compartilhados durante o desenvolvimento deste trabalho.

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 professores João Antônio Lorenzetti e Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, pelas sugestões e experiências transmitidas na elaboração da proposta deste trabalho.

Aos colegas da Divisão de Geointeligência – IEAv/CTA pelas sugestões e incentivo.

À colaboração do SIPAM e 1º/6ºGAv., que disponibilizaram equipamentos e dados utilizados na realização do trabalho.

A todos os amigos da querida turma PG-SER 2009, pelos bons momentos compartilhados e pela amizade.

À Vera Gabriel da Silva Fontes, pela simpatia e pelo tratamento atencioso que sempre me foi dedicado.

Às amigas, Cibele Teixeira Pinto, Verônica Gama e Carolina Scavazza Baldochi, pelo constante apoio, entusiasmo e amizade.

Enfim, a todos, muito obrigada!



## RESUMO

Este trabalho estimou a emissividade espectral relativa e temperatura da superfície de uma parte da área urbana de São José dos Campos. Ao utilizar uma abordagem combinada das imagens das bandas do VNIR-SWIR e TIR do sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*), as variações da temperatura de superfície e de emissividade espectral foram relacionadas com os materiais urbanos e com imagens-frações obtidas de uma análise de mistura espectral. As imagens usadas neste estudo foram adquiridas num imageamento realizado sobre a cidade, no período diurno e noturno em 30 de maio de 2006, com resolução espacial de 2,9 m ao nadir. Em uma primeira etapa, foi desenvolvida uma metodologia de calibração de Números Digitais (ND) para valores de radiância e de correção atmosférica da imagem HSS TIR e, em seguida, realizada uma comparação entre os valores de temperatura estimados por esta metodologia e pelo programa do sensor HSS (*AHS Import Utility*). Uma segunda etapa envolveu o emprego dos métodos NOR (*Normalization Emissivity*), REF (*Reference channel method*) e ALPHA (*Alpha emissivity method*), nas imagens TIR, para determinar a emissividade espectral e a temperatura de superfície. Os resultados destes métodos foram comparados entre si, e observou-se que a emissividade espectral dos principais materiais presentes na área de estudo foi consistente. As temperaturas destes mesmos materiais, determinadas com os métodos NOR e REF, verificou-se que houve uma diferença nos valores calculados de 1,2 °C a mais para o REF para todos os materiais estudados. Outra etapa discutiu a separabilidade de materiais urbanos específicos com base na análise dos espectros de reflectância (VNIR-SWIR) e de emissividade (TIR). Foi observado que alguns materiais, como o asfalto e o fibrocimento, embora não apresentassem feições espectrais no espectro refletido, as tiveram no espectro emitido, evidenciando o ganho de informação ao se utilizar combinadamente as bandas do VNIR, SWIR e TIR. Para as relações entre os dados de temperatura e as imagens-frações do modelo de mistura espectral, verificou-se que a área urbana no geral é mais quente do que a área vegetada mais próxima (pixels com 61% de fração vegetação) em 4,6° C, indicando os efeitos da substituição dos materiais naturais pelos artificiais na temperatura local.



**ESTIMATE OF TEMPERATURE AND EMISSIVITY USING HSS  
(HYPERSPETRAL SCANNER SYSTEM) SENSOR IMAGES AND  
RELATIONSHIP WITH URBAN MATERIALS**

**ABSTRACT**

The relative emissivity and surface temperature of an urban area of São José dos Campos were estimated. By using a combined approach of the images from the of VNIR-SWIR and TIR bands of the HSS sensor (Hyperspectral Scanner System), variations of surface temperature and emissivity were related to urban materials in the image and to fraction-images from spectral mixture analysis. The images used in this study were acquired over the city, in daytime and nighttime periods of May 30<sup>th</sup> 2006, with spatial resolution of 2.9 m at nadir. First a methodology for calibration of Digital Numbers (DN) into radiance values and for atmospheric correction of the HSS TIR image was developed. A comparison was then performed between the temperature values estimated from this methodology and from the HSS sensor algorithm facilities (AHS Import Utility). A second step involved the use of the NOR (Emissivity Normalization), REF (Reference channel method) and ALPHA (Alpha emissivity method) methods, which were applied to the TIR images to determine the spectral emissivity and the surface temperature. The results of these methods were compared to each other and the emissivity of the main materials in the area of study was consistent. However, for the temperature analysis, the same materials presented a difference of 1.2 °C, which was higher for REF than NOR. In another step, the separability of specific urban materials based on spectral reflectance (VNIR-SWIR) and emissivity (TIR) was analyzed. Some materials, such as asphalt and asbestos cement, that did not present spectral features in the reflected region displayed spectral features in the emitted spectral interval. Results showed the gain of information from the combined use of VNIR, SWIR and TIR spectral information. When the temperature data were related to the fraction-images from spectral mixture, results showed that urban area were generally warmer than vegetated areas (pixels with vegetation fraction values higher than 61%) in 4.6° C, indicating the effects of replacement of natural cover by artificial (man-made) materials on the local temperature.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Função de resposta espectral, normalizada, de cada banda termal do sensor HSS.....	8
Figura 2.2 - Esquema ilustrativo da aquisição de uma imagem pelo sensor HSS. Em a) fotografia aérea oblíqua; Em b) Composição colorida do sensor HSS (composição RGB bandas 8, 5 e 2); Em c) Imagem da banda 48. ....	10
Figura 2.3 - Relação entre os <i>ND</i> 's dos corpos negros de referência numa banda TIR e os pixels extrapolados. A linha em vermelho se referem aos <i>ND</i> 's do CNR1 e a linha em azul do CNR2.....	11
Figura 2.4 - Exemplo da transmitância atmosférica para uma altura em relação ao solo de 1 km, e moléculas absorvedoras responsáveis pelas bandas de absorção em cada comprimento de onda. ....	14
Figura 2.5 - Composição da radiação captada pelo sistema sensor e a influência da atmosfera.....	15
Figura 2.6 - Rotação dos eixos em duas dimensões na transformação por componentes principais.....	26
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de trabalho. ....	27
Figura 3.2 - Localização do Município de São José dos Campos e suas Macrozonas Urbanas. ....	29
Figura 3.3 - Composição colorida do sensor HSS (composição RGB bandas 8, 5 e 2), com destaques para as divisões das regiões urbanas na área de estudo.....	30
Figura 3.4 - Gráfico da umidade relativa em função da altitude. Em preto o modelo atmosférico utilizado pelo PcModWin, em azul o dado fornecido pela radiossondagem e em vermelho o valor interpolado utilizado na correção atmosférica. A linha só está conectando os pontos e não serve como indicação da umidade relativa entre os pontos. ....	36
Figura 3.5 - Imagem noturna em níveis de cinza da banda 48, com destaque para a Rodovia Presidente Dutra, cujo material asfalto está presente ao longo da visada do sensor.....	37

Figura 4.1 - Avaliação da estabilidade da temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência ao longo do imageamento e seus ND's para a banda 48 da imagem noturna. ....	44
Figura 4.2 – Imagens em tons de cinza da radiância obtidas no imageamento noturno para diferentes bandas do HSS, sendo as duas primeiras de baixa e a última de boa qualidade. Em a) banda 38 (3,201 $\mu\text{m}$ ); b) banda 39 (3,509 $\mu\text{m}$ ); c) banda 48 (9,800 $\mu\text{m}$ ).....	44
Figura 4.3 - Porcentagem de ruído presente na imagem das bandas HSS TIR obtidas no imageamento noturno. ....	45
Figura 4.4 - Comparação entre a temperatura de brilho estimada para cada nível digital da imagem da banda 49. A reta representa os resultados obtidos com o programa do sensor. A curva é o resultado obtido por meio da calibração em radiância desenvolvida neste trabalho. ....	47
Figura 4.5 - Gráfico da transmitância atmosférica obtida pela modelagem refinada com o perfil de umidade relativa da atmosfera utilizando o PCModWin, e a $FRE_b$ de cada banda, para a janela atmosférica de 8 a 12,5 $\mu\text{m}$ . ....	47
Figura 4.6 - Imagens de emissividade e temperatura de superfície, obtidas pelo método NOR. Em a) Imagem da emissividade para a banda 47. Conforme o tom de cinza fica mais claro, mais próxima de 1 é a emissividade do material; b) Imagem de temperatura de superfície em graus Celsius. Conforme o tom de cinza fica mais claro maior a temperatura. ....	49
Figura 4.7 - Emissividade espectral de alguns materiais presentes na área de estudo obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA. Os símbolos representam os centros das bandas TIR (45 a 50) do HSS. ....	50
Figura 4.8 - Reflectância espectral dos principais materiais presentes na área de estudo. Os símbolos representam os centros das bandas VNIR-SWIR do HSS. ....	54
Figura 4.9 - Fatores de peso das primeiras três componentes principais resultantes da aplicação de ACP aos espectros de reflectância. ....	55
Figura 4.10 - Diagrama de Dispersão dos escores componentes principais para dados de reflectância. ....	56



Figura 4.11 - Emissividade espectral dos principais materiais presentes na área de estudo obtida pelo método NOR.....	57
Figura 4.12 - Fatores de peso das primeiras duas componentes, resultantes da aplicação de ACP sobre os espectros de emissividade.....	58
Figura 4.13 - Diagrama de Dispersão dos escores componentes principais para dados de emissividade espectral.....	59
Figura 4.14 - Transformação MNF aplicada sobre os valores de reflectância de superfície das 37 bandas do sensor HSS, na região do VNIR e SWIR. Da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes componentes MNF: 1; 2; 3; 4; 5; 10; 13; 14; 20 e 30.....	60
Figura 4.15 - Projeção dos pixels selecionados candidatos a membros de referência pela técnica PPI, no visualizador <i>n</i> -dimensional, cujos eixos no espaço de atributos são as bandas MNF 1, 2 e 3, para as quatro classes de materiais: sombra, vegetação verde, solo e superfície impermeável.....	61
Figura 4.16 - Reflectância espectral dos membros de referência selecionados no visualizador <i>n</i> -dimensional para aplicação no modelo de mistura.....	62
Figura 4.17 - Imagens-fração resultantes do modelo linear de mistura espectral aplicado à imagem diurna para as 37 bandas do espectro refletido do sensor HSS. Em a) solo; b) superfície impermeável; c) vegetação verde; e d) sombra. Conforme os níveis de cinza ficam mais claros, maior é a proporção do membro de referência referente à imagem-fração na composição do pixel.	63
Figura 4.18 – Em a) Imagem RMSE do modelo de mistura espectral, mostrando os materiais que apresentaram maior erro residual (pixels mais claros); Em b) sua posição equivalente na composição colorida com as bandas 8 (R), 5 (G) e 2 (B) do HSS.....	65
Figura 4.19 – Composição colorida RGB das imagens-fração resultantes do modelo de mistura aplicado à imagem diurna para as 37 bandas do espectro refletido. Em a) composição RGB - fração solo/cerâmica, vegetação verde e superfície impermeável. Em b) composição RGB - fração solo/cerâmica, vegetação verde e sombra. Em c) uma composição RGB - bandas 8, 5 e 2 do	

HSS.....	66
Figura 4.20 - Imagem em composição colorida RGB (bandas 8, 5 e 2 do HSS) com a delimitação dos subsetores definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos. ....	67
Figura 4.21 – Imagem da temperatura de superfície em graus Celsius, estimada com o método NOR fatiada com a delimitação dos subsetores definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.....	68
Figura 4.22 – Imagem em composição colorida RGB (bandas 8, 5 e 2 do HSS) com detalhamento dos subsetores residenciais definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos. ....	70
Figura 4.23 – Imagem da temperatura de superfície em graus Celsius, estimada com o método NOR fatiada com detalhamento dos subsetores residenciais definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.....	71

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Comprimento de onda central e largura das bandas do sensor HSS nas faixas espectrais do VNIR, corrigidas para o deslocamento de 0,017 $\mu\text{m}$ , e SWIR. ....	7
Tabela 2.2 - Comprimento de onda central e largura das bandas do sensor HSS na faixa espectral do TIR.....	8
Tabela 3.1 - Parâmetros do voo e configuração do equipamento.....	32
Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para a correção atmosférica no FLAASH.....	33
Tabela 4.1 – Coeficientes de calibração das bandas do espectro emitido. ....	46
Tabela 4.2 - Parâmetros atmosféricos utilizados na correção da imagem TIR. ....	48
Tabela 4.3 - Comparação entre a temperatura estimada pelo método NOR e pelo método REF para alguns materiais presentes na área de estudo. ....	52
Tabela 4.4 - Relação da temperatura, obtida com as imagens noturnas, e membros de referência, obtidos das imagens-fração estimadas pelo SMA, utilizando as imagens diurnas. ....	73



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AAC	<i>Autonomous Atmospheric Compensation</i>
ACORN	<i>Atmosphere Correction Now</i>
ACP	Análise por Componentes Principais
AHS	<i>Airborne Hyperspectral Scanner</i>
ALPHA	<i>Alpha emissivity method</i>
ARTEMISS	<i>Automatic Retrieval of Temperature and Emissivity using Spectral Smoothness</i>
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
ATREM	<i>Atmosphere Removal Algorithm</i>
CNR	Corpo Negro de Referência
CP	Componente Principal
DAIS	<i>Digital Airborne Imaging Spectrometer</i>
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
FOV	<i>Field Of View</i>
FRE	Função de Resposta Espectral
HSS	<i>Hyperspectral Scanner System</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field Of View</i>
ISAC	<i>In-Scene Atmospheric Correction</i>
MESMA	<i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
Landsat ETM+	<i>Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
MIVIS	<i>Multispectral Infrared Visible Image Spectrometer</i>
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>
MODTRAN	<i>Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance algorithm and computer model</i>
ND	Número Digital
NEM	<i>Normalized Emissivity Method</i>
NER	<i>Noise Equivalent Radiance</i>
NETD	<i>Noise Equivalent Temperature Difference</i>

NIR	<i>Near Infrared</i>
NOR	<i>Emissivity Normalization Method</i>
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
RE	<i>Emissivity Re-normalization Method</i>
REF	<i>Reference channel method</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SMA	<i>Spectral Mixture Analysis</i>
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i>
SWIR	<i>Shortwave Infrared</i>
TES	<i>Temperature/Emissivity Separation method</i>
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
TISI	<i>Temperature-Independent Spectral Indices method</i>
VNIR	<i>Visible and Near Infrared</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Constante de Planck
$c$	Velocidade da Luz
$k$	Constante de Boltzmann
$\lambda$	Comprimento de Onda
$B(T, \lambda)$	Equação de Planck para a existância de um corpo negro a uma temperatura termodinâmica $T$ , em um determinado comprimento de onda $\lambda$
$B_{CNR}(T, \lambda)$	Equação de Planck para a existância de um corpo negro de referência a uma temperatura termodinâmica $T$ , em um determinado comprimento de onda $\lambda$
$B_{CR}(T, \lambda)$	Equação de Planck para a existância de um corpo real a uma temperatura termodinâmica $T$ , em um determinado comprimento de onda $\lambda$ ;
$B_W(T, \lambda)$	Equação de Planck para a existância de um corpo negro a uma temperatura termodinâmica $T$ , em um determinado comprimento de onda $\lambda$ , aproximada para a Lei de Wien.
$b$	Uma determinada banda de um sensor
$C_{cal}$	Coefficiente de Calibração de um sensor
$F$	Fração
$FRE$	Função de Resposta Espectral
$i$	Membro de Referência
$\rho$	Reflectância
$\rho_{alvo}$	Reflectância do alvo
$\varepsilon$	Emissividade
$\varepsilon_{alvo}$	Emissividade do alvo
$\varepsilon_c$	Emissividade do Céu
$\varepsilon_{CR}$	Emissividade de um corpo real
$\varepsilon_{CNR}$	Emissividade do corpo negro de referência
$\varepsilon_{NOR}$	Emissividade de entrada do método NOR
$e$	Erro

$N$	Número de Membros de Referência
$ND$	Número Digital
$m$	Número de bandas
$L_a$	Radiância Ascendente
$L_d$	Radiância Descendente
$L_{med}$	Radiância medida pelo Sensor Remoto
$L_e$	Radiância emitida
$L_{CNR}$	Radiância Espectral dos Corpos Negros de Referência
$\tau$	Transmitância atmosférica
$T$	Temperatura Termodinâmica
$T_s$	Temperatura Termodinâmica da Superfície
$T_B$	Temperatura de brilho
$T_c$	Temperatura Termodinâmica do céu
$T_{CNR}$	Temperatura Termodinâmica do Corpo Negro de Referência
$T_{NOR}$	Temperatura estimada pela técnica NOR
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco
$T_{po}$	Temperatura de ponto de orvalho
$\theta$	Ângulo de Inclinação



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 O Sensor HSS .....	5
2.2 Calibração em Radiância para as Imagens TIR.....	12
2.3 Correção dos Efeitos da Atmosfera .....	13
2.3.1 Correção Atmosférica das Imagens TIR .....	15
2.3.2 Correção Atmosférica e Reflectância de Superfície das Imagens VNIR-SWIR ..	18
2.4 Métodos de Estimativa de Temperatura e Emissividade da Superfície .....	19
2.5 Modelo Linear de Mistura Espectral .....	22
2.6 Análise por Componentes Principais (ACP) .....	25
<b>3 METODOLOGIA DE TRABALHO .....</b>	<b>27</b>
3.1 Seleção da Área de Estudo e Aquisição das Imagens HSS .....	28
3.2 Pré-processamento das Imagens .....	31
3.2.1 Pré-processamento das Imagens Diurnas VNIR-SWIR .....	32
3.2.2 Pré-processamento das Imagens Noturnas TIR.....	33
3.3 Estimativas da Emissividade e Temperatura da Superfície.....	38
3.4 Análise da Separabilidade dos Materiais com base em Emissividade e Reflectância da Superfície.....	39
3.5 Relação entre os Materiais Urbanos e a Temperatura .....	40
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
4.1 Calibração de Números Digitais (ND) para Valores de Radiância da Imagem HSS TIR e Correção Atmosférica .....	43
4.2 Estimativas da Emissividade e Temperatura pelos Métodos NOR, REF e ALPHA.....	49
4.3 Análise Qualitativa e Quantitativa da Separabilidade dos Materiais com Reflectância e Emissividade da Superfície.....	53
4.3.1 Reflectância da Superfície .....	53
4.3.2 Emissividade da Superfície .....	56

4.3.3 Combinação de Dados de Reflectância e Emissividade .....	59
4.4 Modelo de Mistura Espectral e Temperatura .....	60
4.4.1 Seleção dos Membros de Referência e Obtenção das Imagens-Fração .....	60
4.4.2 Relações entre Imagens-fração e Temperatura da Superfície .....	66
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, mais da metade da população mundial vive nas cidades, cujos processos de urbanização e industrialização são bons indicadores do nível de seu desenvolvimento econômico. Ao mesmo tempo, as cidades enfrentam desafios ambientais e sociais de imensa complexidade devido à deterioração geral do meio urbano e da sua qualidade de vida. Dentre os desafios ambientais está a alteração da zona climática local e regional causada por fatores como a substituição dos materiais naturais pelos artificiais, que podem mudar a frequência e a intensidade dos eventos climáticos extremos de curta duração como, por exemplo, ondas de calor, precipitação intensa, enchentes, secas, entre outros.

Entretanto, para estudar as alterações climáticas do ambiente urbano, é preciso analisar os parâmetros termais da superfície e a complexa mistura de diferentes tipos de materiais no espaço urbano. Lombardo (1995) salienta que um dos parâmetros mais importantes na caracterização do clima urbano é a variação da temperatura intra-urbana. Uma forma de realizar este tipo de análise é o uso de sensoriamento remoto, que pode proporcionar medidas radiométricas da área de interesse em sua totalidade e ao mesmo tempo, o que seria muito difícil e caro realizar por outros meios, como medidas em campo, principalmente em áreas extensas.

Nas faixas do Visível e Infravermelho Próximo (*visible/near infrared* - VNIR) e do Infravermelho de Ondas Curtas (*shortwave infrared* – SWIR), o sensoriamento remoto do espaço urbano é utilizado na modelagem da mistura espectral dos materiais presentes nas estruturas urbana, tanto naturais como artificiais (PU et al., 2008; FRANKE et al., 2009), entre outros. Na faixa do Infravermelho Termal (*thermal infrared* - TIR), as pesquisas com sensoriamento remoto são voltadas para: (a) entender a relação entre a temperatura da superfície e os materiais naturais e artificiais presentes em áreas urbanizadas (WENG et al., 2004; LU; WENG, 2006); (b) analisar comparativamente a refletância e a temperatura de superfície (SMALL, 2006); (c) monitorar e delimitar ilhas de calor urbana (FUCKNER, 2008; RAJASEKAR; WENG, 2009); (d) modelar o

fluxo de calor sensível em área urbana utilizando múltiplas escalas espaciais (XU et al., 2008); e (e) identificar técnicas para a extração de parâmetros termais da superfície (KEALY; HOOK, 1993; LI et al., 1999; SOBRINO et al., 2002; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005; MAO et al., 2008). Há, ainda, estudos sobre a influência da heterogeneidade da superfície e sua relação com o tamanho do pixel da imagem, porque cada pixel terá uma estimativa de temperatura e emissividade individual oriunda da média da temperatura e emissividade dos diferentes elementos que o compõem (HANDCOCK et al., 2006; PU et al., 2006).

O desenvolvimento de sensores multiespectrais que operam no VNIR, SWIR e TIR, com melhores resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica, visam ampliar as possibilidades de aplicação dos dados de sensoriamento remoto. Em nível orbital pode-se citar o sensor orbital multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo da plataforma Terra, que obtém imagens em 14 bandas com resoluções espaciais que variam de 15 a 90 m. Em nível suborbital há uma boa variedade de sensores aerotransportados, cuja resolução espacial varia de acordo com a altura de voo, como o *Digital Airborne Imaging Spectrometer* (DAIS), com 79 bandas, o *Multispectral Infrared Visible Image Spectrometer* (MIVIS), com 102 bandas, e o *Airborne Hyperspectral Scanner* (AHS), com 80 bandas, que operam nas regiões do espectro refletido e emitido (HOOK et al., 2001).

No âmbito desse conjunto de sensores, o sensor aerotransportado *Hyperspectral Scanner System* (HSS), utilizado no presente trabalho, opera com 37 bandas no espectro refletido e 13 no espectro emitido, com campo de visada total (*Field Of View* - FOV) de 86° (MOREIRA et al., 2005). Dependendo da altura de voo, pode adquirir dados de alta resolução espacial (3 metros), o que é fundamental em estudos urbanos. O sensor também possui boa resolução espectral, com 20 bandas no VNIR com largura média de 0,03  $\mu\text{m}$ . Muito embora no SWIR exista uma banda ampla em 1,58  $\mu\text{m}$  com largura de 0,122  $\mu\text{m}$ , há outras 16 bandas mais estreitas de 0,024  $\mu\text{m}$  de largura entre 2 e 2,5  $\mu\text{m}$ . No TIR, há dois grupos de bandas contíguas. No primeiro, a média da largura das bandas é de 0,036  $\mu\text{m}$ , enquanto que no segundo grupo as larguras de banda variam

desde 0,568 a 0,145  $\mu\text{m}$  (SENSYTECH, 2004). Assim, o sensor HSS, ao aliar a alta resolução espacial e espectral às bandas distribuídas em todas as regiões do espectro eletromagnético, permite o uso combinado das regiões do VNIR, SWIR e TIR em estudos mais completos de caracterização espectral dos materiais da superfície.

No Brasil, o sensor HSS foi utilizado para caracterizar o comportamento espectral de alguns alvos urbanos, utilizando as bandas do VNIR e SWIR e uma biblioteca espectral de campo/laboratório de materiais urbanos da cidade de São José dos Campos (MOREIRA, 2008; MOREIRA; GALVÃO, 2010). O sensor HSS também foi usado para detectar e caracterizar feições termais em ambientes aquáticos (LUCCA et al., 2005), e ainda para estudos de ilha de calor (ANDRADE et al., 2007). Entretanto, este sensor carece de mais estudos que se somem aos realizados por Castro et al. (2005; 2007), os quais foram voltados ao funcionamento do HSS propriamente dito, como a análise de corrente escura e da relação sinal/ruído do sensor nas bandas do espectro refletido. Portanto, há grande necessidade de estudos que sejam focados no funcionamento das bandas termais (ruído, número digital, *ND*, dos corpos negros), na determinação dos parâmetros de calibração em radiância, até agora pouco explorados, na estimativa de parâmetros termais, entre outros estudos.

Especificamente, na faixa do termal, um dos desafios do uso de sensores como o HSS é o uso de metodologias visando à separação de temperatura-emissividade (LI et al., 1999; HANDCOCK et al., 2006, BOREL, 2008). Não obstante o constante desenvolvimento de sensores remotos de melhor resolução espacial e espectral, como o sensor HSS, poucos avanços têm acontecido na atualização destas metodologias, as quais foram desenvolvidas para sensores remotos de baixa resolução espectral e espacial, o que exige certo cuidado na sua utilização (SOBRINO et al., 2002, 2006; JIMÉNEZ et al., 2007; JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005). Isto ocorre porque as características do sensor, a geometria de imageamento, as características da superfície de estudo e as propriedades da atmosfera no momento da medida (LEAVER; THOMAS, 2006; PU et al., 2006) são fatores importantes para uma estimativa mais precisa da emissividade e da temperatura. Quando se trata deste tipo de dado (alta resolução espacial e espectral), é

preciso estudá-lo desde sua geração, no momento do imageamento, até a extração final de informações referentes à área de estudo (JIMÉNEZ-MUÑOZ, 2005).

Baseado no exposto acima, este trabalho tem como objetivo geral estimar a emissividade e temperatura da superfície em uma parte da área urbana de São José dos Campos (SP), por meio de métodos amplamente utilizados pela comunidade científica. A hipótese de trabalho é que ao utilizar combinadamente dados de reflectância e emissividade, é possível separar materiais que não poderiam ser separados utilizando somente dados de reflectância. Além disto, que é possível relacionar a distribuição espacial da temperatura da superfície e os principais materiais presentes numa área urbana. De forma mais específica, o trabalho tem os seguintes objetivos:

- 1) Desenvolver uma metodologia de calibração de Números Digitais (ND) para valores de radiância e de correção atmosférica da imagem HSS TIR;
- 2) Testar comparativamente os métodos Normalização da Emissividade (NOR), Canal de Referência (REF) e Emissividade ALPHA para estimativa dos valores de temperatura e emissividade relativa dos principais componentes de cena;
- 3) Discutir a separabilidade de materiais urbanos específicos com base na análise dos espectros de reflectância (VNIR-SWIR) e emissividade (TIR);
- 4) Relacionar os dados de temperatura com os materiais urbanos utilizando imagens-frações resultantes de um modelo linear de mistura espectral.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo deste Capítulo é oferecer uma descrição resumida das características do sensor HSS. Também é feita uma explanação breve sobre a metodologia utilizada pelo programa fornecido pelo fabricante do sensor na obtenção da imagem em grandeza física, mais especificamente, em radiância para o espectro refletido e temperatura de brilho para o espectro emitido. Em seguida, é apresentada a fundamentação teórica usada neste trabalho para obtenção de uma imagem em grandeza física para o espectro emitido, que neste caso é a radiância, e um breve comentário sobre a inadequação da metodologia adotada pelo programa do sensor HSS para a imagem do espectro emitido. Além disso, são descritos aspectos teóricos relacionados com: 1) a correção atmosférica das imagens do espectro refletido e emitido; 2) as técnicas disponíveis para estimar emissividade e temperatura da imagem TIR; 3) a utilização de modelos de mistura espectral; 4) a Análise por Componentes Principais (ACP).

