

**Universidade Federal de Minas Gerais  
Instituto de Geociências  
Departamento de Cartografia**

**Ana Maria Coimbra Carneiro**

**Uso do Modelo de Mistura MESMA  
e Imagens ASTER para Construção  
de um Mapa de Conforto Urbano  
para Belo Horizonte - MG**

**Belo Horizonte  
2009**

Ana Maria Coimbra Carneiro

Uso do Modelo de Mistura MESMA  
e Imagens ASTER para Construção  
de um Mapa de Conforto Urbano  
para Belo Horizonte – MG

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós Graduação em Análise e  
Modelagem de Sistemas Ambientais  
Universidade Federal de Minas Gerais  
como requisito parcial para obtenção do  
título de mestre em Análise e  
Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Luciano Vieira Dutra

Co-Orientador: Piero Secondini

Belo Horizonte  
Instituto de Geociências da UFMG  
2009

C289u  
2009

Carneiro, Ana Maria Coimbra.

Uso do modelo de mistura MESMA e imagens ASTER para construção de um mapa de conforto urbano para Belo Horizonte – MG [manuscrito] / Ana Maria Coimbra Carneiro. – 2009.

xiv, 98 f., enc. : il., fots. (color.), mapas (color.), tabs. (color.).

Orientador: Luciano Vieira Dutra.

Co-Orientador: Piero Secondini.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2009.

Bibliografia: f. 88-98.

1. Solo urbano – Uso – Belo Horizonte – Teses. 2. Qualidade ambiental – Belo Horizonte – Teses. 3. Geociências – Sensoriamento remoto – Teses. 4. Geoprocessamento – Teses. I. Dutra, Luciano Vieira. II. Secondini, Piero. III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 504.064.3(815.1)

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família pelo apoio moral e prático em todo o período do mestrado. Agradeço ao Fulvio pela ajuda no processamento dos dados, nas discussões que me ajudaram a dar forma ao projeto e pela tolerância quando eu estava no limite da honra.

Ao Dutra pela confiança e compreensão. Pelo seu entusiasmo com o MESMA, pela credibilidade dada a mim, pela real orientação sem a desorientação que normalmente os orientandos sofrem. Pela gentileza quando da minha visita ao INPE. Enfim, por tudo. Tive muita sorte mesmo!

Ao Secondini pela co-orientação e pelo apoio dado a mim quando estava na Itália.

À Sheyla Santana pelo apoio moral e técnico, por ser uma ótima representante no colegiado e excelente no LEGAL do SPRING. Ao Charles Freitas que, por mais que me ignorava algumas vezes, me deu importantes dicas e dados. Ao Vladimir que me tirou do buraco com o clássico problema de algumas imagens que caem no lugar errado. Como também pelas inúmeras discussões um tanto profundas sobre mestrados, doutorados e vida acadêmica.

Ao Marcus Fuckner pela ajuda prática no processamento dos dados, pela disponibilidade dada a mim ao momento da minha visita ao INPE e claro, pelos seus passos dados em seu projeto de dissertação que foram fundamentais para que eu conseguisse avançar na linha de pesquisa que almejava.

Agradeço ao Laboratório de Geoprocessamento pela imagem ASTER e dados de Belo Horizonte concedidos e pelo apoio técnico.

À PRODABEL/PBH pela disponibilização das bases de dados de Belo Horizonte.

Às professoras Ana Clara Mourão Moura e Karla Albuquerque pela colaboração no

seminário de dissertação.

Aos colegas que formam a primeira turma desse mestrado, pelo apoio mútuo nas disciplinas, pela troca de conhecimentos, experiências e sensações.

A todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram para que esse projeto de dissertação tomasse forma e fosse enfim finalizado. Aos amigos que, mesmo distantes, me apoiaram e me estimularam a dar sempre o meu melhor.

A frase mais empolgante de ouvir em ciência, a que prenuncia novas descobertas,  
não é "Eureka!", mas sim "Isto é divertido".

Isaac Asimov

# Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Estrutura da Apresentação.....	6
2. ÁREA DE ESTUDO.....	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 O Sensor ASTER.....	12
3.2 Modelo de Mistura – MESMA.....	16
3.3 Modelo Digital do Terreno.....	24
3.4. Dados de Temperatura.....	26
3.5 Conforto Ambiental Urbano.....	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1 Modelo de Mistura (MESMA).....	34
4.2 Modelo Digital de Terreno.....	46
4.3 Dados Temperatura.....	47
4.4 Dados Ambientais e Sócio-Econômicos.....	51
5. ANÁLISES DOS RESULTADOS.....	55
6. ANÁLISE INTEGRADA DO AMBIENTE.....	75
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88

## Lista de Figuras

FIGURA 1: PLANTA ORIGINAL DE BELO HORIZONTE (BARROS, 2004).....	9
FIGURA 2: REGIÃO CENTRO SUL DE BELO HORIZONTE COM A SERRA DO CURRAL AO FUNDO.....	11
FIGURA 3: COMPARAÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR ASTER E DO LANDSAT 5 E 7. A. ADAPTADO DE ABRAMS ET AL. (2002).....	14
FIGURA 4: COMPARAÇÃO DAS BANDAS ESPECTRAIS DO SENSOR ASTER E DO IKONOS. ADAPTADO DE ABRAMS ET AL. (2002).....	14
FIGURA 5: IMAGEM ASTER. BANDAS DO VNIR (1), SWIR (2) E TIR (3).....	15
FIGURA 6: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	32
FIGURA 7: FLUXOGRAMA SÍNTESE DA METODOLOGIA APLICADA.....	34
FIGURA 8: ESQUEMA DOS COMPONENTES DO SINAL RECEBIDO PELO SENSOR (EFEITO DO ESPALHAMENTO ATMOSFÉRICO) (MATHER, 2004).....	36
FIGURA 9: LAYOUT DO MÓDULO VIPERTOOLS EMBUTIDO NO PROGRAMA ENVI 4.2. .....	38
FIGURA 10: PRINCIPAIS ETAPAS DO MODELO MESMA (ADAPTADO DE RASHED ET AL., 2003).....	39
FIGURA 11: ETAPA DE CRIAÇÃO DA BIBLIOTECA ESPECTRAL A PARTIR DE REGIÕES DE INTERESSE COLETADAS NA IMAGEM.....	41
FIGURA 12: ETAPA DO PROCESSAMENTO DO MODELO MÚLTIPLO DE MISTURA..	42
FIGURA 13: ETAPA DE OTIMIZAÇÃO DA BIBLIOTECA ESPECTRAL ATRAVÉS DOS VALORES DOS ÍNDICES EAR, MASA E INCOB.....	43
FIGURA 14: ETAPAS DA APLICAÇÃO DOS MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL. FONTE: ADAPTADO DE ROBERTS ET AL. (2007).....	46
FIGURA 15: JANELAS ATMOSFÉRICAS.....	50
FIGURA 16: RETÂNGULO ENVOLVENTE UTILIZADO NA ANÁLISE INTEGRADA DO AMBIENTE.....	51
FIGURA 20: ESPECTROS DA BIBLIOTECA ESPECTRAL OTIMIZADA.....	57
FIGURA 21: FRAÇÕES DE SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS E SOMBRA/ÁGUA COM DESTAQUE PARA A REGIÃO DE INDUSTRIAL DE CONTAGEM.....	59
FIGURA 22: RESULTADOS DAS FRAÇÕES DE SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS PARA CADA TESTE.....	60



FIGURA 23: MAPA DAS SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS E DA TAXA MÁXIMA DE IMPERMEABILIZAÇÃO PERMITIDA, SEGUNDO A PREFEITURA DE BELO HORIZONTE.....	61
FIGURA 24: RESULTADOS DAS FRAÇÕES DE VEGETAÇÃO PARA CADA TESTE.....	62
FIGURA 25: RESULTADOS DAS FRAÇÕES DE SOLO PARA CADA TESTE.....	64
FIGURA 26: RESULTADOS DAS FRAÇÕES DE SOMBRA/ÁGUA PARA CADA TESTE..	65
FIGURA 27: COMPOSIÇÃO RGB DAS FRAÇÕES SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS, VEGETAÇÃO E SOLO, RESPECTIVAMENTE.....	66
FIGURA 28: FRAÇÕES DE FRAÇÕES SUPERFÍCIES IMPERMEÁVEIS, VEGETAÇÃO, SOMBRA E SOLO OBTIDAS A PARTIR DO TESTE 4.....	67
FIGURA 29: MAPA DE DECLIVIDADES.....	68
FIGURA 30: IMAGEM TEMPERATURA OBTIDA ATRAVÉS DAS BANDAS DO TERMAL.....	69
FIGURA 31: MAPA TEMÁTICO DE TEMPERATURA.....	71
FIGURA 32: ÁREA DE MINERAÇÃO DESATIVADA NA REGIÃO DA SERRA DO CURRAL.....	72
FIGURA 33: IMAGEM TEMPERATURA E GRÁFICOS DE SEÇÕES.....	73
FIGURA 34: VISTA DA REGIÃO CENTRAL DE BELO HORIZONTE A PARTIR DA SERRA DO CURRAL.....	73
FIGURA 35: MAPA DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO.....	76
FIGURA 36: MAPA DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E PRINCIPAIS RODOVIAS.....	77
FIGURA 37: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO.....	78
FIGURA 38: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO.....	81
FIGURA 39: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E ACESSO À ATIVIDADES URBANAS.....	82
FIGURA 40: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E DENSIDADE POPULACIONAL.....	82
FIGURA 41: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E RENDA DO CHEFE DE FAMÍLIA.....	83
FIGURA 42: CONFRONTO ENTRE OS MAPAS DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E INFRA-ESTRUTURA URBANA.....	84

## Lista de Tabelas

TABELA 1: SENSORES DO SATÉLITE TERRA (ABRAMS ET AL., 2002).....	12
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DO ASTER (ABRAMS ET AL., 2002).....	13
TABELA 3: DADOS DA IMAGEM ASTER.....	33
TABELA 4: ORGANIZAÇÃO DA BIBLIOTECA ESPECTRAL.....	40
TABELA 5: FATIAMENTO ADOTADO NAS VARIÁVEIS DE ENTRADA PARA O MAPA DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO.....	53
TABELA 6: RESULTADOS POSSÍVEIS E SUA RESPECTIVA CLASSE NO MAPA DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO.....	53
TABELA 7: TESTES REALIZADOS PARA CRIAÇÃO DAS IMAGENS FRAÇÃO.....	55
TABELA 8: MODELO DE MÚLTIPLOS COMPONENTES ADOTADO.....	56
TABELA 9: DESEMPENHO DOS TESTES NO VIPERTOOLS.....	57
TABELA 10: MEDIDAS EM KM <sup>2</sup> E PORCENTAGEM EM RELAÇÃO À ÁREA TOTAL PARA CASA CLASSE.....	79
TABELA 11: ÍNDICES KAPPA ENCONTRADOS NO CRUZAMENTO ENTRE O MAPA DE CONFORTO AMBIENTAL URBANO E OS DADOS SÓCIO-ECONÔMICOS E DE INFRA-ESTRUTURA.....	80

## Lista de símbolos

K	Kelvin
km	Quilomêtro
m	Metropolitana
$n$	Número de elementos
W	Watt
$\mu\text{m}$	Micrometro
°	Grau
°C	Grau Celsius
J	Joule
s	Segundo

## Lista de Siglas e Abreviaturas

AIS	<i>Airborne Imaging Spectrometer</i>
ALM	Análise Linear de Mistura
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
CoB	<i>Count-Based Endmember Selection</i>
CoBI	<i>Count-Based Index</i>
CRES	<i>Constrained Reference Endmember Selection</i>
DN	<i>Digital</i>
EAR	<i>Endmember Average RMSE</i>
EMC	EAR, MASA, CoB
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
ERSDAC	<i>Earth Remote Sensing Data Analysis Center</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
IGBE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
ISAC	<i>In-Scene Atmospheric Compensation</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LUOS	Lei de Uso e Ocupação do Solo
MASA	<i>Minimum Average Spectral Angle</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MESMA	<i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
MDT	Modelo Digital do Terreno
MISR	<i>Multi-Angle Imaging Spectroradiometer</i>
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MODTRAN	<i>Moderate Resolution Atmospheric Transmission</i>
MOPITT	<i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
PLAMBEL	Plano Metropolitano de Belo Horizonte
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
PRODABEL	Empresa de informática e informação do município de Belo Horizonte
REM	Radiação Eletromagnética
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RPC	<i>Rational Polynomial Coefficients</i>
RSI	<i>Research Systems Incorporated</i>
SEBASS	<i>Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System</i>

SMA	<i>Spectral Mixture Analysis</i>
SPRING	Sistema de Gerenciamento de Imagem Georreferenciadas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
T	Temperatura
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UTM	Universal Transversa de Mercator
VIPER	<i>Visualization and Image Processing for Environmental Research</i>
V-I-S	<i>Vegetation-Impervious Surfaces-Soil</i>
VNIR	<i>Visible and Near Infrared</i>

## RESUMO

O uso de dados de sensoriamento tem sido cada vez mais usado nos estudos de áreas urbanas, principalmente pela maior disponibilização de imagens com maiores resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais. Grande desafio ainda se encontra nos estudos que conjuguem dados de sensores remotos e dados sócio-econômicos, nas quais ricas análises podem ser feitas. Neste trabalho foi utilizada imagem ASTER de Belo Horizonte (MG), Brasil para uma análise geoambiental. O Modelo de Mistura Espectral de Múltiplos Componentes (MESMA) foi empregado para extrair frações da superfície, baseado no modelo V-I-S (*Vegetation, Impervious Surface and Soil*). Também da imagem ASTER foram extraídas informações de temperatura e declividades. De acordo com a ocorrência de vegetação, superfícies impermeáveis, temperatura e declividades, foi elaborado um mapa de conforto ambiental urbano da cidade. Em seguida, foram calculados os índices Kappa entre o mapa de conforto e os dados sócio-econômicos e de infra-estrutura. Nas análises realizadas entre o mapa de conforto ambiental urbano e dados sócio-econômicos e de infra-estrutura, percebeu-se baixos índices Kappa, o que pode indicar que a distribuição do conforto ambiental da cidade não segue os padrões sociais e nem estruturais da cidade.

## ABSTRACT

Remote sensing has been increasingly used in urban areas studies, due to the availability of higher spatial, spectral, radiometric and temporal images. The major challenge, however, still lies in studies that combines remote sensing and socio-economic data, in which valid analysis can be conducted. In this work was used an ASTER image for geoambiental analysis in the Belo Horizonte (MG) urban area. The Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) was applied to extract image-fractions, based on the model of Vegetation, Impervious Surface and Soil (V-I-S). Information about temperature and slope were also extracted from ASTER image. Using the information obtained from V-I-S, temperature and slope, a new map of the city's urban environmental comfort was created. The Kappa indexes were then calculated correlating the map of comfort to the socio-economic and the infrastructure data. The analysis indicated the environmental comfort distribution in the city does not follow the social and infrastructural spatial trends. The results obtained using MESMA with the fraction-images, were satisfactory because It can be identified a sub-pixel mapping in dense urban area, characterizing the most significant aspects of the city. The correlations between environmental indicators coming from remote sensing and socio-economic data is still rarely discussed. The results of this research can contribute to the study of urban planning on the mesoscale.



# 1. INTRODUÇÃO

A partir da segunda metade do século XX, o homem começou a usar a ciência integrada com a tecnologia. Esse fenômeno produziu um alto crescimento industrial e urbanização veloz o que aumentou o número de construções urbanas e, conseqüentemente, provocou grandes impactos ambientais. A ocupação imprópria e desordenada de áreas de risco e a alteração do clima associada aos baixos índices de arborização são alguns dos processos ambientais que comprometem a qualidade do ambiente urbano e que ocorrem, principalmente, nos grandes aglomerados urbanos como as regiões metropolitanas.

O crescimento das áreas urbanas nos países em desenvolvimento é um fenômeno que ainda persiste, porém com certa desaceleração a partir de meados da década de 1980. Esse processo é tardio se comparado aos países desenvolvidos. Os dados nacionais oficiais mostram que em 2000, 81% da população brasileira se situava em áreas urbanas (IBGE, 2001).

Segundo Fuckner (2007), o desenvolvimento urbano brasileiro das últimas décadas pode ser caracterizado por um crescimento populacional mais elevado das antigas periferias econômicas nacionais. Esse processo intensificou a formação de aglomerações urbanas, padrões relativamente baixos de crescimento das regiões metropolitanas, sobretudo no centro-sul do país e em seus municípios sede.

Esses fenômenos ambientais são estruturas complexas que o homem, ao longo de sua evolução, tenta mensurar e analisar suas correlações. Para isso, o desenvolvimento de métodos de análises e seus aprimoramentos têm possibilitado uma maior compreensão do espaço. Neste contexto, a cidade vem sendo reconhecida como um fenômeno dinâmico, com transformações permanentes e com resultados instáveis, por isso há certa dificuldade de aproximar a teoria dos estudos urbanos à prática do planejamento e gestão

urbana. Para se trabalhar com a mudança, é preciso apreender os processos urbanos que a provocam e capturar os fatores que a condicionam ou a determinam, produzindo conhecimento sobre os modos como a cidade se transforma, as regras subjacentes às mudanças e os padrões que emergem de cada situação (Polidori et al., 2001). Dessa forma, modelos que descrevem e simulam o processo de transformação da paisagem são ferramentas valiosas para avaliar, de forma ampla, os impactos da urbanização através da análise da dinâmica da mancha urbana, alterações dos usos do solo, do crescimento populacional, entre outras variáveis.

A modelagem na análise ambiental tem o papel de fornecer parâmetros para o estudo e compreensão de fenômenos, além da aplicação de intervenções nas situações ambientais. Os modelos, portanto, são representações simplificadas da realidade e o seu uso é direcionado pela busca de respostas às correlações e comportamentos de variáveis ambientais. A modelagem deve ser elaborada sobre um recorte metodológico que especifique os fatores de abordagem, as variáveis a serem consideradas, o espaço e o recorte temporal. O planejamento urbano faz uso da análise espacial como suporte para estudos de processos e fenômenos inerentes à dinâmica e ao desenvolvimento das cidades.

A modelagem urbana tem nas imagens de sensores orbitais uma importante fonte de informação. Aspectos ligados a áreas urbanas, como a localização e tipo de sítio, padrões de crescimento e metropolização podem ser estudados a partir de dados de sensoriamento remoto. Seu uso para o mapeamento, planejamento e monitoramento tem sido feito há alguns anos. Tecnologias recentes têm possibilitado o uso de imagens de satélite para mapeamento de áreas urbanas, devido ao aumento da resolução espacial, espectral e radiométrica dos novos sensores (Jensen e Cowen, 1999).

Inicialmente, quando surgiram as primeiras imagens orbitais para uso civil, imagens dos

sensores da série *LandSat*, na década de 1970, as análises regionais eram priorizadas, enquanto muito pouco se investigava sobre o espaço intra-urbano. Isto se deve ao fato que dados de sistemas sensores orbitais não se adequavam à escala de detalhe desejada para as aplicações urbanas. Tradicionalmente, havia uma diferença considerável entre a resolução espacial dos dados obtidos em nível orbital e as fotografias aéreas.

Os novos sensores orbitais que apresentam melhores resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica ampliaram as possibilidades de aplicação de seus dados em áreas urbanas. Dentre estes sensores estão aqueles que se destacam pela resolução espacial, sensores a bordo dos satélites *Ikonos* e *QuickBird*, com 1 e 0,6 m de resolução espacial em seus canais pancromáticos, respectivamente. Por outro lado, a melhoria na resolução espectral foi alcançada em sensores como o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)*, a bordo do satélite Terra, que obtém imagens em 14 canais com resoluções espaciais que variam de 15 a 90 m. Com relação aos sensores a bordo dos satélites *Ikonos* e *QuickBird*, embora sua resolução espacial seja adequada para estudos urbanos, existe uma limitação que se refere ao reduzido número de bandas espectrais, que cobrem apenas o intervalo espectral do visível ao infravermelho próximo.

Considerando este fator, é necessário determinar uma combinação ideal entre as resoluções espacial e espectral para os estudos urbanos, ou seja, também é importante que as bandas espectrais de um sensor estejam posicionadas em comprimentos de onda adequados para a caracterização dos alvos e que tenham a largura adequada. No caso de imagens de sensores multi-espectrais, existem possibilidades de se tratar dados intra-urbanos através de outros materiais e métodos, senão aqueles mais comuns. Dentro desse contexto, se percebe a necessidade de se estudar e analisar a potencialidade

desses materiais e das ferramentas disponíveis. As imagens de resolução espacial média, como aquelas do ASTER/Terra, podem ser utilizadas para estudos em mesoescala, pois apresentam uma série de vantagens espectrais em relação às imagens *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)/*LandSat* (Fückner, 2007). A partir de dados de sensoriamento remoto é possível obter indicadores de qualidade ambiental através da análise integrada de bases de dados de cobertura da terra e uso do solo, temperatura, topografia, vegetação, recursos hídricos, ocorrência de queimadas, entre outros, para subsídio ao planejamento urbano e a gestão ambiental. Desse modo, conforme apresentam Herold et al. (2003), novas abordagens em planejamento urbano, tais como as relacionadas com o desenvolvimento sustentável e qualidade ambiental, contam com a contribuição das novas fontes de dados espaciais e das geotecnologias na análise, compreensão, representação e modelagem da dinâmica urbana. Essas novas fontes de dados apresentam muito de seus potenciais ainda a serem investigados e explorados. Percebe-se a importância do incremento de pesquisas que objetivam compreender como os dados de sensoriamento remoto podem colaborar com a compreensão do território, afim de que sejam esgotadas as possibilidades de análise que essa ferramenta pode fornecer. Os estudos dessas novas técnicas deve portanto abranger vários tipos de ambientes, sejam eles naturais ou antrópicos.

A escolha de se trabalhar com imagens ASTER com tal resolução para área urbana, apesar de haver disponibilidade de outras imagens com resolução espacial melhor, surge da necessidade de se trabalhar com as interações sistêmicas que aqui se propõe. A obtenção de respostas espaciais para unidades de 15 a 90 metros é mais pertinente, pois não faz sentido identificar tipologias para cada metro quadrado quando se trata de variáveis que se comportam de forma sistêmica e interagem em uma área de influência maior. Segundo Moura (2003, p. 88):

A interpretação das análises deve seguir os princípios da Gestalt, de que “o todo é maior do que a simples soma das partes”, em dois sentidos: na consciência de que é uma análise sistêmica resultante da inter-relação entre variáveis; e na compreensão dos mapas resultantes de avaliações, pois não faz sentido a leitura do dado por *pixel*, mas sim de sua relação no conjunto do arranjo espacial e nas conformações espaciais observadas.

Apesar dos custos estarem diminuindo, ainda continua onerosa a aquisição de imagens de alta resolução. Esse fato inibe o acompanhamento constante das mudanças de composição e estrutura de centros urbanos. Alternativamente, imagens de resolução espacial moderada (*pixel* de 10 a 30 m), como as imagens ASTER e até mesmo *LandSat*, têm sido usadas para estimar a composição e abundância de materiais e monitorar áreas urbanas (Wu, 2000).

## **1.1 OBJETIVOS**

A partir da disponibilidade de dados de novos sensores para estudos urbanos em mesoescala no Brasil, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise geoambiental da área urbana de Belo Horizonte, a partir de dados de sensoriamento remoto. Além disso, pretende-se identificar as correlações entre os dados obtidos de imagem orbital e dados sócio-econômicos e de infra-estrutura da área.

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Avaliar o uso da Análise da Mistura Espectral por Múltiplos Componentes (MESMA) para imagem ASTER de um grande aglomerado urbano tropical;
- Avaliar os resultados obtidos sobre as frações físicas mapeadas da estrutura urbana;
- Espacializar o conforto ambiental urbano a partir dos dados obtidos da imagem

ASTER;

- Definir relações de dependência entre os dados ambientais da área de estudo e seus dados sócio-econômicos;
- Contribuir para a caracterização da estrutura física urbana, gerando subsídios ao Planejamento Urbano e para atualização de seus dados.

## **1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

No primeiro capítulo é apresentado o tema da pesquisa e seus objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo apresenta uma caracterização histórica e geográfica da área de estudo, a cidade de Belo Horizonte (MG).

No terceiro capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, com a descrição das características do sensor ASTER, dos modelos de mistura como ferramenta para mapeamento urbano, do modelo digital de terreno, dos dados de temperatura em imagens de sensoriamento remoto. Ainda neste capítulo, são discutidos aspectos da análise urbana em relação ao conforto ambiental.