### 2.1 O Sensor HSS

O sensor HSS é um sensor imageador aerotransportado não climatizado, abrangendo diversas bandas não contíguas em regiões espectrais do VNIR, SWIR e TIR, fabricado e comercializado pela SensyTech – *Imaging Group*, EUA, visando fornecer dados para diversos tipos de estudos ambientais (MOREIRA et al., 2005). A resolução espacial das imagens geradas pelo sensor HSS está diretamente relacionada à altitude do voo e ao tipo de aeronave, com valores normalmente variando entre 2 e 9 metros (MENDES et al., 2007).

De acordo com Moreira et al. (2005), o instrumento possui 37 bandas (ou canais) na região do espectro refletido (VNIR e SWIR entre 0,44 e 2,4  $\mu\text{m}$ ) e outras 13 bandas no espectro emitido (TIR entre 3,0 e 15,0  $\mu\text{m}$ ) (Figura 2.1). Entretanto, Moreira (2008) constatou um deslocamento do centro de banda ao tentar caracterizar a absorção do vapor d'água atmosférico no comprimento de onda de 0,940  $\mu\text{m}$  comparando espectros obtidos diretamente da imagem com os obtidos da medição de campo. Ele verificou que

a absorção se dava na banda 19 cujo comprimento de onda especificado pelo fabricante é 0,971  $\mu\text{m}$  e não na banda 18 especificada em 0,944  $\mu\text{m}$  como era esperado. Isto resultou na necessidade de subtrair 0,017  $\mu\text{m}$  do centro de banda do canal 19, e conseqüentemente, de toda a matriz de detectores vinculados a esta banda (canais 1 a 20), na região do VNIR. Assim, a banda 19 passou a corresponder ao comprimento de 0,954  $\mu\text{m}$  caracterizando, portanto, a absorção pelo vapor d'água. Para a banda 21 (1,583  $\mu\text{m}$ ), o conjunto do SWIR (bandas 22 a 37) e para as bandas do TIR (bandas 38 a 50), não foi reportado necessidade de ajuste espectral. Assim, após os ajustes necessários, as bandas do sensor HSS podem ser observadas nas Tabelas 2.1 e 2.2.

Todas as bandas são quantizadas em 12 bits, com o campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field Of View* - IFOV) intercambiável de 1,25 e 2,5 mrad e FOV de 86°. A frequência de varredura do espelho é regulável entre cinco opções, de 6,25 a 100 Hz (MOREIRA et al., 2005).

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores de radiância equivalente ao ruído (NER – *Noise Equivalent Radiance*) para as bandas do VNIR e SWIR, e na Tabela 2.2, indica-se a diferença de temperatura equivalente ao ruído (NETD - *Noise Equivalent Temperature Difference*) para as bandas TIR, ambas especificadas pelo fabricante do sensor HSS para IFOV de 2,5 mrad e frequência de varredura de 25 Hz (SENSYTECH, 2002). Estes parâmetros indicam o quanto o sinal se sobressai em relação ao ruído. Segundo as avaliações de Castro et al. (2005), a frequência de 12,5 Hz é a de melhor desempenho quanto à relação ruído-sinal do sensor, seguida pela de 25 e de 6,25 Hz, nessa ordem. Entretanto, devido às características do imageamento, a frequência de varredura abordada neste estudo é 25 Hz com IFOV de 2,5 mrad.

A função de resposta espectral (FRE) de cada banda  $FRE_b(\lambda)$ , ou de maneira simplificada  $FRE_b$ , é o resultado da interação da radiação eletromagnética incidente com os componentes ópticos do sensor, da sensibilidade do elemento detector, e do pré-processamento do sinal pelo circuito eletrônico. As FRE's para as bandas do TIR são mostradas na Figura 2.1.



Tabela 2.1 – Comprimento de onda central e largura das bandas do sensor HSS nas faixas espectrais do VNIR, corrigidas para o deslocamento de 0,017  $\mu\text{m}$ , e SWIR.

Região	Banda	Comprimento de Onda Central ( $\mu\text{m}$ )	Largura de Banda( $\mu\text{m}$ )	Radiância Equivalente ao Ruído – NER ( $\mu\text{w}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$ )
VNIR	1	0,439	0,030	0,072
	2	0,466	0,030	0,072
	3	0,494	0,030	0,072
	4	0,523	0,029	0,073
	5	0,551	0,030	0,075
	6	0,581	0,030	0,077
	7	0,610	0,032	0,080
	8	0,639	0,031	0,082
	9	0,668	0,030	0,084
	10	0,698	0,029	0,086
	11	0,726	0,029	0,088
	12	0,755	0,029	0,093
	13	0,784	0,028	0,096
	14	0,812	0,028	0,088
	15	0,842	0,030	0,082
	16	0,871	0,027	0,076
	17	0,898	0,028	0,142
	18	0,927	0,029	0,159
	19	0,954	0,029	0,124
	20	0,983	0,030	0,115
SWIR	21	1,583	0,122	0,021
	22	2,005	0,026	0,099
	23	2,032	0,026	0,099
	24	2,058	0,033	0,099
	25	2,084	0,026	0,099
	26	2,109	0,025	0,099
	27	2,135	0,025	0,099
	28	2,160	0,025	0,099
	29	2,185	0,025	0,099
	30	2,209	0,024	0,099
	31	2,233	0,024	0,099
	32	2,257	0,023	0,099
	33	2,280	0,024	0,099
	34	2,303	0,024	0,099
	35	2,326	0,023	0,099
	36	2,349	0,023	0,099
	37	2,371	0,022	0,099

Fonte: Adaptada de Sensytech (2004).

Tabela 2.2 - Comprimento de onda central e largura das bandas do sensor HSS na faixa espectral do TIR.

Região	Banda	Comprimento de Onda Central ( $\mu\text{m}$ )	Largura de Banda ( $\mu\text{m}$ )	Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído - NETD ( $^{\circ}\text{C}$ )
TIR	38	3,201	0,380	3,980
	39	3,509	0,378	1,880
	40	3,864	0,362	0,800
	41	4,250	0,409	0,640
	42	4,606	0,380	0,400
	43	4,951	0,370	0,350
	44	5,276	0,300	0,350
	45	8,180	0,568	0,390
	46	8,680	0,457	0,390
	47	9,160	0,450	0,390
	48	9,800	0,800	0,390
	49	10,810	0,970	0,390
	50	12,020	1,140	0,490

Fonte: Adaptada de Sensytech (2004).

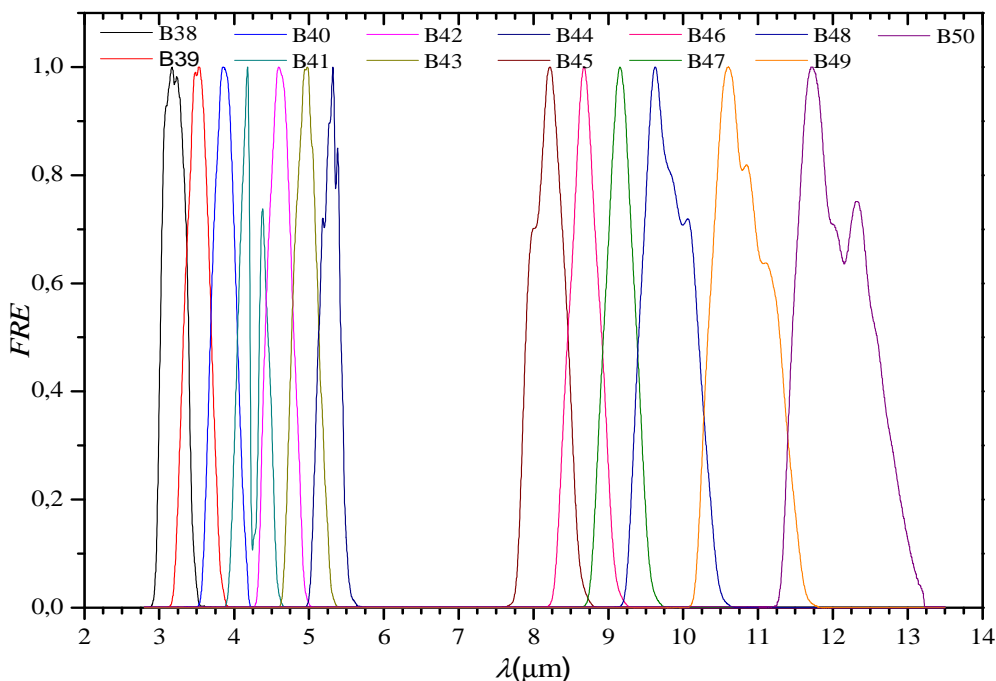


Figura 2.1 - Função de resposta espectral, normalizada, de cada banda termal do sensor HSS.

Fonte: Adaptada de Sensytech (2004).

A partir da tensão/corrente, relacionada ao nível de excitação gerada pela radiação (oriunda da superfície), fornecida pelo elemento detector, acrescida dos fatores de *ganho* e *offset* introduzidos pelo operador, quantificada em valores discretos inteiros por meio de um número digital, *ND*, com valores entre 0 e 4096 referentes à quantização das bandas em 12 bits, obtém-se a imagem de cada banda do sensor que juntas compõem um conjunto de imagens.

Para o IFOV de 2,5 mrad, cada imagem possui 720 pixels por linha de varredura. No entanto, em cada imagem bruta, são registrados 723 pixels por linha. Estes 3 pixels excedentes, localizados no início e no final da linha do imageamento, se referem a informações complementares do sistema.

Assim, o primeiro pixel da linha se refere à informação de codificação da linha. O segundo pixel é a medição da radiância proveniente do corpo negro de referência frio. O último pixel da linha do imageamento é a medição da radiância do corpo negro de referência quente, (MOREIRA et al., 2005), como pode ser observado no esquema da Figura 2.2.

Os valores da temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência (CNR's) são ajustados pelo operador do sensor, o qual, em geral, considera para o corpo negro frio (CNR1) a temperatura de ponto de orvalho do dia do imageamento. Para o corpo negro quente (CNR2) é feita uma análise prévia dos materiais presentes na área de estudo e observada qual a temperatura máxima que se espera encontrar. Então, é ajustada a temperatura do corpo negro de referência quente para um valor acima desta.

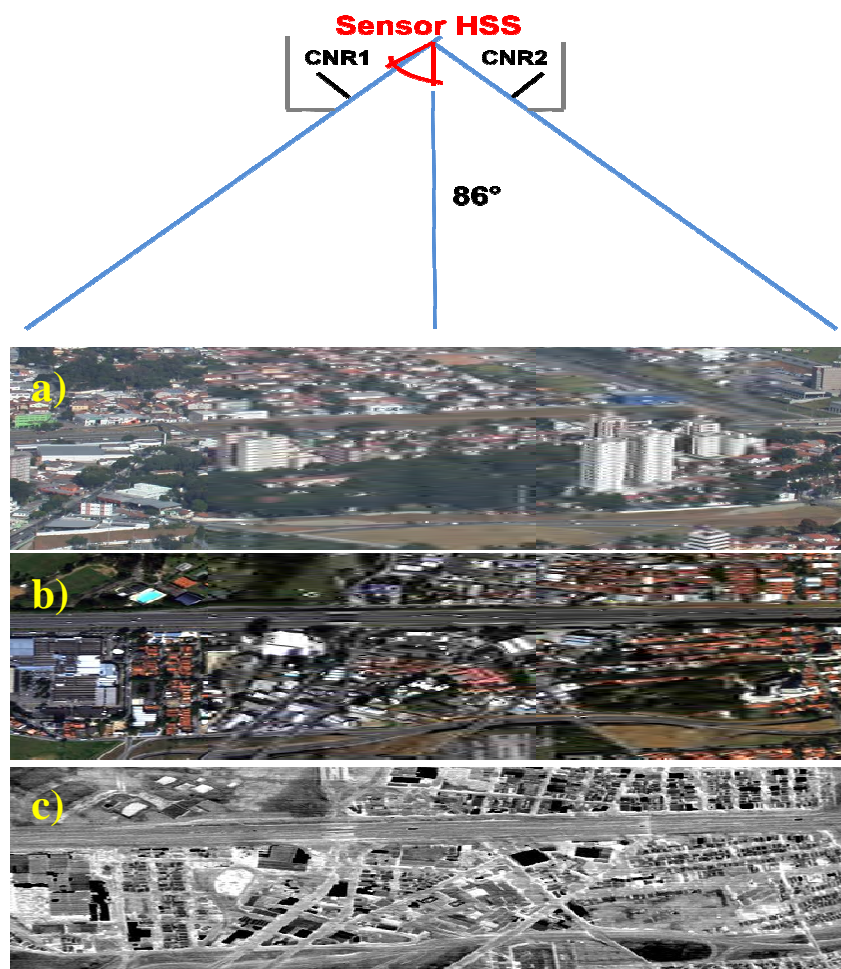


Figura 2.2 - Esquema ilustrativo da aquisição de uma imagem pelo sensor HSS. Em a) fotografia aérea oblíqua; Em b) Composição colorida do sensor HSS (composição RGB bandas 8, 5 e 2); Em c) Imagem da banda 48.

Mesmo com estes critérios, pode ocorrer um efeito indesejável, que corresponde à combinação de uma baixa temperatura e uma baixa emissividade em determinados materiais da área de estudo (como metais, por exemplo). O resultado é que para estes materiais, a radiância medida é muito baixa, inferior ao valor discriminado pelo sistema, cuja referência é a radiância do CNR1. Assim, o valor de *ND* é apresentado como sendo zero, perdendo-se assim, a informação referente a este pixel. O mesmo ocorre quando o material tem emissividade muito próxima de 1, e sua temperatura termodinâmica é maior do que a temperatura do CNR2. O que ocorre é a extrapolação do *ND* do pixel referente à este material, fixado em 4095. Ambos os casos podem ser verificados na Figura 2.3.

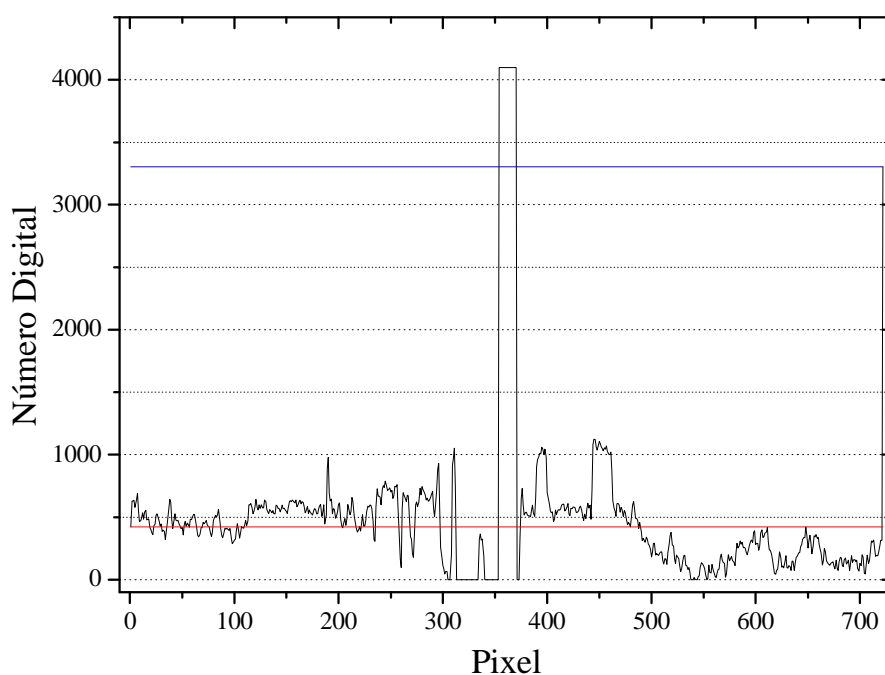


Figura 2.3 - Relação entre os *ND*'s dos corpos negros de referência numa banda TIR e os pixels extrapolados. A linha em vermelho se referem aos *ND*'s do CNR1 e a linha em azul do CNR2.

Para as bandas do espectro refletido, os corpos negros de referência (CNR's) são utilizados na estimativa do ruído de cada imagem, nas condições normais de aquisição, ao serem medidos no início e no final de cada linha, construindo duas referências de pixel escuro os quais podem ser comparados à imagem escura utilizada por Castro et al. (2005) na avaliação do ruído final em sensores imageadores eletroópticos. Enquanto que para as bandas do espectro emitido, as medições dos CNR's são utilizadas para relacionar o *ND* em função da radiância medida, em cada banda do sensor. As informações dos valores ajustados para as temperaturas dos corpos negros são armazenadas em arquivos auxiliares de cada imageamento.

O sensor HSS possui um programa de importação e processamento de dados fornecido pelo fabricante do sensor (*AHS Import Utility*), segundo o qual as imagens brutas são processadas de modo a gerar imagens registradas entre si, corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada. Além disso, o *AHS Import Utility* também converte os *ND*'s das imagens VNIR e SWIR em valores de radiância (*Reflective Calibration*) e os *ND*'s das imagens TIR em valores de temperatura de brilho.

Para converter os  $ND$ 's em valores de radiância (*Reflective Calibration*) das bandas do VNIR e SWIR, o programa extrai dos arquivos auxiliares gravados junto ao arquivo binário das imagens, os registros do voo e os parâmetros *ganho* e coeficiente de calibração,  $C_{cal}$ , para cada banda. O valor de *offset* é calculado a partir da média dos  $ND$ 's dos corpos negros de referência registrados em todas as linhas da imagem bruta, para cada faixa de voo e para cada banda. Obtidos os parâmetros de  $ganho_b$ ,  $offset_b$  e o coeficiente de calibração,  $C_{cal,b}$ , o aplicativo converte os valores digitais da imagem em valores de radiância em cada banda,  $L_{med,b}$ , (MOREIRA, 2008), por meio da equação:

$$L_{med,b} = \frac{ND - offset_b}{ganho_b} \cdot C_{cal,b} \quad (2.1)$$

Para obter as imagens em temperatura das bandas TIR, o programa *AHS Import Utility*, utiliza as temperaturas termodinâmicas dos corpos negros de referência para ajustar linearmente a dependência da temperatura com os  $ND$ 's. Para tal, considera tanto para os corpos negros de referência quanto para os pixels da imagem, uma emissividade igual a 1. Entretanto, este não é o procedimento correto, porque desta forma é obtida a temperatura de brilho para cada pixel, ao invés da radiância que é a grandeza física medida pelo sensor (ANDRADE et al., 2010).

Isto mostra que é fundamental conhecer o processo de aquisição das imagens termais e as etapas de processamento aplicadas para obter imagens em grandeza física, ou seja radiância, temperatura ou emissividade confiáveis, uma vez que o sensoriamento remoto termal é utilizado em estudos ambientais como, por exemplo, para entender a relação entre a temperatura da superfície e o uso da terra (LU; WENG, 2006; ANDRADE, et al., 2007).

## 2.2 Calibração em Radiância para as Imagens TIR

Para converter os  $ND$ 's da imagem em radiância é necessário realizar a calibração radiométrica. Este processo tem início com a determinação da exitância espectral de um corpo negro,  $B(T,\lambda)$ , por meio da equação de Planck (SCHOTT, 1997; NOVO, 2008). Assim, a exitância, em uma determinada temperatura termodinâmica,  $T$ , e um

comprimento de onda,  $\lambda$ , é dada por:

$$B(T, \lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right]} \quad (2.2)$$

onde:  $h$  é a Constante de Planck;  $c$  é a velocidade da luz; e  $k$  é constante de Boltzmann.

Para as bandas da região termal do HSS são utilizadas as temperaturas dos CNR's,  $T_{CNR}$ , para determinar a exitância do corpo negro de referência,  $B_{CNR}$ . Com isto:

$$B_{CNR}(T_{CNR}, \lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ e^{h \cdot c / \lambda \cdot k \cdot T} - 1 \right]} \quad (2.3)$$

Depois, é estimada a radiância espectral dos corpos negros de referência,  $L_{CNR}$ , por meio da sua exitância numa dada temperatura,  $T_{CNR}$ , considerando que: a) a superfície possui uma emissão isotrópica (ou seja, multiplicada por um fator  $1/\pi$ ); b) que a emissividade do corpo negro de referência,  $\varepsilon_{CNR}(\lambda)$ , é igual a 1; c) e que a transmitância é máxima, ou seja, igual a 1, além de ponderar pela Função de Resposta Espectral,  $FRE_b$ , de cada banda. Com isto:

$$L_{CNR,b}(T_{CNR}, \lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{B_{CNR}(T_{CNR}, \lambda)}{\pi} \cdot FRE_b(\lambda) \cdot \varepsilon_{CNR}(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

Assim, foi realizado um ajuste linear da radiância estimada em função dos  $ND$ 's, para cada corpo negro de referência e obtidos os respectivos parâmetros,  $ganho_b$  e  $offset_b$ , para cada banda do sensor. Deste modo, para converter o  $ND$  de cada pixel em radiância medida pelo sensor para cada banda,  $L_{med,b}$ , temos (LILLESAND; KIEFER, 1994):

$$L_{med,b} = ND \cdot ganho_b + offset_b \quad (2.5)$$

### 2.3 Correção dos Efeitos da Atmosfera

A atmosfera, presente entre a superfície e o sistema sensor remoto, possui em sua constituição diversos gases e partículas em suspensão, cada qual em diferentes concentrações. Estes sensores são normalmente projetados para atuar nas chamadas “janelas atmosféricas” do espectro eletromagnético, que são regiões cuja influência da

atmosfera é considerada pequena, porém este efeito não pode ser desprezado (BOREL, 2008). Os efeitos de absorção por diferentes constituintes da atmosfera requerem especial atenção com o uso de sensores hiperspectrais, que adquirem dados em bandas estreitas e contíguas. Esta influência pode ser maior ou menor, dependendo do comprimento de onda e da molécula absorvedora como mostrado na Figura 2.4.

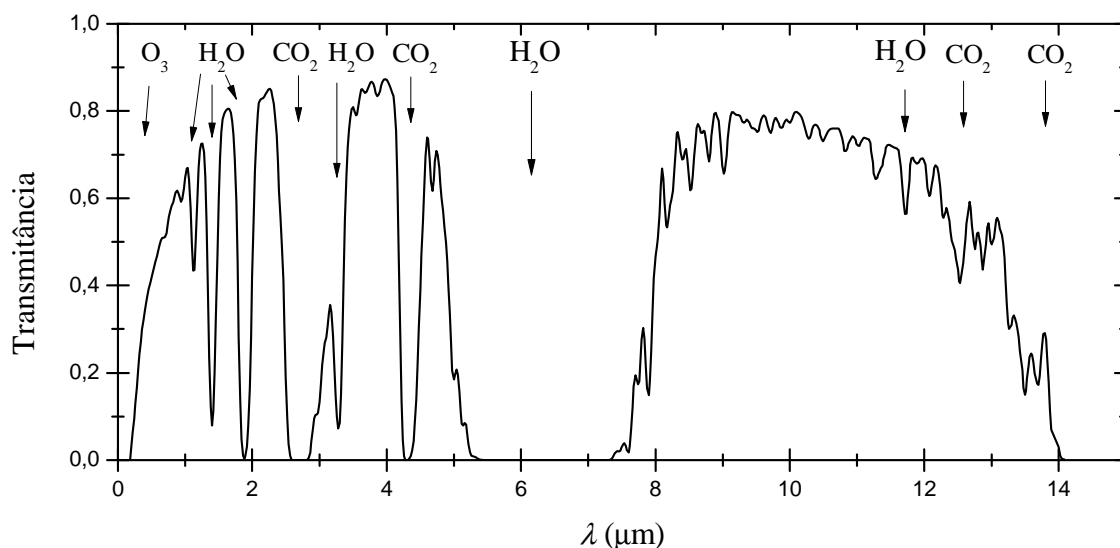


Figura 2.4 - Exemplo da transmittância atmosférica para uma altura em relação ao solo de 1 km, e moléculas absorvedoras responsáveis pelas bandas de absorção em cada comprimento de onda.

Ao analisar a Figura 2.5, verifica-se que a radiação captada por um sistema sensor é composta por duas porções de fluxo direto proveniente do alvo e outro da atmosfera. O fluxo proveniente do alvo corresponde a: a) uma porção oriunda da reflexão pelo alvo da radiação descendente atmosférica,  $L_d$ ; e b) outra, das características de emissão de radiação do alvo,  $L_e$ . Ambas as porções sofrem um efeito de espalhamento e absorção pela atmosfera, conhecido como transmittância atmosférica,  $\tau$ , devido à distância entre o alvo e o sistema sensor. O fluxo difuso oriundo da atmosfera é conhecido como radiação atmosférica ascendente,  $L_a$ , não tem relação com o alvo. Portanto, a atmosfera atua na radiação captada pelo sistema sensor como elemento atenuante e aditivo devido à trajetória da radiação em direção à superfície da terra e ao caminho da radiação refletida e emitida para o sistema sensor.



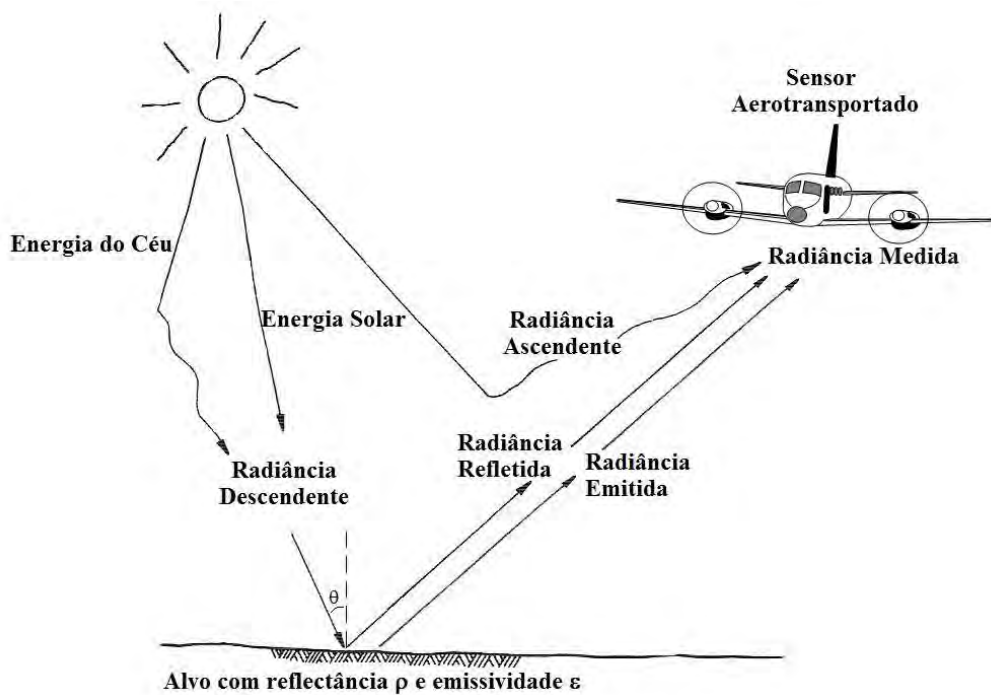


Figura 2.5 - Composição da radiação captada pelo sistema sensor e a influência da atmosfera.  
 Fonte: Adaptado de Lillesand e Kiefer (1994).