No quarto capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos empregados na geração do modelo digitais de elevação, no tratamento dos dados termais do ASTER até a obtenção dos dados de temperatura e nos parâmetros adotados para o processamento das imagens para a aplicação do modelo de mistura, desde a seleção de regiões de referência para a construção de bibliotecas espectrais até a obtenção de imagens-fração e arquivos auxiliares. Como também, é explicitado o procedimento empregado para a análise ambiental urbana, na criação do mapa de conforto ambiental e na sua análise com os dados sócio-econômicos e de infra-estrutura.

No capítulo cinco são feitas as análises dos resultados obtidos nas etapas descritas do capítulo anterior.

No sexto capítulo os resultados dos processamentos das imagens ASTER são analisados de forma integrada, utilizando como referência mapas de infra-estrutura urbana e dados sócio-econômicos.

Por fim, no sétimo capítulo, são tecidas as considerações finais, associadas aos objetivos traçados neste trabalho.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

Criada para ser a mais nova capital do Estado de Minas Gerais e projetada pelo engenheiro Aarão Reis entre 1894 e 1897, Belo Horizonte foi a primeira cidade brasileira moderna planejada. O modelo racionalista prevalece, como também a negação da “desordem” e “irracionalidade” da cidade mineira colonial, de ruas estreitas que desembocavam nos grandes largos irregulares das igrejas, monumentos e edificações públicas (Monte-Mór, 1997).

Os princípios que regeram o plano foram a salubridade, a comodidade e o embelezamento (Braga, 2001). Elementos chave do seu traçado original incluem uma malha perpendicular de ruas, cortadas por avenidas em diagonal, quarteirões regulares, visadas privilegiadas e uma avenida em torno do perímetro urbano (Avenida do Contorno) (Figura 1). Além da abundância de parques, praças e um grande parque central. Dessa forma, Belo Horizonte surgia como uma tentativa de síntese positivista no final do século XIX. Quando foi inaugurada, em 12 de dezembro de 1897, a cidade acolhia 25 mil habitantes (Belo Horizonte, 2000).

Belo Horizonte foi planejada em três setores: urbano, suburbano e rural. A malha urbana abrigava, em seu núcleo, a elite política e econômica, espacialmente circunscrita à avenida do Contorno. Além da avenida do Contorno iniciava-se a zona suburbana, de forma que a avenida funcionava como uma “barreira” entre as faixas sociais (Braga, 2001). Excluídos da zona urbana, os trabalhadores foram se assentando de forma desordenada nas áreas suburbana e rural, para as quais não se planejou infra-estrutura, nas quais estavam ausentes as normas urbanísticas que na área urbana garantiriam a qualidade de vida.



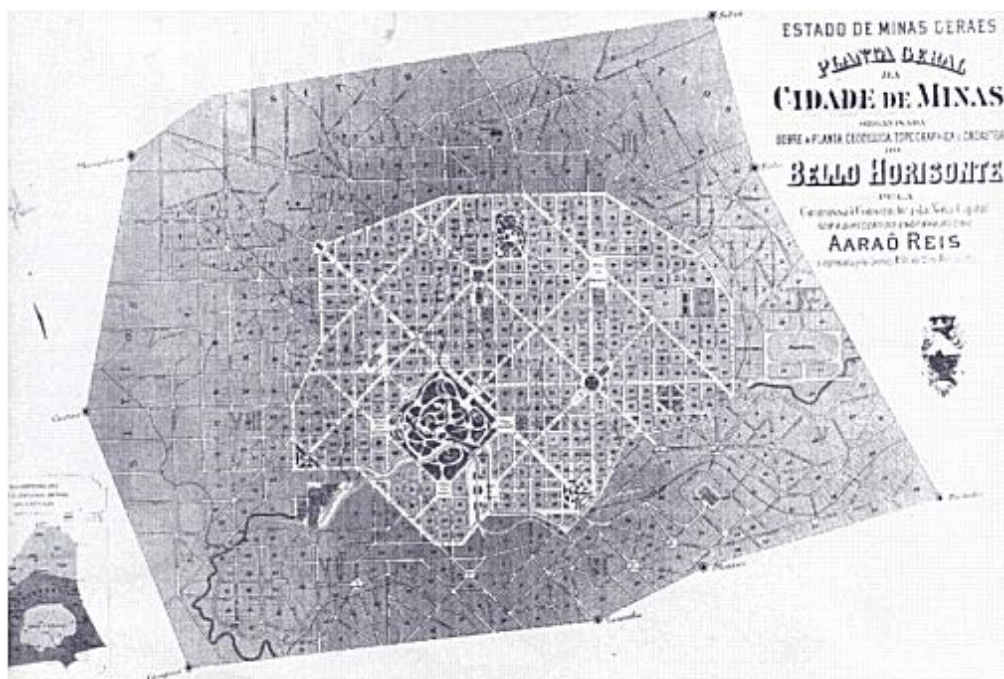


Figura 1: Planta Original de Belo Horizonte (Barros, 2004).

A expansão urbana extrapolou em muito o plano original. Os idealizadores do projeto previram que a cidade alcançaria a marca de 1 milhão de habitantes quando completasse 100 anos. Porém, em 1997, havia mais de 2 milhões de pessoas (Belo Horizonte, 2000).

O desenvolvimento de Belo Horizonte pode ser considerado mínimo até os anos 20. Pelas suas famosas virtudes climáticas, a cidade tornou-se atrativa, especialmente para o tratamento da tuberculose.

Nos anos 30, já com 120 mil habitantes (Belo Horizonte, 2000), Belo Horizonte já sofria dos males do crescimento desordenado com a carência de serviços públicos. No início dos anos 40, a cidade praticamente dobra sua população. Consolidava-se a verticalização da área central. Esboçavam-se os primeiros planos urbanos no sentido de reorganizar a expansão. Abriam-se novas avenidas de fundo de vale (ex.: Avenida Prudente de Moraes). Além disso, a década de 40 trouxe o avanço da industrialização, como também a criação do complexo arquitetônico da Pampulha de Niemeyer, em 1943.

Na década de 50, a população dobra novamente, passando de 350 mil para 700 mil habitantes (Belo Horizonte, 2000). Na década de 60 muitas demolições são feitas,

transformando o perfil da cidade, dando espaço à inúmeros arranha-céus e asfalto no lugar de árvores (ex.: a Avenida Afonso Pena, que antes possuía um canteiro central largo com árvores de grande porte). Além disso, a conurbação com os municípios vizinhos se amplia. Ainda na década de 60, a cidade atinge um milhão de habitantes (Belo Horizonte, 2000). Nessa época, os espaços vazios praticamente se esgotam e o crescimento populacional passou a concentrar-se nos municípios coligados a Belo Horizonte: Contagem, Betim, Ribeirão das Neves e Santa Luzia. Como tentativa de organização para resolver os problemas causados pelo crescimento urbano desordenado, na década de 70, foram instituídas a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e o PLAMBEL (Plano Metropolitano de Belo Horizonte) que desencadearam diversas ações visando conter o “caos” metropolitano (Braga, 2001).

Na década de 80, começou a ser implementado o metrô de superfície, projeto esse ainda hoje não finalizado. A fisionomia urbana foi novamente alterada com a proliferação de prédio em estilo pós-moderno, especialmente na zona sul da cidade.

A década de 90 foi marcada pelo reforço da estrutura administrativa do município, com a aprovação da Lei Orgânica do Município, em 1990. Em 1996 foram aprovados os planos que são vigentes atualmente: o Plano Diretor da Cidade e da Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS).

A expansão de Belo Horizonte apresenta algumas características da urbanização recente, materializada em termos espaciais em processos de fragmentação e dispersão do tecido urbano, associados a mecanismos de crescente segregação sócio-espacial (Costa e Peixoto, 2007). Enquanto o entorno imediato de Belo Horizonte e de suas áreas conurbadas, em especial Betim e Contagem, a oeste e na região norte, vivenciaram uma significativa oferta de lotes para o mercado de baixa renda nas décadas de 70 e 80, o eixo sul metropolitano foi palco da oferta de lotes para a população de média e alta renda,

atraída pelos seus atributos ambientais. A princípio como segunda moradia para lazer aos finais de semana, mas a partir dos anos 90, como local de moradia principal. O padrão de expansão urbana que se desenvolveu no eixo-sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), ultrapassa a barreira natural da Serra do Curral (Figura 2). Esse fenômeno apresenta características especiais se comparado com outros eixos de expansão metropolitana, destacando-se a estrutura fundiária altamente concentrada de propriedade de grandes empresas mineradoras, particularmente no município de Nova Lima, onde se encontram importantes áreas de proteção ambiental (Costa e Peixoto, 2007).



Figura 2: Região centro Sul de Belo Horizonte com a Serra do Curral ao fundo.

Hoje, a região metropolitana de Belo Horizonte é a terceira maior aglomeração urbana do Brasil com uma população de 4.934.210 habitantes em 2007 (IBGE, 2007a). De acordo com o recente estudo do IBGE (2007b) Belo Horizonte é o quinto maior PIB brasileiro representando 1,32% do total das riquezas produzidas no país

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica foram estudados pontos-chaves que possibilitassem o prosseguimento da pesquisa. Foram colhidas informações sobre as imagens ASTER, o modelo múltiplo de mistura espectral, criação de modelo digital de elevação e extração de dados de temperatura a partir de imagens ASTER. Ainda nesta fase foram alvos de pesquisa os estudos sobre conforto ambiental urbano.

#### 3.1 O SENSOR ASTER

O sensor ASTER foi criado através de uma parceria entre a NASA e o Ministério do Comércio e Indústria do Japão. A plataforma Terra (Tabela 1), que carrega o sensor ASTER, foi lançada em 18 de dezembro de 1999. Possui órbita Sol-síncrona de 16 dias de revisita, com altitude de 705 km e com período para completar uma órbita de 98,9 minutos. A cena imageada pelo sensor ASTER tem dimensões de 60 x 60 km<sup>2</sup> (Abrams et al., 2002).

Sensor	Número de Canais	Resolução Espacial (m)	Exemplos de Aplicações
ASTER ( <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> )	14	15/30/90	Temperatura da superfície, emissividade, elevação
CERES ( <i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i> )	3 (2 instrumentos)	20.000	Balanco de radiação terrestre
MISR ( <i>Multi-angle Imaging Spectroradiometer</i> )	4 (9 ângulos)	275/1.100	Nuvens, aerossóis, imagens multiângulo
MODIS ( <i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i> )	36	250/500/1.000	Recursos terrestres, dos oceanos e baixa atmosfera
MOPITT ( <i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i> )	-	22.000	Distribuição, transporte e fontes de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub>

Tabela 1: Sensores do satélite Terra (Abrams et al., 2002).

O sensor ASTER consiste em três subsistemas diferentes, cada um opera em uma região espectral distinta: visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal. Cada subsistema possui uma resolução espacial, como mostra a Tabela 2. O Visível e o Infravermelho Próximo (*Visible and Near-infrared* -VNIR) possuem 3 bandas com a resolução espacial de 15 metros e uma retrovisada adicional (3B) que permite a visão estereoscópica da superfície e a criação de Modelos Digitais de Elevação (MDE). O Infra-Vermelho Médio (*Shortwave Infrared* -SWIR) possui 6 bandas com resolução espacial de 30 metros e o Infra-Vermelho Termal (*Thermal Infrared* -TIR) possui 5 bandas com resolução espacial de 90 metros.

O sensor ASTER pode ser considerado um sistema multi-espectral de média resolução espacial aprimorado quando comparado aos sistemas multi-espectrais mais comuns (ETM+/LandSat-7 e HRV/SPOT).

Banda	Comprimento de Onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolução Espacial(m)	Níveis de Quantização
1	0,52-0,60	15	8 bits
2	0,63-0,69		
3N	0,78-0,86		
3B	0,78-0,86		
4	1,60-1,70	30	8 bits
5	2,145-2,185		
6	2,185-2,225		
7	2,235-2,285		
8	2,295-2,365		
9	2,360-2,430		
10	8,125-8,475	90	12 bits
11	8,475-8,825		
12	8,925-9,275		
13	10,25-10,95		

Tabela 2: Características do ASTER (Abrams et al., 2002).

Pode-se perceber que o ASTER subdivide algumas bandas do *LandSat*, como também aumenta a resolução espacial na banda do visível (Figura 3).

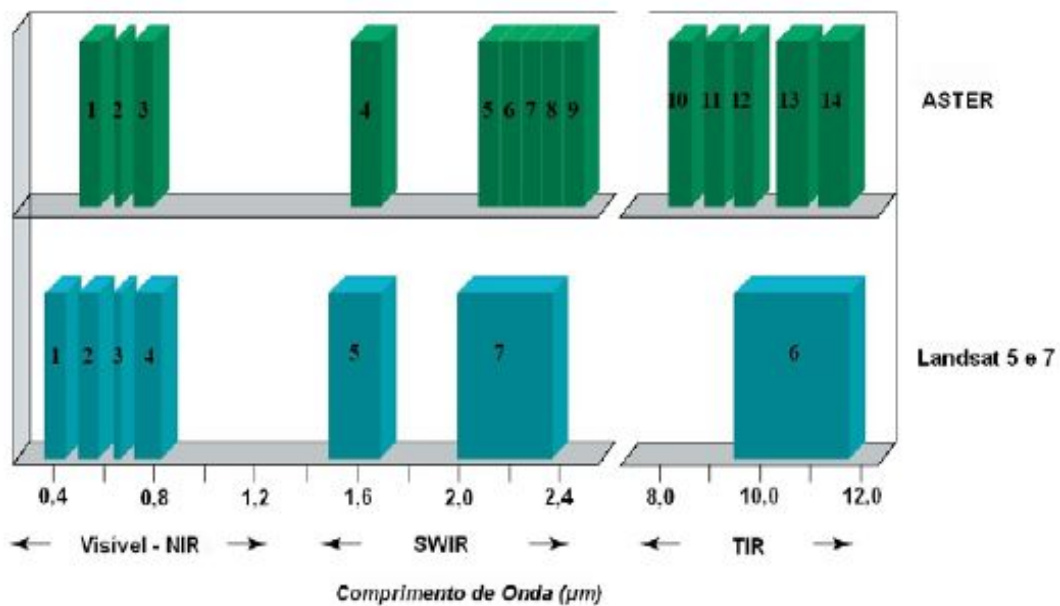


Figura 3: Comparação das bandas espectrais do sensor ASTER e do *LandSat* 5 e 7. A. Adaptado de Abrams et al. (2002).

Já em relação às imagens *Ikonos*, o sensor ASTER se estende consideravelmente mais no espectro eletromagnético (Figura 4).

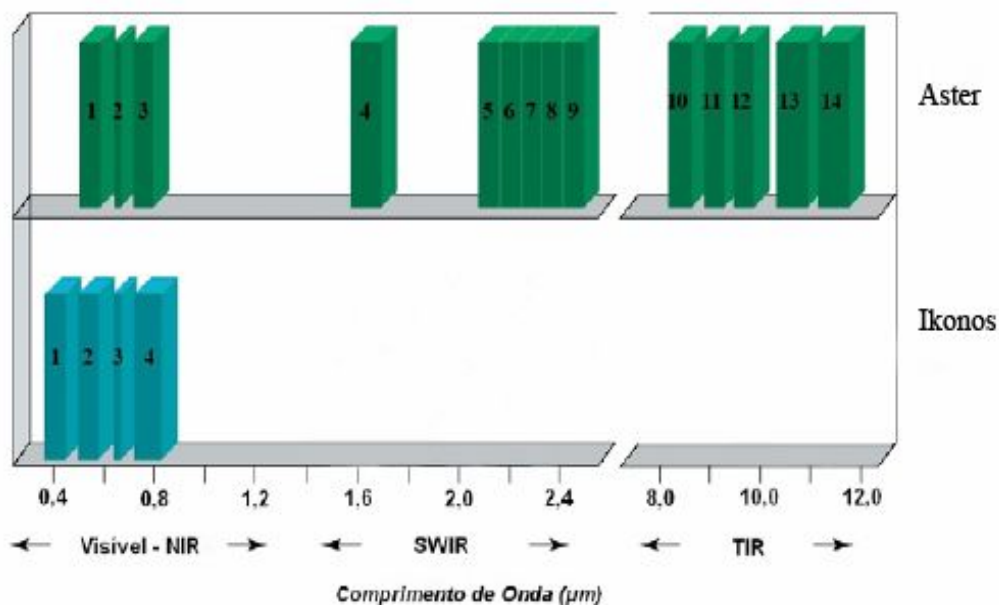


Figura 4: Comparação das bandas espectrais do sensor ASTER e do *Ikonos*. Adaptado de Abrams et al. (2002).

O ASTER é o primeiro sensor orbital multi-espectral termal e seu imageamento pode ocorrer tanto no período diurno quanto noturno. Em relação os dados termais, se

comparado ao TM do *LandSat 5*, ASTER apresenta a vantagem da melhor resolução espacial, 90 contra 120 m, maior quantidade de bandas (cinco) e um nível maior de discretização dos alvos, pois o sinal é quantizado em 12 *bits*, enquanto que os dados termais do sensor TM também apresentam 8 *bits* assim como as demais bandas do sensor.

Além disso, os dados do sensor ASTER podem ser utilizados em estudos topográficos a partir da geração de modelos digitais de elevação com resolução de 15 m. A Figura 5 apresenta um recorte de uma imagem ASTER. É possível observar a diferença de resolução espacial entre cada subsistema.

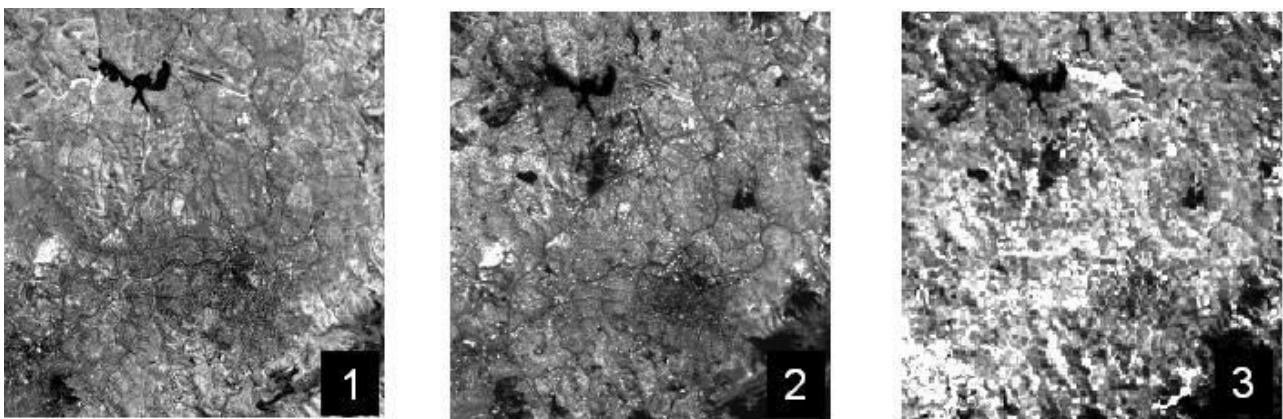


Figura 5: Imagem ASTER. Bandas do VNIR (1), SWIR (2) e TIR (3).

Os dados ASTER são distribuídos nos níveis 1A, 1B, 2 e 3. O instrumentos ASTER produzem dois tipos dados Nivel1: Nível 1A (L1A) e Nível 1B (L1B). Dados ASTER L1A são dados brutos. Eles não possuem nenhum processamento na imagem, como coeficientes radiométricos e geométricos, dessa forma, mantêm os valores originais dos dados adquiridos pelo sensor. Os dados L1B possuem a aplicação dos coeficientes de calibração radiométrica e reamostragem geométrica (registro de imagens) (Abrams et al., 2002). Os dados nível 2 correspondem a produtos gerados a partir do nível 1B que são: temperatura aparente, emissividade, composições coloridas com realce por decorrelação, refletância de superfície, temperatura de superfície, radiância de superfície e classificação das nuvens e da superfície polar. No nível 3 são gerados modelos digitais de elevação

(JPL, 2007).

Imagens do sensor ASTER têm sido correntemente empregadas para o mapeamento do uso e cobertura da terra. A classificação de espaços urbanos através de imagens ASTER é viável, principalmente nas bandas do visível que possuem resolução espacial maior. Segundo Zhun e Blumberg (2002, p. 239):

The 15-m classification product shows, however, urban details such as streets, roads, buildings, etc. That is why there are different class settings between the two groups, from six classes for 15-m images to five classes for 30-m images. The main difference is that the 30-m SWIR data can differentiate water bodies from roads, while the 15-m VNIR data can distinguish some special materials for factories and malls from bare soils just excavated.

Estudos têm sido feitos com o objetivo de mapear o uso do solo através de imagens ASTER, porém a maioria deles não se especificava nas áreas intra-urbanas. Contudo, alguns estudos que visavam a classificação intra-urbana, utilizaram procedimentos simples de classificação, se atendo às bandas de maior resolução espacial, o subsistema VNIR, como foi o caso do estudo de Zhun e Blumberg (2002). Esses comparam o comportamento de cada subsistema e obtiveram o melhor mapeamento urbano nas bandas da região do visível e infravermelho próximo. Técnicas sofisticadas para o mapeamento urbano através das imagens ASTER têm surgido, principalmente com o intuito de utilizar sua diversidade espectral (Chrysoulakis, 2003; Fuckner, 2007; Netzband e Stefanov, 2004; Teza e Baptista, 2005; Sousa e Baptista, 2005).

### **3.2 MODELO DE MISTURA – MESMA**

Um importante princípio do sensoriamento remoto é que cada objeto na superfície da Terra e na atmosfera reflete, absorve, transmite ou emite a energia eletromagnética em diferentes proporções. É essa diferença que permite que os objetos sejam identificados. No imageamento remoto, a radiância detectada por um sensor é a média ponderada das



radiâncias de todos os materiais contidos no campo de visada instantânea - *Instantaneous Field of View* (IFOV), isto é, a medida de um espectro feita por um sensor é a combinação de todos os espectros dos materiais contidos em um campo de visada. Essa mistura ocorre em qualquer escala, na observação em um microscópio, observando grãos de minerais como também em uma escala de cobertura do solo em quilômetros (Mather, 2004). Desse modo, a radiância é capturada por um sensor como sendo correspondente à mistura de diferentes tipos de superfícies. Além da superfície de mapeamento, deve-se adicionar na radiância a contribuição da absorção e do espalhamento atmosférico, o que pode dificultar o estudo da distribuição espacial de determinados elementos representados na imagem. Devido à presença dessa mistura espectral nas imagens, a identificação dos materiais componentes da paisagem que usam técnicas de análise *per-pixel* se tornam muito difíceis até que o continuum da cobertura do solo não possa ser realmente dividido em classes discretizadas.

Como alternativa para superar esse problema, foi criada uma técnica de análise que busca identificar a proporção de cada material na imagem. O modelo de mistura linear baseia-se no emprego da regressão múltipla para quantificar a proporção dos minerais presentes na imagem. Esse procedimento teve sua origem no tratamento de imagens multi-espectrais (Horwitz et al., 1971; Richardson et al., 1975; Adams e Adams, 1984; Huete, 1986). Com o advento do sensor *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS), Smith e Adams (1985) transferiram e aprimoraram a metodologia para imagens hiper-espectrais, denominando-a de Análise Linear de Mistura (ALM). Procurando recuperar a resposta espectral de cada tipo de alvo, Shimabukuro e Smith (1991) consideram que a resposta de cada *pixel* em qualquer comprimento de onda pode ser considerada como uma combinação linear da resposta espectral de cada elemento contido no IFOV.

Dessa forma, a ALM considera que a paisagem é formada por uma proporção contínua de

tipos de cobertura do solo com espectro puro (Adams et al., 1993), os *endmembers* (componentes) que são abstrações da cobertura do solo com propriedade uniformes. A ALM é um modelo baseado na mistura linear de dois ou no máximo igual ao número de bandas espectrais utilizadas (Adams et al., 1993). Essa aplicação gera imagens-fração ou proporção, em número variável de acordo com o número de *endmembers* selecionados como constituintes da mistura espectral. Os *pixels* da imagem são modelados como uma mistura linear desses *endmembers* e um *endmember* sombra é usado para calcular a variação de iluminação. Os *endmembers* podem ser selecionados a partir da imagem, medidos em campo ou em laboratório.

A equação de um modelo de mistura pode ser expressa conforme a Equação 1:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j) + e_i \quad (1)$$

onde:

$r_i$  é a refletância de um *pixel* na  $i$ -ésima banda espectral;

$a_{ij}$  é a refletância do  $j$ -ésimo elemento na  $i$ -ésima banda espectral;

$x_j$  é a proporção ocupada pelo  $j$ -ésimo elemento no *pixel*;

$j$  corresponde a 1, 2, 3, ...,  $n$  (número de elementos);

$i$  corresponde a 1, 2, 3, ...,  $m$  (número de bandas espectrais); e

$e_i$  corresponde ao erro residual.

Tompkins et al. (1997) aponta para o fato que a seleção dos *endmembers* é etapa vital da ALM. Para otimizar esse modelo, criando frações físicas significativas, a seleção dos *endmembers* deve ser cuidadosamente elaborada. Na imagem, a seleção de componentes pode ser feita através da técnica *Pixel Purity Index* (PPI) proposta por Boardman et al. (1995). Segundo esta técnica, os componentes devem representar respostas espectrais puras do elemento considerado. Antes da aplicação do modelo é possível efetuar a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) para minimizar os efeitos

de ruído nas bandas e descorrelacionar os dados.

ALM foi massivamente utilizada na caracterização dos materiais da superfície da Lua e de Marte (Adams et al., 1986; Mustard e Head, 1996). Como também foi aplicada no monitoramento de ambientes urbanos (Phinn et al., 2002; Small, 2002). Sousa (1999) aplicou um modelo de mistura espectral para estudar os padrões de uso do solo e da cobertura vegetal em uma área do vale do Paraíba, estado de São Paulo. A partir da aplicação do modelo, o autor pôde classificar a cobertura vegetal em função da idade e estrutura, principalmente nas áreas de planícies aluviais, assim como diferentes teores de umidade no solo, distinguir corpos d'água e portos de areia.

Um grande desafio é o mapeamento de áreas muito heterogêneas. A paisagem urbana é composta por um vasto número de elementos e materiais, que a definem como sendo radiometricamente heterogênea e complexa (Small, 2005). Rashed et al. (2003) salientam que a classificação de uma área urbana baseada nas imagens-fração obtidas a partir da análise de mistura espectral pode ter maior exatidão se comparada a outras técnicas tradicionais de classificação. Neste sentido, o uso da ALM pode ser insatisfatório porque considera todos os *pixels* como mistura de um único conjunto inicial de membros finais. Desta forma, pode-se ter um *pixel* modelado por membros finais que nele sejam inexistentes. Assim, misturas não-lineares podem ser importantes para alguns tipos de análises, como os estudos urbanos (Roberts et al., 1998a). Nas imagens-erro também geradas na ALM, que auxiliam na avaliação dos resultados, normalmente, o erro gerado é grande porque os componentes necessários para descrever determinadas áreas da cidade como, por exemplo, as áreas centrais, são diferentes daqueles adequados a bairros residenciais. Como resultado, os modelos de mistura espectral simples subutilizam o potencial de muitos dados de sensoriamento remoto na discretização de materiais, enquanto produzem erros de estimativa devido à incorreta escolha dos componentes ou

do número de componentes usados para decompor um determinado *pixel*.

Para corrigir essa fonte de erro foi proposto um novo método que estabelece para cada *pixel* o melhor modelo de mistura a partir do menor valor do erro médio quadrático (Roberts et al., 1992). A evolução dessa proposta deu origem ao modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Componentes (*Multiple endmember Spectral Mixture Analysis* - MESMA) (Roberts et al., 1998b). Desta forma, o MESMA difere da ALM por permitir que o número e o tipo de componentes finais variem de *pixel* para *pixel* tanto quanto sua abundância.

O MESMA busca selecionar como componentes para o modelo *pixels* que representam a variabilidade espectral de uma determinada classe na cena que, não necessariamente, correspondem a *pixels* puros (Fuckner, 2007). Os componentes mais puros não são sempre os mais representativos. Embora deva representar a variedade, a biblioteca espectral criada não deve ser muito grande, para evitar a forte confusão espectral e elevado esforço computacional.

O MESMA tem sido aplicado no mapeamento de áreas com cobertura de neve (Painter et al., 2003), de vegetação em região de chaparral (Roberts et al., 1998b), mapeamento de solo em terras áridas (Okin et al., 2001) e sensoriamento remoto urbano (Rashed et al., 2003; Powell et al., 2007; Fuckner, 2007). No Brasil, uma versão simplificada do modelo MESMA foi desenvolvida para mapeamento mineral por Carvalho Júnior et al. (2001), neste trabalho buscou-se, basicamente, diminuir a demanda computacional para a execução do modelo.

Powell et al., 2007 aplicou o modelo MESMA em imagens TM/LandSat para o mapeamento de áreas urbanas, visando analisar a influência da urbanização sobre as mudanças na cobertura da terra em escala regional. As áreas de estudo foram algumas cidades do estado de Rondônia, e a capital do Estado do Amazonas, Manaus. Para

Powell et al., 2007, o uso do MESMA é importante porque permite comparações regionais do desenvolvimento urbano através das séries históricas de dados *LandSat*. Os resultados obtidos pela autora apontam para a necessidade do desenvolvimento de uma biblioteca espectral específica para cada área urbana, considerando a diversidade de materiais que compõem a superfície e que ocorrem na mistura espectral.

Nunes e Souza Júnior (2007) aplicaram a ALM e o MESMA em imagens *LandSat* (ETM+) da cidade de Belém, Estado do Pará. Em comparações elaboradas através da análise dos dois resultados obtidos, os autores concluíram que a análise linear de mistura modelava, satisfatoriamente, a área de estudo, considerando insignificantes as diferenças entre os resultados. Contudo, como também considera Fuckner (2007), em imagens *LandSat* com apenas seis canais espectrais não apresenta grande alteração nos espectros de *pixels* pertencentes às mesmas classes de materiais, diferentemente do que ocorre em imagens de sensores com maior número de bandas.

Neste sentido, os dados ASTER agregam grande valor na aplicação do modelo MESMA devido a sua resolução espacial e espectral. A aplicação do MESMA para dados ASTER em estudos urbanos foi conduzida por Rashed (2004) para a cidade de Cairo (Egito). As imagens-fração obtidas foram relacionadas a dados demográficos a fim de caracterizar a estrutura física e os padrões de ocupação urbana. Para o autor, os índices elevados de solo exposto, por exemplo, indicaram alto grau de instabilidade associada à reconstrução e atividades de desenvolvimento, em áreas de forte expansão demográfica.

Fuckner (2007) aplicou o MESMA para o mapeamento das capitais São Paulo e Rio de Janeiro. Seu trabalho incluiu também o uso de outros recursos disponíveis nas imagens ASTER nos estudos urbanos, como o modelo digital de terreno e as bandas termais. As imagens frações foram relacionados à dados de temperatura, qualidade do ar e declividades de modo a caracterizar os ambientes urbanos. O autor verificou a

necessidade da construção de bibliotecas espectrais específicas para cada capital e data das imagens com criteriosa seleção de *endmembers*.

Conforme Powell et al., 2007, dois são os pontos-chave para o sucesso na aplicação do MESMA: a construção de uma biblioteca espectral regional adequada e a seleção de parâmetros e ajustes do modelo. Existem várias técnicas que foram desenvolvidas para a identificação e otimização dos *endmembers* como o Índice de Pixel Puro (PPI: Boardman et al., 1995), Seleção Restrita de Componentes de Referência (CRES - *Constrained Reference Endmember Selection*), Erro Médio do Componente (EAR - *Endmember Average RMSE*), Mínimo Ângulo Espectral Médio (MASA - *Minimum Average Spectral Angle*) e Componentes Baseada em Contagem (CoB - *Count-based Endmember Selection*) (Roberts et al., 2007).

Diferentemente do que ocorre com outras técnicas de seleção de componentes para modelos de mistura espectral, como por exemplo o PPI, utilizando o EAR, MASA e CoB (EMC) os componentes selecionados não são os mais puros ou os mais extremos, mas os mais representativos de uma classe, ou seja, os que melhor modelam a biblioteca espectral (Fuckner, 2007). O EMC é calculado a partir das métricas adquiridas na matriz quadrada - imagens padrão do ENVI criadas a partir da biblioteca espectral -  $n$  por  $n$ , onde  $n$  é o número de espectros da biblioteca. Linhas e colunas armazenam o número de modelos e a diagonal representa cada espectro modelando ele mesmo. Esta imagem possui bandas que armazenam informações do RMSE, ângulo espectral, fração sombra e as banda das restrições que indica se o modelo encontrou as restrições utilizadas.

O EAR foi primeiramente proposto por Dennison e Roberts (2003) como uma maneira de localizar o espectro com a classe que dê melhor resultados no modelo. EAR é calculado como uma média RMSE (*Root Mean Square Error*) produzida por um espectro quando este é usado para modelar todos os membros dessa classe. Este índice é calculado para

cada membro da classe na biblioteca espectral. Dessa forma, o melhor espectro é aquele que produz o menor RMSE, conseqüentemente, o menor EAR (Roberts et al., 2007). O EAR não trabalha com a confusão espectral entre classes. Entretanto, como os componentes extremos não são privilegiados, existe a tendência dos *pixels* mais brilhantes da imagem não serem modelados. Quando os valores mínimos de EAR são altos significa que a variabilidade espectral no interior da classe é alta (Dennison e Roberts, 2003).

O MASA é similar ao EAR por selecionar o espectro que melhor modela a classe. Mas difere da primeira técnica por medir a adequação do espectro em relação à classe a partir do ângulo espectral e não o RMSE. Usando esse método, cada espectro é usado para calcular o ângulo espectral entre ele mesmo e todos os outros membros da biblioteca espectral. Dessa forma, esse índice é calculado como uma média do ângulo espectral entre o modelo candidato e o restante dos espectros da mesma classe. O melhor MASA é aquele que produz o menor ângulo espectral (Roberts et al., 2007).

EAR e MASA são conceitualmente muito similares. De qualquer maneira, a otimização da biblioteca dependerá do brilho dos membros da biblioteca. O índice MASA é mais sensível aos espectros escuros. Para os objetos claros, por sua vez, as alterações serão notadas no EAR, com maiores valores de RMSE, porém mantendo o MASA com taxas baixas. Em situações não extremas, frequentemente, os valores EAR e MASA para cada membro são baixos.

O índice CoB foi proposto por Roberts et al (2003) como uma média para a seleção ótima de *endmembers*. Considera que aqueles membros da biblioteca espectral que modela o maior número de espectros de sua classe são os melhores. Usando esta técnica, modelos candidatos são estimados a partir da banda Código Restrito, criada na etapa da Matriz Quadrada. Depois de calcular cada modelo, o número total de espectros modelados

dentro de cada classe (In\_CoB) e o número total de modelos que promoveram confusão de classes (Out\_CoB) são gravados para cada modelo. O melhor modelo é aquele que possui o maior valor de In\_CoB e um baixo Out\_CoB. Ainda é calculado uma terceira métrica, *Count Based Index* (CoBI), que é a razão entre In\_Cob e Out\_Cob, com o denominador multiplicado pelo número de espectros da classe. Assim, um alto CoBI e In\_CoB represente uma excelente escolha (um espectro especialista). Um alto CoBI e um moderadamente baixo in\_CoB pode ser um bom candidato porque captura um membro da classe que é espectralmente único, mesmo que não seja bem representado na biblioteca. Baixos valores de CoBI somente são aceitos se são equilibrados por um alto in\_Cob (espectros generalistas) (Roberts et al., 2007). A utilização das métricas CoB apresenta uma série de ressalvas, pois é importante considerar que o fato de um componente modelar bem sua classe não significa que modelará bem a imagem.

Essas métricas são utilizadas para otimizar a biblioteca espectral criada. Fuckner (2007) utilizou a técnica do EAR para a seleção dos membros. Assim como Dennison e Roberts (2003) e Powell et al., 2007. Os espectros selecionados foram exportados para uma nova biblioteca espectral a ser utilizada para a aplicação do modelo de mistura.

Nos estudos já realizados com o MESMA, a maioria dos autores recomenda a aplicação do modelo MESMA em outras cidades e ambientes, bem como o uso de dados de outros sensores para a comparação dos resultados.

### **3.3 Modelo Digital do Terreno**

O conhecimento do relevo é um aspecto do terreno de fundamental importância para estudos e análises em diversas disciplinas que lidam com questões relacionadas à organização, planejamento e gestão do espaço geográfico. Tradicionalmente o relevo da superfície terrestre é representado através de curvas de níveis e pontos cotados em



cartas, mapas e plantas topográficas, além de outras formas de uso pouco freqüente como cores hipsométricas, hachuras, sombreamentos, perfis topográficos, entre outros. Estas formas de representação, apesar do seu reconhecido valor e da sua utilização tradicional desde remotas datas, não permitem fazer análises numéricas, simulações e modelagens eficientes, que forneçam respostas rápidas, precisas e adequadas para fazer face às crescentes demandas provocadas pelo advento das novas tecnologias. Surgiram então métodos alternativos para lidar com as questões que abordam a representação e análise eficiente da variação contínua da altitude. Dentre elas destaca-se a modelagem digital de elevação (MDE) também conhecido como modelagem digital de terreno (MDT). O termo elevação geralmente implica em outros atributos da paisagem, além da altitude.

Um Modelo Digital de Terreno (MDT) pode ser definido como a representação matemática da distribuição contínua do relevo dentro de um espaço de referência, armazenada em formato digital adequado para utilização em computadores (Namikawa et al., 2003). O MDT constitui uma poderosa ferramenta para a informação relacionada ao espaço geográfico, permitindo a modelagem, análise e exibição de fenômenos relacionados aos aspectos físicos do terreno ou superfícies similares.

Segundo Abrams et al. (2002) os MDEs relativos (elaborados sem pontos de controle) do ASTER podem ser gerados com valores de RMSE de até 10 m. A precisão altimétrica do MDE gerado a partir de imagens ASTER não são citadas na literatura, embora seja difundido o valor de 14 m. Este valor, no entanto, pode divergir conforme a área de estudo.

Entre os poucos trabalhos experimentais já publicados que empregaram dados ASTER para a obtenção de modelos digitais de elevação, ou seja, não utilizaram o produto nível 3 do ASTER, pode ser citado o de Parma (2007), que teve como objetivo analisar a aplicabilidade do modelo para cartografia, o de Godoy e Diáz (2007), para o estudo da

Geomorfologia e o de Oliveira (2005). Este último autor comparou a adequação dos MDE's gerados a partir de imagens ASTER, RADARSAT-1 e SRTM aos padrões de exatidão cartográfica estabelecidos pela legislação nacional, utilizando um módulo do programa *PCI Geomatics* para o processamento das imagens com pontos de controle coletados em campo. Seus resultados apontaram para a adequação dos MDE's provenientes do ASTER à exatidão recomendada para a escala 1:100.000. Fuckner (2007) executou uma avaliação dos MDE's para verificar o nível de conformidade em relação ao mapeamento topográfico oficial em escala compatível das suas áreas de estudo (Rio de Janeiro e São Paulo). O autor concluiu que para a área de estudo do Rio de Janeiro, no modelo digital de elevação as altitudes das áreas emersas mais baixas apresentaram valores inferiores aos do nível do mar. Mas os erros maiores nessa cidade podem ser em virtude da topografia acidentada e da grande porção de água na imagem. De forma geral, os modelos digitais de elevação do ASTER são considerados ferramentas eficazes para os estudos urbanos em mesoescala envolvendo hipsometria.

### **3.4. Dados de Temperatura**

O ecossistema da cidade envolve variáveis ambientais que modificam e também são modificadas pelas características físicas desse espaço urbano. Estes termos referem-se ao clima e à forma urbana que definem uma infinidade de combinações no espaço e no tempo. Nos grandes centros urbanos, observa-se diferenças representativas de temperatura entre as áreas centrais (temperaturas mais altas) e a periferia desses centros (temperaturas mais baixas). A substituição por grande quantidade de casas e prédios, ruas e avenidas, pontes e viadutos e uma série de outras construções faz aumentar significativamente a irradiação de calor para a atmosfera em comparação com as zonas periféricas ou rurais. Dependendo do albedo, mais radiação será absorvida e mais calor será emitido pela superfície (Teza e Batista, 2005). Na atmosfera das zonas centrais da

cidade, é muito maior a concentração de gases e materiais particulados, lançados pelos automóveis e pelas fábricas, responsáveis por um efeito estufa localizado, que colabora para aumentar a retenção de calor. Esses aspectos ainda vêm somados ao crescente número de automóveis, que são uma grande fonte de produção de calor. O uso de grande quantidade de combustíveis fósseis em aquecedores, automóveis e indústrias transformam a cidade em uma potente fonte de calor (Lombardo, 1985). Os materiais usados na construção, como o asfalto e o concreto, servem de refletores para o calor produzido na cidade e para o calor solar. De dia, os edifícios funcionam como um labirinto de reflexão nas camadas mais altas de ar aquecido. À noite a poluição do ar impede a dispersão de calor (Lombardo, 1985).

Os ambientes urbanos sem o devido planejamento que preveja o controle desses fenômenos têm apresentado qualidades ambientais cada vez mais baixas e danosas ao homem. Inúmeros estudos têm sido focalizados nesta ótica, afim de compreender as transformações sofridas pelo território e como podem ser controladas e amenizadas. Neste sentido, os dados de sensoriamento remoto colabora na disponibilização de dados das áreas urbanas. Como um dos pioneiros do uso de sensoriamento remoto para mapeamento do clima urbano, Lombardo (1985) utilizou imagens com *pixels* de 1,1 km de resolução espacial para mapear São Paulo.

Baptista (2003) analisou imagens termiais do Distrito Federal obtidas pelo sensor TM/*LandSat* 5 em 1984 e em 2001. Concluiu que houve uma ampliação da ilha de calor, motivada fundamentalmente pela expansão urbana aliada à ocupação de áreas públicas. Sousa e Baptista (2005) avaliaram a influência do tamanho do *pixel* na determinação da temperatura de superfície em sensores remotos termiais, utilizando imagens do sensor ASTER e MODIS. Concluíram que tanto a imagem ASTER quanto a imagem MODIS sofreram variação térmica na mesma faixa de temperatura, sendo que , as alterações de

temperatura são mais bem observadas nas imagens MODIS devido ao maior tamanho do *pixel*. Chen e Zhou (2004) compararam os dados de temperatura extraídos das imagens dos sensores ETM+/LandSat e ASTER e concluíram que o ASTER é mais eficiente na discriminação das temperaturas em relação ao ETM+.

### **3.5 Conforto Ambiental Urbano**

Data do final da década de 80 o surgimento de propostas de construção de indicadores ambientais e de sustentabilidade. Tais propostas possuem em comum o objetivo de fornecer subsídios à formulação de políticas nacionais e acordos internacionais, bem como à tomada de decisão por atores públicos e privados (Braga et al., 2002). Também buscam descrever a interação entre a atividade antrópica e o meio ambiente e conferir ao conceito de sustentabilidade maior efetivação e funcionalidade. Os índices ambientais existentes são, na maioria dos casos, modelos de interação atividade antrópica/meio ambiente. Eles podem ser classificados em três tipos principais: estado; pressão; resposta. Os indicadores de estado buscam descrever a situação presente, física ou biológica dos sistemas naturais. Os indicadores de pressão tentam medir/avaliar as pressões exercidas pelas atividades antrópicas sobre os sistemas naturais. Os indicadores de resposta buscam avaliar a qualidade das políticas e acordos formulados para responder/minimizar os impactos antrópicos (Herculano, 1998; Isla, 1998). De forma geral, os estudos sobre os indicadores de qualidade ambiental defrontam com dificuldades metodológicas referentes à concepção conceitual, à definição de variáveis e à obtenção e tratamento dos dados.

Uma primeira dificuldade diz respeito aos diferentes conceitos e concepções sobre o que seja qualidade ambiental, o que torna obscuro o processo de escolha das variáveis a serem utilizadas na mensuração. A carência de informações sistemáticas, tanto em relação à qualidade de vida quanto em relação ao meio ambiente, é problema recorrente

para aqueles que trabalham com indicadores ambientais. A construção dos índices envolve ainda a complicação adicional de tornar comparáveis dados de diferentes fontes, produzidos a partir de escalas distintas, com cobertura e distribuição espacial e temporal diversas.

A qualidade ambiental contribui para a qualidade de vida nas cidades, portanto, repensar tal questão é refletir sobre o controle do conforto ambiental, do consumo energético e dos impactos ambientais. O ecossistema da cidade envolve variáveis ambientais que modificam como também são modificadas pelas características físicas desse espaço urbano. (Braga et al., 2002).

O conceito de conforto ambiental é amplo e subjetivo e quando se refere ao ambiente construído está ligado à questão básica de se proporcionar aos assentamentos humanos as condições necessárias de habitabilidade, utilizando-se racionalmente os recursos disponíveis. Trata-se de fazer com que o produto arquitetônico corresponda – conceitual e fisicamente - às necessidades e condicionantes do meio ambiente natural, além do social, cultural e econômico de cada sociedade. Segundo Picada (1999, p. 2) “O conforto ambiental está intimamente ligado às necessidades psicossomáticas do indivíduo que, muitas vezes, têm que ser expressas para que possam ser atendidas e, em outras vezes, por tão específicas e particulares, são relegadas à solução genérica adotada.”

Isla (1998) ressalta que no caso dos indicadores ambientais locais, devido à ausência de uma definição conceitual, são utilizadas listas de indicadores isolados, sem explícita relação entre si, nem mesmo clareza da dependência dos dados e hierarquia.

Estudos têm sido feitos no intuito de identificarem as variáveis pertinentes para a avaliação da qualidade ambiental e definição do grau de confortabilidade ambiental dos espaços urbanos. Katzschner (1997) aponta para o estudo do clima urbano como um instrumento chave que explica o grau de qualidade ambiental das cidades, pois considera

a circulação do ar e as condições térmicas aspectos relevantes para o chamado clima urbano ideal. Para isso, este autor desenvolveu uma metodologia de representação das características ambientais locais em mapas de planejamento, integrando qualitativa e quantitativamente as informações sobre topografia, uso e ocupação do solo, rugosidade, vegetação, bem como temperatura do ar e ventos. O resultado final é um mapa de classificação de toda a área de planejamento que identifica partes homogêneas a serem protegidas e/ou melhoradas do ponto de vista climático. Ainda segundo Katzschner (1997), o mais importante passo para a identificação dessas áreas é saber definir quais as variáveis (que podem ser topografia, ocupação do solo, altura das edificações, vegetação, estrutura da cidade) que irão pesar em sua classificação, de acordo com o grau de influência na alteração climática.

A análise integrada dos atributos do meio físico urbano, tais como a topografia, o clima e a cobertura vegetal, associados ao uso e a ocupação do solo possibilita a elaboração de um diagnóstico ambiental mais consistente de uma determinada área. Este tipo de análise é recomendada por autores como Lu e Weng (2006), Mascaró (1996) e Weng et al. (2004), entre outros. Mudanças no uso e cobertura da terra não alteram apenas a abundância de vegetação e biomassa, mas também as propriedades termais. De acordo com Mascaró (1996), em escala mesoclimática, o clima urbano pode ser estudado com o auxílio da topografia, visando compreender a organização climática espacial.

A arquitetura e o urbanismo devem considerar sempre fatores climáticos e ambientais para o projeto de residências, prédios ou cidades de forma a proporcionar não apenas conforto do espaço onde se convive e sim de todas as formas, térmico, luminosidade, acústico da qualidade perceptível do ar, da água, do solo, entre outros. Segundo o Projeto de Normalização em Conforto Ambiental produzido por LabEEE (1998, p. 3) conforto térmico é a “*satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do*

*ambiente*” e desconforto local é o “*aquecimento ou resfriamento de uma parte do corpo gerando insatisfação do indivíduo*”.

O crescente interesse público na qualidade dos espaços abertos urbanos é resultado do reconhecimento de que essas áreas podem contribuir para a qualidade de vida nas grandes cidades. Porém, a inobservância de alguns fatores podem causar degradação ambiental e até exclusão social. Na corrente das várias discussões sobre uma nova urbanização, a questão que se ressalta é a revitalização das cidades. Dessa forma, no intuito de provocar melhorias no espaço comum urbano, é necessário focalizar esforços nas condições do ambiente e no conforto térmico (Katzschner, 1997). As cidades têm crescido, preferencialmente, com a implementação de grandes prédios, cada vez mais adensados, o que altera o clima local, a ventilação, o ciclo das águas e a luminosidade.