### 2.3.1 Correção Atmosférica das Imagens TIR

A radiância medida por um sensor remoto,  $L_{med}$ , pode ser obtida por meio de um modelo de transferência radiativa (JIMÉNEZ-MUÑOZ; SOBRINO, 2003) que descreve como a radiação se comporta quando esta entra em contato com a atmosfera. Assim, para um determinado comprimento de onda, tem-se:

$$L_{med}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot L_e(\lambda) + \tau(\lambda) \cdot \{L_d(\lambda) \cdot [1 - \epsilon_{alvo}(\lambda)]\} + L_a(\lambda) \quad (2.6)$$

onde:  $\epsilon_{alvo}(\lambda)$  é a emissividade do alvo.

O primeiro termo se refere à porção da radiância emitida pelo alvo,  $L_e$ , enquanto o segundo se refere à porção da radiância descendente refletida pelo alvo,  $L_d$ . Ambos os termos estão sob a influência da transmitância atmosférica,  $\tau$ . O terceiro termo se refere à radiância ascendente atmosférica,  $L_a$ . Entretanto, observa-se que para obter a componente refletida da radiância medida pelo sistema sensor, é preciso estimar a radiância descendente atmosférica, que é composta pela exitância do céu,  $B(T_c, \lambda)$ , para uma dada temperatura do céu,  $T_c$ , e sua emissividade,  $\epsilon_c(\lambda)$ .

Na literatura são encontrados diversos métodos para estimar a emissividade do céu, com diferentes níveis de complexidade, que são aplicados de acordo com as informações disponíveis sobre a atmosfera e a área de estudo. Dentre estes métodos pode-se citar o Berdahl e Fromberg (1982) apud Pérez-Garcia (2004), que apresenta uma abordagem empírica cuja emissividade do céu,  $\varepsilon_c$ , pode ser derivada da sua dependência em relação à temperatura de ponto de orvalho,  $T_{po}$ , como pode ser observada em:

$$\varepsilon_c = 0,741 + 0,62 \cdot \left( \frac{T_{po}}{100} \right) \quad (2.7)$$

E para estimar a temperatura do céu é utilizada a temperatura de bulbo seco,  $T_{bs}$ , segundo Pérez-Garcia (2004):

$$T_c = \varepsilon_c^{1/4} \cdot T_{bs} \quad (2.8)$$

Pérez-Garcia (2004) estudou este método o qual considera que existe diferença entre a distribuição da temperatura vertical durante o dia e a noite, e utiliza a temperatura do ponto de orvalho no momento do imageamento para estimar a emissividade do céu. Além disso, ele considera que a emissividade do céu é constante em toda a faixa de comprimentos de onda.

Entretanto, nem sempre é possível obter dados sobre a atmosfera no momento do imageamento. Por isto vários métodos vêm sendo desenvolvidos e testados com o objetivo de realizar a correção atmosférica baseando-se apenas nos dados da imagem, sem a necessidade de dados meteorológicos auxiliares. Dentre estes algoritmos estão o *In-Scene Atmospheric Correction (ISAC)*, *Autonomous Atmospheric Compensation (AAC)* e o *Automatic Retrieval of Temperature and Emissivity using Spectral Smoothness (ARTEMISS)*, revisados por Leaver e Thomas (2006).

Quando se tem conhecimento das propriedades ópticas da atmosfera e do processo de interação da radiação com a atmosfera e a superfície, além de dados meteorológicos auxiliares, é possível modelar a atmosfera com maior precisão utilizando algoritmos que visam estimar os parâmetros físicos característicos da atmosfera em estudo. Entretanto, muito embora a modelagem considere um perfil vertical para a concentração de gases e

partículas, a atmosfera é presumida uniforme e única sobre toda a área de estudo. Um exemplo é o *Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance algorithm and computer model* (MODTRAN), um dos algoritmos mais conhecidos utilizado na modelagem da transferência radiativa atmosférica, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas da Força Aérea dos Estados Unidos. Como este algoritmo não tem uma plataforma muito amigável, a Ontar Corporation desenvolveu o PcModWin que é uma versão para o Windows do MODTRAN (ONTAR, 2011).

O PcModWin/MODTRAN possui, além da possibilidade de inserção de dados externos, modelos de atmosfera padrão que estão embutidos no modelo e podem ser utilizados de acordo com o conhecimento da área de estudo em relação a sua localização geográfica, tipo de cobertura da terra, etc., além de dados do imageamento como a data da coleta da imagem, cobertura de nuvens, etc.

Para correção da imagem termal, o PcModWin/MODTRAN permite estimar os parâmetros que possuem maior contribuição para os efeitos da atmosfera tais como a transmitância total  $\tau(\lambda)$  e a radiância ascendente,  $L_a(\lambda)$ , na faixa de comprimento de onda entre 2 e 20  $\mu\text{m}$ . A partir destes dados, estes parâmetros são ponderados pela função de resposta de cada uma das bandas do sensor,  $FRE_b$ , como por exemplo, a transmitância ao ser ponderada obteve-se um fator de transmitância,  $\tau_b$ :

$$\tau_b = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_b(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} FRE_b(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2.9)$$

De maneira semelhante, são ponderadas a radiância ascendente,  $L_{a,b}$ , e a radiância descendente,  $L_{d,b}$ , utilizadas no modelo de transferência radiativa descrito pela equação (2.6), que ao ser reescrita para as bandas do sensor HSS tem-se:

$$L_{med,b} = \tau_b \cdot L_{e,b} + \tau_b \cdot [L_{d,b} \cdot (1 - \varepsilon_{alvo,b})] + L_{a,b} \quad (2.10)$$

onde:  $L_{med}$  é a radiância medida;  $L_e$  é a radiância emitida pelo alvo, e  $\varepsilon_{alvo}$  é a emissividade do alvo.

### 2.3.2 Correção Atmosférica e Reflectância de Superfície das Imagens VNIR-SWIR

Para recuperar a reflectância de superfície, existem vários algoritmos, dentre eles, o *Atmosphere Removal Algorithm* (ATREM), o *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) e o *Atmosphere Correction Now* (ACORN). Eles se baseiam no algoritmo MODTRAN e são explicados por Kruse (2004) e Gao et al. (2009), utilizando o modelo de transferência radiativa desenvolvido por Gao e Goetz (1990) mostrado, para um determinado comprimento de onda, na equação 2.11:

$$L_{med}(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot [L_d(\lambda) \cdot \rho_{alvo}(\lambda) \cdot \cos(\theta)] + L_a(\lambda) \quad (2.11)$$

onde:  $L_{med}$  é a radiância medida;  $\tau$  é a transmitância atmosférica,  $L_d$  é a radiância descendente, e  $\rho_{alvo}$  é a reflectância do alvo,  $\theta$  é o ângulo de incidência da radiação, e  $L_a$  é a radiância ascendente.

Observa-se que as diferenças entre o modelo de transferência radiativa aplicado aos comprimentos de onda do espectro refletido e do emitido, estão relacionadas: a) ao ângulo de incidência,  $\theta$ , da radiância solar descendente que atinge o alvo; b) ao termo  $1 - \epsilon_{alvo}$ , que é substituído pela reflectância do alvo,  $\rho_{alvo}$ ; e c) e ao termo da radiância emitida pelo alvo que, por ser muito pequeno, não é levado em consideração.

Neste trabalho, foi utilizado o algoritmo FLAASH (ACHARYA et al., 1999), implementado no aplicativo *Environment for Visualizing Images* (ENVI), versão 4.2, para geração de imagens de reflectância de superfície (VNIR-SWIR) corrigidas para os efeitos da atmosfera. Esta escolha se deve à possibilidade de seu uso para qualquer sensor remoto, desde que se forneçam as características espectrais e os dados de calibração radiométrica, Moreira (2008). O FLAASH utiliza o MODTRAN para caracterizar a atmosfera e eliminar efeitos causados por partículas de vapor d'água, aerossol e gases (ozônio, dióxido de carbono, etc.), necessitando dos seguintes parâmetros de aquisição de imageamento: coordenadas geográficas, elevação do terreno, altitude de voo e horário de aquisição.

## 2.4 Métodos de Estimativa de Temperatura e Emissividade da Superfície

A partir da radiância de superfície, ou seja, da radiância corrigida para os efeitos da atmosfera, pode-se obter a temperatura de brilho de cada pixel ao considerar que este possui emissividade de um corpo negro, ou seja, igual a 1. Entretanto, é fundamental que se conheça a emissividade dos materiais, os quais possuem emissividade menor que 1, para converter a temperatura de brilho em temperatura termodinâmica. Para estimar a emissividade de uma superfície deve-se considerar que seu comportamento espectral está relacionado à sua composição física, rugosidade, mistura de elementos dentro do mesmo pixel, geometria de imageamento, entre outros.

Por definição, a emissividade espectral de um Corpo Real é uma razão entre a exitância do Corpo Real e a exitância de um Corpo Negro, ambos na mesma temperatura e comprimento de onda (SCHOTT, 1997; NOVO, 2008), ou seja, é a capacidade de um corpo em emitir radiação, sendo que o corpo negro representa o limite máximo de radiação que um corpo real pode emitir ( $\varepsilon = 1$ ). Assim, temos:

$$B_{CR}(T, \lambda) = \varepsilon_{CR}(\lambda) \cdot B(T, \lambda) \quad (2.12)$$

onde:  $B_{CR}(T, \lambda)$  é a exitância de um corpo real a uma temperatura termodinâmica T, em um determinado comprimento de onda  $\lambda$ ;  $\varepsilon_{CR}$  é a emissividade de um corpo real.

Estimar a emissividade e a temperatura da superfície por meio da radiância emitida pelos alvos da área de estudo é uma tarefa difícil, porque para obter a temperatura é necessária a medição em uma banda, desde que se forneçam dados atmosféricos, e a emissividade do alvo. Por outro lado, não se conhece a emissividade de muitos alvos e, portanto, esta precisa ser determinada a partir da temperatura.

A solução para a determinação da temperatura e emissividade sempre incorre num número maior de incógnitas ( $N+1$ ) do que de variáveis medidas (GILLESPIE et al., 1998), porque ao medir a radiância por meio de  $N$  bandas de um sensor, não se pode obter  $N$  emissividades espectrais além da temperatura de superfície. Então, para determinar esses parâmetros, é necessário realizar medições de campo ou lançar mão de

algum método que estabeleça determinados vínculos entre as emissividades e a temperatura. Desta forma, vários métodos são aplicados para obter a emissividade espectral absoluta e outros para extrair a emissividade espectral relativa, que neste caso, é obtida em relação a uma emissividade de referência nas diferentes bandas, visando recuperar a forma do espectro dos diferentes materiais.

Os principais métodos de estimativa da emissividade de um material, baseando-se apenas na imagem, são listados abaixo:

Emissividade Espectral Absoluta:

*Day/Night method*

*NDVI Thresholds Method - NDVI<sup>THM</sup>*

*Normalized Emissivity Method – NEM*

*Temperature/Emissivity Separation method – TES*

Emissividade Espectral Relativa:

*Temperature-Independent Spectral Indices method – TISI*

*Reference channel method – REF*

*Emissivity Normalization Method – NOR*

*Emissivity RE-normalization method – RE*

*ALPHA emissivity method – ALPHA*

Melhores explicações e comparações entre estes métodos podem ser obtidas em Li et al. (1999), Sobrino et al. (2002), Jiménez-Muñoz (2005) e Jiménez et al. (2007). Os métodos mais comuns (NOR, REF e ALPHA) estão implementados no programa de processamento de dados na área de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica, o *Environment for Visualizing Images* (ENVI) na versão 4.2 facilitando sua utilização. Estes métodos possibilitam obter as variações espectrais da emissividade.

O método *Emissivity Normalization Method* (NOR) normaliza a emissividade,  $\epsilon_{NOR}$ , para o valor definido como o máximo valor de emissividade,  $\epsilon_{max}$ , que se espera encontrar nas imagens TIR. Assim, assumindo que  $\epsilon_{NOR,b} = \epsilon_{max}$  para todas as bandas, é

possível determinar a temperatura de cada pixel para cada banda,  $T_{NOR,b}$ , (CASELLES, et al., 1999), determinando a temperatura para que a exitância em uma dada banda,  $B_b$ , seja igual a radiância proveniente do alvo, conforme a equação:

$$B_b(T_{NOR,b}) = \frac{L_{med,b} - (1 - \epsilon_{NOR,b})I_{atm,b}}{\epsilon_{NOR,b}} \quad (2.13)$$

onde:  $L_{med}$  é a radiância medida, e  $I_{atm}$  é a irradiância atmosférica.

Em seguida, é verificado qual o valor máximo da temperatura, dentre os estimados para cada banda. Este valor máximo é definido como a temperatura de superfície,  $T_s$ . Esta temperatura é, então, utilizada para recalculer a emissividade dos pixels em cada banda,  $\epsilon_b$ , dividindo a radiância medida por cada banda do sensor,  $L_{medb}$ , pela exitância de corpo negro para o valor máximo da temperatura que é a temperatura de superfície. Com isto:

$$\epsilon_b = \frac{L_{med,b}}{B_b(T_s)} \quad (2.14)$$

O método *Reference channel method* (REF) também extrai a emissividade relativa e a temperatura dos pixels de uma imagem. Para tal, assume que a emissividade em uma dada banda é constante para todos os pixels da imagem e, então, obtém-se a temperatura destes pixels, a qual é considerada temperatura da superfície de todas as bandas. Assim, como a temperatura de superfície é a mesma para todas as bandas, é possível estimar a emissividade para cada pixel da imagem em radiância de cada banda, como explicado algebricamente pela equação acima.

O *ALPHA emissivity method* (ALPHA) estima o comportamento da emissividade a partir da aproximação de Wien para equação de Planck, com isto:

$$B_w(T, \lambda) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} \right]} \quad (2.15)$$

onde:  $B_w$  é a exitância espectral de um corpo negro aproximada pela Lei de Wien,  $h$  é a Constante de Planck;  $c$  é a velocidade da luz;  $k$  é constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura termodinâmica.

Com esta aproximação, torna-se possível linearizar a equação, calculando logaritmos. Assim, temos uma equação para cada banda, cujos valores da radiância e emissividade são diferentes, enquanto a temperatura é a mesma. Depois de algumas manipulações algébricas (KEALY; HOOK, 1993; LI et al., 1999; CHENG et al., 2007), elimina-se, pela subtração da equação de cada banda pela equação da média de todas as bandas, o termo referente à temperatura da superfície. Então o valor alpha é estimado para cada banda. Considerando-se todas as bandas, obtém-se o espectro de emissividade alpha. Este espectro é uma função da emissividade e só têm a forma semelhante aos espectros de emissividade, com uma média zero. Portanto, a única comparação dos espectros de emissividade com espectros alpha ocorre pela forma do espectro, desconsiderando-se a escala. Também é conveniente lembrar que este método é independente da temperatura de superfície.

Segundo Li et al. (1999), os erros associados aos diferentes métodos de estimativa da temperatura e emissividade são, geralmente, devidos à simplificação dos métodos, ruído e erro de calibração do sensor remoto utilizado e às incertezas devidas à correção atmosférica.

## 2.5 Modelo Linear de Mistura Espectral

Imagens de alta resolução espacial como as do sensor HSS permitem mapear a composição e abundância dos materiais presentes na área de estudo, uma vez que a radiância medida pelo sensor em cada pixel, em qualquer banda espectral, pode ser uma combinação linear ou não-linear das radiâncias dos diversos materiais que compõem a área do pixel. Assim, para estudar os diversos materiais presentes na área de estudo através da decomposição do pixel, pode ser utilizada a Análise de Mistura Espectral (*Spectral Mixture Analysis - SMA*), a qual está implementada no ENVI 4.2. Para tal, a reflectância do pixel em qualquer banda espectral é considerada uma combinação linear da reflectância de cada membro de referência (*endmembers*), pixel composto por um único material, dentro do pixel (ADAMS et al., 1993), além da variação de iluminação da imagem, ao utilizar como membro de referência a sombra. Esta análise se baseia no método dos mínimos quadrados, o qual estima as proporções de cada membro de



referência pela minimização da soma dos quadrados dos erros, para recuperar a abundância de cada membro de referência contido no pixel. Assim, a reflectância do pixel numa dada banda,  $\rho_b$ , é determinada pela soma das reflectâncias de cada material contido no pixel, multiplicado pela fração de cobertura, como descrito na Equação 2.16:

$$\rho_b = \sum_{i=1}^N F_i \cdot \rho_{ib} + e_b \quad (2.16)$$

onde:  $\rho_{ib}$  é a reflectância do membro de referência,  $i$ , para uma banda específica,  $b$ ;  $F_i$  é a fração do membro de referência;  $N$  é o número de membros de referência; e  $e_b$  é o erro residual para uma dada banda.

O ajuste do modelo pode ser avaliado pelo erro residual ou pela raiz quadrada do erro médio quadrático (*Root Mean Square Error* – RMSE), expressa na Equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{b=1}^m (e_b)^2} \quad (2.17)$$

onde:  $m$  é o número de bandas.

Ao aplicar o modelo de mistura numa imagem, são geradas tantas imagens quantos forem os membros de referência. Essas imagens são conhecidas por imagens-fração ou proporção, em número variável de acordo com o número de membros de referência selecionados como constituintes da mistura.

O inconveniente deste modelo é considerar que apenas um conjunto de membros de referência descreve a mistura de todos os pixels da imagem, ou seja, que o pixel contém todos os membros de referência em diferentes proporções, mesmo que não haja um dos membros de referência na sua composição. Desta forma, observa-se uma forte dependência da quantidade e qualidade dos membros de referência utilizados, pois qualquer tipo de interferência por parte deles afeta os demais pixels. O erro oriundo desta aproximação pode ser significativo em alguns casos.

Diversos pesquisadores como Lu e Weng (2006), Powell (2007), Pu et al. (2008), Franke et al. (2009), entre outros, têm modelado a mistura espectral dos materiais

presentes na estruturas urbana, tanto naturais como artificiais. Segundo Lu e Weng (2006), os melhores membros de referência para uma área urbana em modelos lineares de mistura espectral são: a superfície impermeável, a vegetação verde, e o solo.

A precisão dos modelos está intimamente ligada à seleção dos membros de referência, os quais podem ser obtidos tomando-se por base a imagem, medidas de campo ou bibliotecas espectrais (POWELL, 2007).

Uma das metodologias utilizadas na seleção dos membros de referência a partir das imagens foi proposta por Kruse et al. (2003), visando satisfazer as seguintes condições: 1) elementos puros independentes uns dos outros; 2) o número de elementos puros é menor do que o número de bandas  $e$ ; 3) não-correlação entre as bandas selecionadas. Nesta metodologia, inicialmente, é aplicada a transformação Fração de Ruído Mínima (*Minimum Noise Fraction* - MNF), cuja finalidade é a redução da dimensão espectral ao decorrelacionar os dados e minimizar os efeitos de ruído nas bandas. Em seguida, é utilizada a técnica de Índice de Pureza do Pixel (*Pixel Purity Index* - PPI), que detecta a frequência com que cada pixel é considerado extremo em distribuições aleatórias de vetores ou pares de bandas. Por último, é feita a identificação manual dos membros de referência utilizando um visualizador  $n$ -dimensional.

A transformação MNF (KRUSE et al., 2003), inicialmente, estima o ruído através da matriz de covariância e o ordena de forma crescente, além de decorrelacionar as bandas. Em seguida é aplicada uma técnica baseada na transformação por Componentes Principais, e as bandas são re-escaladas segundo os autovalores, os quais expressam a variância das bandas. Assim, as bandas com elevados autovalores concentram a maior parte da informação coerente, e são utilizadas nas etapas seguintes, enquanto que as imagens com menores autovalores concentram o ruído (KRUSE et al., 2003). Nesta transformação não há perdas ou modificações nas informações originais, sendo realizada pixel a pixel e não depende da localização espacial dos dados (MOREIRA, 2003).

A técnica PPI, desenvolvida por Boardman et al. (1995), consiste na projeção repetitiva de gráficos de espalhamento  $n$ -dimensional (definida pelo número de imagens MNF) que se ajusta aos dados da imagem sobre um vetor unitário aleatório, no qual os pixels mais extremos em cada projeção são registrados, assim como o número total de vezes em que isso ocorre. Em seguida, uma imagem PPI é gerada. Quanto maior o valor de um pixel (nível de cinza) nesta imagem, maior é o seu grau de pureza. Assim, é possível selecionar os membros de referência a partir da imagem.

O visualizador  $n$ -dimensional é uma ferramenta de visualização que permite a rotação dos eixos, alternando-os em múltiplas combinações de bandas MNF, para formar o espaço de atributos e facilitar a seleção dos membros de referência. Para tal, é analisada a coesão de agrupamentos de pontos e evidenciada as extremidades da forma geométrica. Esta tem suas extremidades atreladas aos membros de referência a serem selecionados (BOARDMAN et al., 1995), para posterior análise dos espectros de reflectância e sua localização na imagem.

## 2.6 Análise por Componentes Principais (ACP)

As imagens de melhor resolução espectral, como as imagens obtidas por meio do sensor HSS, apresentam certa correlação entre as bandas adjacentes e, portanto, redundância de informações, dificultando a identificação das feições espectrais sutis, que são exclusivas de cada banda espectral (JENSEN, 2009). Consequentemente, a separabilidade dos materiais presentes na área de estudo pode ser dificultada. Assim, para reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar os fatores responsáveis pela variabilidade espectral das imagens do sensor HSS, Moreira e Galvão (2010) utilizaram a Análise por Componentes Principais (ACP) que, a partir de combinações lineares das bandas originais, altamente correlacionadas, gera um novo conjunto de bandas decorrelacionadas, as componentes principais (CPs).

Segundo Schott (1997), esta transformação linear consiste no cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variância-covariância ou de correlações das bandas originais. Os primeiros autovalores explicam uma porção elevada da

variabilidade total associada às bandas originais. Os autovetores correspondem às componentes principais e são resultados da influência das bandas originais sobre cada componente. Os fatores de peso associados aos autovetores indicam a contribuição relativa de cada banda para explicar as componentes principais, sendo que os sinais, positivos ou negativos, indicam, respectivamente, relações diretamente e inversamente proporcionais (BAILEY; GATRELL, 1996). Ao multiplicar a matriz de fatores de peso de cada banda nas componentes principais pela matriz original de dados, são obtidos os escores componentes principais. Os escores, quando projetados num diagrama de dispersão, em que os eixos são as componentes principais mais importantes fornecem uma ideia das relações de similaridade espectral entre amostras ou valores de reflectância de pixels transformados no espaço CP.

Graficamente, a ACP é a aplicação de uma transformação linear aos dados da imagem para transladá-los e rotacioná-los em um novo sistema de coordenadas de modo a maximizar a sua variância (SCHOTT, 1997) (Figura 2.6). A primeira componente principal é projetada na direção de maior variância dos dados, enquanto a segunda componente, por ser perpendicular à primeira, segue a segunda maior variância e assim, sucessivamente, até que toda variação do conjunto seja explicada.

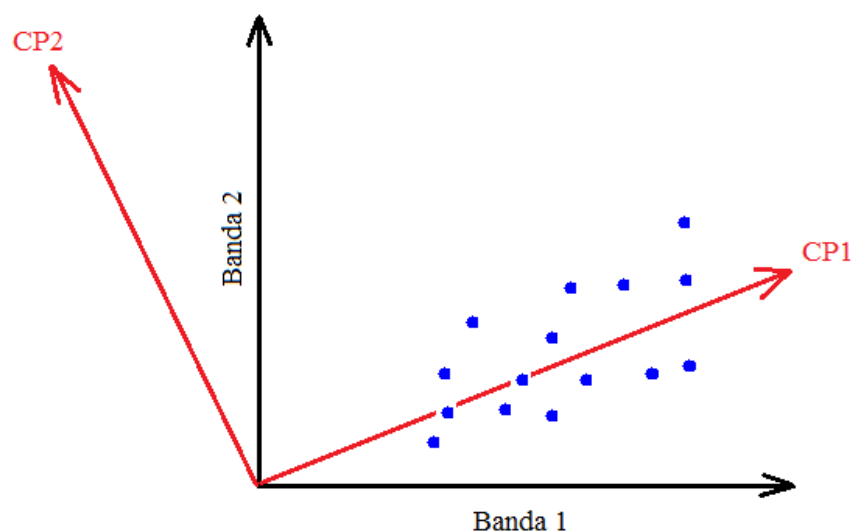


Figura 2.6 - Rotação dos eixos em duas dimensões na transformação por componentes principais.

Fonte: Adaptado de SCHOTT, 1997.

### 3 METODOLOGIA DE TRABALHO

A metodologia empregada neste trabalho está descrita de acordo com o fluxograma da Figura 3.1.

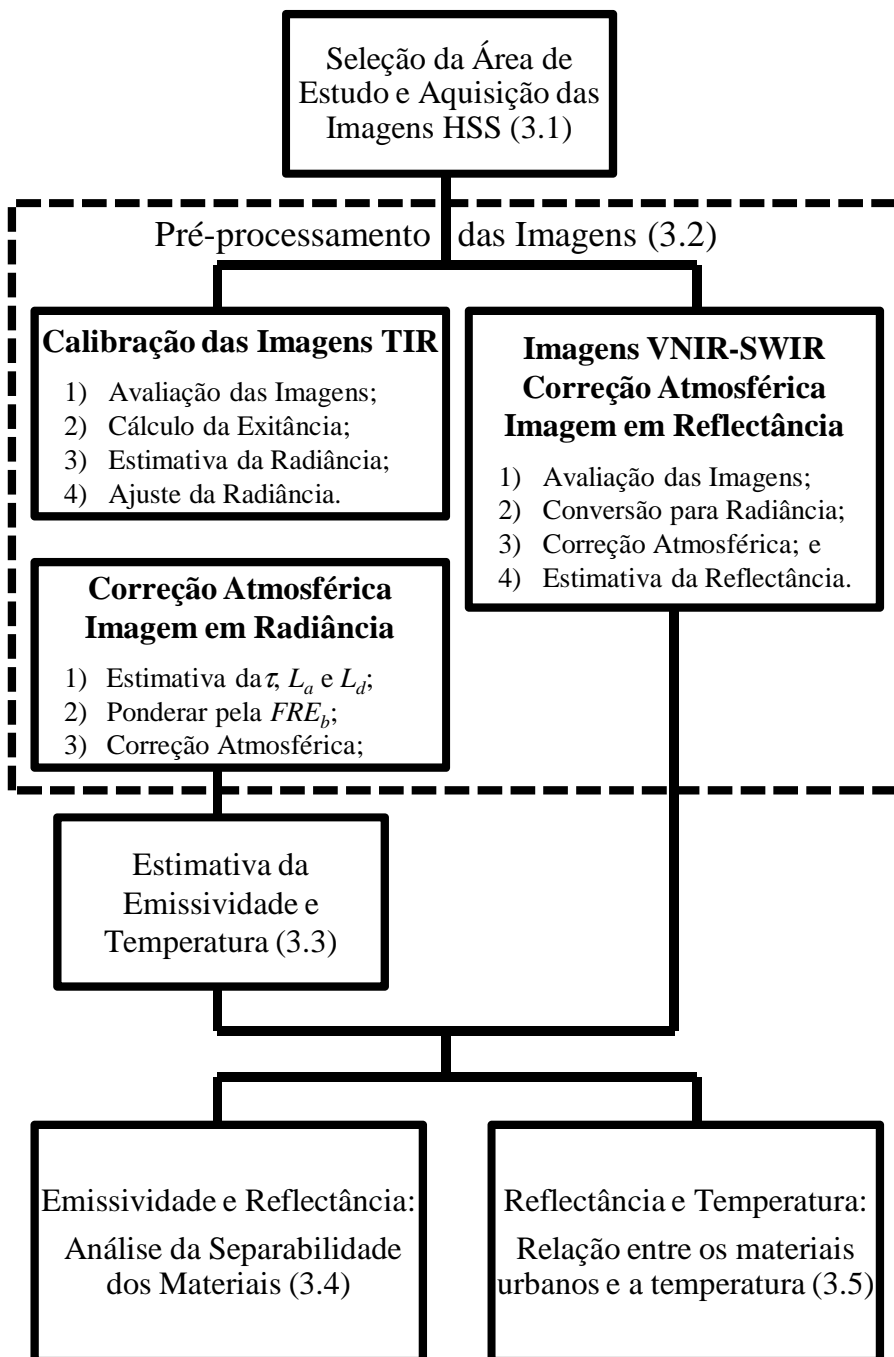


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia de trabalho.