Diversas ferramentas para aquisição de dados para o mapeamento do conforto ambiental urbano são utilizadas, como dados de levantamento de campo, estações de medição, cartas topográficas e inclusive os próprios moradores do núcleo urbano.

O sensoriamento remoto tem sido crescentemente utilizado para a obtenção de dados para a modelagem do conforto ambiental urbano e, na maioria dos casos, as aplicações são conjugadas com dados adquiridos por outros tipos de levantamentos cartográficos. No entanto, a maior dificuldade é adquirir dados a partir de sensores com resolução espacial aplicável a estudos urbanos.

Outro desafio no estudo sobre conforto ambiental urbano é relacionar indicadores ambientais provenientes do sensoriamento remoto e dados sócio-econômicos. Rashed e Weeks, (2003) utilizaram técnicas de regressão linear e correlação de Pearson para comprovar a relação entre condições físicas e sociais em áreas urbanas. Concluíram que dados de sensoriamento remoto podem ser usados para obter indicadores da estrutura espacial urbana.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada uma imagem ASTER que compreende o município de Belo Horizonte e intercepta alguns municípios da região metropolitana de Belo Horizonte (Figura 6).

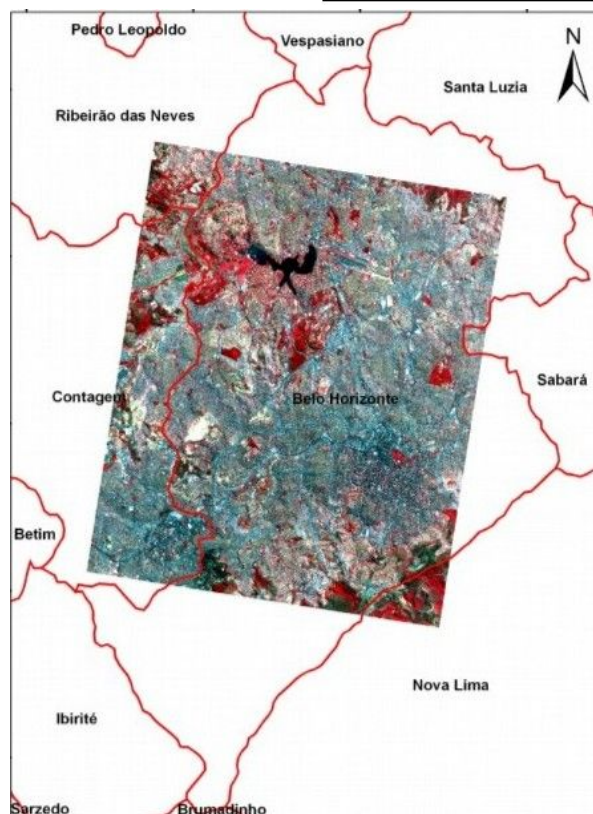
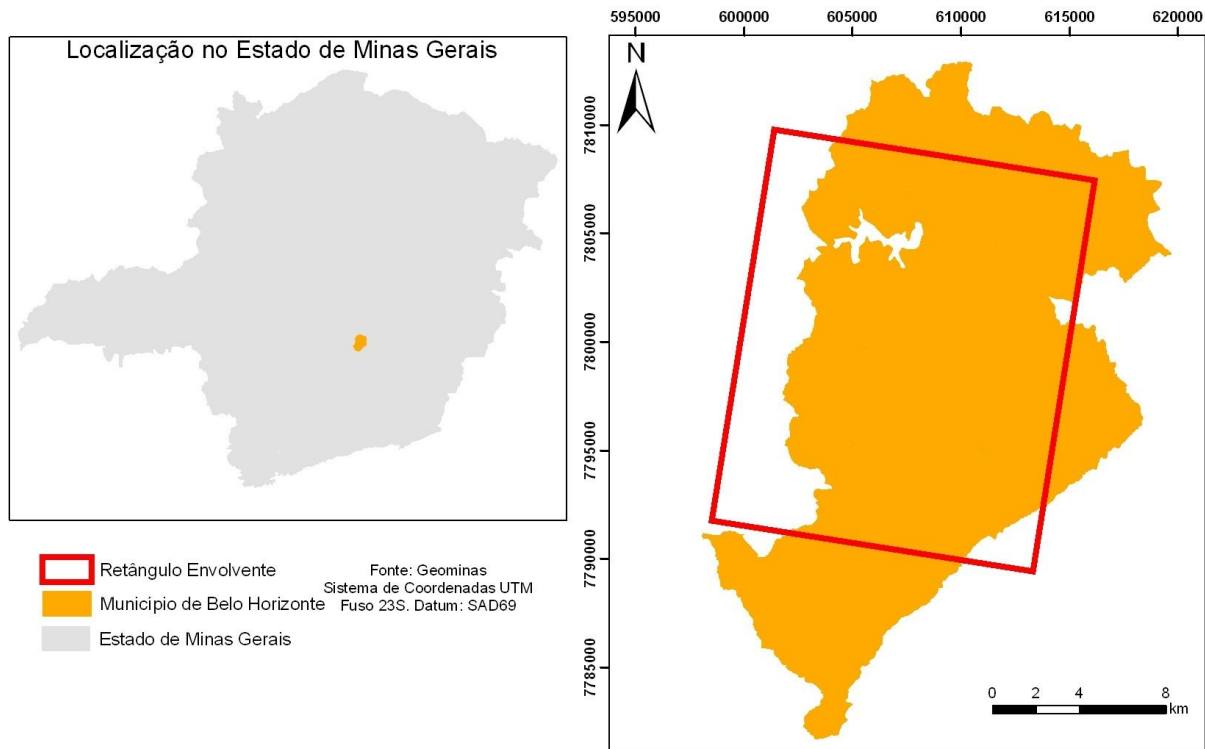


Figura 6: Localização da área de estudo



Os municípios que são interceptados pelo retângulo envolvente são: Contagem, Ribeirão das Neves, Nova Lima e Sabará. No momento da análise integrada do ambiente, quando é criado o mapa de conforto ambiental urbana, a área de estudo é alterada, sendo restrita somente à área do município de Belo Horizonte. Isso se deve ao fato que os dados elaborados nesta segunda etapa serão cruzados com outras informações exclusivamente de Belo Horizonte.

A imagem ASTER utilizada é do nível 1B, com aplicação dos coeficientes para correções radiométrica e geométrica incluídas. A imagem é de 04 setembro de 2002, uma quarta feira, dia típico na cidade de Belo Horizonte, sem a presença de feriado, o que confere à imagem adquirida uma visualização instantânea de uma situação ordinária para a área. Esse aspecto deve ser sempre notado nos estudos urbanos a partir de dados de sensoriamento remoto uma vez que a imagem com a qual se extrai informações diversas sobre a área é um “fotografia” do instante no qual o satélite sobrevoou a localidade, podendo assim, imagear um instante da paisagem que não necessariamente descreva sua situação padrão. Os dados da imagem ASTER adquirida são sintetizados na Tabela 3. O sistema de coordenadas dos dados é UTM (Universal Transversa de Mercator), no datum WGS84.

O percurso feito no procedimento metodológico pode ser observado na Figura 7. De forma geral existem três vertentes – criação dos dados de temperatura, MDE e modelo de mistura - que se confluem na análise integrada do ambiente e nas discussões tecidas em seu entorno.

ASTER	
<b>Nível</b>	Level 1B
<b>Data</b>	04 de setembro de 2002
<b>Hora</b>	10:16:02 (Hora Local)
<b>Dia da semana</b>	Quarta Feira

Tabela 3: Dados da imagem ASTER

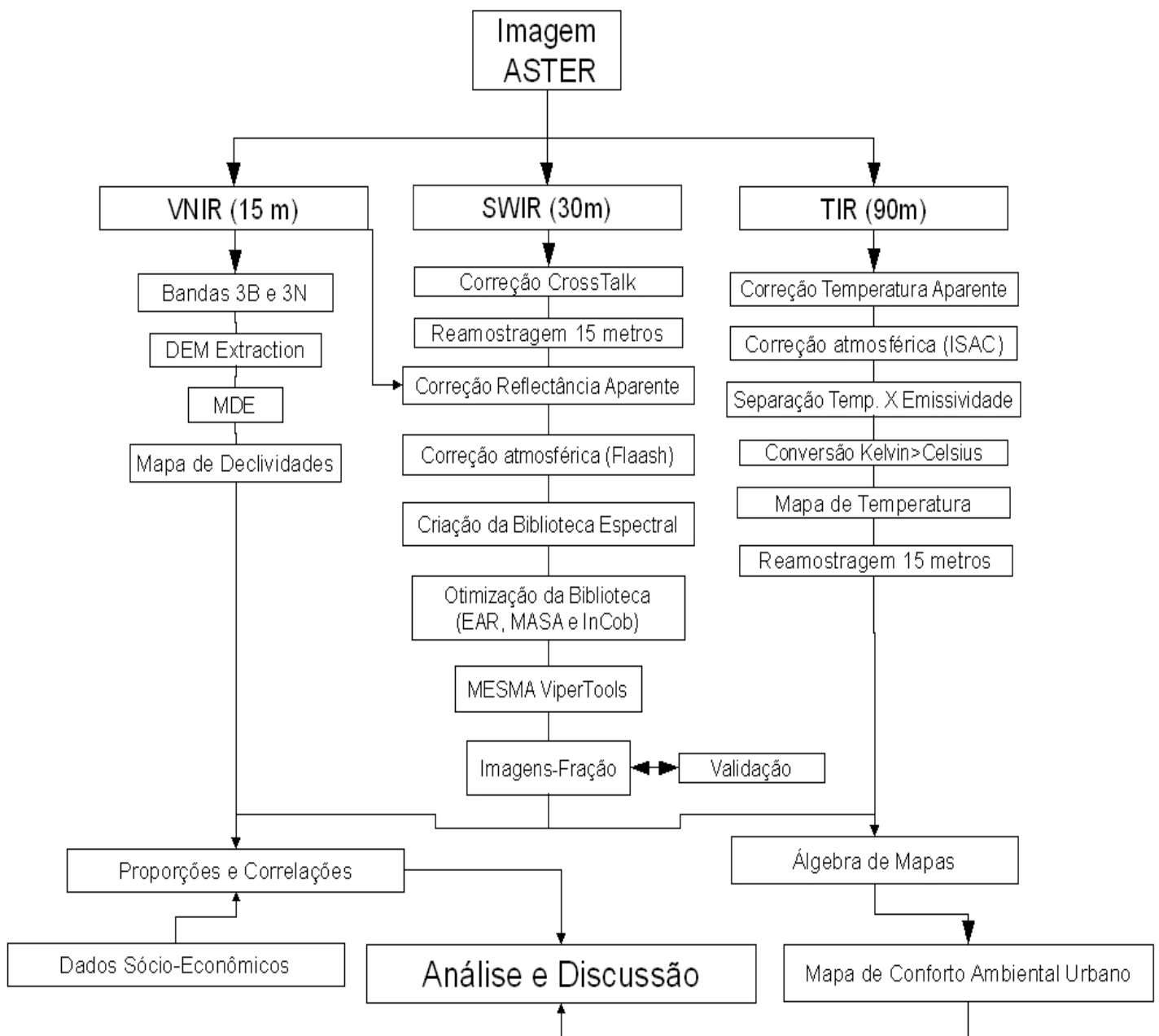


Figura 7: Fluxograma síntese da metodologia aplicada.

#### 4.1 Modelo de Mistura (MESMA)

Para a aplicação do modelo de mistura espectral foram utilizadas as bandas adquiridas por dois subsistemas do sensor ASTER, as 3 bandas do VNIR e as 6 do SWIR. Como plataformas, foram utilizados os módulos *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes - FLAASH* e *Visualization and Image Processing for Environmental Research (VIPER) Tools*, ambos implementados no programa *Environment for Visualizing*

## *Images - ENVI 4.2.*

A imagem ASTER do nível 1B já corrigida geométrica e radiometricamente. Essas imagens devem ser convertidas para radiância espectral, porém no programa ENVI 4.2 não há a necessidade de aplicação desta transformação radiométrica, pois automaticamente são extraídas as informações de calibração do cabeçalho dos arquivos “.hdf” das imagens ASTER, incluindo também as informações do georreferenciamento, ao serem abertas na lista de bandas disponíveis. Para os dados ASTER nível 1A, uma calibração completa para radiância deve ser executada. Para os dados ASTER no nível 1B o programa converte os dados escalonados em radiância para unidades de radiância espectral no formato numérico de ponto flutuante. As unidades de saída são  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ .

As imagens ASTER, antes de serem transformadas para reflectância, foram corrigidas para o efeito de *cross-talk*, que atua nas bandas do SWIR e é causado pela dispersão da REM incidente sobre os detectores da banda 4 do sensor (ERSDAC, 2003). Este procedimento foi executado através do programa de correção das imagens ASTER no nível de processamento 1B disponibilizado pelo *Earth Remote Sensing Data Analysis Center*.

Os dados do SWIR foram reamostrados de 30 para 15 m a partir da técnica do vizinho mais próximo e combinados com os do VNIR para formar um único arquivo. Ressalta-se que a técnica de vizinho mais próximo, utilizada na reamostragem, não alterou os valores da imagem, apenas quadruplicou o número de *pixels*.

As imagens foram transformadas de radiância espectral para reflectância espectral utilizando valores de irradiância solar espectral no topo da atmosfera conforme o método desenvolvido por Smith (2006). A reflectância espectral no topo da atmosfera para imagens ASTER pode ser calculada usando a Equação 2 (Wooster, 1996):

$$R_{TDA} = \frac{\pi \times L_{rad} \times d^2}{E_{sun_j} \times \cos_{(z)}} \quad (2)$$

onde:

$R_{TDA}$  é a reflectância planetária;

$L_{rad}$  é a radiância espectral da banda do sensor;

$E_{sun_j}$  é a irradiância solar média no topo da atmosfera da  $i$ -ésima banda espectral;

$Z$  é o ângulo solar zenital<sup>19</sup>; e

$d$  é a distância entre o Sol e a Terra, medida em unidades astronômicas.

A transformação das imagens de reflectância aparente para reflectância de superfície foi efetuada empregando-se um modelo de correção dos efeitos da atmosfera. A remoção desse efeito é importante pois o valor registrado de um dado *pixel* em uma imagem de sensoriamento remoto não é o registro real da radiação existente na superfície devido à influência da absorção da atmosfera, bem como de sua capacidade de causar espalhamento da energia eletromagnética (Figura 8) (Mather, 2004).

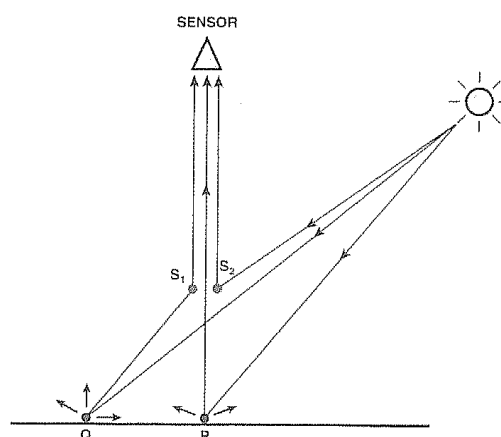


Figura 8: Esquema dos componentes do sinal recebido pelo sensor (Efeito do espalhamento atmosférico) (Mather, 2004).

Para a medida e remoção do efeito da atmosfera, utilizou-se o modelo de transferência radiativa FLAASH, baseado em códigos do MODTRAN 4.0 (Acharya et al., 1999). Este módulo efetua a correção de bandas no intervalo de comprimento de onda de 0,35 a 2,5

µm. Os dados de entrada utilizados são relativos a características da imagem, do sensor e da cena, tais como data e hora de aquisição, altitude do sensor, altitude média da cena, coordenadas geográficas do centro da cena e tamanho do *pixel*. Devem ainda ser selecionados os respectivos modelos de atmosfera e de aerossóis<sup>1</sup> mais adequados à área de interesse e inseridos o valor multiplicador da coluna de água e a visibilidade.

O modelo aplicado considerou um único valor de altitude para toda a cena apesar da grande variação neste parâmetro. Este procedimento pode tornar a imagem não bem corrigida para toda a área, no entanto, quando há uma alta frequência de variação altimétrica, como no caso do Belo Horizonte, considerando diferentes valores haveria a necessidade de recortar a imagem em diversas partes, descontínuas. Porém, Fuckner (2007) em seu estudo para a cidade do Rio de Janeiro, onde existe similar amplitude altimétrica, também optou por considerar um único valor para toda a cena, o que não acarretou em erros perceptíveis. O modelo de atmosfera e aerossóis utilizado foi o tropical e urbano, respectivamente (RSI, 2005).

O modelo de mistura espectral de múltiplos componentes foi processado considerando o arquivo de imagem que agregou as 9 bandas dos dados do VNIR e SWIR através do aplicativo *ViperTools* (versão *Beta* 1.12) desenvolvido por Roberts et al. (2007).

O *ViperTools* oferece um conjunto de ferramentas para o processamento de imagens multi-espectrais e hiper-espectrais: criação e gerenciamento de bibliotecas espectrais, seleção de *endmembers* para análise de mistura espectral e para cálculo e interpretação de modelos de mistura espectral simples – SMA (*Spectral Mixture Analysis*) e modelos de mistura espectral de múltiplos *endmembers* (MESMA) (Figura 9). Embora seja um programa livre, *ViperTools* não possui código fonte aberto e os direitos autorais são

---

<sup>1</sup>Os modelos de atmosfera disponíveis no ENVI são: Inverno Sub-Ártico, Inverno de Latitudes Médias, Estados Unidos Padrão, Verão Sub-Ártico, Verão de Latitudes Médias e Tropical e os modelos de aerossóis são: rural, urbano, marítimo e troposférico (RSI, 2005).

mantidos. Faz-se necessária a requisição de uma licença para sua instalação. Desenvolvido em linguagem IDL (*Interactive Data Language*), *ViperTools* possui interface como um módulo embutido no programa ENVI. Atualmente encontra-se na versão Beta 1.4 e o único sistema operacional compatível é o *Windows*®. *ViperTools* pode processar dados nas formas de nível digital, radiância ou reflectância. Fatores de escala podem ser definidos considerados os formatos numéricos e escalonamento dos dados. A unidade de saída das imagens-fração é dada no formato numérico de ponto flutuante.

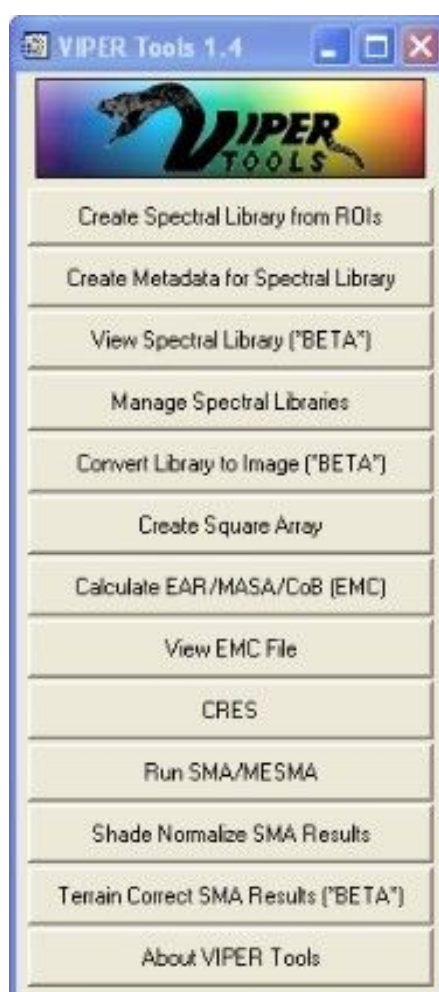


Figura 9: Layout do módulo ViperTools embutido no programa ENVI 4.2.

O objetivo do programa é ser utilizado em conjunto com as demais ferramentas disponíveis no ENVI para visualização, processamento de dados e acesso aos produtos resultantes, evitando repetição de ferramentas e atividades. As principais etapas são sintetizadas na Figura 10.

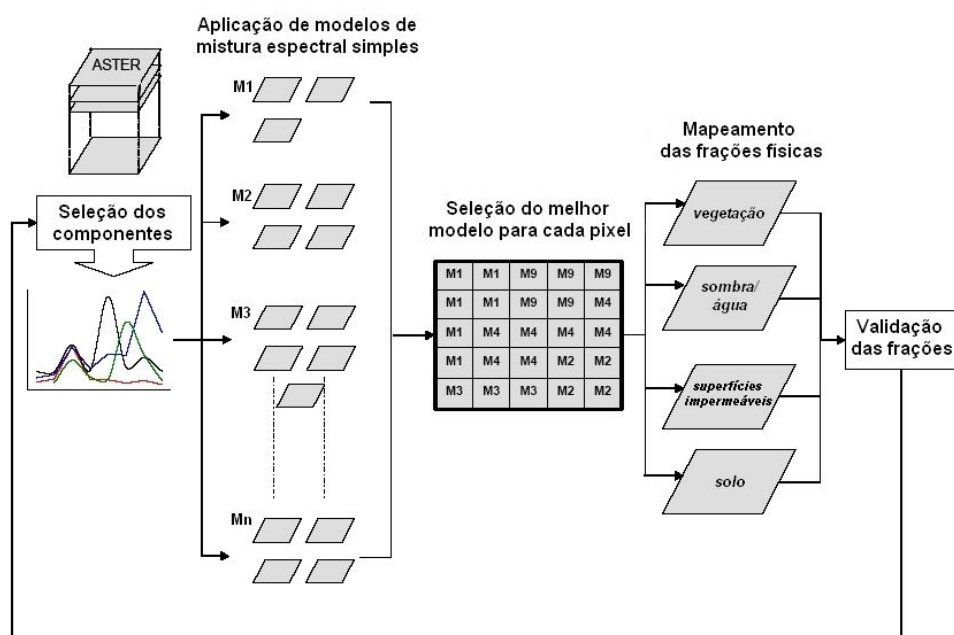


Figura 10: Principais etapas do modelo MESMA (Adaptado de Rashed et al., 2003).

A primeira etapa de aplicação do modelo consiste da criação da biblioteca espectral. Esta foi elaborada a partir de regiões de interesse nas imagens, identificadas a partir da análise visual de composições coloridas e análise espectral, bem como através de pesquisa de campo nas duas áreas de estudo. Esta seleção teve como objetivo principal a busca de componentes representativos da diversidade de alvos existente nas áreas de estudo, agregados segundo classes e categorias de interesse. As categorias para a biblioteca espectral foram definidas tomando como referência o modelo teórico V-I-S (*Vegetation, Impervious Surface e Soil*) (Ridd, 1995). Este autor propõe que qualquer ambiente urbano pode ser conceitualizado em termos dessas 3 componentes físicas: vegetação, superfície impermeável e solo, com a adição da classe água ou sombra. O modelo foi, originalmente aplicado para cidade norte americanas, mas já foi testado em mapeamento de outras cidades como Austrália (Ward et al., 2000), Tailândia (Madhavan et al., 2001) e Egito (Rashed, 2004) . Rashed et al (2003) mapearam os gradientes físicos do V-I-S para a cidade de Los Angeles e sugeriu correlações entre as características sócio-econômicas dos bairros e suas correspondências com a composição V-I-S. Rashed (2004) mapeou as

componentes V-I-S para a cidade do Cairo, Egito, e identificou alterações entre os dados físicos e os dados populacionais. Estes autores propõem que o monitoramento das componentes V-I-S em diferentes datas promovem maior acurácia na estimação de mudança da cobertura do solo.

Uma biblioteca espectral foi construída a partir das regiões de interesse contendo as informações relativas a comprimentos de onda, no entanto, sem qualquer informação espacial (Figura 11). Neste momento, é necessário editar o arquivo de metadados gerado automaticamente com a biblioteca, no qual são adicionadas informações sobre cada região de interesse, como classe e categoria. Foram feitas 30 regiões de interesse, cada uma contendo 36 *pixels* para a criação da biblioteca espectral de 8 classes distribuídas em 3 categorias, como mostra a Tabela 4.

<b>Categoria</b>	<b>Classe</b>
Vegetação	Rasteira
	Arbustiva
	Arbórea
Superfícies Impermeáveis	Asfalto
	Ocupação urbana densa com predomínio da verticalização
	Ocupação urbana de média a baixa densidade com predomínio da ocupação horizontal
	Edificação de grande porte.
Solo Exposto	Solo Exposto

Tabela 4: Organização da biblioteca espectral





Figura 11: Etapa de criação da biblioteca espectral a partir de regiões de interesse coletadas na imagem.

A etapa seguinte é a criação do arquivo de Matriz Quadrada (*Square Array*). Este arquivo contém valores das métricas de ajuste base para o cálculo das técnicas de seleção de componentes no *ViperTools*. O arquivo de Matriz Quadrada agrega diversas informações. A banda RMSE apresenta os valores calculados da raiz do erro quadrático médio de um espectro modelando o outro. A banda Ângulo Espectral apresenta os valores de distância angular (em radianos), entre dois espectros. A banda Fração de Brilho do Componente é a fração de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. A banda Fração Sombra, por sua vez, corresponde à fração sombra de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. É calculada como tendo o valor igual a 1 menos a Fração de Brilho do Componente. A banda Código Restrito contém valores de 1 se o modelo foi parcialmente restrito (as frações modeladas excederam o limite, mas não excederam o limiar de aceitação do erro); 2 se o limiar de aceitação do erro foi excedido (completamente restrito); e 0 (zero) para modelos sem qualquer restrição (Roberts et al, 2007).

Considerando valores padrão recomendados na literatura (Roberts et al., 1998b) e seguindo a recomendação de adoção do método parcialmente restrito, foram aplicados os valores de -0,05, 1,05 e 0,025 para a fração mínima, máxima e para o limiar de aceitação

de erro, respectivamente (Figura 12). Foram também utilizados outros parâmetros testados por Powell et al. (2007), em seu estudo na cidade de Manaus (AM). Esses valores consistem em -0,10 a 1,10 de brilho da fração; 0,5 máximo de sombra; RMSE *threshold*: 0,025. Para esses últimos parâmetros citados, também foi adotado o método parcialmente restrito. Este método permite a inclusão de modelos muito escuros que serão utilizados para calcular o EMC, posteriormente. Caso contrário, tais modelos seriam excluídos na etapa da Matriz Quadrada, sendo assim, subutilizados.

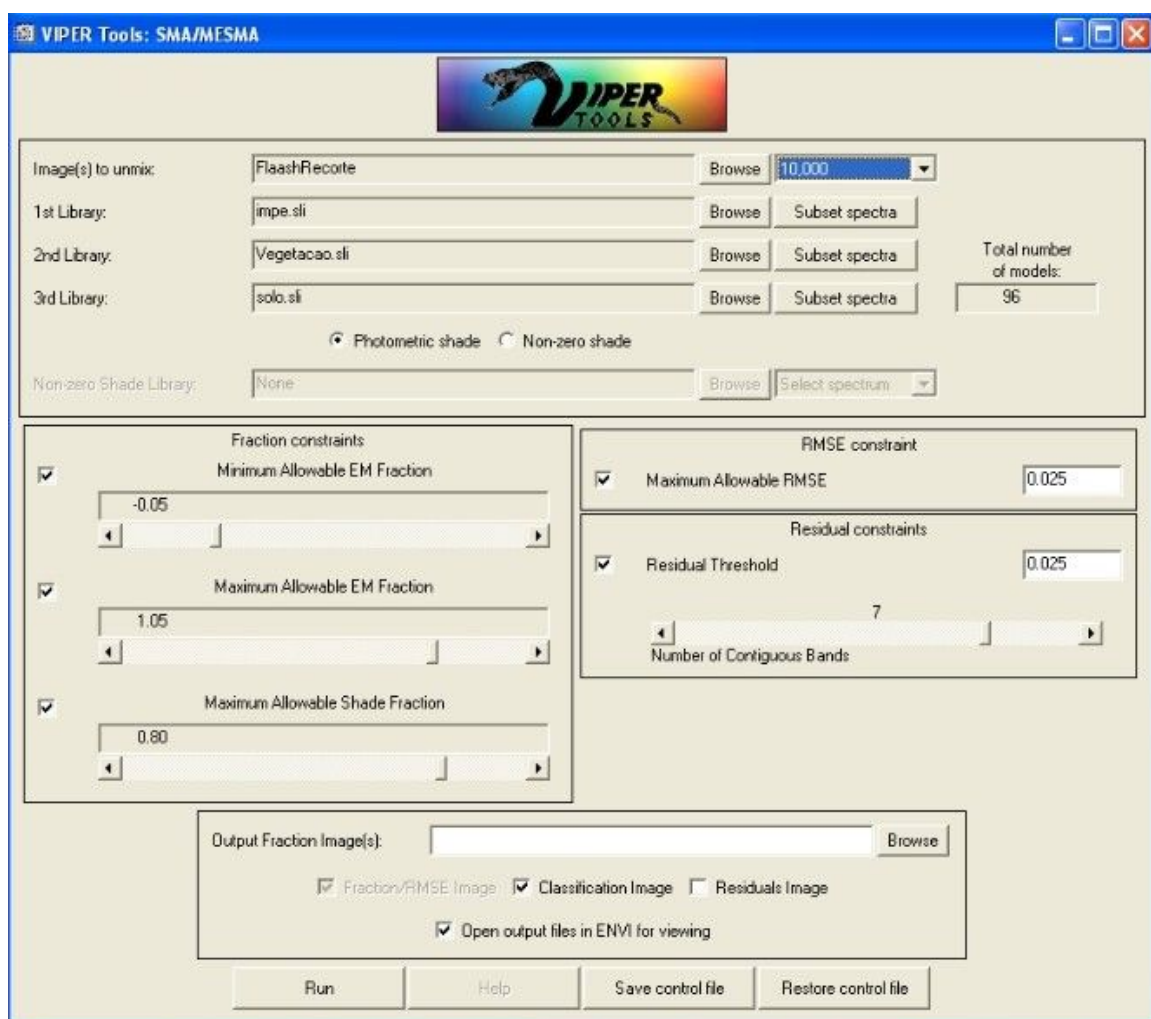


Figura 12: Etapa do processamento do modelo múltiplo de mistura.

Quatro técnicas para otimização da biblioteca espectral são identificadas no *ViperTools* CoB, EAR, MASA e CRES. Neste trabalho, foram adotadas duas formas para otimizar a biblioteca espectral: a primeira foi a técnica do menor EAR, como os autores citados anteriormente fizeram; na segunda foram selecionados espectros que possuíam o menor

EAR, menor MASA e maior InCoB. Nessa técnica, se seleciona os candidatos com melhor desempenho em cada uma das métricas. Assim, se ordena a lista de espectros para visualizar os menores EAR e se seleciona aqueles que adquiriram os menores valores para essa métrica (Figura 13). Da mesma forma com o MASA e InCoB. Foram selecionados os primeiros espectros com o melhor desempenho em cada índice. Dessa forma, na biblioteca espectral otimizada se encontram espectros que obtiveram bons resultados no EAR, MASA e InCoB. Se mais de uma métrica possibilitou a seleção do mesmo espectro, o espectro é selecionado somente uma vez. Essa técnica é proposta por Roberts et al. (2007) e, segundo os autores, a eficiência das diversas formas de otimização de biblioteca espectral ainda estão sob foco de pesquisas.

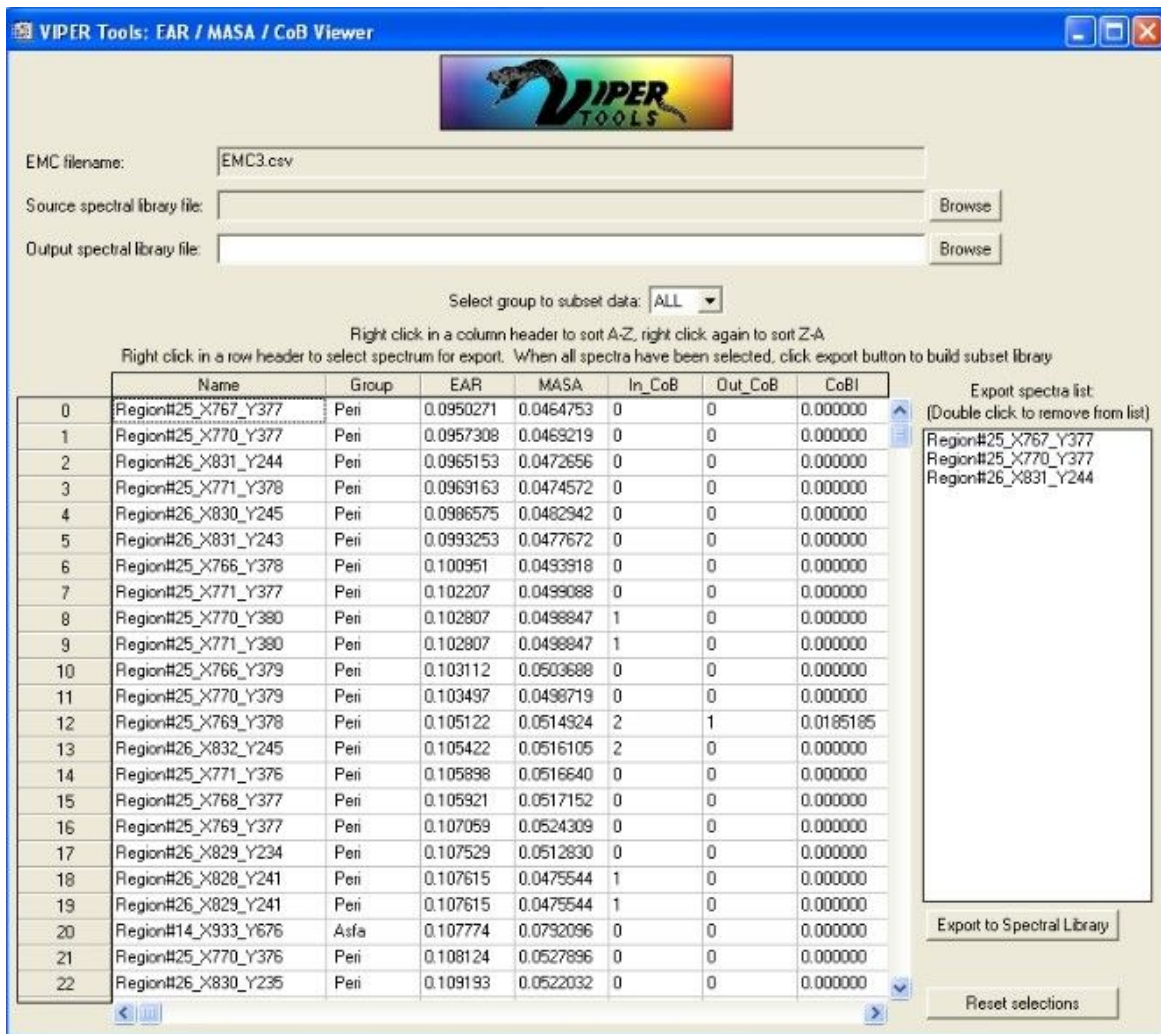


Figura 13: Etapa de otimização da biblioteca espectral através dos valores dos índices EAR, MASA e InCoB.

O *ViperTools* ainda possui uma quarta técnica para otimização dos *endmembers*, o CRES. Esse se apresenta como uma alternativa para a técnica do EMC. Descrito primeiramente por Roberts et al. (1993), é aplicada para o processamento de modelos de mistura simples. Para a seleção através desta técnica é importante que a biblioteca de referência contenha informações das frações estimadas em campo. Os melhores modelos serão os que apresentarem os menores valores do índice CRES (Roberts et al., 2007). Neste trabalho, como se estuda a aplicação do modelo múltiplo de mistura, essa técnica não foi utilizada.

Uma vez elaborada a biblioteca espectral otimizada, o MESMA pode ser processado. Essa opção do *ViperTools* inclui também o processamento do ALM, a partir da seleção de um único modelo para a biblioteca espectral. No caso de modelos múltiplos, o modelo que apresentar melhor desempenho deve ser selecionado com base no menor RMSE (Roberts et al., 2007). Também existem opções de restrição a valores mínimos e máximos fracionais, limiar de aceitação do erro ou resíduos e fração sombra máxima permitida, as quais devem ser ajustadas e cada processamento.

O módulo inclui duas opções para a criação da fração sombra: sombra fotométrica, quando a sombra padrão corresponde à refletância igual a zero, e a sombra não fotométrica que permite que o usuário selecione de uma biblioteca espectral um componente de referência para a sombra. Em geral, nessa abordagem, é utilizado um espectro de água limpa como referência (Roberts et al., 2007).

O MESMA, de acordo com as ferramentas existentes no *ViperTools*, permite modelar para cada *pixel* de uma imagem modelos com até quatro componentes. Entretanto, isto não é obrigatório, e nem inerente ao modelo, porque as combinações são efetuadas automaticamente. Se um *pixel* for modelado com menos componentes do que o necessário, a porção não modelada do *pixel* será fracionada para as frações resultantes

aumentando, assim, o erro do modelo para aquele *pixel* (Fuckner, 2007). Similarmente, o uso de muitos componentes para decompor o espectro do *pixel* resultará em erros de fração, causados pela confusão espectral entre os componentes (Rashed, 2004) além de excessiva demanda computacional. Dessa forma, o *pixel* será modelado por um modelo de quatro componentes somente se não tiver sido modelado anteriormente por modelos menos complexos, permitindo a comparação de resultados e a seleção do melhor modelo baseado em critérios como a mínima complexidade, adotado por Powell et al., 2007.

O *ViperTools* ainda conta com a Normalização da Sombra que pode ser introduzida nas imagens-fração na tentativa de minimizar os efeitos da sombra nas imagens de entrada, removendo esta componente das imagens-fração. Por exemplo, se pretende mapear a abundância de vegetação verde em regiões semi-áridas com topografia altamente irregular. A partir do modelo de mistura regular, a sombra da topografia poderá causar algumas confusões na interpretação dos valores de vegetação verde. Se se compara as frações de vegetação verde entre a região com baixa declividade do terreno com aquela região que possui relevo acidentado, a primeira área mostrará uma fração de vegetação verde mais alta devido à baixa interferência de sombras, mesmo que a abundância de vegetação verde seja a mesma nas duas regiões. Sendo assim, a normalização da sombra atenua esse efeito indesejado (Roberts et al., 2007). Outra forma de tratar a sombra é através de outra ferramenta disponível no *ViperTools*, o Módulo de Correção do Terreno. Este módulo usa as imagens-fração, um modelo digital de elevação e áreas de treinamento para desenvolver uma relação empírica entre a fração sombra e o ângulo incidente. Essa relação pode então ser usada para retirar a sombra topográfica da imagem-fração. Para executar esse módulo, é necessário criar, previamente, um MDE que possua a mesma resolução espacial e extensão (linhas e colunas) das imagens-fração processadas. Para este estudo, considerando a relevância da fração sombra no recorte espacial de Belo Horizonte, onde mais se destaca nos corpos d'água, esse

módulo não foi aplicado. De modo sintetizado, a rotina do *ViperTools* para a aplicação do MESMA pode ser visualizada na Figura 14.

A principal limitação do *ViperTools* consiste em não apresentar ainda uma rotina para seleção do melhor modelo para cada *pixel* da imagem considerando os modelos com número diferente de componentes. Esta seleção é efetuada considerando somente modelos de dois, três ou quatro componentes, conforme o número de bibliotecas espectrais de referência para as frações desejadas selecionadas.

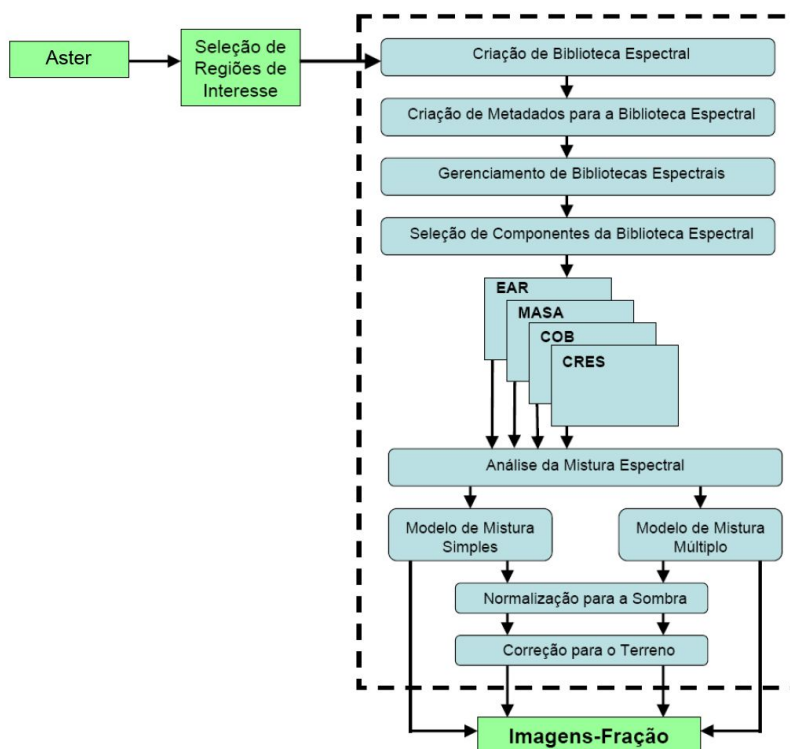


Figura 14: Etapas da aplicação dos modelos de mistura espectral. Fonte: Adaptado de Roberts et al. (2007).

Para a validação dos dados obtidos a partir do MESMA foi realizada uma análise qualitativa dos resultados.

## 4.2 Modelo Digital de Terreno

A partir das imagens 3B (*Backward*) e 3N (*Nadir*) do ASTER, ambos com 15 metros de resolução espacial e com o mesmo intervalo espectral (de 0,78 a 0,86  $\mu\text{m}$ ), foi possível

elaborar um modelo digital de elevação da área utilizando a ferramenta *DEM Extraction*, implementado no ENVI 4.2. Ambas imagens são adquiridas com um ângulo de visada lateral de aproximadamente 28°, permitindo a construção de pares estereoscópicos para cada imagem e a geração de modelos de elevação (Abrams et al., 2002).

O módulo *DEM Extraction* possibilita a extração de dados de elevação através de imagens que são pares estereoscópicos como aqueles provenientes dos sensores ASTER, *Ikonos*, *OrbView-3*, *QuickBird* e SPOT. É importante que essas imagens sejam associadas com *Rational Polynomial Coefficients* (RPC's), que contêm necessariamente informações sobre o sensor. Além disso, os RPC's são usados para a geração de pontos de controle e para calcular a relação do par de imagens estereoscópicas (RSI, 2005).

Esta etapa foi executada a fim de criar o MDE da área. Posteriormente, foram extraídas as informações sobre as declividades do terreno.

### **4.3 Dados Temperatura**

Para a extração dos dados de temperatura foram utilizadas as 5 bandas no termal do ASTER. Foram necessárias 3 etapas no processamento: conversão da radiância (DN) para temperatura radiante; (2) correção para absorção e reemissão atmosférica; e (3) correção para emissividade (Voogt e Oke, 2003).

As imagens foram transformadas para temperatura radiante por meio da Equação 3, definida com base na Lei de Planck, que descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo-negro<sup>2</sup> (Slater, 1980; Iqbal, 1983).

---

<sup>2</sup>Gustav Kirchoff, em 1860, definiu o "corpo negro" (*Blackbody*) como sendo uma superfície hipotética ideal, cuja emitância espectral é máxima em todos os comprimentos de onda, ou seja, possui emissividade constante e igual a 1. Os objetos da superfície terrestre não emitem radiação como um corpo negro, pois apresentam emissividade variável e  $>1$ . Quando a emissividade espectral de um objeto é igual a 1, a sua temperatura radiométrica é igual à temperatura real deste. Se a radiação é medida em  $n$  canais espectrais, existem  $n + 1$  dados desconhecidos ( $n$  emissividades, uma por canal, e uma temperatura da superfície).

$$T = \frac{c_2}{\lambda \times \ln \left[ 1 + \frac{c_1}{\lambda^5} \times \pi \times L_\lambda \right]} \quad (3)$$

onde:

$c_1$  corresponde a  $3,7427 \cdot 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^4$ ;

$c_2$  corresponde a  $1,4388 \cdot 10^4 \mu\text{m.K}$ ;

$\lambda$  é o comprimento de onda em  $\mu\text{m}$ ;

$T$  é a temperatura aparente em Kelvin;

$L$  é a radiância.

Segundo a Lei de Planck, a emissão espectral de radiação eletromagnética de um corpo é proporcional à sua temperatura. (Slater, 1980; Iqbal, 1983). A magnitude da radiação térmica para um determinado comprimento de onda e a distribuição espectral variam com a temperatura e com a natureza da superfície emissora. Os valores de temperatura na equação anterior se referem a um corpo negro, desse modo, correções devido à emissividade espectral devem ser efetuadas. Os valores de emissividade variam de acordo com a cobertura da superfície terrestre. Considerando que cada tipo de superfície se comporte como um corpo cinza, ou seja, apresente emissividade constante e inferior a 1 e que a relação entre temperatura aparente e real seja representada pela Equação 4.

$$T_a = \varepsilon^{1/4} T_r \quad (4)$$

onde:

$T_a$  é a temperatura aparente, radiométrica, radiante ou de brilho;

$\varepsilon$  é a emissividade da superfície e;

$T_r$  é a temperatura real, cinética, termométrica da superfície.

A temperatura da superfície da Terra corrigida para emissividade pode ser gerada a partir



da Equação 5 (Artis e Carnahan, 1982).

$$T_s = \frac{T_c}{1 + \left( \lambda \times \frac{T_c}{\gamma} \right) \ln \varepsilon'} \quad (5)$$

onde:

$T_s$  é a temperatura da superfície;

$\lambda$  é o comprimento de onda da radiância emitida (para o pico da resposta espectral de cada banda e média de sua largura);

$T_c$  é a temperatura aparente;

$\gamma = h \cdot c / \sigma$  ( $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ), e  $c$  é a velocidade da luz ( $2,998 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Antes de converter os dados de temperatura aparente para emissividade e assim obter a imagem temperatura de superfície, é imprescindível efetuar a correção dos efeitos atmosféricos na imagem de satélite. A correção atmosférica do termal é útil para medir e remover as contribuições da atmosfera nos dados de radiância no infravermelho termal (RSI, 2005).

O algoritmo de correção atmosférica usado foi Algoritmo de Compensação Atmosférica da Cena (*In-Scene Atmospheric Compensation Algorithm - ISAC*), implementado no ENVI 4.2. Este algoritmo foi desenvolvido para o sensor aerotransportado *Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System* (SEBASS), de propriedade da empresa *Aerospace Corporation*, que possui 124 bandas no intervalo espectral de 7,5 a 13,4  $\mu\text{m}$ . O algoritmo ISAC possibilita corrigir os efeitos da atmosfera de dados termais multi-espectrais com base nos parâmetros de radiância coletados pelo próprio sensor remoto, sem a necessidade de inserção de dados meteorológicos auxiliares (Young et al., 2002).

O ISAC assume que a influência da atmosfera é uniforme em toda a cena e que existe na imagem uma superfície com propriedades semelhantes a um corpo negro. A localização

desse corpo negro não é requerida para o processamento. A temperatura de superfície de cada *pixel* é estimada e usada para se obter a temperatura aparente com base na equação de Planck assumindo-se uma emissividade igual a 1. Em seguida é ajustada uma linha no diagrama de dispersão entre a radiância e a temperatura aparente. Os percentuais de radiação atenuada e transmitida pela atmosfera são derivados a partir dos coeficientes de regressão desta linha (RSI, 2005).

Após a correção atmosférica das bandas do infravermelho termal, foram separadas da temperatura aparente, a emissividade e a temperatura. Foi utilizada a técnica Banda de Referência (*Reference Channel*), que assume um valor fixo para a emissividade para gerar os dados de emissividade e temperatura.

Nesta técnica, considera-se que todos *pixels* de um dado canal do infravermelho termal (banda) possuem uma emissividade constante. Foi selecionado o canal 13 (10,25 – 10,95  $\mu\text{m}$ ), pois este intervalo espectral é o pouco susceptível à atenuação da atmosfera (Figura 15). Trabalhos anteriores como, por exemplo, o de Lu e Weng (2006) e Fuckner (2007) também utilizaram esse canal do ASTER para a obtenção da imagem de temperatura.