### 3.1 Seleção da Área de Estudo e Aquisição das Imagens HSS

A seleção da área de estudo foi condicionada por dois critérios determinantes: 1) investigar uma área urbana com uma boa heterogeneidade de materiais artificiais e naturais e, conseqüentemente, com diversos tipos de uso e cobertura da terra; e 2) a disponibilidade de imagens do espectro refletido e emitido obtidas durante uma campanha de imageamento e calibração realizada no período de maio a junho de 2006.

Assim, a área selecionada, cujas coordenadas geográficas são -23.2875 S e -45.7967 W, situa-se no município de São José dos Campos, Vale do Paraíba Paulista, que é uma região de grande relevância econômica para o Brasil, e principal eixo de ligação entre Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. A cidade possui boa diversidade de alvos urbanos, incluindo tipos variados de edificações quanto à área construída, materiais utilizados e uso. Desta forma, é caracterizada por uma grande diversidade de usos do espaço e, conseqüentemente, por uma grande mistura em diferentes proporções de materiais naturais e artificiais, os quais possuem diferentes propriedades térmicas.

Na Figura 3.2 é possível observar que a cidade é dividida em macrozonas, as quais são subdivididas em setores e subsetores, conforme a Lei Municipal Complementar 428/10 de 2010, visando facilitar o levantamento de dados e análise socioeconômica. Esta divisão considera o agrupamento de bairros contíguos que possuem características socioeconômicas semelhantes, sendo que cada setor está contido em uma determinada região geográfica, segundo a Prefeitura Municipal de São José dos Campos (2003).



Figura 3.2 - Localização do Município de São José dos Campos e suas Macrozonas Urbanas.

A área de estudo compreende, em sua grande maioria, a região central da cidade de São José dos Campos, além de uma pequena parte da zona sul e sudeste, como pode ser observada na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Composição colorida do sensor HSS (composição RGB bandas 8, 5 e 2), com destaques para as divisões das regiões urbanas na área de estudo.

Nesta pesquisa foi adotada como parâmetro de comparação, a divisão oficial da cidade em setores e subsetores por causa da heterogeneidade da textura urbana e, conseqüentemente, das suas características socioeconômicas, obtida do Banco de Dados geográficos Cidade Viva. Em conjunto, foi utilizada a metodologia consolidada de interpretação visual de fotografias aéreas para a interpretação das imagens do espectro refletido HSS para identificar setores que representassem o uso residencial horizontal e vertical, o uso comercial e área verde presentes no espaço intra-urbano.



As imagens de interesse foram selecionadas de uma campanha de imageamento e calibração realizada em 30 de maio de 2006, na cidade de São José dos Campos, que está a uma altitude média de 600 m. Foram realizados voos diurnos e noturnos a uma altura de aproximadamente 1090 m sobre o terreno, obtendo-se imagens diurnas na região VNIR-SWIR e noturnas e diurnas na região TIR. Como o sensor foi ajustado para IFOV de 2,5 mrad e frequência de varredura de 25 Hz, foi obtida uma resolução espacial aproximada de 2,9 m ao nadir, no ponto de referência de altura, 646 m, a cabeceira da pista do Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf, e uma largura de faixa de 2,1 km visto que o FOV é de 86°. O intervalo de tempo entre uma faixa e outra foi de 15 minutos. Houve sobreposição das áreas imageadas, resultando na observação de alguns alvos em mais de uma imagem. Estes parâmetros foram escolhidos na campanha de imageamento e calibração visando utilizar a melhor configuração do conjunto sistema sensor e aeronave, respeitando os requisitos necessários da imagem.

### 3.2 Pré-processamento das Imagens

Para selecionar as imagens utilizadas neste estudo, foi feita uma avaliação qualitativa das imagens obtidas em relação ao ruído, distorções geométricas causadas por movimentos da aeronave, entre outros. Também, foram verificadas as condições dos corpos negros de referência quanto à estabilidade da temperatura e ao ajuste dos *ND*'s.

Realizadas estas avaliações prévias, as imagens brutas diurnas foram registradas entre si. O mesmo procedimento foi aplicado às imagens brutas noturnas. Estas imagens foram corrigidas geometricamente para efeitos de varredura e de visada por meio do programa de processamento de imagens do sensor *AHS Import Utility* (SENSYTECH, 2002).

Os parâmetros de voo para aquisição das imagens nos períodos diurno e noturno em 30 de maio de 2006 são apresentados na Tabela 3.1. Da aquisição diurna, foram utilizadas apenas as imagens das 37 bandas posicionadas nas faixas espectrais do VNIR e SWIR (Tabela 2.1), em função da baixa qualidade dos dados TIR. Da aquisição noturna, foram

utilizadas imagens das 13 bandas posicionadas no TIR (Tabela 2.2). As temperaturas, máxima e mínima, dos corpos negros de referência foram definidas como 44,6 e 16,9 °C.

Tabela 3.1 - Parâmetros do voo e configuração do equipamento.

Parâmetro	Diurno	Noturno
Coordenada central (Lat.; Long.)	-23.2875 S ; -45.7967 W	-23.2875 S ; -45.7967 W
Altura do sensor em relação ao solo	1094 m	1089 m
Altitude média	600 m	600 m
Tamanho do pixel	2,9 m	2,9 m
Data aquisição	30/05/2006	30/05/2006
Hora aquisição	14h02	21h06
IFOV	2,5 mrad	2,5 mrad
Frequência de varredura	25 Hz	25 Hz
Temperatura CNR1	-	44,6°C
Temperatura CNR2	-	16,9°C

### 3.2.1 Pré-processamento das Imagens Diurnas VNIR-SWIR

Visando obter dados de reflectância da superfície do conjunto de imagens do VNIR-SWIR coletado no sobrevoo diurno, inicialmente foram realizadas avaliações quanto às condições das imagens, entre elas a homogeneidade, investigando visualmente a existência de variações grosseiras de brilho.

Em seguida, foi utilizado o programa do sensor *AHS Import Utility* na conversão dos *ND's* em valores de radiância (*Reflective Calibration*) (Equação 2.1). Para isto são necessários alguns parâmetros do imageamento, tais como localização geográfica, altitude, altura do sensor em relação ao solo, resolução espacial (Tabela 3.1), bem como

dos coeficientes de calibração, os quais estão inseridos nos arquivos auxiliares.

As imagens radiância foram convertidas em reflectância de superfície, portanto corrigidas para os efeitos de espalhamento e absorção atmosférica, utilizando o aplicativo FLAASH, que se baseia no modelo de transferência radiativa MODTRAN. Para isto o FLAASH necessita: a) de parâmetros do sobrevoo (Tabela 3.1); b) de parâmetros atmosféricos (Tabela 3.2), obtidos da estação meteorológica localizada no Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf; e c) das funções de resposta espectral de cada banda,  $FRE_b$ .

Tabela 3.2 - Parâmetros utilizados para a correção atmosférica no FLAASH.

Modelo atmosférico	Tropical
Modelo de aerossol	Urbano
Visibilidade da atmosfera	40 km
Concentração de Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub>	360 ppm

O modelo de atmosfera adotado foi o Tropical, devido à localização geográfica da imagem. O modelo de aerossol foi o urbano, que é uma mistura de 80% de aerossol rural com 20% de aerossóis típicos de fuligem, mais adequado para regiões com alta densidade urbana e áreas industriais, como a área de estudo. A visibilidade de 40 km foi obtida da estação meteorológica e a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi de 360 ppm (CONWAY et al., 1994).

### 3.2.2 Pré-processamento das Imagens Noturnas TIR

Para converter os  $ND$ 's das imagens do espectro emitido obtidas no sobrevoo noturno para radiância da superfície, primeiro foi verificada a qualidade da imagem noturna da mesma forma que foi realizada na imagem diurna. Também foi realizada uma avaliação dos ajustes das temperaturas termodinâmicas dos corpos negros de referência e sua correlação com os  $ND$ 's, para verificar uma eventual ocorrência de pixels com valores extrapolados.

Depois foi observada a flutuação dos  $ND$ 's dos corpos negros de referência visando estimar o ruído na imagem, tendo como base os trabalhos de Castro et al. (2005 e 2007). Assim, o ruído foi determinado pela razão do desvio padrão dos  $ND$ 's do corpo negro de referência 2, ajustado com a maior temperatura, pelo valor médio dos seus  $ND$ 's. Esta análise inicial de qualidade das imagens TIR foi um dos parâmetros que determinaram quais das 13 bandas poderiam ser utilizadas no trabalho.

Além disso, para estimar a incerteza final da temperatura, deve-se levar em consideração a incerteza do instrumento,  $\sigma_{inst}$ , neste caso, o sensor HSS. Esta incerteza pode ser estimada, por exemplo, a partir da conversão em temperatura da flutuação em radiância do  $CNR_2$  na banda 50. Utilizando esta estimativa, obtemos uma incerteza instrumental de 0,5 °C. Com isto, a incerteza final,  $\sigma_f$ , é dada pela expressão:

$$\sigma_f = \sqrt{(\sigma_m)^2 + (\sigma_{inst})^2} \quad (3.1)$$

onde:  $\sigma_m$  é o desvio padrão da média.

Uma vez avaliados os dados de temperatura termodinâmica e os  $ND$ 's dos  $CNR$ 's, a primeira foi utilizada para obter a radiância das imagens das bandas 41 a 50, por meio da calibração em radiância, Seção 2.2. Foram determinados então os coeficientes de calibração e, em seguida, foi realizada a interpolação linear entre as radiâncias com base nos  $ND$ 's obtidos nas imagens de cada banda, utilizando a Equação 2.5.

Obtidas as imagens em radiância que chega ao sensor, foi necessário avaliar e corrigir os efeitos da atmosfera visando obter imagens em radiância de superfície. Para tal, foi preciso estimar a radiância descendente, a transmitância e a radiância ascendente atmosférica no momento do imageamento noturno, de acordo com a Seção 2.3.

Para determinar a radiância descendente atmosférica, primeiramente foi preciso estimar a emissividade e a temperatura do céu (atmosférica) (Equações 2.7 e 2.8), utilizando os dados de temperatura de ponto de orvalho, 15,4 °C, e de temperatura de bulbo seco, 18,1 °C, obtidos da estação meteorológica localizada no Aeroporto de São José dos Campos – Professor Urbano Ernesto Stumpf. Assim, estimou-se a temperatura e a

emissividade do céu, que foram, respectivamente, 5,4 °C e 0,84, com as quais foi determinada a radiância descendente.

A transmitância atmosférica e a radiância ascendente foram estimadas utilizando duas configurações no PCModWin/MODTRAN, sendo que, para ambas, o modelo de atmosfera adotado foi o Tropical; as estações do ano assumidas foram outono/inverno devido ao período do ano; e a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foi de 360 ppm (CONWAY et al., 1994). O modelo de aerossol adotado foi o urbano com visibilidade de 40 km. Na primeira configuração foi utilizada a configuração padrão do programa, para o número e distribuição das camadas atmosféricas e a umidade relativa do perfil atmosférico, do modelo de atmosfera tropical. Na segunda configuração, foram utilizadas 33 camadas atmosféricas, número máximo permitido pelo programa, com camadas mais próximas da superfície terrestre. Também foi realizado um refinamento dos dados de umidade relativa do perfil atmosférico utilizando dados obtidos por radiossondagem do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP) no Aeroporto Campo de Marte, local mais próximo à área coberta pela imagem no dia do imageamento.

Como pode ser observado na Figura 3.4, o comportamento da umidade relativa do padrão do modelo de atmosfera Tropical do programa PcModWin é significativamente diferente da radiossondagem. Com isto, a transmitância estimada pelo modelo padrão do PcModWin foi menor do que a transmitância estimada com o refinamento por meio dos dados meteorológicos. Isto se deve ao fato de que, ao adicionar os dados de umidade relativa, a absorção pelo vapor d'água é estimada com maior precisão, enquanto que no modelo padrão ela é estimada para condições gerais, fornecendo um valor superestimado para a influência deste componente atmosférico, nas condições em que a imagem foi obtida. Por isto, os dados de umidade relativa, interpolados da radiossondagem foram utilizados na correção atmosférica da imagem TIR.

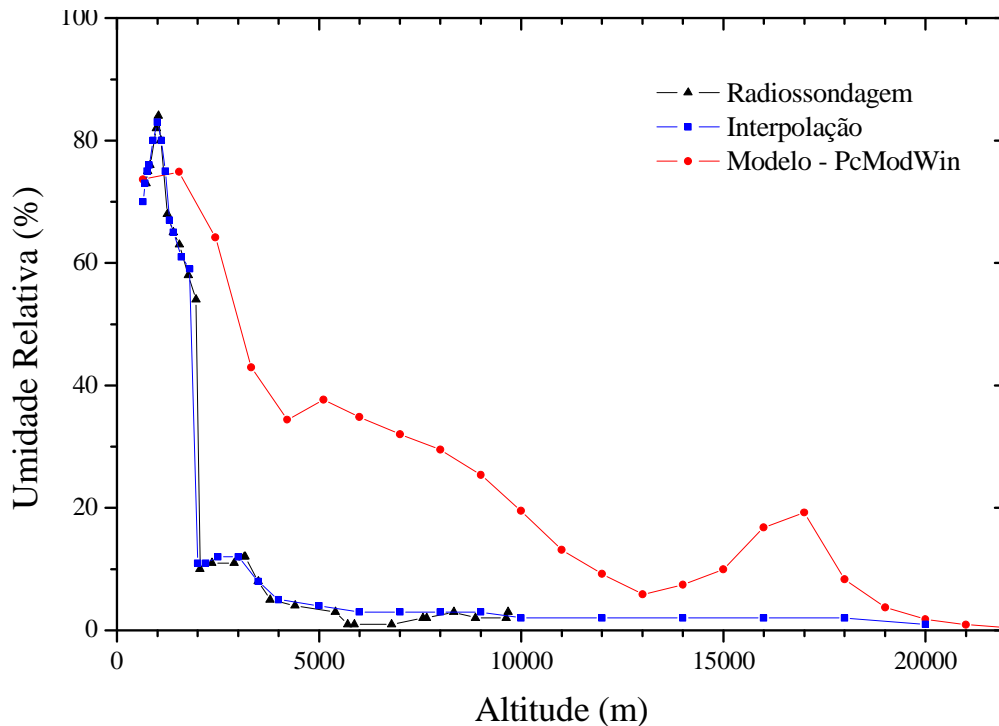


Figura 3.4 - Gráfico da umidade relativa em função da altitude. Em preto o modelo atmosférico utilizado pelo PcModWin, em azul o dado fornecido pela radiossondagem e em vermelho o valor interpolado utilizado na correção atmosférica. A linha só está conectando os pontos e não serve como indicação da umidade relativa entre os pontos.

Deste modo, utilizando a segunda configuração no PcModWin/MODTRAN, foram estimadas a transmitância e a radiância ascendente atmosférica para as bandas do espectro emitido da imagem noturna que, em seguida, foram ponderadas pela  $FRE_b$ , como descrito na Seção 2.4.

Por fim, foi avaliada a influência do ângulo de visada do sensor nos cálculos da correção atmosférica, uma vez que o amplo campo de visada e toda a variação da influência atmosférica causada por ele podem contribuir para a anisotropia dos materiais presentes na imagem. Para tal, foi necessário encontrar um material na imagem que pudesse ser considerado homogêneo e que estivesse presente ao longo da imagem, ou seja, presente ao longo do campo de visada do sensor sob diferentes ângulos. Este material foi o asfalto do pavimento da Rodovia Presidente Dutra, que pode ser observado na Figura 3.5, correspondente a uma imagem, noturna, da banda 48.



Figura 3.5 - Imagem noturna em níveis de cinza da banda 48, com destaque para a Rodovia Presidente Dutra, cujo material asfalto está presente ao longo da visada do sensor.

Como o FOV do sensor é de  $86^\circ$ , os parâmetros atmosféricos foram ajustados para os ângulos de visada nadir ou  $0^\circ$ ,  $\pm 21^\circ$  e  $\pm 43^\circ$  devido à trajetória da radiação que chega ao sensor, uma vez que para o ângulo de  $43^\circ$ , a atmosfera entre o alvo e o sensor é 42% maior que ao nadir. Conseqüentemente, a influência atmosférica também aumenta. Assim, foi feito um teste, cuja imagem noturna em radiância foi corrigida para os efeitos da atmosfera segundo os ângulos de visada acima. Em seguida foram obtidas as imagens em emissividade das bandas 45 a 50, pelo método NOR (seção 2.6). Depois, foram extraídos da imagem, pixels que continham os espectros de emissividade do asfalto considerando o ângulo de visada do sensor. Verificou-se que, nesta configuração, as diferenças encontradas no espectro de emissividade para as diferentes correções do ângulo de visada, para o material asfalto, não foram significativas. Portanto, foi adotado o ângulo de visada de  $0^\circ$ , ou nadir, como parâmetro de entrada para a modelagem da atmosfera.

### 3.3 Estimativas da Emissividade e Temperatura da Superfície

Foram estimadas a temperatura e a emissividade da superfície utilizando as imagens do infravermelho termal do imageamento noturno de boa qualidade. Para avaliar o comportamento espectral da emissividade e a temperatura de superfície dos componentes de cena da área de estudo, foram utilizados os métodos NOR, REF e ALPHA, descritos na Fundamentação Teórica (seção 2.4).

Para estimar a emissividade e a temperatura de cada pixel da imagem pelo método NOR, a emissividade inicial adotada foi de 0,98, que é a mais próxima da emissividade da maioria dos materiais, e que mais se aproximam à de um corpo negro, para todas as bandas.

Para o método REF, a emissividade inicial adotada também foi de 0,98 e a banda adotada como banda de referência foi a 50 (12,02  $\mu\text{m}$ ) devido ao baixo nível de ruído, uma vez que, devido à correlação das bandas, o ruído da imagem tende a ser realçado após este processamento, ao introduzir o ruído da banda de referência nas demais bandas.

Assim, a partir das imagens em emissividade, estimadas pelos três métodos, NOR, REF e ALPHA, foi extraída a emissividade espectral relativa de um total de 265 pixels para alguns dos principais materiais presentes na imagem da área de estudo, tais como: vegetação, asfalto, cerâmica, fibrocimento, aço galvanizado acinzentado e concreto. Uma vez que não há disponibilidade de biblioteca espectral no Brasil destes materiais, os comportamentos espectrais da emissividade, obtidos com os três métodos, foram comparados entre si.

Para avaliar os valores de temperatura de superfície foram utilizados dois métodos: o NOR e o REF. Os parâmetros adotados neste procedimento foram os mesmos usados na estimativa da emissividade. Assim, obtidas as imagens em temperatura de superfície por ambos os métodos, os valores de temperatura foram obtidos para o mesmo conjunto de 265 pixels, mencionado no parágrafo anterior. Os resultados foram comparados entre si,



uma vez que não foram feitas medições em campo durante o sobrevoo.

### 3.4 Análise da Separabilidade dos Materiais com base em Emissividade e Reflectância da Superfície

Para verificar a separabilidade dos principais materiais presentes na área de estudo, foi realizada uma análise qualitativa e quantitativa dos espectros de emissividade e reflectância espectral. Assim, inicialmente foi realizada a análise qualitativa da resposta espectral visando identificar algumas feições espectrais ao longo do VNIR-SWIR, que caracterizam a presença de certos tipos de materiais e separam um material do outro. Entretanto, para materiais que não possuem bandas de absorção bem definidas, ou que não seja possível identificá-las por causa da largura e posição das bandas do HSS e de sua relação sinal-ruído, foi verificada se há uma inclinação da curva de reflectância na análise. No TIR, as feições espectrais estão associadas a mínimos e máximos de emissividade, as quais são muito úteis quando o material possui feições de absorção sutis ou inexistentes no VNIR-SWIR, ou ainda, quando há confusão na separabilidade de materiais.

Para tal, foram extraídos espectros de um total de 320 pixels para oito tipos de materiais das imagens diurnas (espectro refletido) e das imagens noturnas (espectro emitido). A definição das classes e seleção dos pixels na imagem foi feita com base no conhecimento de campo dos materiais de maior relevância na área de estudo, segundo sua abundância ou peculiaridade espectral, além da abrangência de pixels na imagem, ou seja, tamanho do alvo composto pelo material em questão. O objetivo foi minimizar a influência de pixels vizinhos na caracterização do material.

Na abordagem quantitativa da separabilidade dos principais materiais presentes na área de estudo, foi utilizada a análise por componentes principais, a qual foi aplicada nos espectros de reflectância do VNIR-SWIR das imagens diurnas e de emissividade do TIR das imagens noturnas, por meio de um programa específico para cálculos estatísticos, o *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) versão 19. O cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores foi feito por meio da matriz de correlação das bandas

originais com valor mínimo do autovalor igual a 1 e número máximo de interações de 25, para um total de 320 pixels extraídos diretamente da imagem, divididos em oito tipos de materiais presentes na estrutura urbana. Assim, as componentes principais, CP's, que apresentaram maiores autovalores, e que juntas apresentaram uma variância acumulada maior que 90%, tiveram seus autovetores analisados visando identificar a contribuição dos diferentes intervalos espectrais para explicar cada CP (MOREIRA; GALVÃO, 2010).

### 3.5 Relação entre os Materiais Urbanos e a Temperatura

A partir das imagens de reflectância de superfície das 37 bandas no VNIR e SWIR, foi aplicado um modelo de mistura espectral, implementado no ENVI versão 4.2, para estimar a abundância de alguns dos principais materiais urbanos presentes na área de estudo. Para a seleção dos membros de referência do modelo de mistura, foi feita a aplicação sequencial das técnicas MNF (*Minimum Noise Fraction*), PPI (*Pixel Purity Index*) e do visualizador *n*-dimensional dos pixels.

As imagens foram transformadas linearmente aplicando a técnica transformação MNF, cuja dimensionalidade espectral dos dados foi determinada pelos autovalores maiores que 3 e pela inspeção da qualidade visual das imagens MNF, em relação ao ruído. Estas bandas MNF foram usadas como dados de entrada para a técnica PPI, visando reduzir a abrangência espacial dos dados, de forma a identificar os pixels candidatos a membros de referência. Para tal foram utilizadas 20.000 iterações devido à complexidade da estrutura urbana visando gerar inúmeras projeções, e valor limiar (*threshold*) de 2 números digitais (sendo que 1 número digital é igual a 1 desvio-padrão com relação à medida do pixel) para a seleção dos pixels puros. Depois, foi feita uma análise dos grupos de pixels indicados pela técnica PPI no espaço de atributos por meio da sua distribuição no visualizador *n*-dimensional quanto à dispersão e agrupamento, e então foram definidas as classes de membros de referência utilizadas no modelo de mistura. Finalmente, foram obtidas 4 imagens-fração, as quais representam a abundância de cada membro de referência em cada pixel da imagem, mais uma imagem erro residual, que quantifica a qualidade do ajuste feito pelo modelo de mistura.

Obtidas as imagens-fração e a imagem em temperatura, foi analisado o comportamento da temperatura segundo a distribuição espacial de determinados materiais na cena para setores socioeconômicos da área de estudo. Para tal foram utilizados os limites dos setores socioeconômicos abrangidos pela área de estudo para servir de recorte para a imagem em temperatura e para as imagens-fração. Em seguida foram calculadas as temperaturas médias de cada setor socioeconômico e determinado material predominante em cada setor. Para determinar/classificar cada pixel, a porcentagem mínima para o pixel ser classificado com sendo de uma dada fração, foi de 50%. Os setores socioeconômicos analisados foram escolhidos de acordo com sua especificidade, ou seja, com suas características de uso e ocupação do solo observadas por meio de uma imagem do sensor HSS da área de estudo.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes às metodologias explicadas no capítulo anterior, as quais foram empregadas nas imagens diurnas para estimar a abundância dos principais materiais presentes na área de estudo e nas imagens noturnas, para obter as imagens em radiância e depois estimar a temperatura e a emissividade relativa destes mesmos materiais. Em seguida, depois de analisado o comportamento espectral da reflectância e da emissividade, foi verificada a separabilidade destes materiais, visando demonstrar a importância de se utilizar combinadamente dados do VNIR, SWIR e TIR. Por último, foram utilizadas: a temperatura, as imagens-fração obtidas com o SMA e a divisão em setores socioeconômicos, para uma abordagem sobre a relação destes dados.

### 4.1 Calibração de Números Digitais (ND) para Valores de Radiância da Imagem HSS TIR e Correção Atmosférica

Ao avaliar a estabilidade dos corpos negros de referência ao longo do imageamento, foi verificado que eles se mantiveram estáveis com uma variação de 0,2 °C em torno da média da temperatura termodinâmica (Figura 4.1). Entretanto, os valores em ND's dos corpos negros de referência medidos pelos detectores variaram em até 100 ND's, em torno da média, para as bandas 39 a 43, enquanto que para as demais bandas, a variação foi de 100 a 200 ND's. Esta variação ocorreu, provavelmente, devido ao ruído inerente do sistema sensor, além de uma pequena correlação entre os corpos negros.

Embora a maioria das bandas tenha sido ajustada corretamente, os ND's dos CNR1 e CNR2 para as bandas 38, 39 e 40 apresentaram valores muito próximos. Estes valores deveriam estar mais afastados para que a calibração em radiância apresentasse resultados coerentes e a imagem pudesse ser convertida de ND's para radiância. Assim, devido aos ajustes de ganho e *offset* destas bandas, as imagens apresentaram baixa qualidade, impedindo sua utilização neste trabalho, como pode ser observado na Figura 4.2, na comparação entre as duas bandas com problemas de ajuste e a banda 48 ajustada corretamente.