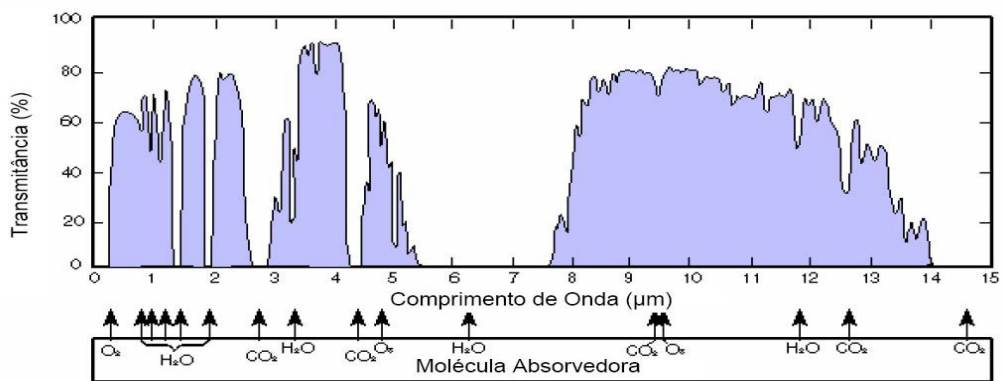


Figura 15: Janelas Atmosféricas

A imagem temperatura é adquirida em Kelvin e foi transformada em Celsius através da Equação 6.

$$T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (6)$$

#### 4.4 Dados Ambientais e Sócio-Econômicos

Foram analisados, de forma integrada, os dados obtidos a partir das técnicas expostas anteriormente, como também foram submetidos à análises combinadas com dados sócio-econômicos e de infra-estrutura urbana da área de estudo (Dados PRODABEL - PBH). Pelo fato desses dados serem exclusivos para o município de Belo Horizonte, excluiu-se da área de estudo, nesta etapa, as regiões que incluíam municípios da região metropolitana (Figura 16). Além da alteração do retângulo envolvente, os dados obtidos nas etapas descritas anteriormente sofreram a conversão do datum de WGS84 para SAD69, também como o intuito de possibilitar o cruzamento com os dados de Belo Horizonte.

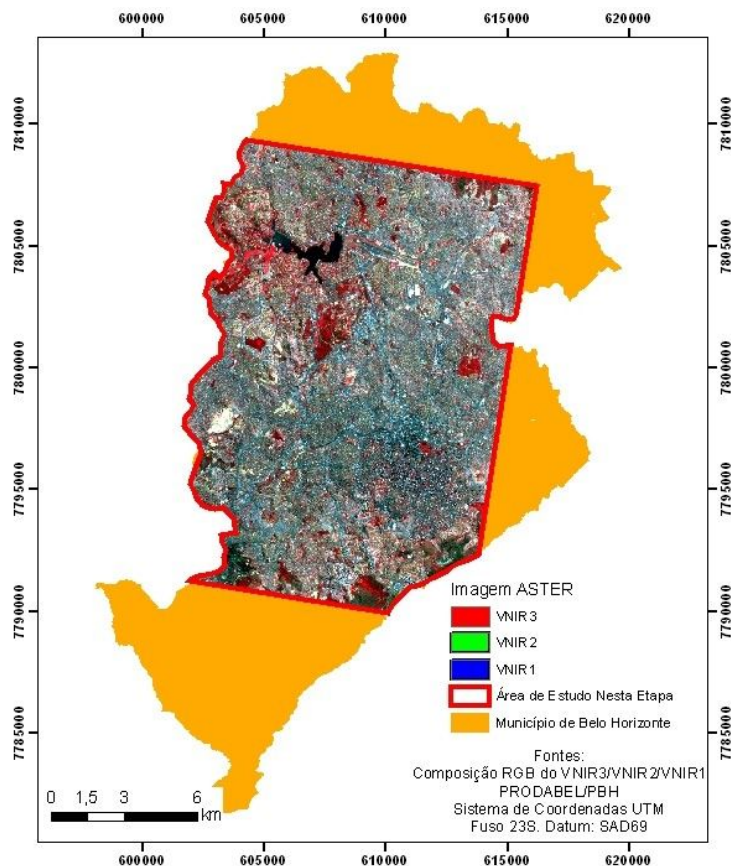


Figura 16: Retângulo envolvente utilizado na análise integrada do ambiente.

Foi proposto um modelo descritivo do conforto ambiental urbano a partir de álgebra de mapas, considerando que o conforto ambiental urbano segue as seguintes regras:

extremos de temperatura, concentração de superfícies impermeáveis e altas declividades são inversamente proporcionais ao conforto ambiental urbano, enquanto que a vegetação lhe é diretamente proporcional, como mostra a Tabela 5. Para essa etapa foi utilizado o programa LEGAL (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) implementado no SPRING 4.3.3. (Sistema de Gerenciamento de Imagem Georreferenciadas).

Os extremos das temperaturas encontradas na imagem foram considerados como indicador de baixa qualidade ambiental. Dessa forma, foi feito um fatiamento que valorizasse os valores medianos dessa variável. Vale salientar que confortabilidade em relação à temperatura é um fator cultural, dessa forma, a escolha desse fatiamento teve como base informações colhidas com habitantes da cidade de Belo Horizonte. Esses por sua vez, indicaram quais seriam os valores de temperatura que lhes proporcionariam agradabilidade e desconforto, dentro do intervalo obtido na imagem temperatura utilizada. A mesma técnica foi adotada com os dados de declividades. Neste caso, foi considerado que a maior declividade cria empecilhos para o morador da cidade em relação à acessibilidade do território. Dessa forma, os dados de declividade foram examinados como graus de acessibilidade topográfica. Já com as imagens-fração, foi feito um fatiamento proporcional, dividindo igualmente nas três categorias.

Cada variável dos mapas temáticos de entrada foi dividida em três categorias, nomeadas em Alto, Médio e Baixo, que possuem notas de 6, 4 e 2, respectivamente. As áreas que obtiveram o valor Alto significa que colaboram ao máximo na confortabilidade urbana, enquanto que o Baixo a influência negativamente. A cada resultado foi atribuída uma pontuação que a inclui numa certa classe do mapa final, como mostra a Tabela 6. Nota-se que os mapas de entrada possuem pesos iguais a 1.

<b>Variável</b>	<b>Fatiamento</b>
Temperatura	Alto: 22 a 27,99°C
	Médio: 18 a 21,99°C e 28 a 29,99°C
	Baixo: 13 a 17,99°C e 30 a 40°C
Superfícies Impermeáveis	Alto:-0.10 a 0.2999
	Médio: 0.30 a 0.6999
	Baixo: 0.70 a 1.10
Acessibilidade Topográfica	Alto: 0° a 26,55°
	Médio: 26,56° a 53,10°
	Baixo: 53,11° a 79,65°
Vegetação	Alto:0.70 a 1.10
	Médio: 0.30 a 0.6999
	Baixo: -0.10 a 0.2999

Tabela 5: Fatiamento adotado nas variáveis de entrada para o mapa de conforto ambiental urbano

Na análise entre o mapa de conforto ambiental urbano e os dados sócio-econômicos, foi calculado o índice Kappa para determinar a concordância entre eles. Esse índice normalmente é utilizado como uma medida de concordância que indica quanto as observações se afastam da referência considerada como verdade terrestre. Porém, neste trabalho, o índice Kappa foi empregado no seu sentido original, como um fator que indica como um mapa concorda com outro, e não uma medida de erro.

<b>Pontuação</b>	<b>Classes de Conforto Ambiental</b>
2,0 a 2,833	Baixo
2,834 a 3,666	Médio a Baixo
3,667 a 4,499	Médio
4,5 a 5,332	Médio a Alto
5,334 a 6,0	Alto

Tabela 6: Resultados possíveis e sua respectiva classe no mapa de conforto ambiental urbano.

Foram confrontados o mapa de conforto ambiental urbano e os seguintes dados sócio-econômicos:Índice de Desenvolvimento Humano (IDH); acessibilidade à atividades

urbanas, resultante do cruzamentos do número de estabelecimentos industriais, comerciais, de serviços, de cultura, de saúde e proximidade à áreas de lazer; densidade populacional; renda do chefe de família; infra-estrutura urbana, que incluem abastecimento de água, coleta de lixo, rede de esgoto, drenagem pluvial e acessibilidade viária.

## 5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os processamentos que antecederam a aplicação do modelo de mistura espectral de múltiplos componentes foram conduzidos com sucesso após a realização de diversos testes. Foram obtidos quatro resultados através da aplicação de diferentes formas de otimização da biblioteca espectral e dos parâmetros utilizados no processamento do MESMA.

No primeiro teste a otimização foi feita através do menor EAR e os parâmetros utilizados foram aqueles padrão do *ViperTools* (Roberts et al., 2007). No segundo teste mantém-se a forma de otimização do primeiro, alterando os parâmetros do MESMA, com base em Powell et al., 2007. No terceiro teste a otimização é feita com base no menor EAR e MASA e maior InCob, com os parâmetros padrão. Já o quarto teste foi submetido aos parâmetros de Powell et al., 2007 mantendo a forma de otimização do terceiro teste (Tabela 7).

<b>Teste 1</b>	<b>Teste 2</b>	<b>Teste 3</b>	<b>Teste 4</b>
Otimização pelo menor EAR	Otimização pelo menor EAR	Otimização pelo menor EAR e MASA, maior InCob	Otimização pelo menor EAR e MASA, maior InCob
Parâmetros Roberts et al. (2007) Padrão	Parâmetros Powell et al., 2007	Parâmetros Roberts et al. (2007) Padrão	Parâmetros Powell et al., 2007

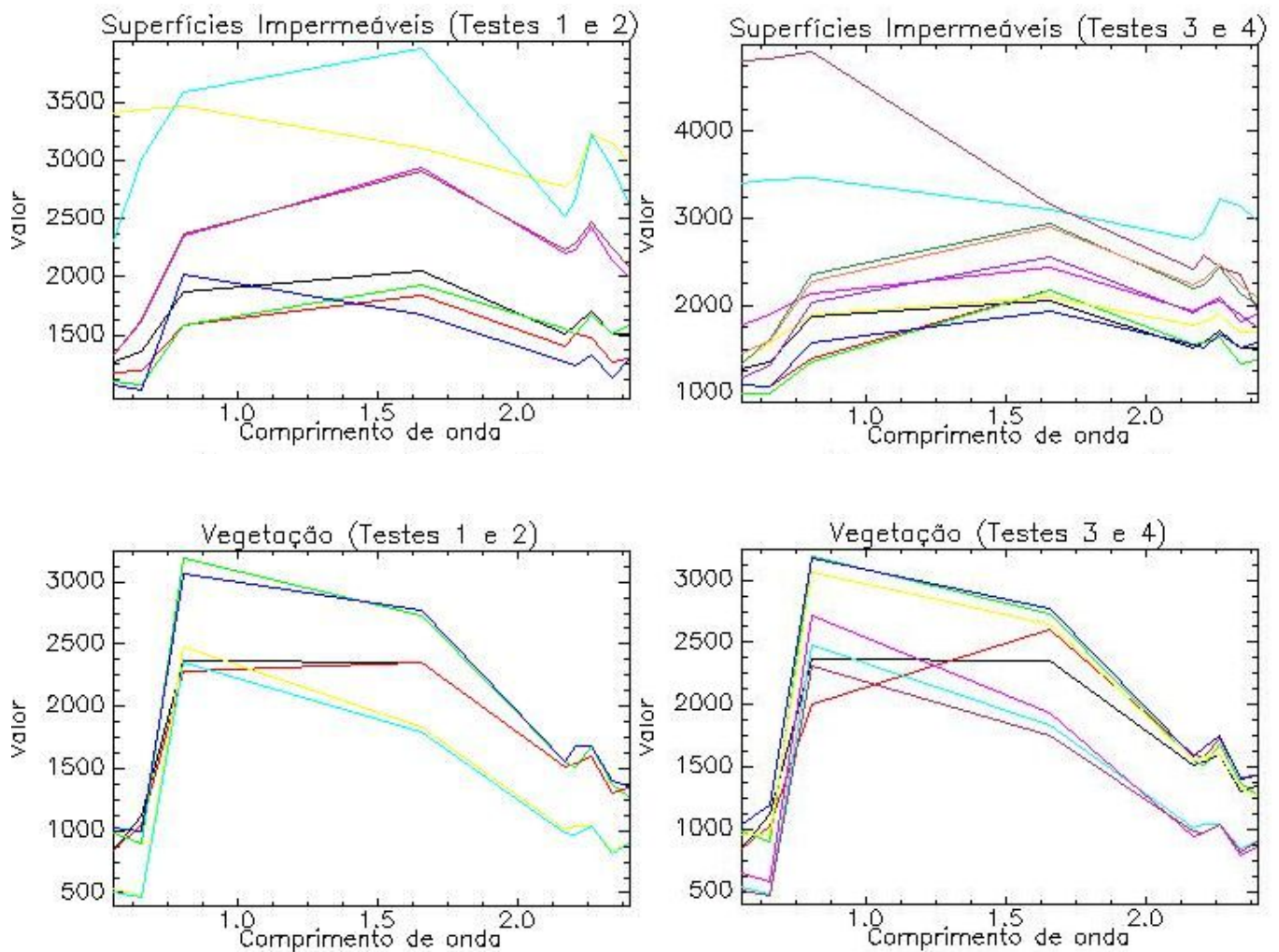
Tabela 7: Testes realizados para criação das imagens fração

Os modelos aplicados após a realização dos devidos testes contemplaram o número e as classes de componentes conforme listados na Tabela 8. Também foram efetuados testes com um número maior de componentes, porém, visualmente não foram obtidos melhores resultados, seja em valores maiores para determinada fração, seja modelando com menos ruído.

O número de componentes foi inferior ao selecionado por Powell et al., 2007 para aplicação do modelo MESMA à cidade de Manaus, correspondente a 26 componentes, considerando todas as classes. As assinaturas espectrais dos componentes selecionados a partir das diferentes técnicas de otimização da biblioteca e incluídos no processamento do MESMA são apresentadas na Figura 20.

Classe	Teste 1 e 2	Teste 3 e 4
Superfícies Impermeáveis	8 espectros	11 espectros
Vegetação	6 espectros	8 espectros
Solo Exposto	2 espectros	2 espectros
<b>Total de Componentes</b>	16	20
<b>Total de modelos</b>	96	176

Tabela 8: Modelo de múltiplos componentes adotado





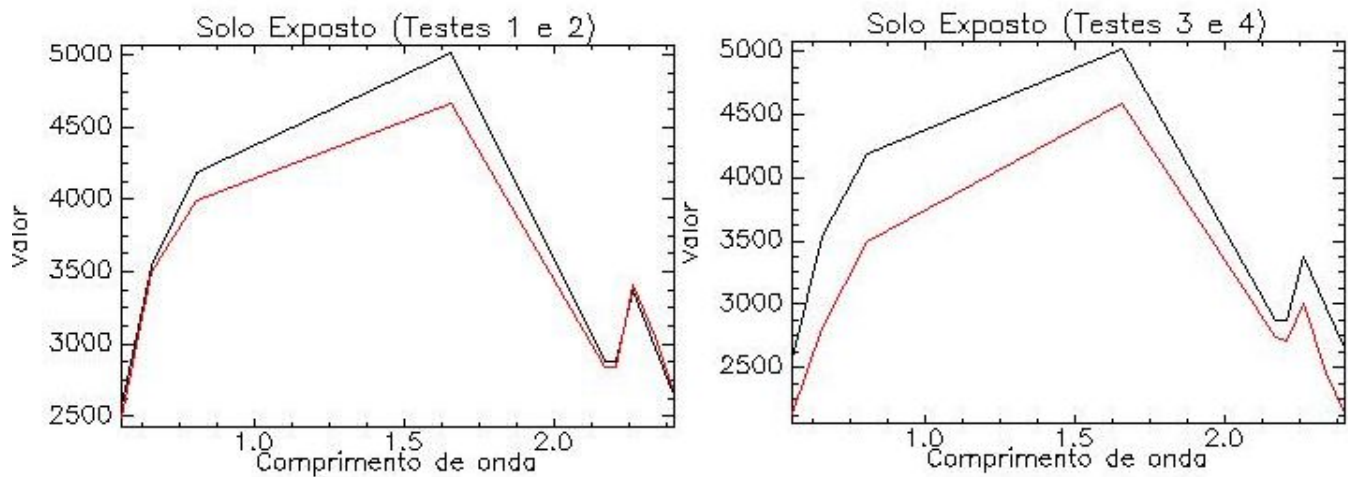


Figura 20: Espectros da biblioteca espectral otimizada

Observando os resultados (Tabela 9), percebe-se que a otimização da biblioteca espectral utilizando os índices EAR, MASA e InCob alteram significativamente o desempenho se comparados àqueles resultados encontrados com o emprego do EAR somente, no que diz respeito à quantidade de *pixels* modelados.

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
96 modelos		176 modelos	
25,59% da imagem	17,83% da imagem	13,47% da imagem	9,08% da imagem
não modelada	não modelada	não modelada	não modelada

Tabela 9: Desempenho dos testes no *ViperTools*

No teste 1, a partir da otimização da biblioteca, 96 modelos foram utilizados e 25,59% da imagem não foi classificada. Já no teste 3, 176 modelos foram selecionados a partir da otimização aplicada, resultando em 13,47% da imagem não classificada.

No teste 2, com os mesmos 96 modelos do teste 1, alterando-se os parâmetros, a quantidade de *pixels* não modelados caiu para 17,83%. Enquanto que no teste 4, com os 176 modelos, 9,08% da imagem não foi classificada.

As diferenças quantitativas dos resultados se deve ao fato que, a otimização da biblioteca espectral considerando mais índices, abrange mais a complexidade da área estudada. Um número maior de espectros foi selecionado para classificar a imagem, aumentando as

chances de combinação. As diferenças também observadas com a alteração dos parâmetros se deve ao fato que os valores que Powell et al. (2007) propõe são mais permissivos, aumentando a possibilidade de um *pixel* ser modelado.

Dessa forma, a combinação da otimização da biblioteca espectral a partir do emprego concomitante do EAR, MASA e InCob e da alteração dos parâmetros do modelo conforme Powell et al., 2007, melhoram o desempenho na modelagem dos *pixels*.

Recorrendo a uma análise qualitativa dos resultados, percebe-se que no desempenho dos testes 3 e 4, na fração das superfícies impermeáveis, é possível identificar as grandes vias de acesso da cidade, como Avenida Presidente Antônio Carlos, Via Expressa, Avenida Cristiano Machado e Avenida do Contorno. Enquanto que nos testes 1 e 2 não são tão visíveis esses padrões. Grandes áreas com superfícies impermeáveis (ex.: Aeroporto da Pampulha) não apresentam grande diferenças entre os testes.

Na área industrial de Contagem, percebe-se um menor mapeamento de superfícies impermeáveis que o esperado. Provavelmente devido à elevada quantidade de material particulado em suspensão na atmosfera, proveniente da poluição emitida pelos estabelecimentos do local. Dessa forma, a resposta espectral da superfície ali presente foi subestimada pelo sensor. Apesar desse efeito, ainda pode-se notar que existe uma grande concentração de áreas impermeáveis na região (Figura 21).

De forma geral, em relação às frações de superfícies impermeáveis, o teste 1 é aquele com o menor desempenho. No teste 4 foi observada uma maior proporção de superfícies impermeáveis, em segundo lugar o teste 3. Isso se deve ao fato que ambos os testes foram processados com os parâmetros de Powell et al., 2007 que abrangem a possibilidade de um *pixel* ser modelado como superfície impermeável. Apesar do teste 2 ter sido realizado com esses parâmetros, não houve uma maior modelagem dos *pixels* devido ao tipo de otimização da biblioteca espectral (Menor EAR), na qual limita a

diversidade de espectros que representem a variedade das superfícies impermeáveis. Os resultados obtidos em cada teste para essa fração podem ser observados na Figura 22.

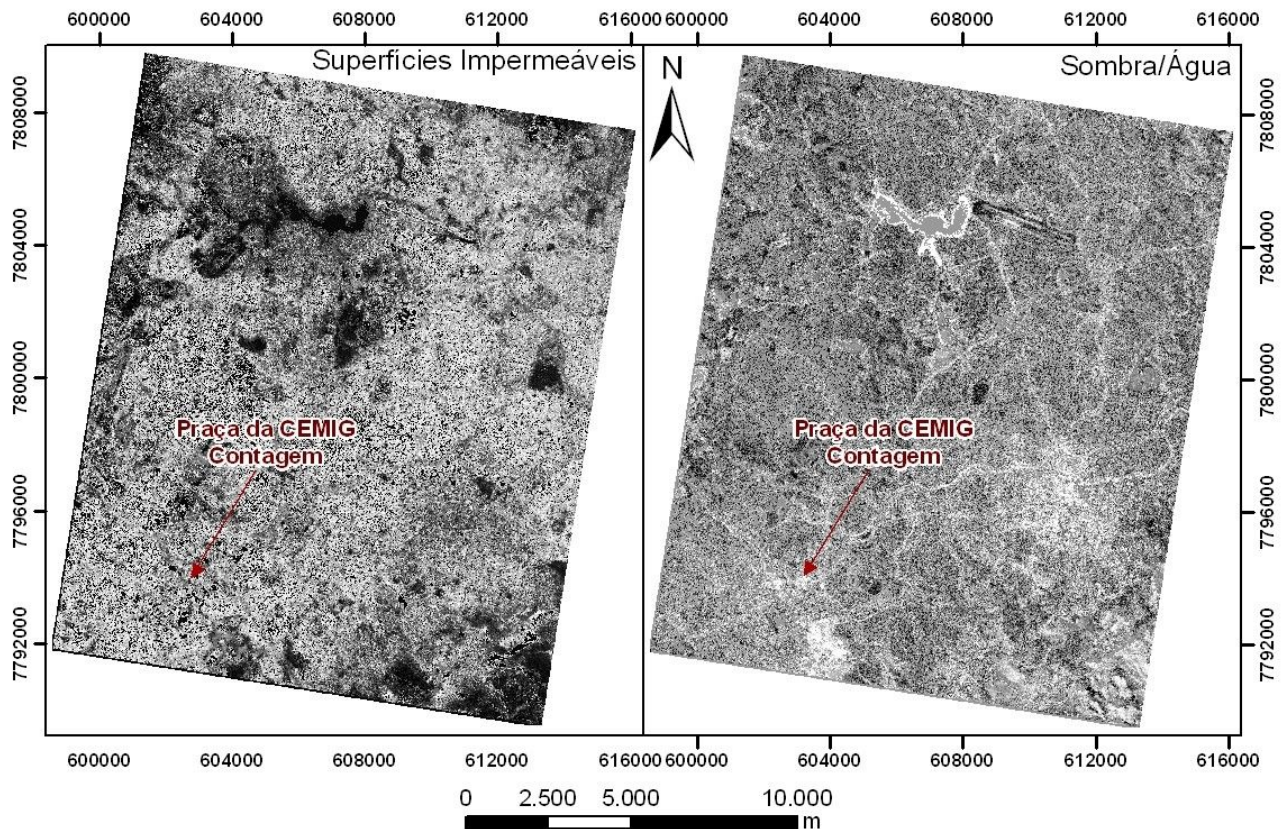


Figura 21: Frações de superfícies impermeáveis e sombra/água com destaque para a região de industrial de Contagem.

Considerando a região da área de estudo que intercepta o município de Belo Horizonte, existe uma lei que estabelece normas e condições para parcelamento, ocupação e uso do solo urbano no município. A Lei nº 7.166 de de 27 de agosto de 1996 considera que esta é uma área totalmente urbana, dividida em zonas, de acordo com as diretrizes estabelecidas no Plano Diretor de Belo Horizonte (Lei nº 7.165, de 27 de agosto de 1996). Ainda segundo a Lei nº 7.166, é obrigatório haver uma taxa mínima de permeabilização da área descoberta do terreno, em relação a sua área total. Essa área deve ser dotada de vegetação que contribua para o equilíbrio climático e propicie alívio para o sistema público de drenagem urbana.