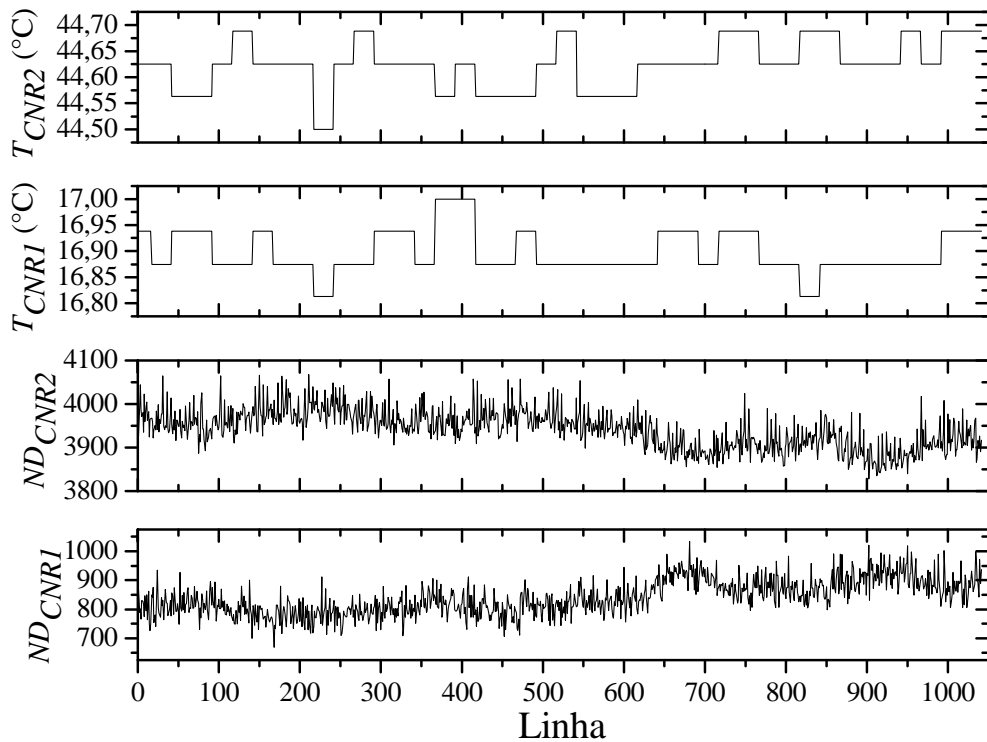


Figura 4.1 - Avaliação da estabilidade da temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência ao longo do imageamento e seus ND's para a banda 48 da imagem noturna.

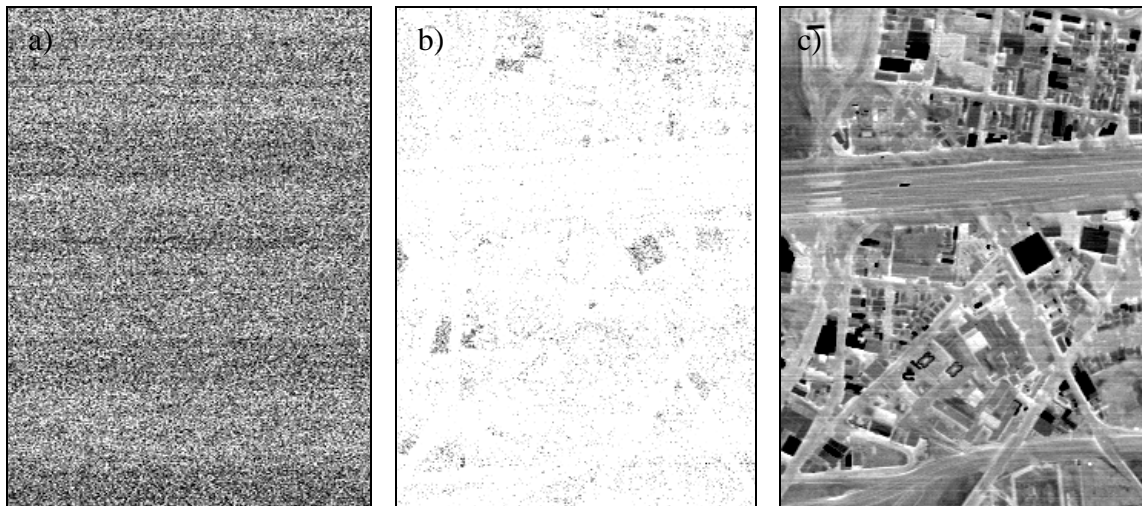


Figura 4.2 – Imagens em tons de cinza da radiância obtidas no imageamento noturno para diferentes bandas do HSS, sendo as duas primeiras de baixa e a última de boa qualidade. Em a) banda 38 (3,201  $\mu\text{m}$ ); b) banda 39 (3,509  $\mu\text{m}$ ); c) banda 48 (9,800  $\mu\text{m}$ ).

Aplicada a metodologia para estimativa do ruído, verificou-se que a banda 38 apresentou o maior ruído (21,3%), enquanto que as bandas 39 e 40 apresentaram valores em torno de 4%. Para as demais bandas, o ruído foi menor que 1% (Figura 4.3). A alta porcentagem de ruído estimada para a banda 38 é mais um indicativo da baixa qualidade da sua imagem, e por isso foi descartada deste trabalho. Portanto, as imagens das bandas 38, 39 e 40 não foram utilizadas neste trabalho devido à baixa qualidade causada pelo ajuste inadequado de ganho e *offset* e pelo ruído presente na imagem da banda 38.

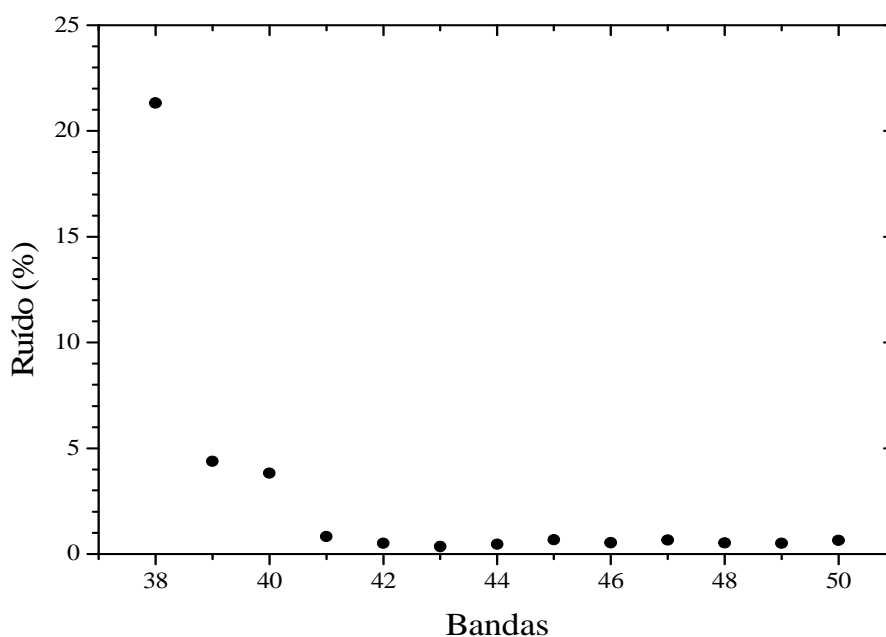


Figura 4.3 - Porcentagem de ruído presente na imagem das bandas HSS TIR obtidas no imageamento noturno.

Na Tabela 4.1 são apresentados os coeficientes de calibração resultantes da utilização da metodologia adotada, após a utilização dos dados de temperatura termodinâmica dos corpos negros de referência, conforme descrito na seção 3.2.2 e 2.2.

Tabela 4.1 – Coeficientes de calibração das bandas do espectro emitido.

Bandas	<i>off-set</i> W / m <sup>2</sup> ·sr·nm	<i>Ganho</i> W / m <sup>2</sup> ·sr·nm
41	-0,3960	0,0012
42	-0,3763	0,0011
43	0,6688	0,0010
44	1,3057	0,0011
45	4,5731	0,0024
46	6,5125	0,0017
47	6,3699	0,0018
48	7,0550	0,0015
49	7,1399	0,0017
50	7,2447	0,0012

Na Figura 4.4 é apresentado o gráfico de temperatura de brilho de um alvo, quando a emissividade é igual a 1, em função do *ND*, obtido com a metodologia desenvolvida neste trabalho para a banda 49, do sensor HSS. Como mencionado anteriormente, a relação entre a temperatura e o *ND* é uma curva, visto que a calibração da radiância em função do *ND* é linear, de acordo com a metodologia descrita na seção 2.2. Na figura também se observa, para comparação, a temperatura de brilho fornecida pelo programa do sensor, o *AHS Import Utility*, que apresenta um comportamento linear, diferente do esperado.

Usando a metodologia descrita na seção 3.2.2 foram utilizados os dados da segunda configuração no PcModWin/MODTRAN, a qual incluiu um refinamento da umidade relativa utilizando dados de radiossondagem, para modelar a atmosfera no momento do imageamento. Na Figura 4.5 pode ser observada a transmitância atmosférica juntamente com a *FRE<sub>b</sub>*, das bandas 45 a 50 (8 a 12,5 μm).



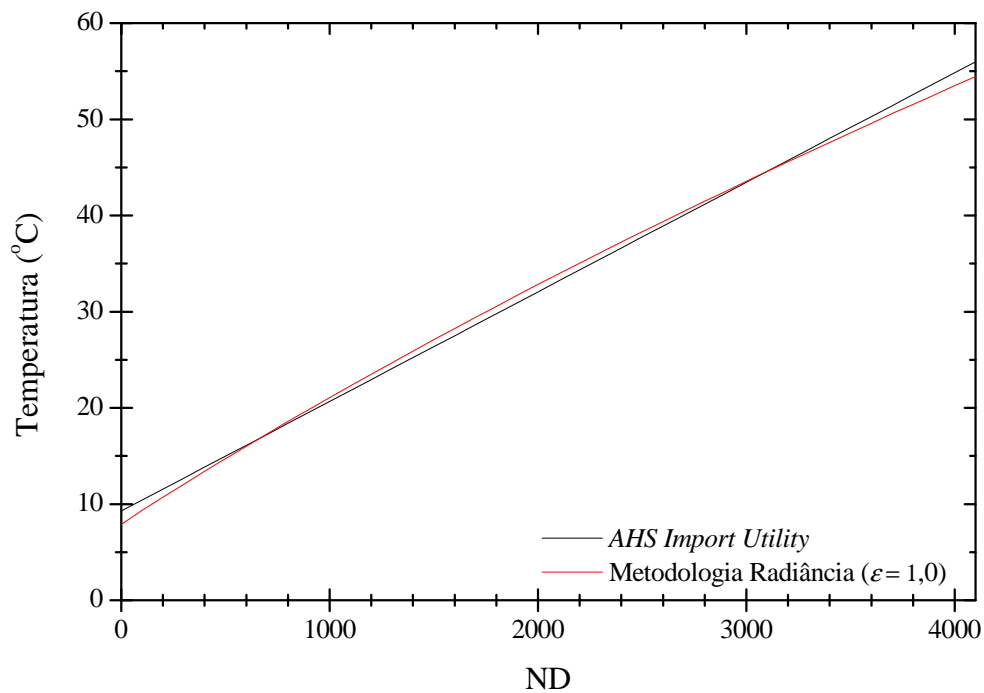


Figura 4.4 - Comparação entre a temperatura de brilho estimada para cada nível digital da imagem da banda 49. A reta representa os resultados obtidos com o programa do sensor. A curva é o resultado obtido por meio da calibração em radiação desenvolvida neste trabalho.

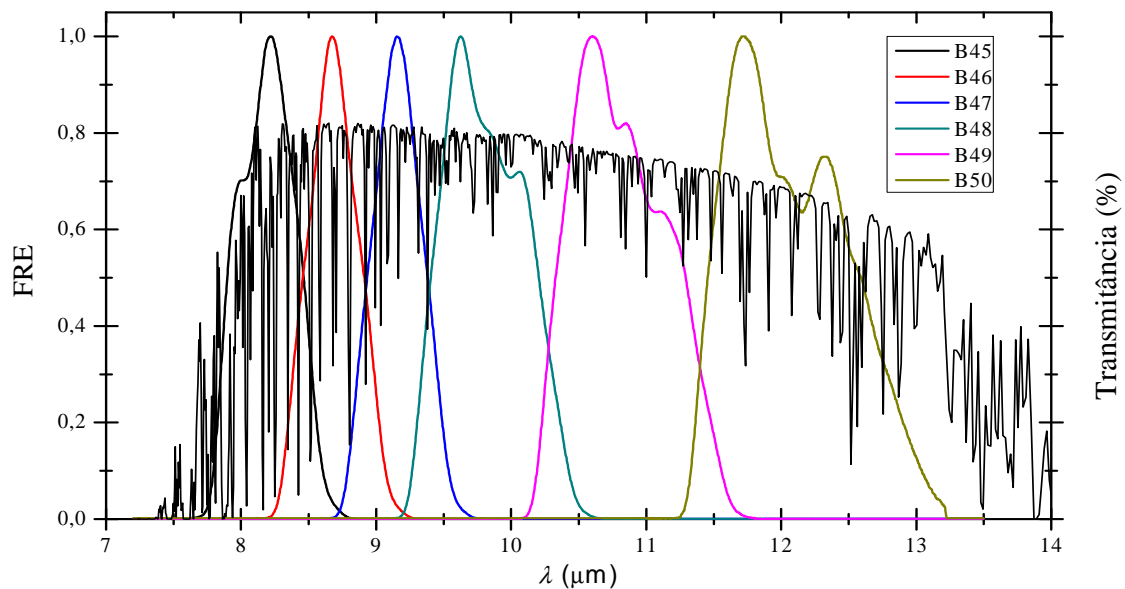


Figura 4.5 - Gráfico da transmitância atmosférica obtida pela modelagem refinada com o perfil de umidade relativa da atmosfera utilizando o PCModWin, e a  $FRE_b$  de cada banda, para a janela atmosférica de 8 a 12,5 μm.

Em seguida foram realizadas as ponderações da transmitância, radiância ascendente e radiância descendente, pelas FRE das bandas do TIR do HSS. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2. Verifica-se que na região espectral das bandas 41 a 44, ou seja, de 4,050 a 5,425  $\mu\text{m}$ , a radiância medida pelo sensor é muito baixa. Portanto, sofre grande influência da radiância ascendente. Além disso, a transmitância atmosférica é menor que 50%, por causa da influência do vapor d'água. Estes fatores, somados, fazem com que a radiação, principalmente a proveniente da emitância do alvo, captada nestas bandas seja baixa e, conseqüentemente, muito suscetível ao ruído inerente do sistema sensor e à influência da atmosfera. Portanto, as bandas viáveis ao estudo, verificadas por esta avaliação, foram da janela atmosférica de 8 a 12,5 $\mu\text{m}$  (bandas 45 a 50), que são as normalmente utilizadas em estudos termais (PU et al., 2006; CHENG et al., 2007), mesmo em sistemas sensores que possuam bandas na região entre 3,3 e 5,4  $\mu\text{m}$  (SOBRINO et al., 2006; JIMÉNEZ et al., 2007).

Tabela 4.2 - Parâmetros atmosféricos utilizados na correção da imagem TIR.

Banda	Comprimento de Onda Central ( $\mu\text{m}$ )	Rad. Descendente ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$ )	Rad. Ascendente ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$ )	Transmitância
41	4,250	0,122	0,477	0,439
42	4,606	0,212	0,636	0,496
43	4,951	0,320	1,294	0,341
44	5,276	0,438	3,354	0,044
45	8,180	1,574	3,630	0,536
46	8,680	1,682	2,445	0,707
47	9,160	1,756	2,138	0,752
48	9,800	1,812	2,050	0,767
49	10,810	1,821	2,326	0,730
50	12,020	1,736	3,137	0,607

## 4.2 Estimativas da Emissividade e Temperatura pelos Métodos NOR, REF e ALPHA

A partir das imagens em radiância, corrigidas para os efeitos da atmosfera, das bandas 45 a 50, foram obtidas as imagens em emissividade e temperatura pelo método NOR, conforme descrito na seção 3.2.2 e 2.2 (Figura 4.6).

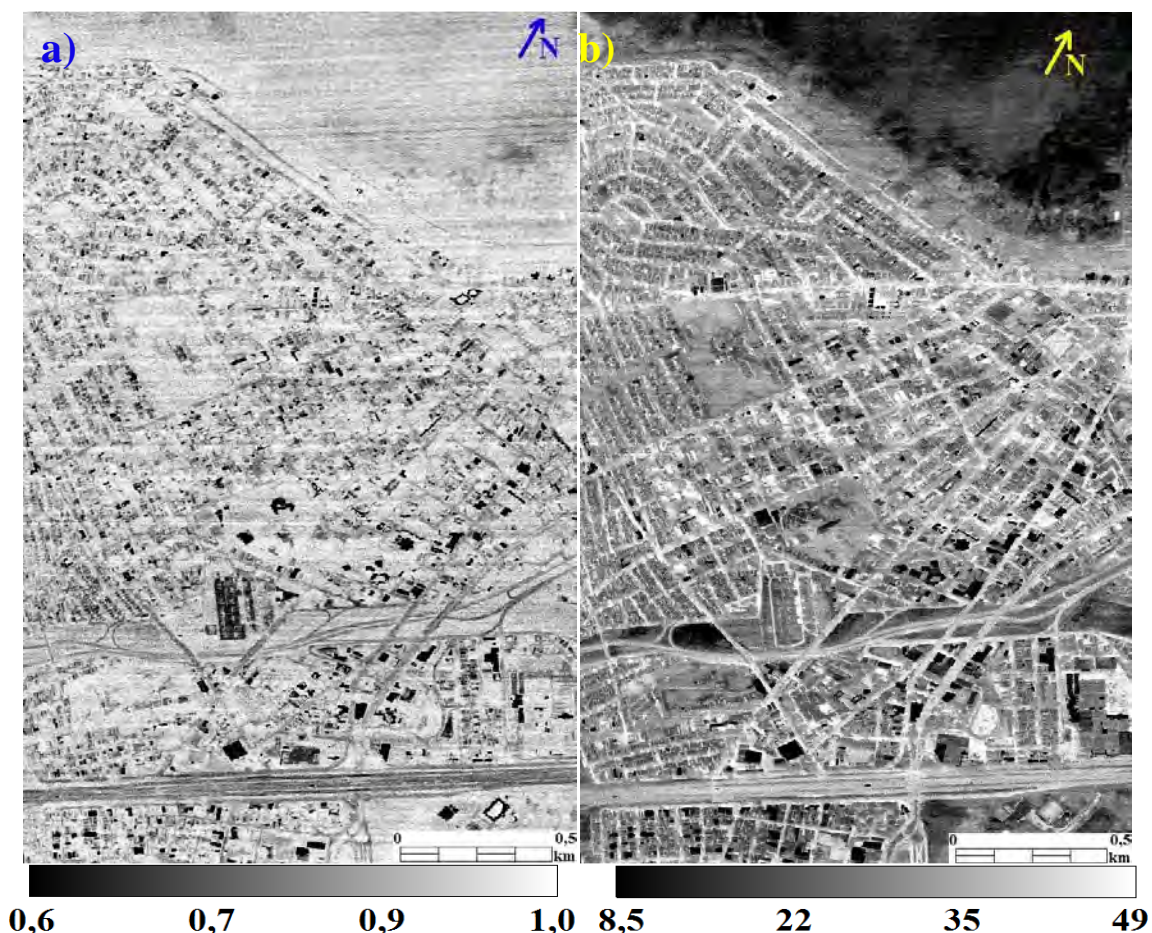


Figura 4.6 - Imagens de emissividade e temperatura de superfície, obtidas pelo método NOR. Em a) Imagem da emissividade para a banda 47. Conforme o tom de cinza fica mais claro, mais próxima de 1 é a emissividade do material; b) Imagem de temperatura de superfície em graus Celsius. Conforme o tom de cinza fica mais claro maior a temperatura.

Conforme descrito anteriormente na seção 3.3, para avaliar o comportamento da emissividade espectral, obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA, foram selecionados 265 pixels para alguns materiais típicos/interesse: vegetação, asfalto, cerâmica vermelha, fibrocimento, aço galvanizado (aspecto acinzentado devido à exposição ao tempo) e concreto. Assim, devido ao número de pixels extraídos para cada um dos

materiais, calculou-se a média e o desvio padrão da média,  $\sigma_m$ , da emissividade em cada banda. Os resultados obtidos para a emissividade espectral dos materiais selecionados podem ser observados nas Figuras 4.7 e 4.8. No geral, as formas dos espectros de emissividade dos mesmos materiais, obtidas pelos 3 métodos, foram semelhantes. É conveniente lembrar que somente podemos comparar a forma dos espectros, visto que os métodos utilizados estimam a emissividade relativa, ou seja, é obtida em relação a uma emissividade de referência que pode ser definida pelo usuário para os métodos NOR e REF. Para o ALPHA, obtém-se um valor que não é a emissividade relativa e sim a forma do espectro.

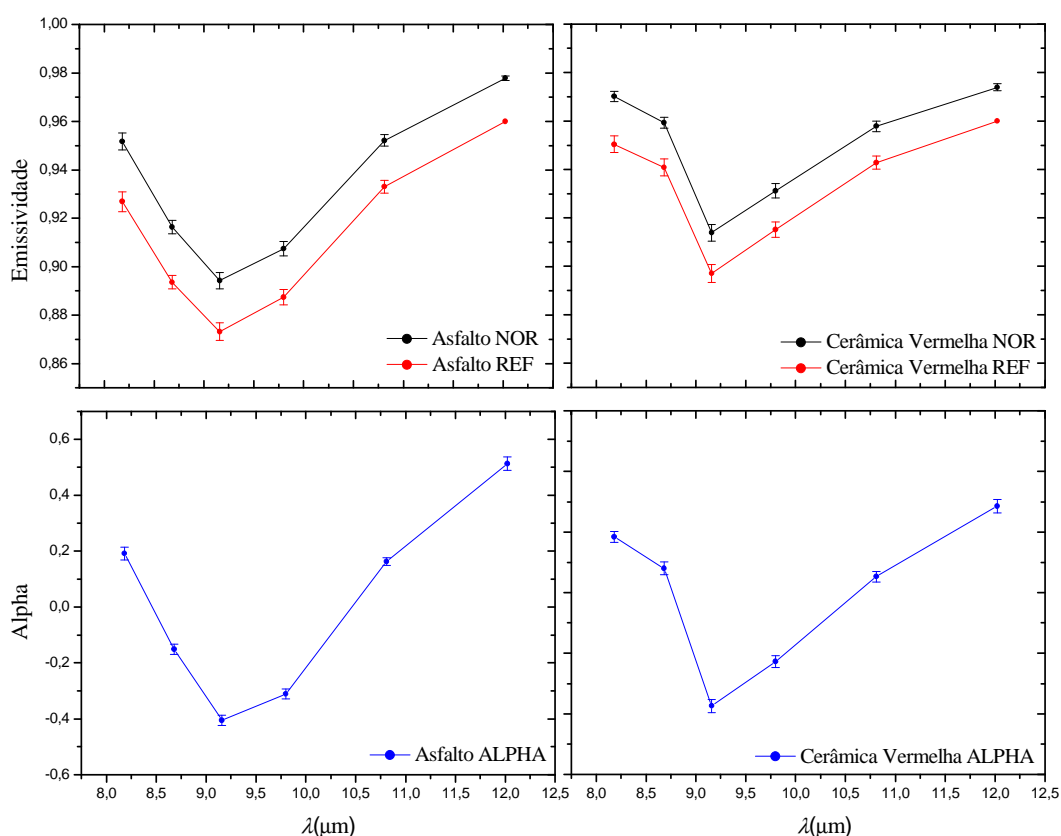


Figura 4.7 - Emissividade espectral de alguns materiais presentes na área de estudo obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA. Os símbolos representam os centros das bandas TIR (45 a 50) do HSS.

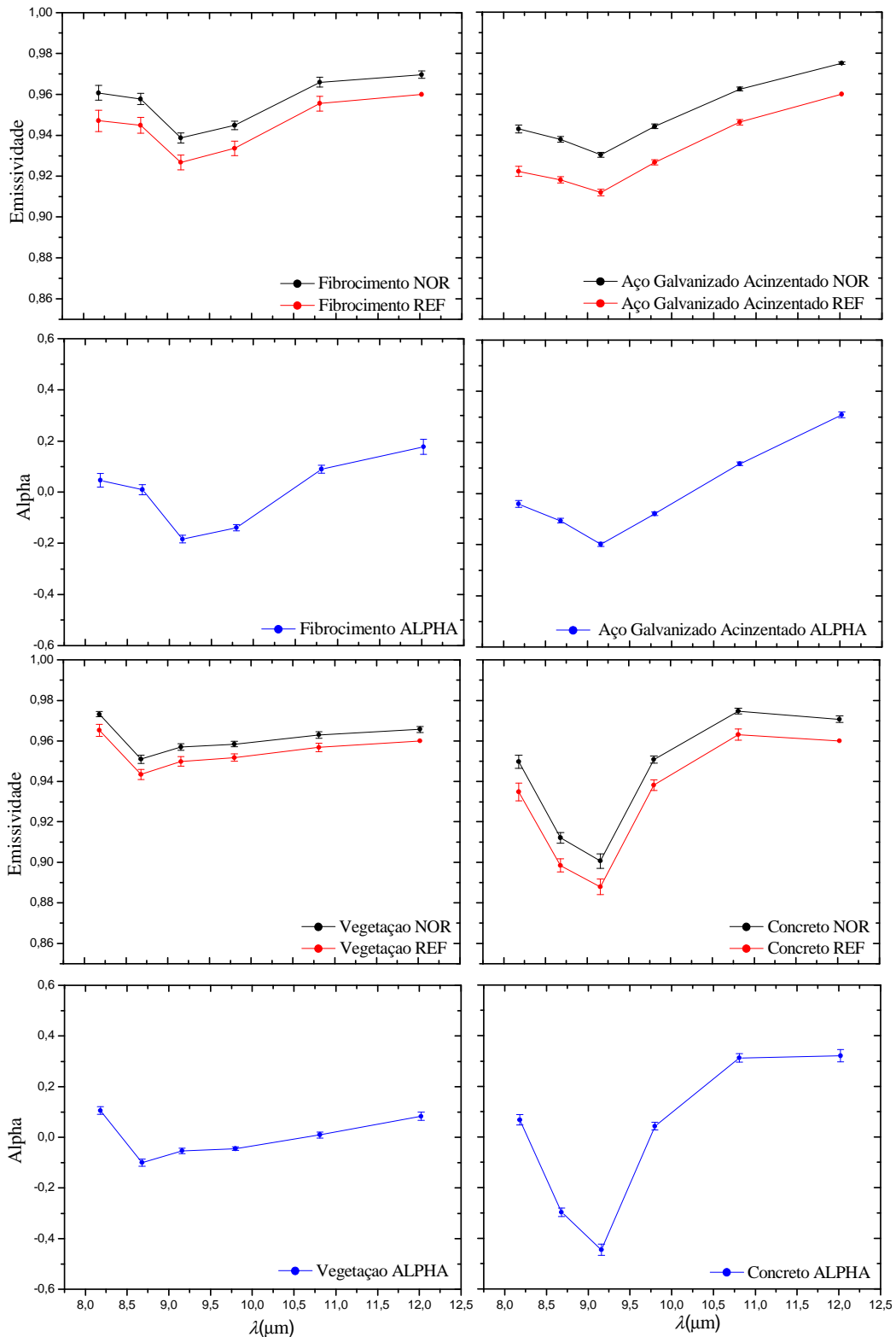


Figura 4.7 - Emissividade espectral de alguns materiais presentes na área de estudo obtida pelos métodos NOR, REF e ALPHA (continuação). Os símbolos representam os centros das bandas TIR (45 a 50) do HSS.

Também foi realizada uma comparação por meio da diferença entre as temperaturas obtidas pelos métodos NOR e REF. Para tal, foram selecionados os mesmos 265 pixels utilizados no estudo da emissividade, e determinada a média da temperatura, o desvio padrão,  $\sigma$ , e o desvio padrão da média,  $\sigma_m$ , devido ao número de pixels extraídos para cada um dos materiais de interesse. Os resultados obtidos para a temperatura de superfície dos materiais selecionados podem ser observados na Tabela 4.3. Verificou-se que a temperatura obtida pelo método NOR esteve sempre abaixo da temperatura estimada pelo método REF, possivelmente devido à simplificação que cada método faz em relação à emissividade inicial. Ao comparar os métodos NOR e REF, Kealy e Hook (1993) observaram que o NOR possui maior exatidão para estimar a temperatura do que o REF, porque as diferenças na emissividade dos materiais terrestres introduzem erros na estimativa da temperatura da superfície.

Tabela 4.3 - Comparação entre a temperatura estimada pelo método NOR e pelo método REF para alguns materiais presentes na área de estudo.

Materiais	Temperatura (°C)					
	Método NOR			Método REF		
	Média	$\sigma$	$\sigma_m$	Média	$\sigma$	$\sigma_m$
Asfalto	21,00	1,81	0,08	22,19	1,73	0,08
Concreto	23,40	1,34	0,08	23,92	1,48	0,08
Cerâmica Vermelha	13,77	1,23	0,07	14,38	1,23	0,07
Fibrocimento	15,52	1,04	0,05	16,25	1,19	0,05
Aço Galvanizado Acinzentado	12,41	1,37	0,09	13,46	1,36	0,09
Vegetação Arbórea	17,63	1,74	0,08	18,22	1,90	0,08
Vegetação Rasteira	15,10	2,49	0,10	15,86	2,52	0,11

Assim, foi observado que o material concreto foi o material mais quente encontrado na área de estudo, com uma temperatura média de 23,40 °C um desvio padrão de 1,34 °C, com isto o desvio padrão da média foi de 0,08 °C, fornecendo uma incerteza final de 0,5 °C (Equação 3.1), seguido do asfalto que apresentou uma temperatura média de 21,00 °C e desvio padrão de 1,81 °C. O material mais frio foi o aço galvanizado acinzentado com uma temperatura média de 12,41 °C um desvio padrão de 1,37 °C,

possivelmente devido à sua baixa emissividade e por dispersar o calor mais facilmente devido ao seu calor específico. Dentre os materiais naturais, a vegetação rasteira apresentou o menor valor médio de 15,10 °C e desvio padrão 2,49 °C, (Tabela 4.3), provavelmente devido ao solo úmido da região da concha do Banhado do Rio Paraíba do Sul presente na composição do pixel referente ao material vegetação rasteira.

Além disto, materiais metálicos polidos presentes na imagem, cujas emissividades são muito menores do que a emissividade do corpo negro, ou seja, muito abaixo de 1, com uma temperatura termodinâmica baixa, corresponderam aos pixels mais escuros da imagem emissividade, porque os métodos ajustam estes pixels extrapolados para a menor emissividade estimada. Entretanto, este dado não é correto e deve ser desprezado. O mesmo ocorre com a temperatura termodinâmica estimada para estes materiais, uma vez que a emissividade é muito baixa e a temperatura determinada pelos métodos é ajustada para a temperatura mínima. Embora, na imagem em radiância estes materiais apresentem valor de *ND's* como sendo zero, os métodos de estimativa da emissividade e temperatura consideram este dado como útil, porque ele faz parte da imagem. Ambos os casos podem ser observado na Figura 4.6, sendo que os pixels pretos da imagem em emissividade correspondem aos pixels em azul da imagem em temperatura termodinâmica. Assim, materiais como telhados metálicos sem pintura, foram descartados na análise dos resultados obtidos de emissividade e temperatura.

#### 4.3 Análise Qualitativa e Quantitativa da Separabilidade dos Materiais com Reflectância e Emissividade da Superfície

##### 4.3.1 Reflectância da Superfície

Espectros de reflectância da superfície de vários materiais de interesse, obtidos a partir do imageamento diurno do HSS, são mostrados na Figura 4.9. Nesta figura, pode ser observado que as curvas referentes ao aço galvanizado acinzentado, o asfalto e o fibrocimento não apresentam, em geral, feições destacáveis de absorção, entre si, mas se separam dos demais materiais devido à baixa reflectância no VNIR-SWIR. Tanto a vegetação arbórea quanto a vegetação rasteira se destacam dos demais materiais, devido

à sua reflectância espectral característica no VNIR, ou seja, com feições de absorção da radiação nas regiões do azul e do vermelho, além da intensa reflexão na região do infravermelho próximo. A cerâmica e o solo claro se destacam pela feição de absorção na região do azul, o rápido aumento da reflectância que se inicia na região do verde até o infravermelho próximo, além da alta reflexão no SWIR, sendo maior para o material cerâmico. Finalmente, o material concreto se destaca pela grande inclinação da curva espectral na região do visível, o que caracteriza sua cor acinzentada branca, e boa reflexão no SWIR.

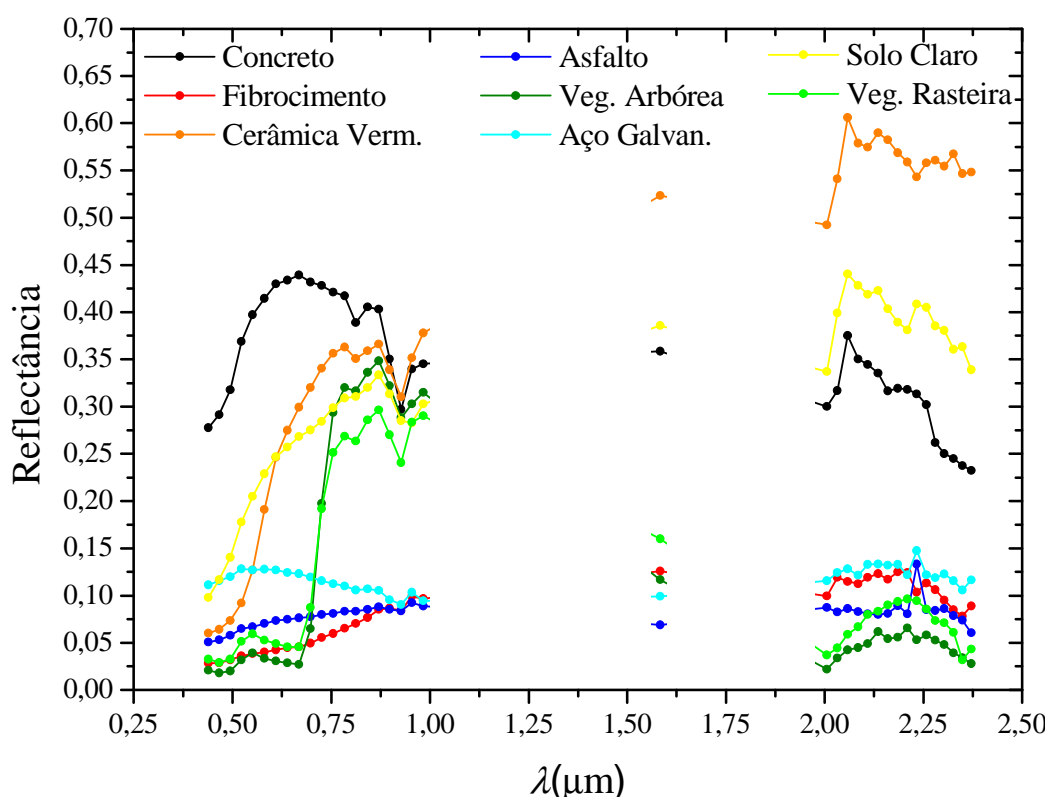


Figura 4.8 - Reflectância espectral dos principais materiais presentes na área de estudo. Os símbolos representam os centros das bandas VNIR-SWIR do HSS.

Na Análise por Componentes Principais (ACP) dos espectros de reflectância, verificou-se que CP1, CP2 e CP3 foram as componentes que apresentaram autovalores maiores que 1 e 97,55% da variação total dos dados. A CP1, CP2 e CP3 representaram 71,35, 16,35 e 9,85% da variância, respectivamente, concentrando a maior parte da informação relacionada com as diferenças espectrais entre os materiais.



Também foram analisados os dados da matriz de autovetores, visando identificar o intervalo espectral que teve maior contribuição/importância para cada componente principal do espectro refletido. Assim, como pode ser observado na Figura 4.9, verificou-se que a CP1 está relacionada com o brilho/albedo ou reflectância média dos materiais. A CP2 destacou o contraste entre o NIR (fator de peso positivo) e o SWIR (fator de peso negativo), reproduzindo aproximadamente o espectro da vegetação verde. A para a CP3, realça a declividade dos espectros na faixa do VIS com fatores de peso positivo dos demais (NIR, SWIR) com fator de peso negativo.

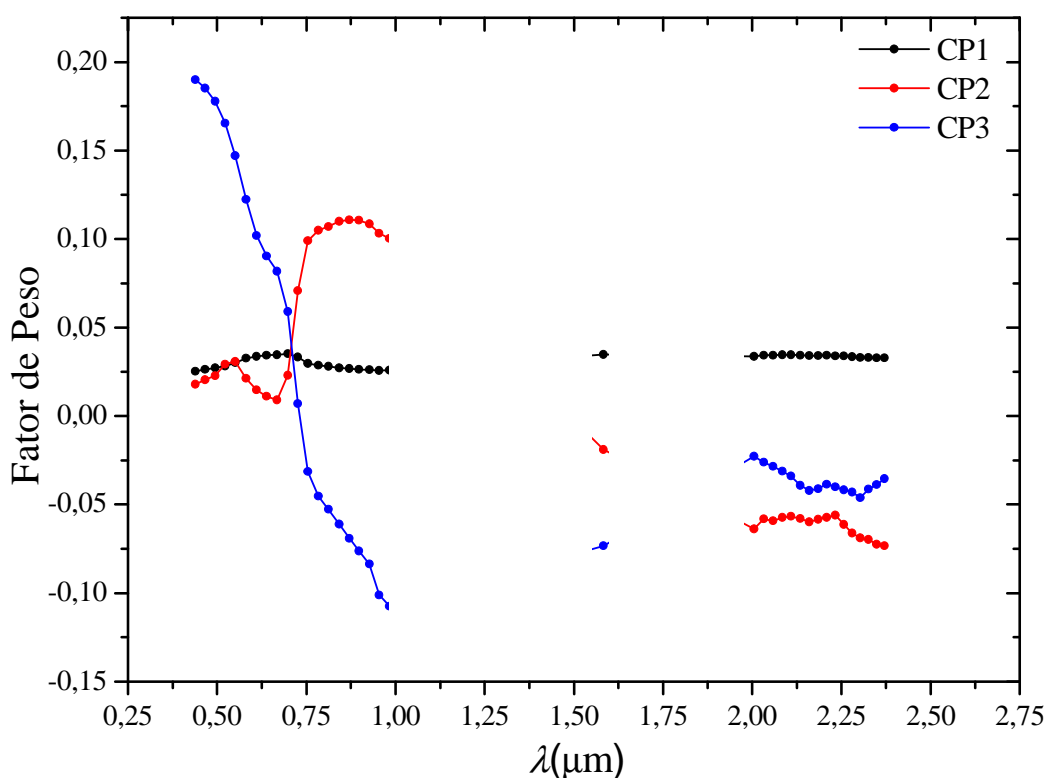


Figura 4.9 - Fatores de peso das primeiras três componentes principais resultantes da aplicação de ACP aos espectros de reflectância.

Na Figura 4.10a, é apresentada a relação entre os escores CP1 e CP2. Observou-se que a CP1 destacou os materiais de baixa reflectância (como por exemplo, o asfalto no lado esquerdo do diagrama) e de alta reflectância (como por exemplo, o solo claro e a cerâmica, no lado direito). A segunda componente destacou a vegetação verde e o concreto, ambos no topo de eixo dos demais materiais, ou seja, espectros com declividade descendente do NIR para o SWIR. Na Figura 4.10b, a CP3 destacou o

concreto, localizado no topo do diagrama, dos demais materiais. Portanto, a separação do material concreto foi evidente em todas as combinações das componentes principais. Isto se deve ao fato de que o concreto apresentou alto brilho ou altos valores de reflectância tanto no VNIR quanto no SWIR. O material cerâmico foi mais bem destacado pela combinação da CP1 e CP3, devido ao brilho e uma maior reflectância na região do vermelho e do NIR, além da alta reflectância no SWIR, regiões espectrais que têm relação inversa com a CP3.

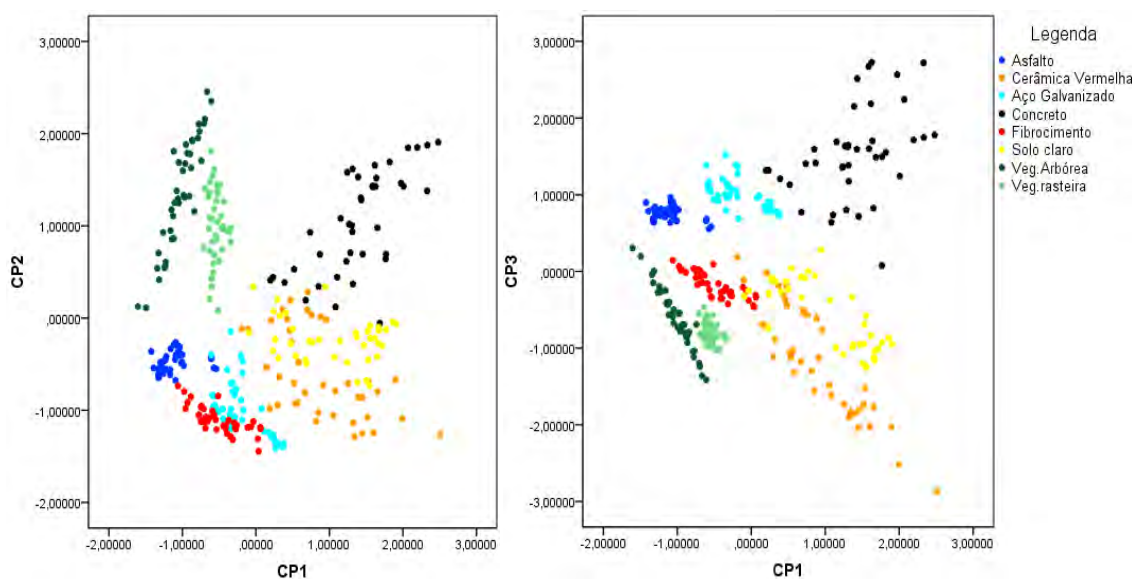


Figura 4.10 - Diagrama de Dispersão dos escores componentes principais para dados de reflectância.

#### 4.3.2 Emissividade da Superfície

A emissividade espectral dos principais materiais da área de estudo, obtida pelo método NOR, é mostrada na Figura 4.11. Dois grupos distintos de materiais são evidentes: um composto pelos materiais solo claro, cerâmico e asfalto cujos valores mínimos de emissividade ocorrem em 9,16  $\mu\text{m}$  (banda 47 do HSS) e outro composto pelos demais materiais, sem feições tão bem destacadas de emissividade.

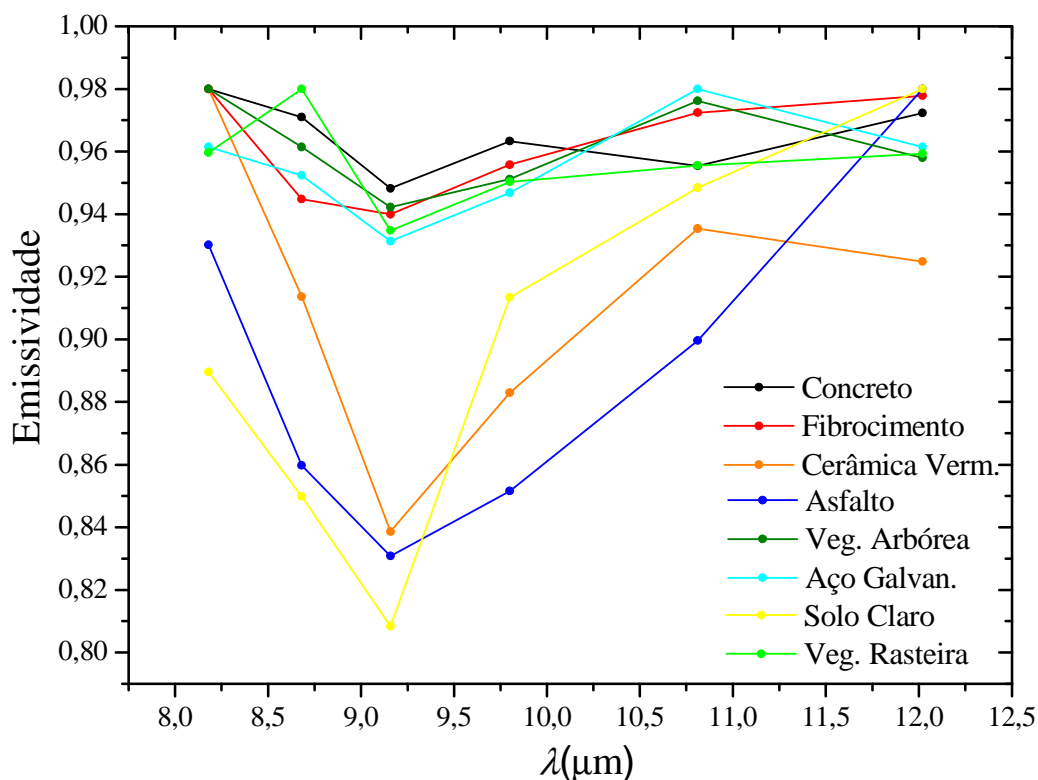


Figura 4.11 - Emissividade espectral dos principais materiais presentes na área de estudo obtida pelo método NOR.

Na ACP dos espectros de emissividade, foram extraídas apenas duas componentes principais com autovalores maiores que 1. As componentes principais CP1 e CP2 juntas representaram 70,62% da variação total dos dados, sendo que CP1 descreveu 51,13%, enquanto CP2 representou 19,49% desta variação. Os fatores de peso para CP1 diminuíram gradativamente com o aumento do comprimento de onda (Figura 4.12). A CP2 destacou as diferenças de emissividade entre o comprimento de onda de 8 a 9μm (B45 e 46) e de 11 a 12μm (B49 e 50).

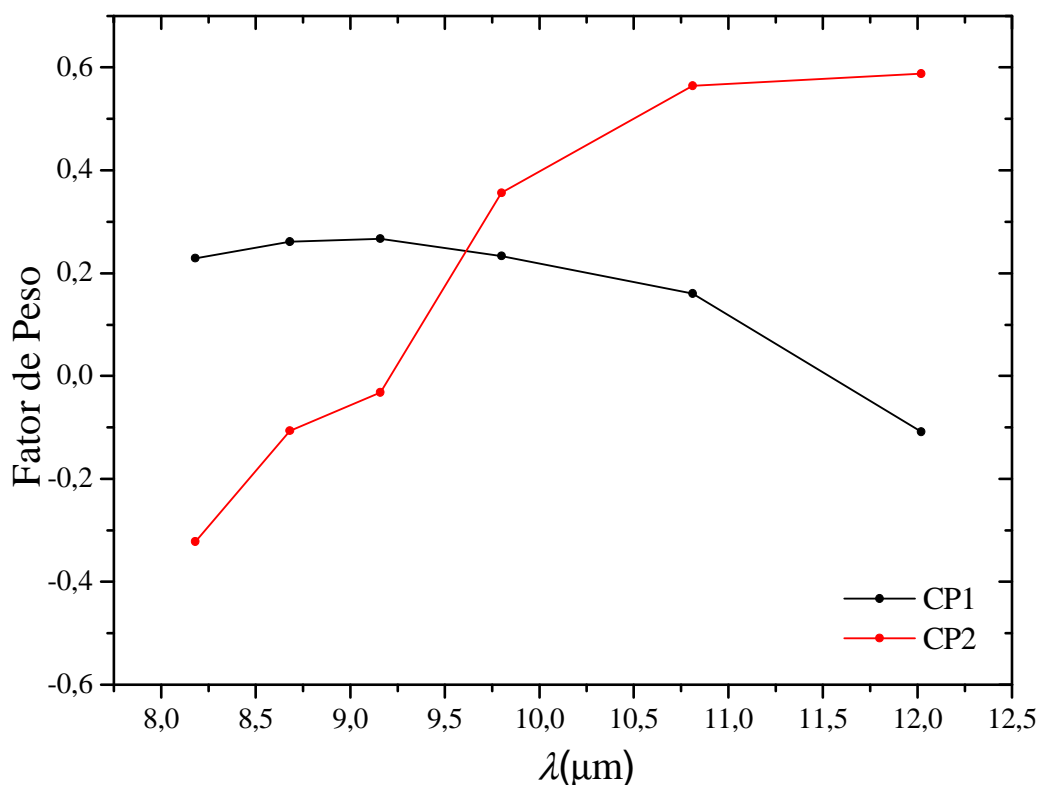


Figura 4.12 - Fatores de peso das primeiras duas componentes, resultantes da aplicação de ACP sobre os espectros de emissividade.

No diagrama de dispersão de escores componentes principais da Figura 4.8, verificou-se que a CP1 separou os materiais de alta emissividade dos materiais de baixa emissividade. A CP2 destacou o solo exposto claro dos demais materiais, devido ao contraste entre as bandas 45 e 50, ou seja, apresentou baixa emissividade relativa nas três primeiras bandas do espectro emitido, sendo que nestas bandas a CP2 apresentou forte contribuição negativa, e no intervalo espectral de 9,4 a 12,59  $\mu\text{m}$  (bandas 48 a 50), estes materiais apresentaram alta emissividade relativa e a CP2 uma contribuição positiva deste intervalo. Os materiais asfalto, cerâmica e solo claro, apresentaram uma forte feição de emissividade na banda 47, com centro em 9,16  $\mu\text{m}$ .

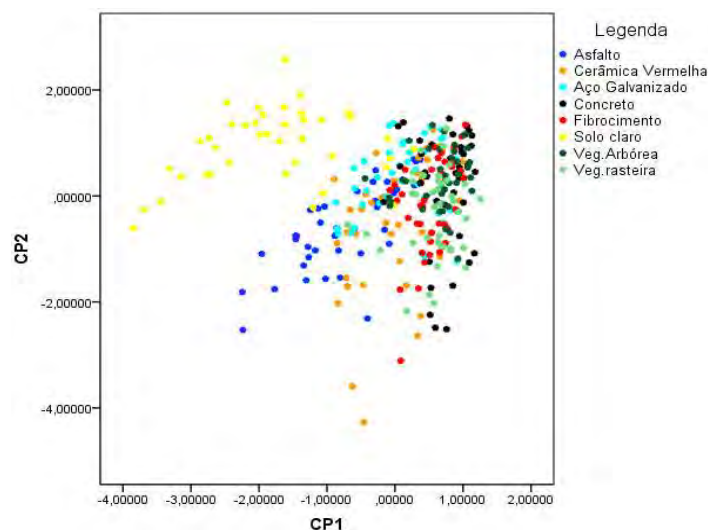


Figura 4.13 - Diagrama de Dispersão dos escores componentes principais para dados de emissividade espectral.

#### 4.3.3 Combinação de Dados de Reflectância e Emissividade

Comparando qualitativamente a reflectância e a emissividade dos materiais estudados (Figuras 4.3 e 4.6), foi observado que o material asfalto, embora não tendo uma feição de absorção no espectro refletido, apresentou uma forte feição de emissividade na banda 47 (9,16  $\mu\text{m}$ ). Para o fibrocimento, embora não tão evidentes, é possível verificar a presença de feições de emissividade que abrangem duas bandas do HSS (46 e 47), posicionadas em 8,68  $\mu\text{m}$  e 9,16  $\mu\text{m}$ . Portanto, foi evidenciada a importância de uma análise combinada para materiais que inicialmente não apresentaram boa separabilidade devido à falta de feições de absorção no espectro refletido, mas que podem ter feições bem definidas no espectro emitido.

De maneira geral, ao avaliar os resultados das componentes principais, foi observado que, com exceção do material cerâmico que se destacou em ambos os intervalos espectrais, a maioria dos materiais destacados pelas componentes principais do espectro refletido era diferente dos materiais destacados pelas componentes principais do espectro emitido, evidenciando a importância do uso combinado da reflectância e da emissividade no estudo dos materiais presentes numa área urbana.

## 4.4 Modelo de Mistura Espectral e Temperatura

### 4.4.1 Seleção dos Membros de Referência e Obtenção das Imagens-Fração

Conforme mencionado na seção 3.5, a seleção dos membros de referência para o modelo de mistura espectral foi feita a partir da aplicação das técnicas MNF (*Minimum Noise Fraction*), PPI (*Pixel Purity Index*) e visualizador  $n$ -dimensional de pixels, utilizando o ENVI 4.2. Os resultados obtidos pela utilização da técnica transformação MNF sobre os dados de reflectância das 37 bandas (VNIR e SWIR), decorrelacionando os dados da imagem diurna, foram autovalores mais elevados nas 13 primeiras componentes MNF, responsáveis por 96,57% da variância dos dados, as quais tiveram a melhor qualidade visual (Figura 4.14). A banda MNF14 apresentou baixa qualidade visual, com forte presença de ruído, sendo que o mesmo ocorreu com as bandas seguintes a esta (MNF 15 a 37).