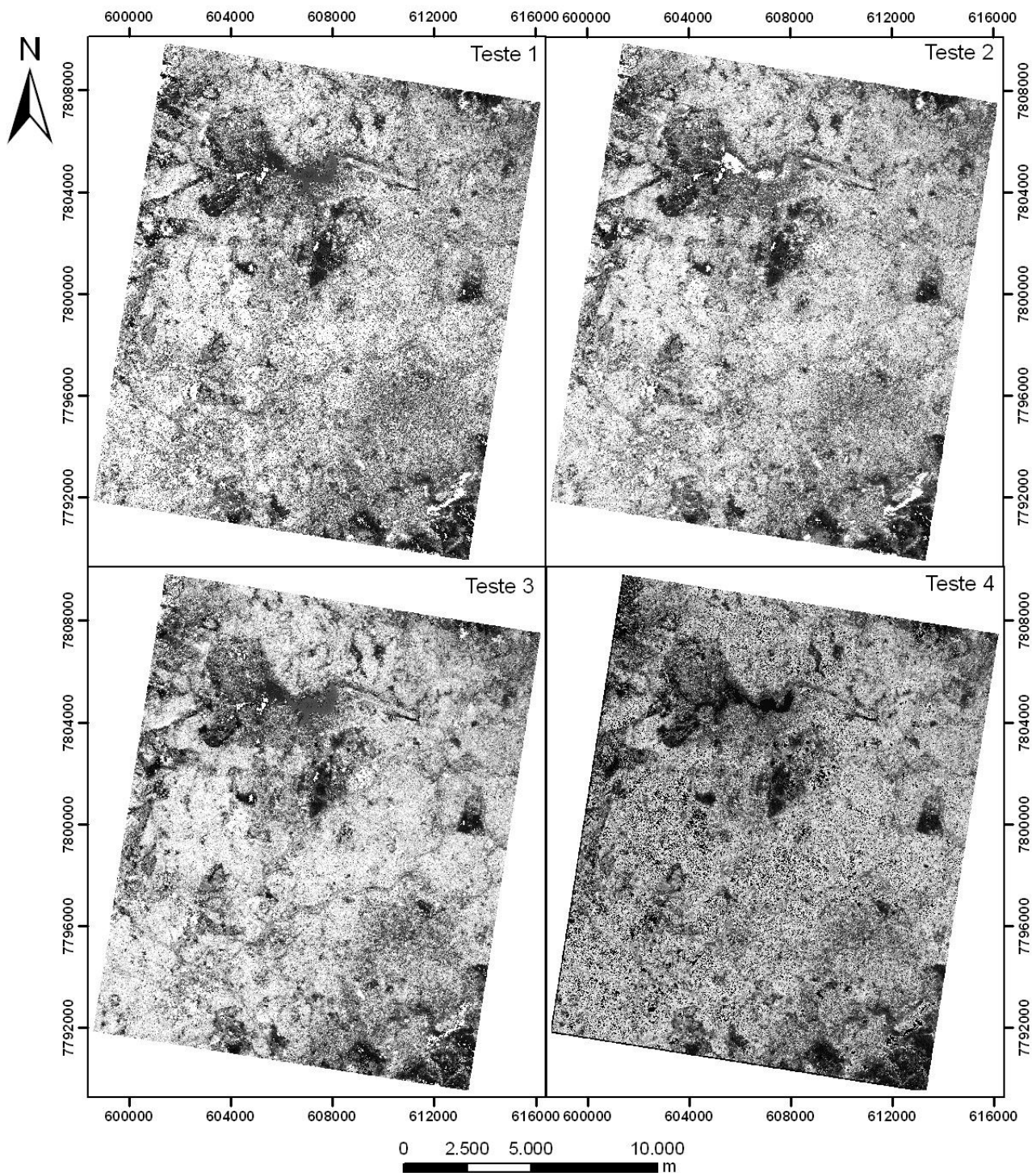


Figura 22: Resultados das frações de superfícies impermeáveis para cada teste.

Assim, foi determinada uma taxa de impermeabilização máxima para cada zona da cidade (Figura 23). Confrontando o mapa temático obtidos das superfícies impermeáveis com o mapa resultante das diretrizes para o uso do solo da cidade percebe-se, primeiramente, que as zonas com a taxa máxima de impermeabilização igual a mais baixa, as zonas de proteção, configuram realmente as zonas com as menores taxas de impermeabilização.

Existe uma alta variabilidade na zona com maior possibilidade de impermeabilização (80%), coexistindo áreas com grande concentração de superfícies impermeáveis e áreas tão permeáveis como as zonas de proteção.

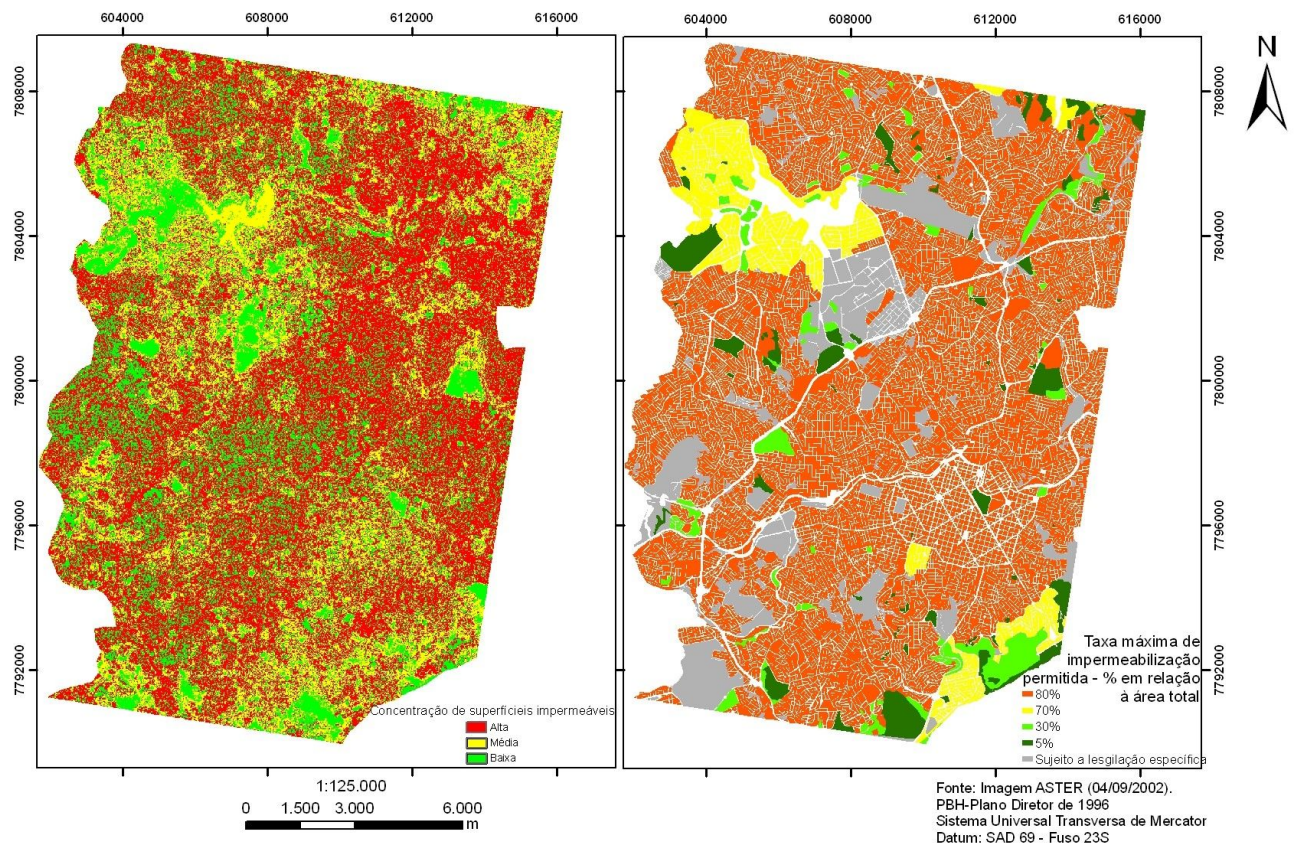


Figura 23: Mapa das superfícies impermeáveis e da taxa máxima de impermeabilização permitida, segundo a Prefeitura de Belo Horizonte.

Segundo Arnold e Gibbons (1996), as superfícies impermeáveis não geram a poluição e sim contribuem para que as mudanças hidrológicas degradem os leitos dos rios, diminuam o processo natural de absorção do solo de poluentes através da percolação e são eficazes para carregar os poluentes através das enxurradas. Sendo assim, como indicador ambiental, as superfícies impermeáveis por si só não são indicadores de qualidade ambiental. Porém um zoneamento urbano que determine as taxas máximas dessas superfícies, conjugado com o sancionamento de outros aspectos como existência de áreas de vegetação e áreas preferenciais de ocupação urbana, por exemplo, podem ajudar na manutenção e no incremento da qualidade ambiental urbana.

Pode-se considerar que as taxas impermeabilização do município de Belo Horizonte se

encontram, de forma geral, em acordo com as leis que as sancionam.

Em relação às frações de vegetação, nota-se que estão melhor delimitadas nos testes 3 e 4 (Figura 24).

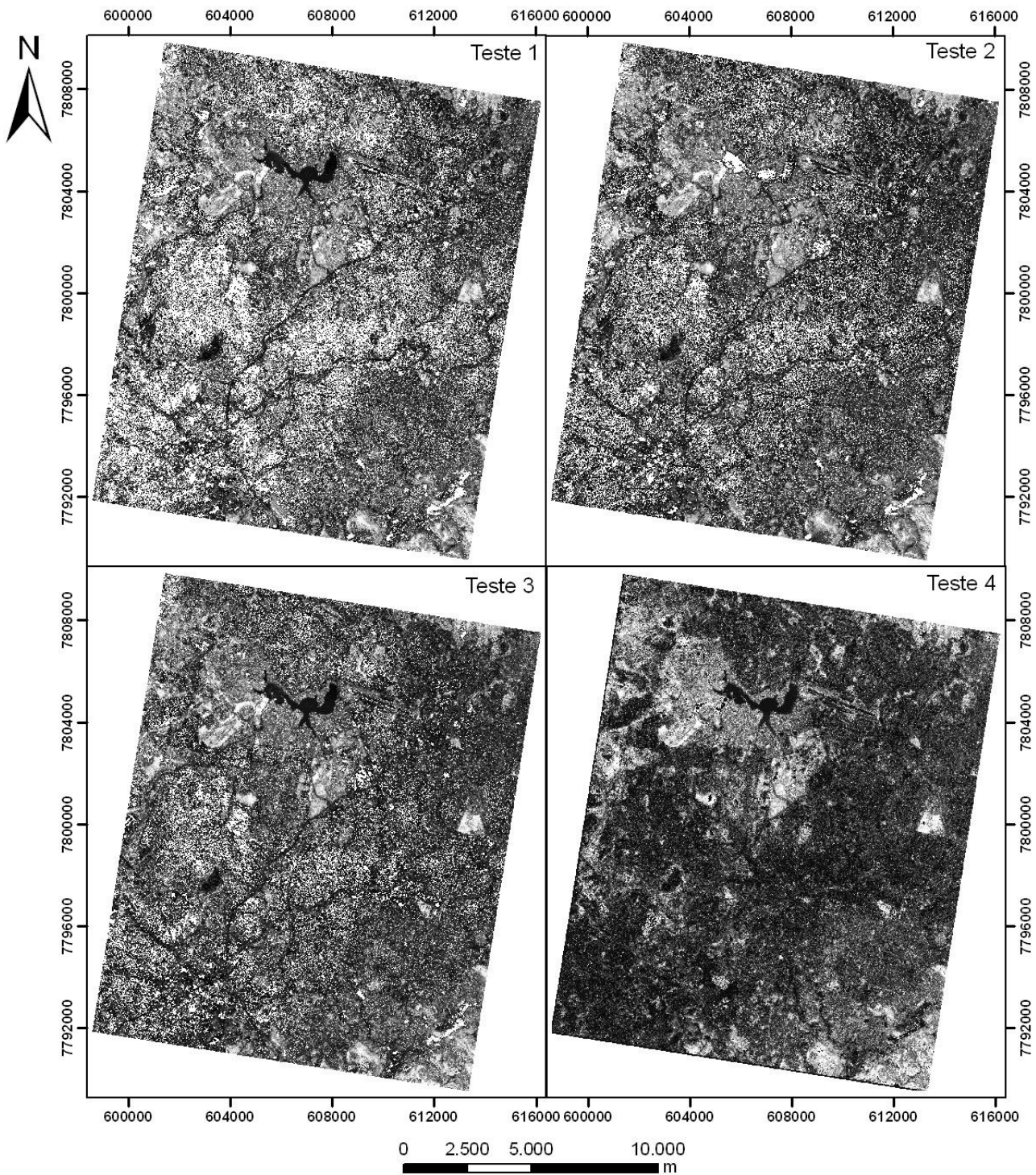


Figura 24: Resultados das frações de vegetação para cada teste.

Percebe-se um bom mapeamento de grandes áreas verdes como o Horto Florestal na zona leste da cidade, o Parque Municipal e a Estação Ecológica da UFMG, como também na identificação de largos canteiros centrais como, por exemplo, a Avenida Bernardo Monteiro (Bairro Santa Efigênia), Avenidas Bias Fortes e Alfredo Balena. Como esperado, a fração vegetação apresenta uma situação praticamente inversa à imagem-fração de superfícies impermeáveis e solo exposto.

Na fração solo exposto não se observou grandes diferenças entre os resultados. Percebe-se uma confusão entre solo exposto e vegetação do tipo rasteira, situação normal considerando que a imagem é do fim do inverno, típico período seco na região. O que altera a aparência da vegetação, especialmente essa, com a carência de água. Também nota-se confusão entre solo exposto e alguns tipos de asfalto, principalmente aqueles com alta resposta espectral (Figura 25).

Nas frações sombra/água, algumas áreas de asfalto, sobretudo aqueles com menor resposta espectral, causaram confusão neste mapeamento. Nos testes 2 e 4, a Lagoa da Pampulha não foi bem delimitada, parte devido ao fato que os parâmetros adotados nesses testes limitam mais o brilho máximo da fração sombra. Como também deve-se considerar que a resposta espectral das águas dessa lagoa não são do tipo padrão, uma vez que possui grande quantidade de material particulado em suspensão (Figura 25).

Como esperado, o centro da cidade apresentou grande resposta na fração sombra/água devido à sombra projetada pelos prédios. Pode-se considerar também a existência de maior concentração de material particulado no ar causada pela emissão de poluentes, devido ao intenso tráfego de veículos automotores.

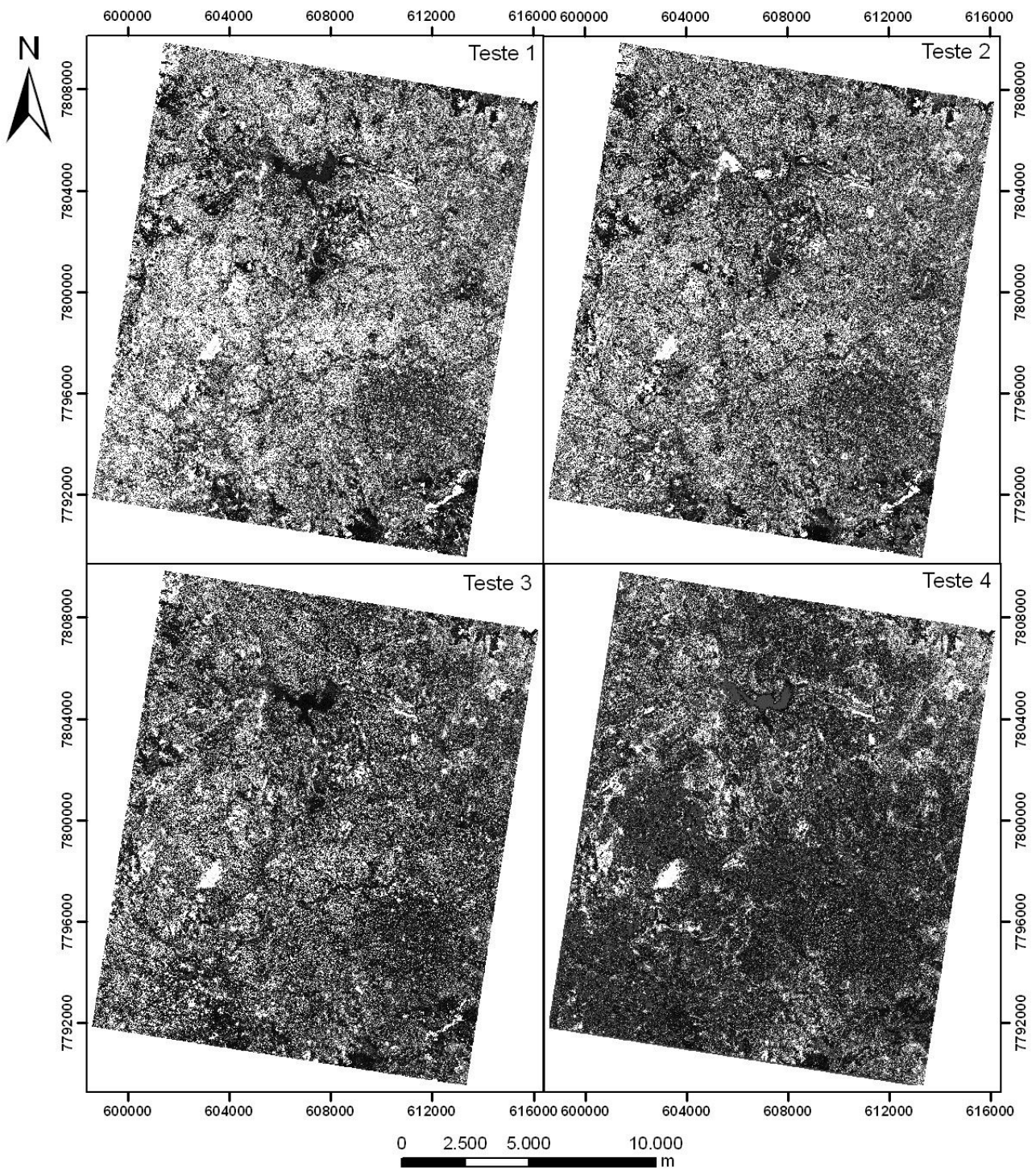


Figura 25: Resultados das frações de solo para cada teste.



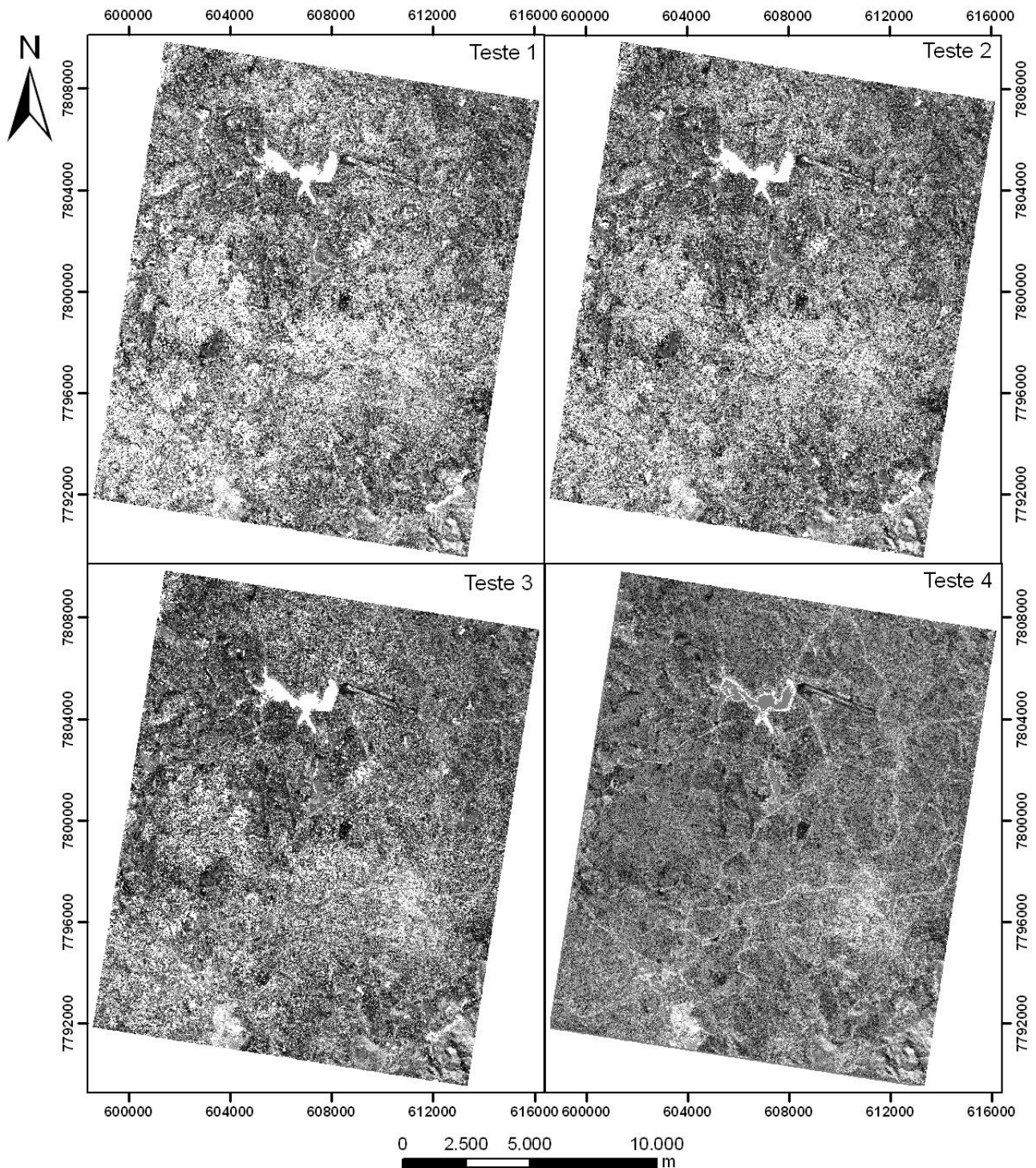


Figura 26: Resultados das frações de sombra/água para cada teste.

Os *pixels* não modelados pelo MESMA foram os *pixels* muito brilhantes em áreas de cobertura vegetal, com valores em média acima de 50% de reflectância na banda 3, correspondente ao infravermelho próximo. De forma geral, o teste 4 conseguiu mapear mais áreas, principalmente da fração vegetação. A Figura 27 é uma composição RGB das frações superfícies impermeáveis, vegetação e solo, respectivamente.

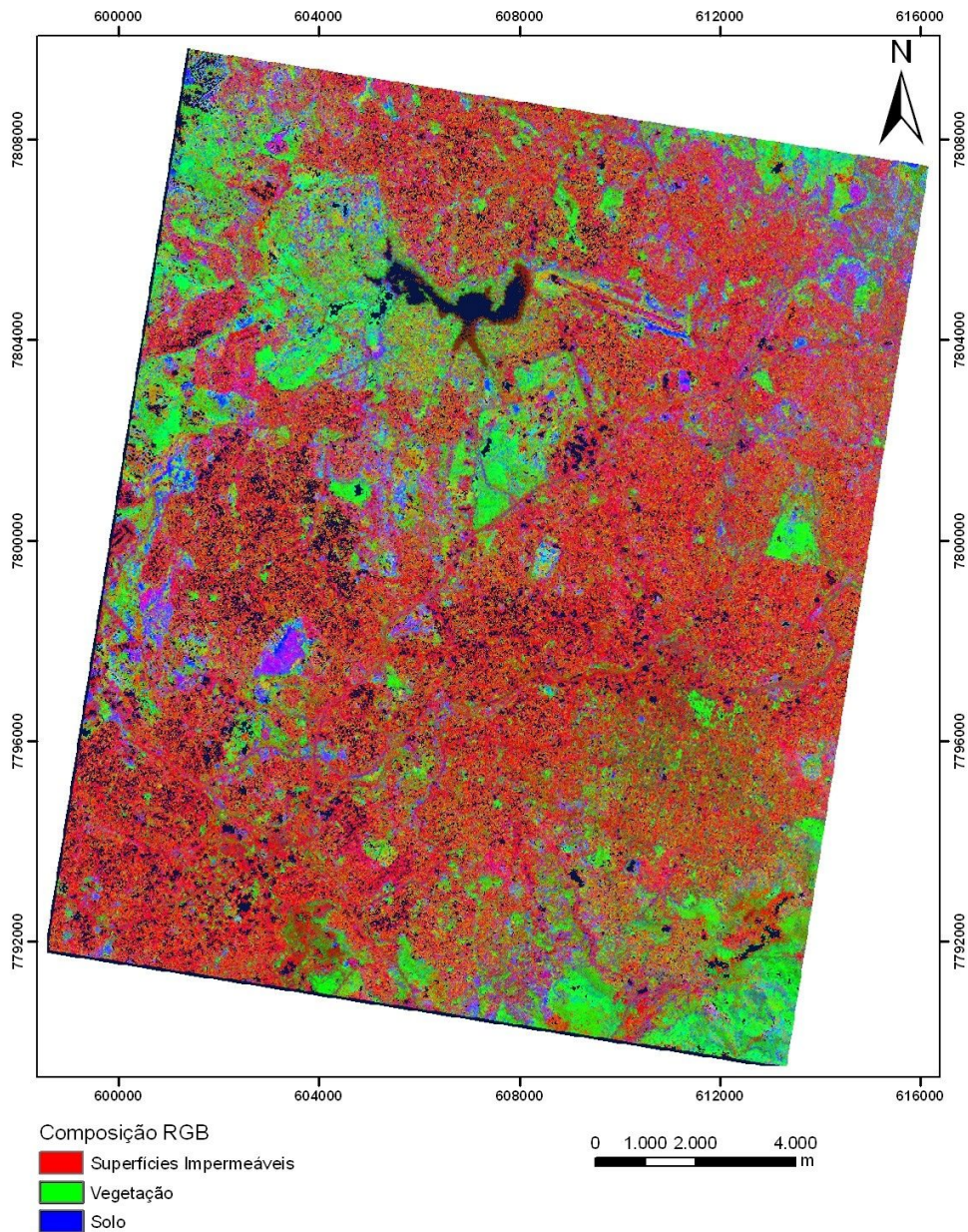


Figura 27: Composição RGB das frações superfícies impermeáveis, vegetação e solo, respectivamente.