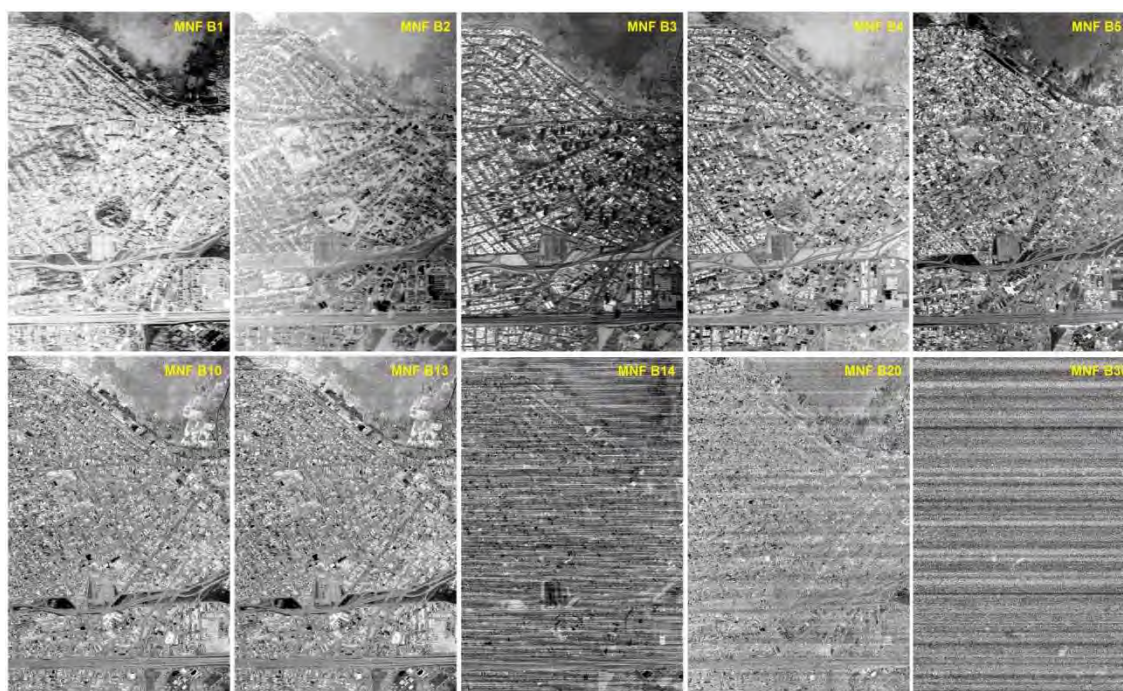


Figura 4.14 - Transformação MNF aplicada sobre os valores de reflectância de superfície das 37 bandas do sensor HSS, na região do VNIR e SWIR. Da esquerda para direita, estão dispostas as seguintes componentes MNF: 1; 2; 3; 4; 5; 10; 13; 14; 20 e 30.

A técnica índice de pureza de pixel (PPI) foi aplicada sobre as 13 primeiras bandas MNF, que representaram a parte coerente da imagem (desprovida de ruído), para detecção dos pixels candidatos a membros de referência. Foram realizadas 20.000 iterações, com limiar de pureza de 2. Ao final, 11.475 pixels foram apontados como candidatos a membros de referência, representando 1,73 % dos pixels da imagem, Observando a distribuição destes pixels no visualizador  $n$ -dimensional foram selecionados os membros de referência (Figura 4.15).

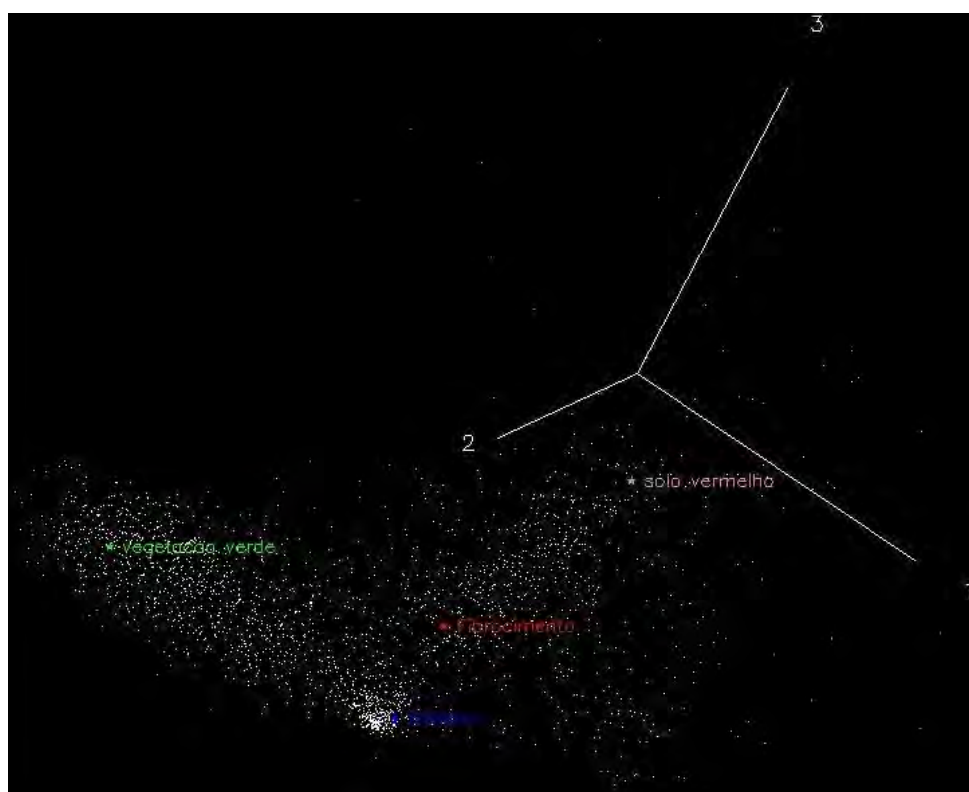


Figura 4.15 - Projeção dos pixels selecionados candidatos a membros de referência pela técnica PPI, no visualizador  $n$ -dimensional, cujos eixos no espaço de atributos são as bandas MNF 1, 2 e 3, para as quatro classes de materiais: sombra, vegetação verde, solo e superfície impermeável.

Assim, quatro conjuntos de pixels, correspondentes às classes vegetação verde, superfície impermeável (fibrocimento), solo e sombra, foram selecionados e considerados como membros de referência (Figura 4.16).



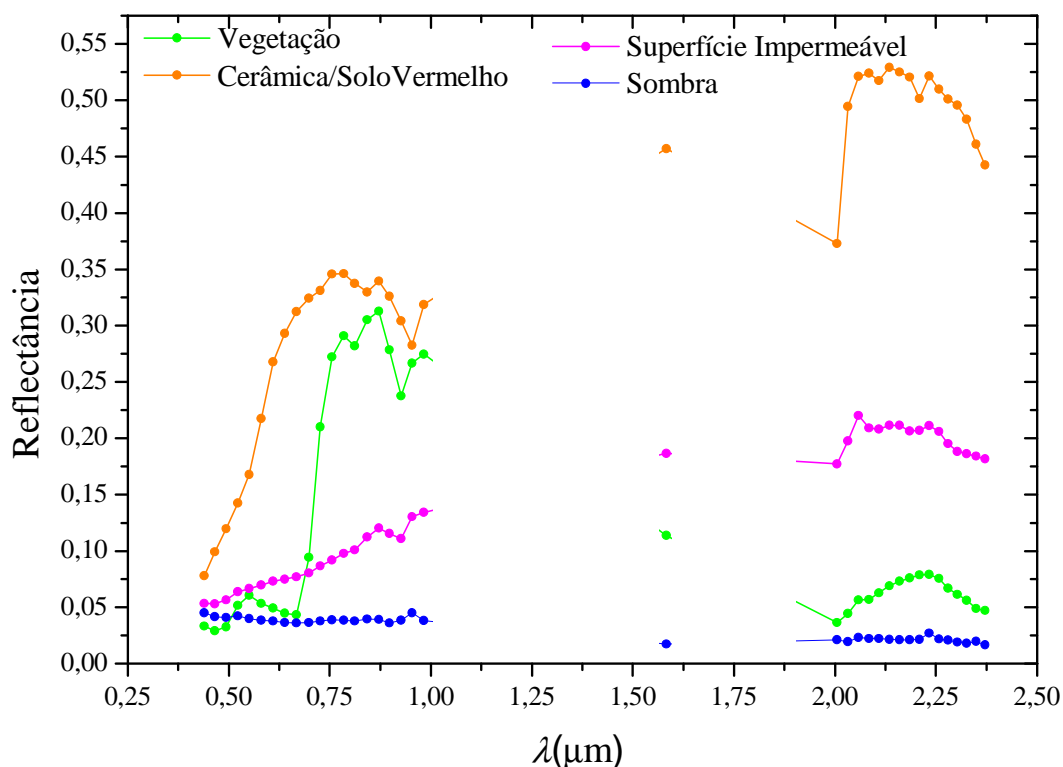


Figura 4.16 - Reflectância espectral dos membros de referência selecionados no visualizador n-dimensional para aplicação no modelo de mistura.

Uma vez selecionados os membros de referência, foi realizada a modelagem da mistura dos materiais utilizando a Análise de Mistura Espectral (*Spectral Mixture Analysis - SMA*). O resultado desta modelagem foram imagens-fração geradas para cada membro de referência, sendo que cada pixel da imagem contém informações sobre a proporção e a resposta espectral de cada membro (Figura 4.17). Uma imagem erro residual também foi gerada.

Assim, ao analisar as imagens-fração, verificou-se que a fração vegetação verde apresentou melhor resultado devido às características do espectro da vegetação que facilita sua distinção dos demais espectros (Figura 4.17c). A vegetação rasteira apresentou maiores valores de fração, provavelmente devido ao maior brilho do pixel para este tipo de vegetação, uma vez que a vegetação arbórea apresenta em seu interior áreas sombreadas devido às características deste tipo de vegetação como galhos mais altos que outros e posição das folhas no dossel, enquanto que uma vegetação rasteira é mais homogênea e menos sombreada.



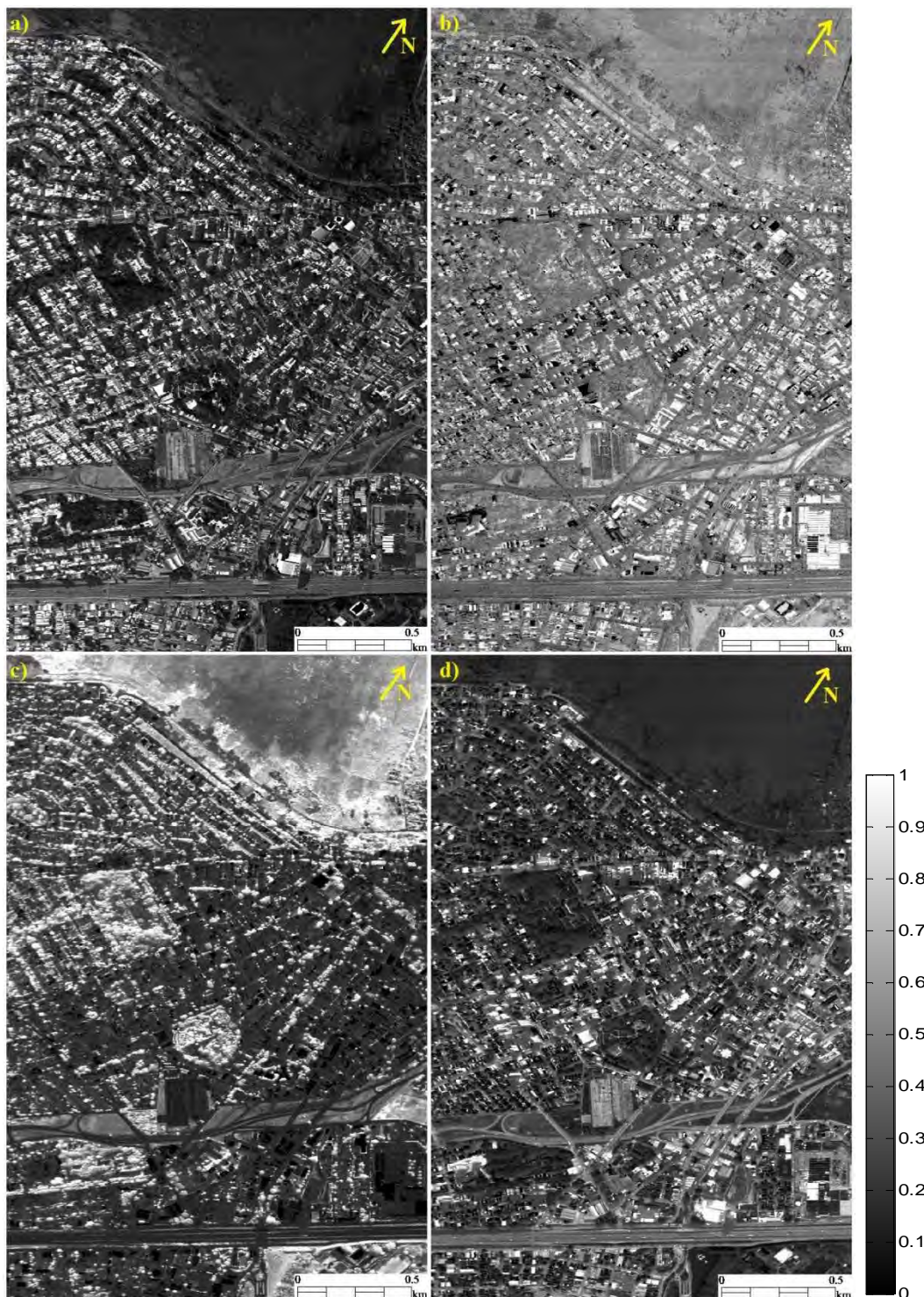


Figura 4.17 - Imagens-fração resultantes do modelo linear de mistura espectral aplicado à imagem diurna para as 37 bandas do espectro refletido do sensor HSS. Em a) solo; b) superfície impermeável; c) vegetação verde; e d) sombra. Conforme os níveis de cinza ficam mais claros, maior é a proporção do membro de referência referente à imagem-fração na composição do pixel.

A fração solo também apresentou bons resultados ao considerar como parte desta fração as telhas de cerâmicas, muito comuns em áreas residenciais (Figura 4.17a). Porém, esta fração modelou como solo o concreto das fachadas de prédios, muito provavelmente devido às características espectrais destes materiais e ao maior erro residual neste caso. A fração superfície impermeável modelou de forma bem coerente o material fibrocimento, caracterizando as áreas comerciais da área de estudo (Figura 4.17b).

Embora o membro de referência sombra tenha sido utilizado para modelar a variação de iluminação na imagem, ou seja, um pixel com reflectância muito baixa, as áreas sombreadas na imagem não apresentaram tão baixa reflectância quanto o material asfalto ao longo do espectro VNIR-SWIR. Isto possibilitou identificar a proporção do material asfalto presente na área de estudo, referente, principalmente, ao arruamento, porque os maiores valores de níveis de cinza presentes na imagem-fração sombra se referem a este material (Figura 4.17d).

Ao analisar o desempenho do modelo de mistura utilizando a imagem erro residual, verificou-se que mais de 95% dos pixels apresentaram erro menor que 0,017 em unidades de reflectância. Os maiores erros foram associados às superfícies brilhantes da imagem como o concreto claro e telhado metálico pintado de branco, como pode ser observado na Figura 4.18, além da variação entre as características espectrais dos materiais impermeáveis considerados semelhantes.



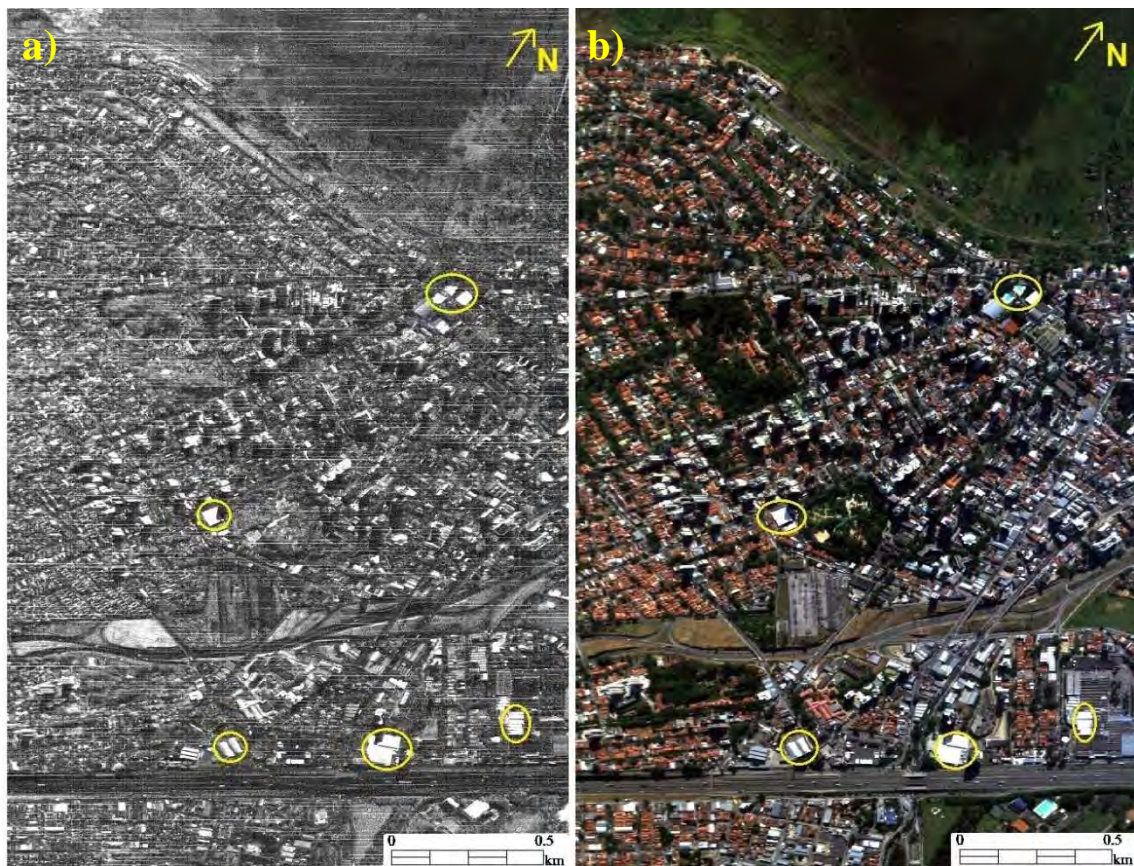


Figura 4.18 – Em a) Imagem RMSE do modelo de mistura espectral, mostrando os materiais que apresentaram maior erro residual (pixels mais claros); Em b) sua posição equivalente na composição colorida com as bandas 8 (R), 5 (G) e 2 (B) do HSS.

Para melhor visualização dos resultados do modelo de mistura, foram obtidas composições RGB das imagens-fração (vegetação verde, superfície impermeável, solo, e sombra, Figuras 4.19a e 4.19b) e uma composição RGB com as bandas 8, 5 e 2 do HSS (Figura 4.19c). Verificou-se que as diferentes combinações de composições RGB não apresentaram cores espectrais puras nem intensamente saturadas, o que pode ser atribuído ao fato do modelo SMA considerar que apenas um conjunto de membros de referência descreve a mistura de todos os pixels da imagem, ou seja, que o pixel contém todos os membros de referência em diferentes proporções, mesmo que não haja um dos membros de referência na sua composição. Somou-se a este, a heterogeneidade da estrutura urbana, a anisotropia dos materiais e a geometria de iluminação e visada.

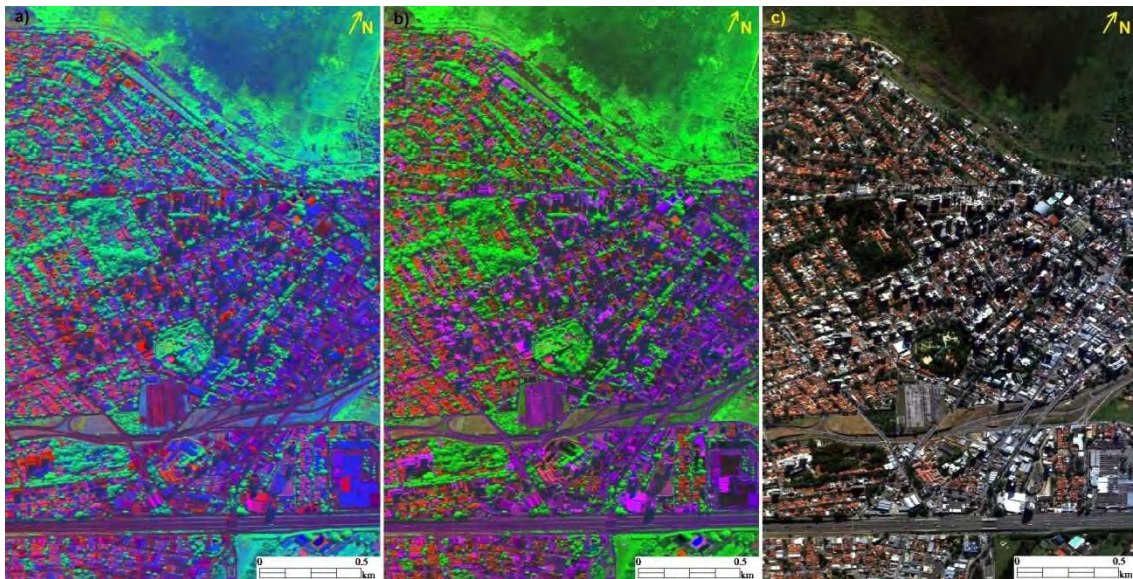


Figura 4.19 – Composição colorida RGB das imagens-fração resultantes do modelo de mistura aplicado à imagem diurna para as 37 bandas do espectro refletido. Em a) composição RGB - fração solo/cerâmica, vegetação verde e superfície impermeável. Em b) composição RGB - fração solo/cerâmica, vegetação verde e sombra. Em c) uma composição RGB - bandas 8, 5 e 2 do HSS.

Verificou-se que a SMA pode ser influenciada pela geometria de iluminação e visada e pela heterogeneidade do membro de referência. Um exemplo disto, é que a mesma vegetação apresentou proporção maior que 100% na sua parte mais iluminada, enquanto que na parte menos iluminada o valor estimado foi entorno de 56%.

#### 4.4.2 Relações entre Imagens-fração e Temperatura da Superfície

Para analisar os dados de temperatura, obtidos a partir de dados de radiância da imagem noturna do sensor HSS por meio do método NOR, e sua relação com o tipo de uso do solo em determinadas porções da área de estudo, foi utilizada a divisão em setores sócio-econômicos. Também foram observadas as características gerais dos setores quanto ao tipo de material predominante e o tipo de construção. Para tal, foram empregadas as bandas 8, 5 e 2 da imagem diurna na composição RGB (Figura 4.20), as imagens-fração obtidas pelo SMA (Figura 4.17) e a imagem de temperatura obtida da imagem noturna pelo método NOR (Figura 4.21).





Figura 4.20 - Imagem em composição colorida RGB (bandas 8, 5 e 2 do HSS) com a delimitação dos subsetores definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.



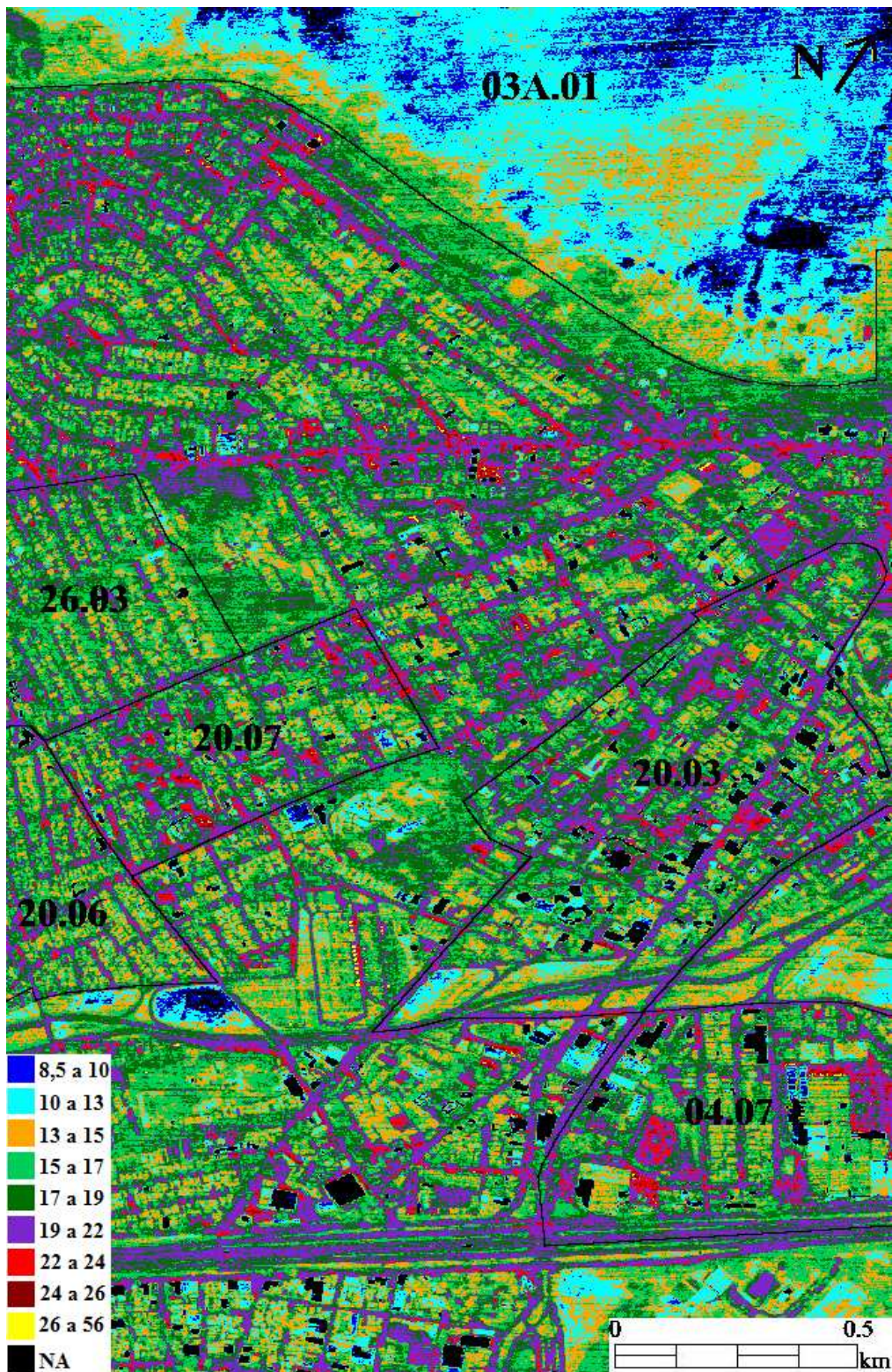


Figura 4.21 – Imagem da temperatura de superfície em graus Celsius, estimada com o método NOR fatiada com a delimitação dos subsetores definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.

Para facilitar a análise da distribuição da temperatura ao longo da área de estudo, foi aplicado um processamento que gerou uma imagem fatiada (Figura 4.21). Por meio desta imagem pode-se observar a diferença de temperatura, de aproximadamente 4,6 °C, entre a área predominantemente urbanizada, com média de 17,3 °C, e a área com cobertura natural preservada, cuja temperatura média é de 12,7 °C. Isto indica que à medida que se substituiu a cobertura natural vegetal por materiais artificiais há um incremento na temperatura local. Esta diferença de temperatura evidencia o fenômeno denominado Ilha de Calor estudado por Andrade et al. (2007) para a cidade de São José dos Campos, cuja diferença encontrada pelos autores foi de 6 a 8 °C no período diurno.

Mesmo tendo observado uma diferença de temperatura entre a vegetação rasteira e a vegetação arbórea (Tabela 4.3), cuja primeira se mostrou mais fria do que a segunda no período noturno, provavelmente devido à geometria do dossel das árvores no favorecimento à retenção de calor, foi possível verificar que as áreas verdes presentes na estrutura urbana apresentam temperaturas muito parecidas com a área vegetada adjacente à área urbana. Isto ratifica a necessidade de áreas verdes inseridas na estrutura urbana, visando amenizar a temperatura e os problemas acarretados por ela.

Na Figura 4.22 é possível observar os principais materiais urbanos e na Figura 4.23, a distribuição da temperatura para uma área com três tipos de ocupação residencial: 1) subsetor 26.03 que é composto pelo bairro Jardim Apolo I, que é voltado à classe média alta e, portanto, definido como residencial horizontal de alto padrão; 2) a parte do subsetor 20.06 estudada foi identificada como residencial de médio padrão e é composta pelo o Jardim Renata, parte do jardim Santa Madalena, do jardim Maringá e da Vila Luiza. Este subsetor apresenta uma densidade de residências maior do que o subsetor 26.03, ou seja, maior ocupação do lote pela residência; e 3) A Vila Jaci representa o subsetor 20.07, uma área residencial que contém uma boa quantidade de prédios, e por isso foi identificada como residencial vertical.

Observou-se que o subsetor 26.03 apresentou maior quantidade de pixels com temperatura entre 15 e 19 °C, devido em parte pela vegetação presente. O subsetor 20.06 continha uma boa quantidade de pixels com temperatura em torno de 13 a 15 °C,



causada pela cobertura de cerâmica das residências. Verificou-se também, que o subsetor 20.07 apresentou maior quantidade de pixels com temperatura de 22 a 24 °C devido ao concreto presente na fachada dos prédios, além de maior quantidade de pixels com temperatura de 19 a 22 °C devido ao concreto e ao asfalto presente no arruamento, em relação aos demais subsetores.



Figura 4.22 – Imagem em composição colorida RGB (bandas 8, 5 e 2 do HSS) com detalhamento dos subsetores residenciais definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.



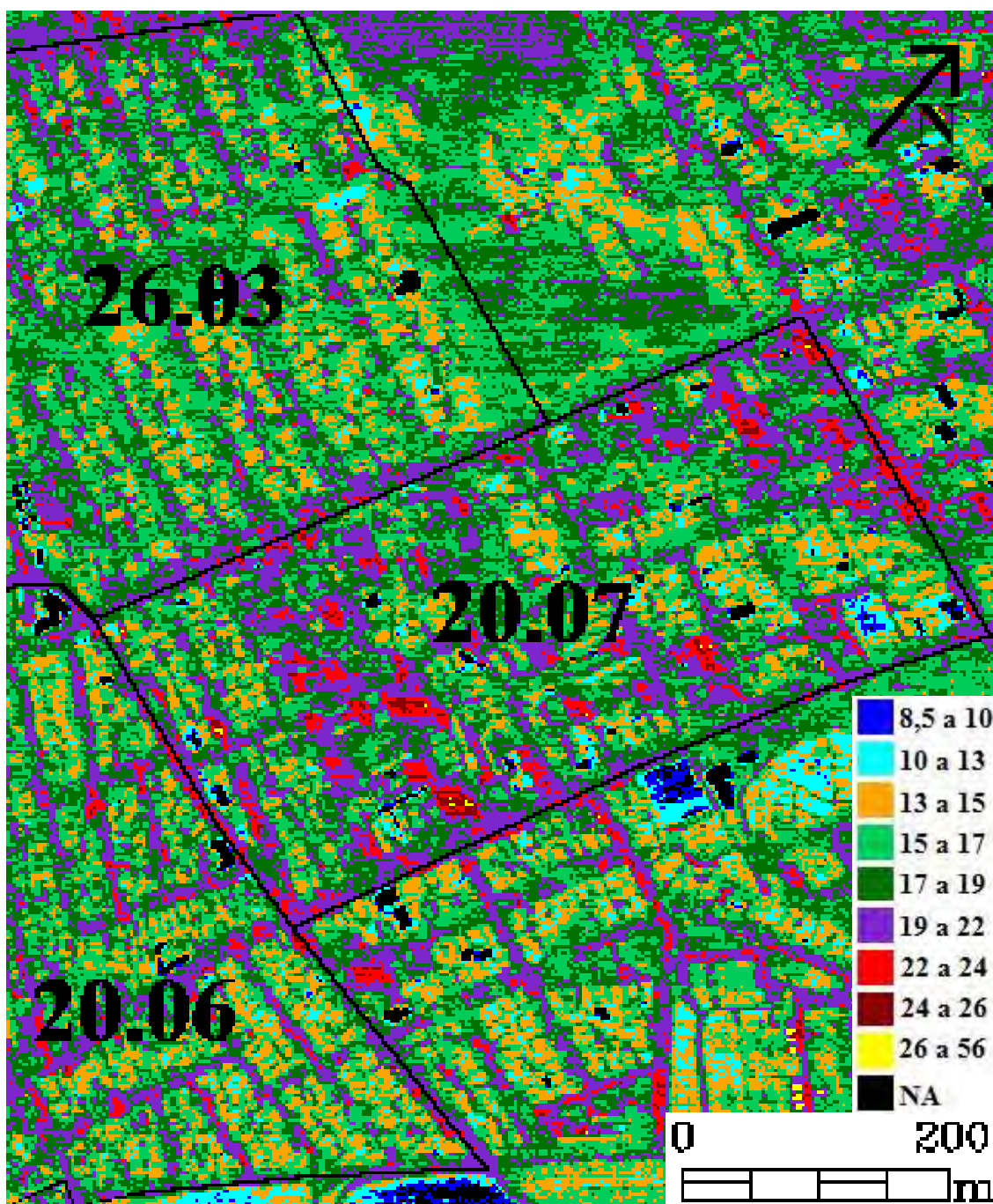


Figura 4.23 – Imagem da temperatura de superfície em graus Celsius, estimada com o método NOR fatiada com detalhamento dos subsetores residenciais definidos como exemplos para avaliação da relação entre a temperatura e os materiais urbanos.

Entretanto, não foi possível realizar uma correlação direta entre as imagens-fração e a temperatura de superfície, por causa da influência da geometria de iluminação e visada nos resultados do modelo de mistura, uma vez que a temperatura não é influenciada por

estes fatores. O resultado foi que pixels que deveriam apresentar a mesma proporção, por serem muito semelhantes, tiveram proporções muito diferentes e a mesma temperatura de superfície.

Em seguida foram inseridos na análise os setores sócio-econômicos, com o intuito de possibilitar uma abordagem voltada ao uso do solo. Desta forma, a Tabela 4.4 foi composta pela média e o desvio padrão da temperatura dos pixels presentes em cada subsetor. Em seguida, os pixels contidos em cada setor foram classificados quanto às frações geradas pelo SMA utilizando os 4 membros de referência. Para tal, o pixel foi classificado como um dado membro de referência quando este o continha em pelo menos 50% deste na sua composição. Os pixels que não se enquadraram nesta condição foram considerados não-classificados, ou seja, não foi identificada uma porção que se destacasse das demais devido à mistura dos materiais. Por fim, foram calculadas as proporções dos 4 membros de referência para cada subsetor.

Deste modo, observando a Tabela 4.4, foi possível verificar que, embora os subsetores predominantemente urbanos tenham apresentado porcentagens diferentes dos materiais vegetação, solo, superfície impermeável e sombra, estes apresentaram, em média, valores de temperatura muito próximos, em torno de 17,3 °C e desvio padrão de 2,6 °C. Dentre estes, o subsetor 26.03 apresentou maior porção de vegetação (33,9%) enquanto a parte do subsetor 20.06 estudada apresentou a maior quantidade de solo (22,7%), presentes no telhado de cerâmica devido à maior taxa de ocupação do lote pela residência. O subsetor 20.07 apresentou 46% da fração sombra, que, neste caso, provavelmente se trata da sombra dos prédios presentes nesta área e arruamento.

O subsetor 04.07 foi identificado como tendo características comerciais, contendo uma grande área contínua de comércio, um shopping. Dentre os subsetores cuja cobertura da superfície é predominantemente de materiais artificiais, este foi o que apresentou maior quantidade de superfície impermeável (26,7%). Este subsetor também apresentou a segunda maior quantidade de pixels não-classificados (23,7%), seguido pelo subsetor 03A.01 (34,5%), devido à grande mistura presente nos pixels. Enquanto o subsetor 20.03, contendo um comércio mais esparsos, apresentou maior quantidade de sombra

(49,7%), devido à presença do asfalto nos pátios de estacionamento e arruamento.

Tabela 4.4 - Relação da temperatura, obtida com as imagens noturnas, e membros de referência, obtidos das imagens-fração estimadas pelo SMA, utilizando as imagens diurnas.

Sub-Setores	Uso do Solo	Temperatura (°C)		Vegetação (%)	Solo (%)	Sup. Imperm. (%)	Sombra (%)	Pixels Não-Classificados (%)
		Média	$\sigma$					
26.03	Residencial Horizontal de alto padrão	17,01	2,21	33,9	11,6	8,4	26,9	19,2
20.06	Residencial Horizontal de médio padrão	17,19	2,50	11,0	22,7	9,3	38,6	18,4
20.07	Residencial Vertical	17,70	2,80	9,7	11,8	12,4	46,5	19,6
04.07	Comercial	17,25	3,35	9,1	7,1	26,7	33,4	23,7
20.03	Comercial Esparso	17,18	2,27	9,9	4,6	23,2	49,7	12,6
03A.01	Área de Preservação Ambiental	12,01	3,27	61,0	0,0	3,6	0,9	34,5

O subsetor 03A.01, que é composto por uma área de preservação ambiental, a concha do Banhado do Rio Paraíba do Sul, apresentou temperatura média bem menor (12,01 °C com desvio padrão de 3,27 °C) do que os demais setores, sendo que fração dominante foi a vegetação (61%), o que ratifica a conclusão de que a vegetação pode contribuir para a diminuição da temperatura intra-urbana. Isto é concordante com o observado por Weng et al. (2004), Lu e Weng (2006) assim como por Small (2006), que identificaram uma forte correlação negativa entre a fração vegetação e a temperatura da superfície. Lombardo (1995) salienta a importância/influência das áreas verdes, ao afirmar que estas áreas têm atuado como moderadoras das temperaturas urbanas, principalmente parques e áreas verdes que ocupam mais que 10% de área residencial.



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho, ao estimar a emissividade e temperatura da superfície de uma área urbana, contribui para o estudo das alterações climáticas do ambiente urbano e dos problemas relacionados à transformação da paisagem. Em linhas gerais, o uso combinado de imagens VNIR, SWIR e TIR, de boa resolução espacial, 2,9 m ao nadir, calibradas, possibilita o uso de dados de emissividade e de reflectância na separabilidade dos componentes de cena. Com os dados de temperatura de superfície, estimadas com a imagem TIR, é possível relacioná-los com a distribuição espacial de materiais selecionados na imagem e com valores de frações determinados por um modelo linear de mistura espectral aplicado sobre as bandas do VNIR-SWIR.

Desta forma, foi obtida pela primeira vez uma imagem em radiância das bandas termais do sensor HSS. Para tal, foi necessário desenvolver uma metodologia de calibração em radiância que pudesse ser aplicada ao Sensor HSS. Além disto, para o processamento das imagens termais foram utilizados métodos para extração da emissividade e temperatura, também inéditas para o sensor HSS. A partir dos resultados obtidos através da metodologia de trabalho, as principais conclusões são descritas abaixo:

(1) Com relação ao desenvolvimento de uma metodologia de calibração de Números Digitais (ND) para valores de radiância e correção atmosférica da imagem HSS TIR, pôde-se concluir que:

(a) para obter as imagens em radiância das bandas termais é necessário realizar uma calibração radiométrica a qual se inicia com a estimativa da existância espectral dos corpos negros de referência e termina com a determinação dos coeficientes de calibração (*ganho* e *offset*) de cada banda. A diferença nos valores de temperatura de superfície encontrada entre esta metodologia e a aplicada pelo programa *AHS Import Utility* aumenta conforme diminui a emissividade dos componentes de cena, uma vez que o programa estima a temperatura de brilho, emissividade igual a 1 para todos os pixels, o que não é real. Portanto, é preciso conhecer o processo de aquisição das imagens termais e as etapas de processamento aplicadas para obter imagens em

grandeza física, seja radiância, temperatura ou emissividade para se utilizar os dados de sensoriamento remoto termal visando evitar erros de análise do objeto de estudo.

(b) para efetuar uma boa correção atmosférica, devem ser somadas às informações contidas no imageamento e conhecimento da área de estudo, o uso de dados de campo, como a umidade relativa obtida por radiossondagem, contribuindo para uma modelagem mais próxima possível da realidade. Uma boa correção atmosférica é muito importante como verificado na região espectral das bandas 41 a 44, ou seja, de 4,050 a 5,425  $\mu\text{m}$ , que sofre grande influência da radiância ascendente e a transmitância atmosférica é menor que 50%, por causa da influência do vapor d'água. Estes fatores, somados, fazem com que a radiação, principalmente a proveniente da emitância do alvo, captada nestas bandas seja baixa e, conseqüentemente, muito suscetível ao ruído inerente do sistema sensor e à influência da atmosfera.

(2) Ao se testar comparativamente os métodos Normalização da Emissividade, Canal de Referência e Emissividade Alpha para estimativa da emissividade relativa e da temperatura dos principais componentes de cena, obteve-se as seguintes conclusões:

(a) os métodos NOR, REF e ALPHA, apresentaram resultados coerentes e muito semelhantes ao estimar a emissividade espectral. Muito embora, não sendo projetados para aplicação em dados de alta resolução espacial e espectral, eles fornecem informações confiáveis sobre a emissividade espectral relativa dos materiais em estudo, mais especificamente em superfícies urbanas. Desta forma, ficou evidente o grande potencial da imagem das bandas do sensor HSS no espectro emitido, que aliada à alta resolução espacial, possibilitou o estudo da emissividade dos materiais urbanos.

(b) ao estimar os valores de temperatura de superfície utilizando os métodos NOR e REF, verificou-se que houve uma diferença na estimativa da temperatura para todos os materiais analisados entre os dois métodos de até 1,2 °C, sendo que a temperatura estimada pelo método NOR foi sempre mais baixa do que a temperatura estimada pelo método REF. Esta diferença ocorreu, provavelmente, por causa da simplificação dos métodos.

(3) Em termos de separabilidade de materiais urbanos específicos com base na análise dos espectros de reflectância (VNIR-SWIR) e emissividade (TIR), observou-se que ao utilizar combinadamente as bandas VNIR-SWIR e TIR da imagem HSS, foi possível separar materiais como o asfalto e o fibrocimento que não possuíam feições de absorção evidentes no VNIR-SWIR dos demais, utilizando feições espectrais evidentes no TIR. Isto aconteceu ao observar o comportamento espectral da reflectância e da emissividade do material, tanto numa análise qualitativa quanto numa análise quantitativa, utilizando o método estatístico, que foi a análise por componentes principais.

(4) Quando dados de temperatura, obtidos pelo método NOR, foram relacionados com as imagens-frações resultantes de um modelo linear de mistura espectral, concluiu-se que a área urbana no geral é mais quente do que a área com cobertura vegetal mais próxima, a concha do Banhado do Rio Paraíba do Sul, em 4,6 °C, evidenciando a modificação causada pela substituição dos materiais naturais pelos artificiais no campo térmico local. Foi verificado que o material concreto quando exposto à insolação durante todo o dia, como na fachada de prédios, apresentou uma das maiores temperaturas encontradas na área de estudo. O asfalto foi o material mais quente em termos de área, e está presente nos arruamentos, estacionamentos e pátios internos de áreas comerciais. Desta forma, observou-se que a substituição dos materiais naturais, vegetação e corpos d'água, por materiais artificiais podem provocar um significativo aumento da temperatura da superfície causando localmente desconforto térmico, como verificado por Lombardo (1995).

Por fim, é preciso ressaltar que alguns tópicos podem ser explorados com maior profundidade em trabalhos futuros, como teste ou o desenvolvimento de novos algoritmos para extração da temperatura e da emissividade, absoluta e relativa, focados em sensores de alta resolução espectral e espacial. Também pode ser testado o uso da análise de mistura espectral de múltiplos membros de referência (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* - MESMA), para estimar a abundância dos principais materiais da área de estudo, uma vez que a análise de mistura espectral usada no presente trabalho tem o inconveniente de considerar que apenas um conjunto de

membros de referência pode descrever a mistura de todos os pixels da imagem. Além disto, múltiplos imageamentos são recomendáveis para avaliar a distribuição da temperatura em uma área de estudo ao longo do tempo, visando subsidiar eventuais intervenções urbanísticas que por ventura possam vir a ser implementadas pelos órgãos competentes.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, P. K.; BERK, A.; ANDERSON, G. P.; LARSEN, N. F.; TSAY, S.; STAMNES, K. H. MODTRAN4: multiple scattering and bi-directional reflectance distribution function (BRDF) upgrades to MODTRAN. In: SPIE OPTICAL SPECTROSCOPIC TECHNIQUES AND INSTRUMENTATION FOR ATMOSPHERIC AND SPACE RESEARCH, 3, 1999, Denver, CO. **Proceedings...** Denver: SPIE, 1999. Disponível em: <[www.spectral.com/sr115.pdf](http://www.spectral.com/sr115.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2010.

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. **Imaging spectroscopy:** interpretation based on spectral mixture analysis. In: PIETERS, C. M.; ENGLERT, P. (Ed.). Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition. New York: Cambridge University Press, 1993. p. 145-166.

ANDRADE, L.L.; SOUZA, L. H.; SAKURAGI, J.; CASTRO, R.M. Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p.473-480. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

ANDRADE, L. L.; CASTRO, R. M. GALVÃO, L. S. Conversão dos ND's em radiância e temperatura de imagem de sensoriamento remoto termal. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO IEAv - SICI, 4, 2010, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: IEAv, 2010, v.1, p. 95-96.

BAILEY, T. C.; GATRELL, A.C. **Interactive spatial data analysis.** Essex: Longman Scientific, 1996, 432p.

BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A.; GREEN, R.O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, 5, 1995, Pasadena. **Proceedings...** California: JPL Publication, 1995, p. 95-1. Disponível em: <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/33635/1/94-1613.pdf> Acesso em: 18 jan. 2010.

BOREL, C. Error analysis for a temperature and emissivity retrieval algorithm for hyperspectral imaging data. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, n.17-18, p.5029-5045, 2008.

CASELLES, V.; COLL, C.; RUBIO, E.; VALOR, E.; SOSPEDRA, F. Medida de la temperatura y la emisividad con datos multiespectrales del sensor DAIS. In.: CONGRESSO NACIONAL DE TELEDETECCIÓN, 10, 1999, Albacete. **Proceedings...** Espanha: Teledetección: Avances y Aplicaciones, 1999, p.343-346.

CASTRO, R.M.; MOREIRA, R.C.; ESPOSITO, E.S.C.; LUCCA, E.V.D. Avaliação do ruído em sensores eletroópticos: abordagem da imagem escura no HSS. In.: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p. 355-362. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.

CASTRO, R.M.; MOREIRA, R.C.; ESPOSITO, E.S.C. Avaliação em laboratório do sensor HSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6443-6448. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7.

CHENG, J.; XIAO, Q.; LI, X.; LUI, Q.; DU, Y.; NIE, A. Evaluation of five algorithms for extracting soil emissivity from hyperspectral FTIR data. In. IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM - IGARSS, 2007, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: IEEE International, 2007, p. 3146-3149. ISBN 978-1-4244-1211-2.

CONWAY, T. J.; TANS, P. P.; WATERMAN, L. S.; THONING, K. W.; KITZIS, D.; MASARIE, K. A.; ZHANG, N. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory Global Air Sampling Network, **Journal of Geophysical Research-Atmospheres**, v.99 n.D11, p.22831-22855, 1994.

FRANKE, J.; ROBERTS, D.A.; HALLIGAN, K.; MENZ, G. Hierarchical Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) of hyperspectral imagery for urban environments. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n. p.1712-1723, 2009.

FUCKNER, M. A. **Aplicação de imagens ASTER no estudo do ambiente urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 235 p. 2008.

GAO, B.; GOETZ, A. F. H. Column atmospheric water vapor and vegetation liquid water retrievals from airborne imaging spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D4, p. 3549-3564, 1990.

GAO, B.C.; MONTES, M.J.; DAVIS, C.O.; GOETZ, A.F.H. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. **Remote Sensing Environment**, v.113, s.1, p.S17-S24, 2009.

GILLESPIE, A.; ROKUGAWA, S.; MATSUNAGA, T.; COTHERN, J. S.; HOOK, S. J.; KAHLE, A. B. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.

HANDCOCK, R. N., GILLESPIE A.R., CHERKAUER, K.A., KAY J.E., BURGESS S.J., AND S. K. KAMPF. Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing

of stream temperatures at multiple spatial scales. **Remote Sensing of Environment**, v.100, n.4, p. 427-440, 2006.

HOOK, S. J.; MEYERS, J. J.; THOME, K. J.; FITZGERALD M.; KAHLE, A. B. The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) – a new instrument for earth science studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n.1, p.93-102, 2001.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

JIMÉNEZ, M.; CHICO, J., DE MIGUEL, E.; GÓMEZ, J.A.; SOBRINO, J.A.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; PRADO, E.; ROBLES, C. Airborne Hyperspectral Scanner (AHS) Spectral Emissivity Retrieval in 8-13mm. In. International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, 10, 2007, Davos. **Proceedings...**Suíça: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2007.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. **Estimación de la temperatura y la emisividad de la superficie terrestre a partir de datos suministrados por sensores de alta resolución**. Tese (Doutorado em Física). ISBN.: 84-370-6145-8 Universidad de València, Espanha, 378p., 2005.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J.A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperatura from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n.d22, p. ACL2-1 – ACL2-9, 2003.

KEALY, P. S.; HOOK, S. J. Separating Temperature and emissivity in termal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperaturas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.31, n. 6, p. 1155-1164, 1993.

KRUSE, F. A.; BOARDMAN, J.W.; HUNTINGTON, J.F. Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p.1388-1400, 2003.

KRUSE, F. A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH Atmospheric Corrections using Low-Altitude AVIRIS Data of Boulder. In: JPL AIRBORNE GEOSCIENCE WORKSHOP, 13, 2004, Pasadena. **Proceedings...**California: JPL Publication, 2004. Disponível em: <[http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004\\_ATM\\_Compare.pdf](http://www.hgimaging.com/PDF/Kruse-JPL2004_ATM_Compare.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2010.

LEAVER, F.; THOMAS, O. Scene-Based Atmospheric Correction Methods for LWIR Hyperspectral Sensors. In: EMRS DTC TECHNICAL CONFERENCE, 3, 2006, Edinburgh. **Proceedings...** Edinburgh: EMRSDTC, 2006, p.B22-B22. Disponível em: [http://www.emrstdtc.com/conferences/2006/downloads/pdf/conference\\_papers/B022.pdf](http://www.emrstdtc.com/conferences/2006/downloads/pdf/conference_papers/B022.pdf) Acesso em: 21 jan. 2010.

Li, Z.-L.; BECKER, F; STOLL, M. P; WAN, Z. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. **Remote Sensing of Environment**, v.69, n.3, p.197–214, 1999.

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

LOMBARDO, M. A. **Qualidade ambiental e planejamento urbano: considerações e métodos**. Tese (livre-docência em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 1995.

LU, D.; WENG, Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 2, p. 157-167, 2006.

LUCCA, E. V. D.; BANDEIRA, J. V.; LORENZZETTI, J. A.; MOREIRA, R. C.; CASTRO, R. M.; SALIM, L. H.; ZALOTI JÚNIOR, O. D.; ESPÓSITO, E. S. C. Uso de sensor hiperespectral aerotransportado no monitoramento da pluma termal oceânica decorrente da descarga de refrigeração da Central Nuclear de Angra dos Reis. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57, v. 01, p. 48-55, 2005. (ISSN 1808-0936).

MAO, K.; SHI, J.; TANG, H.; LI, Z.-L.; WANG, X.; CHEN, K.-S. A neural network technique for separating land surface emissivity and temperature from ASTER imagery. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 1, p. 200–208, 2008.

MENDES, V. L.; MOREIRA, R. C.; CASTRO, R. M. Planejamento para aquisição de imagens com o sensor de varredura aerotransportado HSS instalado no R-95. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007, p. 6473-6480. CD-ROM. ISBN 978-85-17-00031-7

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

MOREIRA, R. C.; CASTRO, R.M; ESPOSITO, E. S. C.; LUCCA, E. V. D. Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005, p. 4517-4524. CD-ROM. ISBN 85-17-00018-8.

MOREIRA, R. C. **Estudo espectral de alvos urbanos com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System)**. (INPE-15339-TDI/1375). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 238 p., 2008. Disponível em: <http://www.mtc18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/...03.../publicacao.pdf> Acesso em: 18 jan. 2010.

MOREIRA, R. C.; GALVÃO, L.S. Variation in spectral shape of urban materials. **Remote Sensing Letters**, v.1, n.3, p.149 – 158, 2010.

NOVO, E.M.L.de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 3ª Edição. São Paulo: Blucher, 2008, 388p.

ONTAR. PcModWin - Overview [on line]. Ontar Corporation. Disponível em: <http://www.ontar.com/Software/ProductDetails.aspx?item=PcModWin> Acesso em: set, 2011.

PÉREZ-GARCIA, M. Simplified modelling of the nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications. **Ecological Modelling**, v.180, n.2-3, p.395-406, 2004.

POWELL, R. L. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n.2, p. 253-267, 2007.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **São José dos Campos: banco de dados geográficos Cidade Viva**. CD-ROM, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Atlas das condições de vida do município de São José dos Campos**. NEPO/PMSJC, 2003. Disponível em: <http://www.sjc.sp.gov.br/spu/downloads/atlas.pdf> Acesso em: 13 fev. 2011.

PU, R. L.; GONG, P.; MICHISHITA, R.; SASAGAWA, T. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval. **Remote Sensing of Environment**, v.104, n. 2, p. 211-225, 2006.

PU, R. L.; GONG, P.; MICHISHITA, R.; SASAGAWA, T. Spectral mixture analysis for mapping abundance of urban surface components from the Terra/ASTER data. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 939-954, 2008.

RAJASEKAR, U., WENG, Q. Urban heat island monitoring and analysis by data mining of MODIS imageries. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.64, n.1, p.86-96, 2009.

SCHOTT, J.R. **Remote sensing: the image chain approach**. New York: Oxford University Press. 401 p. 1997.

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

SENSYTECH, INC. **AA5201 Airborne Hyperspectral Scanner System**: operator manual. Ann Arbor, v. 1, 2004. 104p. (Sensytech MN52011A Rev.2).

SMALL, C. Comparative analysis of urban reflectance and surface temperature. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 2, p. 168–189, 2006.

SOBRINO J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. LABED-NACHBRAND, J.; NERRY, F. Surface emissivity retrieval from Digital Airborne Imaging Spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v.107, n. D23, p. ACL 24-1 - 24-13, 2002.

SOBRINO J. A., JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., ZARCO-TEJADA P. J., SEPULCRE-CANTÓ, G., MIGUEL, E. de. Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. **Remote Sensing of Environment**, v. 102, n. 1-2, p. 99-115, 2006.

XU, W.; WOOSTER, M.J.; GRIMMOND, C.S.B. Modelling of urban sensible heat flux at multiple spatial scales: A demonstration using airborne Hyperspectral imagery of Shanghai and a temperature–emissivity separation approach. **Remote Sensing of Environment**, v.112 n.9, p.3493–3510, 2008.

WENG, Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: methods, applications, and trends. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.64, n.4, p.335-344, 2009.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v.89, n.4, p.467-483, 2004.