O teste 4 (Figura 28) apresentou o melhor desempenho geral, por realizar um mapeamento mais fiel à realidade da cidade, além de possuir o maior número de *pixels* modelados.

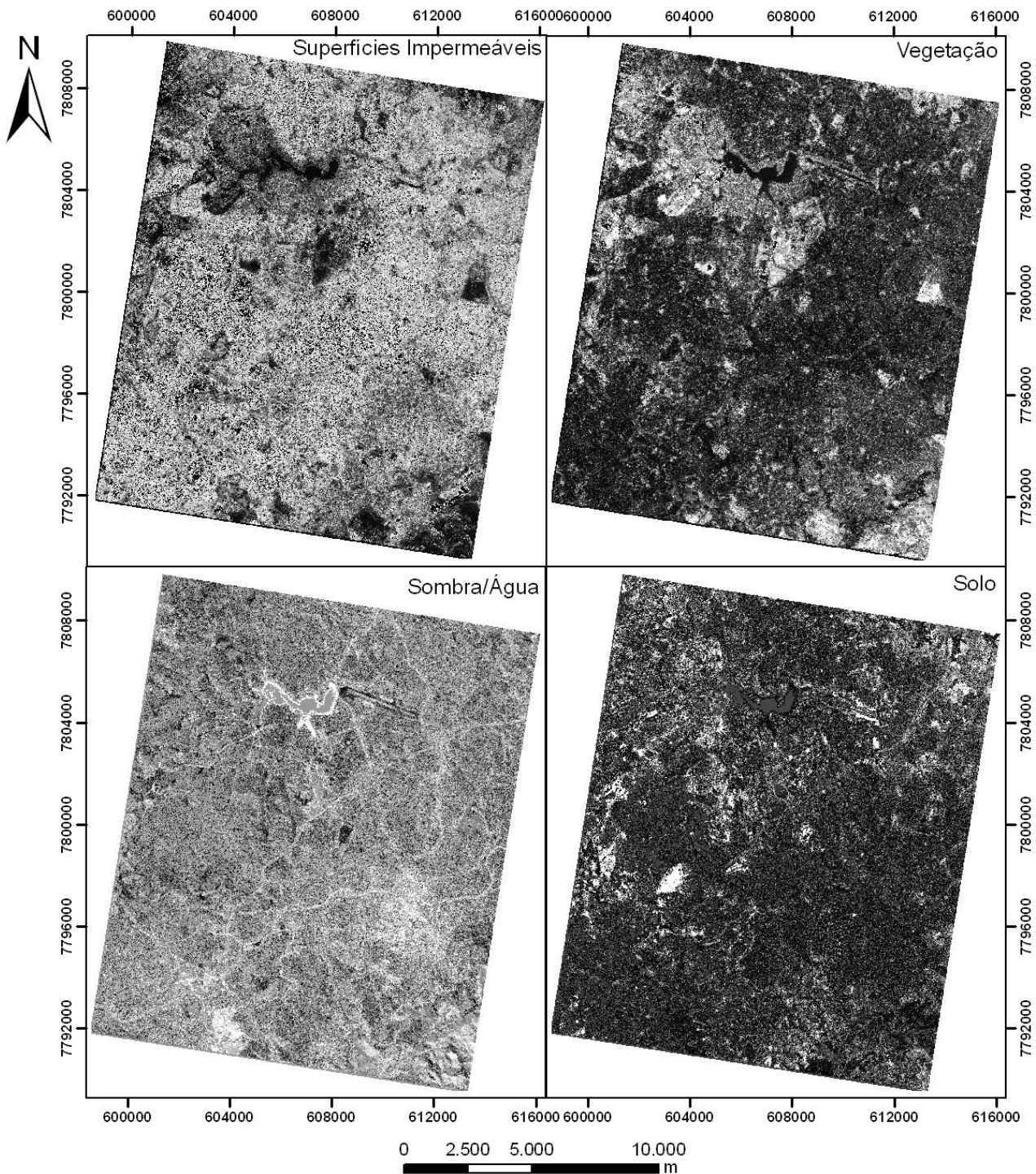


Figura 28: Frações de frações superfícies impermeáveis, vegetação, sombra e solo obtidas a partir do teste 4.

A partir do modelo digital de terreno foram extraídas as declividades (Figura 29). Os resultados foram comparados visualmente com dados obtidos a partir de imagens SRTM. Como citado anteriormente, os dados extraídos das bandas estereoscópicas do ASTER e do SRTM se assemelham na precisão. Foi considerado satisfatório o resultado obtido.

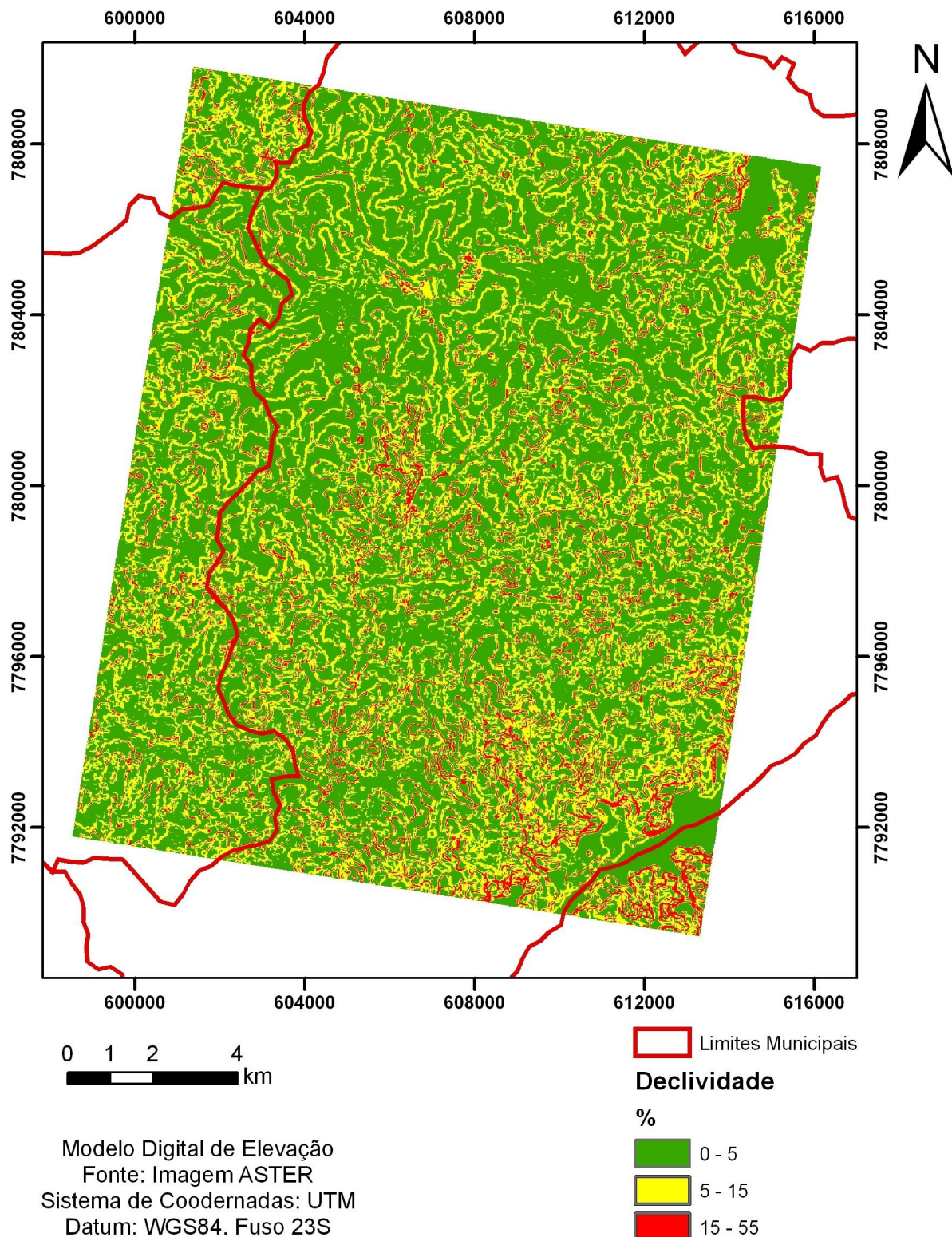


Figura 29: Mapa de declividades.

Na imagem temperatura (Figura 30) nota-se que áreas com maior ocorrência de superfícies impermeáveis foram aquelas com as temperaturas mais altas. Por sua vez, as regiões com maiores índices de vegetação e nas suas vizinhanças foram aquelas que

obtiveram os menores valores de temperatura. Vale ainda ressaltar que a região da Pampulha, além de possuir um alto índice de vegetação, os baixos valores de temperatura ali observados se devem à existência da lagoa. Valores menores de temperatura também foram notados em outras áreas verdes da cidade como a Estação Ecológica da UFMG, o Horto Florestal, alguns parques como o Parque Municipal e na região da Serra do Curral. A partir dessas observações é possível confirmar que a altitude, a estrutura física urbana e o uso do solo influenciam na temperatura da superfície.

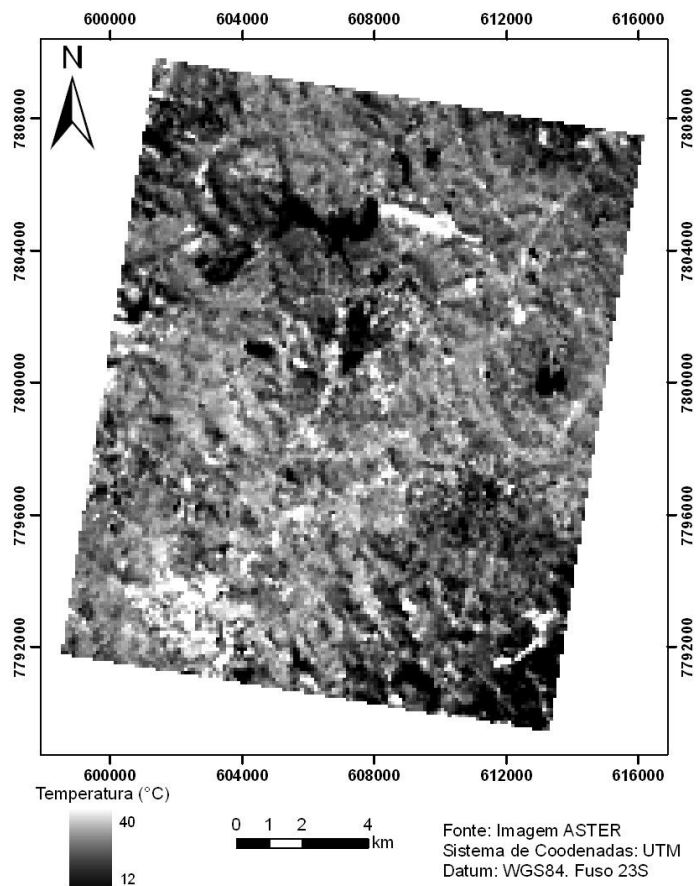


Figura 30: Imagem temperatura obtida através das bandas do termal.

Nas Figuras 30, 31 e 33 pode-se notar que a região de Contagem, em sua zona industrial, configura-se um pólo com as mais altas temperaturas (entre 30°C e 40°C). Esse fato é notável uma vez que como foi observado anteriormente, houve uma alta resposta desta mesma área para a fração sombra, resultante do acúmulo de material particulado na

atmosfera. Mesmo assim, os altos valores de temperatura foram captados, o que pode subentender que esses dados ainda podem estar subvalorizados.

Outros pontos da cidade com altos valores de temperatura são: o eixo sudoeste-nordeste, bastante coincidente com a região do Anel Rodoviário e Via Expressa, também com altos índices de superfícies impermeáveis. Assim como, com grande destaque, o aeroporto da Pampulha. Dessa forma, fica clara a relação direta entre temperatura e áreas impermeabilizadas.

Ainda em relação aos picos de temperaturas encontrados, nota-se a existência de uma área com altos valores na região da Serra do Curral, coincidente com a cava de mineração desativada existente na área (Figura 32).

Na validação dos resultados obtidos com o MESMA é interessante haver disponibilidade de dados de alta resolução espacial e de campo. A análise dos resultados foi efetuada exclusivamente a partir de interpretação visual.

A partir da observação das imagens obtidas com as bandas do termal, comparadas com a fração de vegetação, pode-se notar que as áreas verdes não apresentam somente função estética, mas também função climática. Os gestores municipais e a sociedade devem se preocupar com a arborização das vias urbanas, pois ela beneficia o conforto térmico, principalmente em regiões tropicais. Infelizmente, em geral, a arborização viária encontra-se restrita somente às áreas de ocupação urbana residencial antiga. Além disso, não devem estar concentradas espacialmente e a sua distribuição deveria levar em conta a densidade populacional.

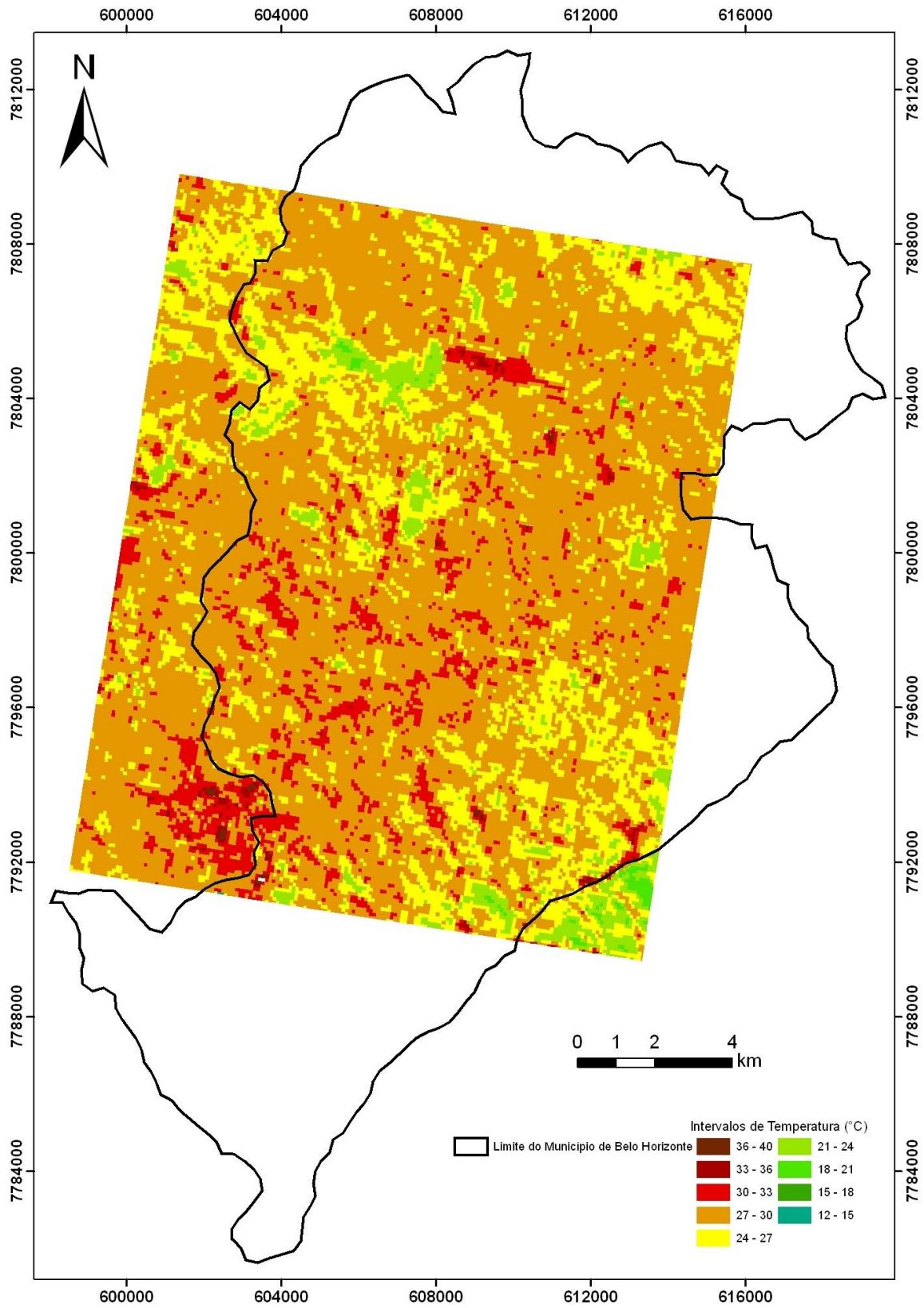


Figura 31: Mapa temático de temperatura



Figura 32: Área de mineração desativada na região da Serra do Curral

O partir de perfis elaborados sobre a imagem temperatura (Figura 33), pode ser observado que as áreas com cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas mais amenas em relação ao entorno. Por exemplo, no eixo NO-SE, na região da Estação Ecológica da UFMG, percebe-se uma queda da temperatura, de 27°C para 23°C. Por sua vez, existe uma retomada dos valores de forma considerável quando alcança a região do Anel Rodoviário (cerca 30°C).

Já na região central de Belo Horizonte, percebe-se a existência de valores mais baixos de temperatura em relação ao entorno imediato. Como foi dito anteriormente, isso se deve à sombra projetada pelos altos prédios dessa região da cidade (Figura 34), o que provoca uma subestimação da temperatura pelo sensor e até mesmo pontos reais com temperaturas mais baixas.



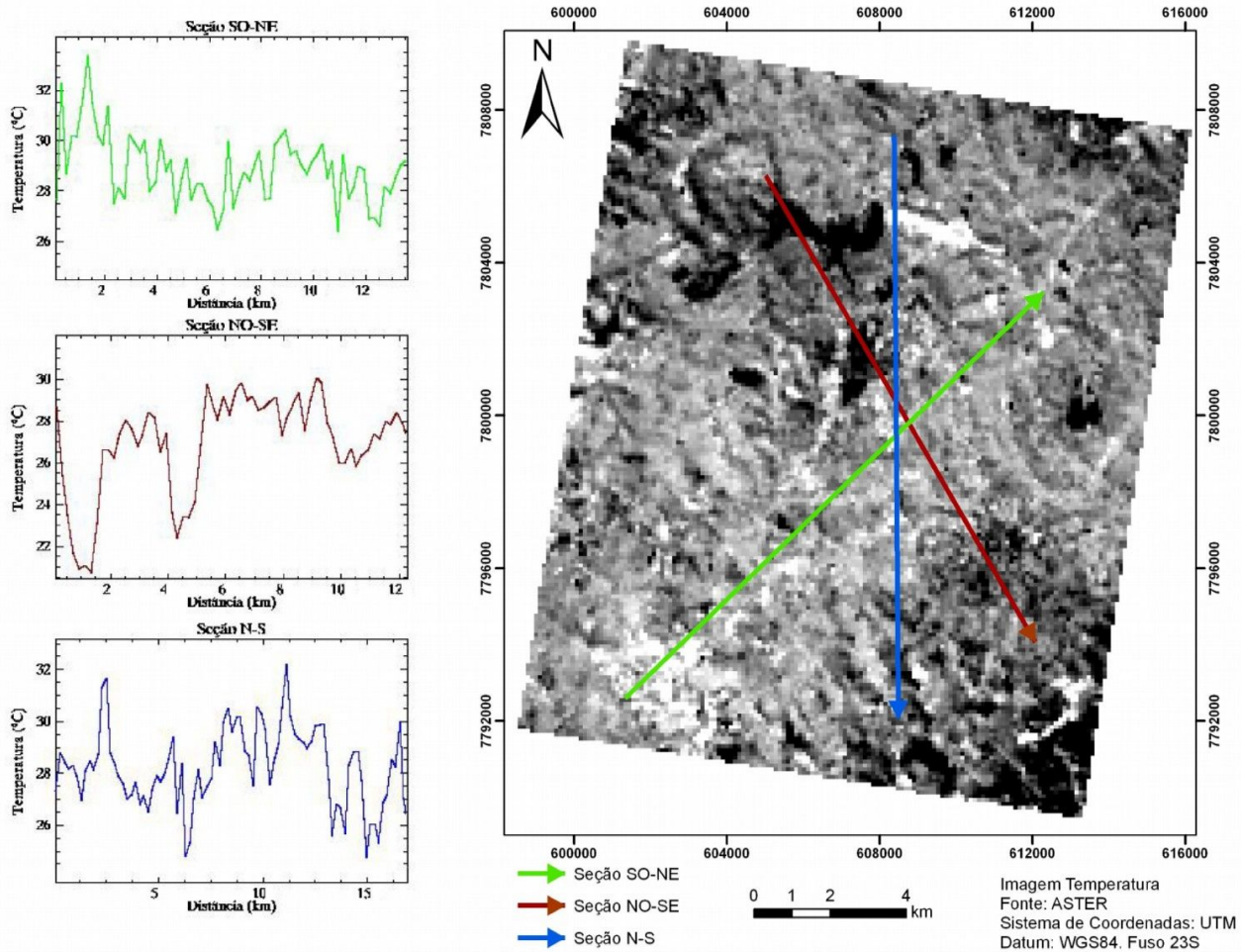


Figura 33: Imagem temperatura e gráficos de seções.



Figura 34: Vista da região central de Belo Horizonte a partir da Serra do Curral

Mais uma vez, a região da Pampulha se destaca pela suas baixas temperaturas. Bem como a Serra do Curral.

Nos resultados obtidos com as imagens-fração e temperatura fica clara a relação existente entre o modo com o qual o homem modifica o meio urbano, acarretando quase sempre uma maior geração de calor. Isso gera alterações na composição da própria atmosfera e no balanço de energia, o que propicia, em alguns casos, áreas com temperatura mais elevadas que as circunvizinhas.

## 6. ANÁLISE INTEGRADA DO AMBIENTE

O mapa de conforto ambiental urbano seguiu os padrões dos mapas de entrada: superfícies impermeáveis, vegetação, temperatura e declividade. Pôde-se perceber que grandes vias de acesso da cidade e o entorno de grandes superfícies impermeáveis diminuem consideravelmente o conforto ambiental. Assim como aquelas áreas com maiores temperaturas que, por vezes, coincidem com as superfícies impermeáveis. A região centro sul obteve um bom índice de conforto ambiental devido ao fato que possui maiores áreas com cobertura vegetal e menores temperaturas. Porém o índice foi desfavorecido pelo alta quantidade de superfícies impermeáveis e altas declividades. O hipercentro obteve baixo conforto, enquanto que partes vizinhas, ainda na área central da cidade, apresentou um maior índice de conforto ambiental (Figura 35). O intenso tráfego urbano naquela região, aumentando a temperatura local, associado com altos índices de superfícies impermeáveis e baixos índices de vegetação resultou em uma área com baixas condições de confortabilidade. Isso se repete na região central da área de estudo, onde existem grandes vias de acesso, como o Anel Rodoviário (Figura 36). Nessa área percebe-se que se criou uma significativa faixa contínua de baixos níveis de conforto. Nas áreas vizinhas à Serra do Curral, apesar da vegetação, das baixas temperaturas e do relativo menor índice de superfícies impermeáveis, não foi observado um alto índice de conforto ambiental porque esse foi influenciado pelas altas declividades ali presentes. Nas grandes áreas verdes da cidade e nas suas vizinhanças imediatas observa-se altos níveis de conforto, por mais que essas áreas apresentem outras variáveis que prejudiquem o índice, como as superfícies impermeáveis. As massas de vegetação influenciam nas temperaturas locais, amenizando-as ou mesmo, contrabalanceando o efeito que as materiais impermeáveis fazem na área urbana.

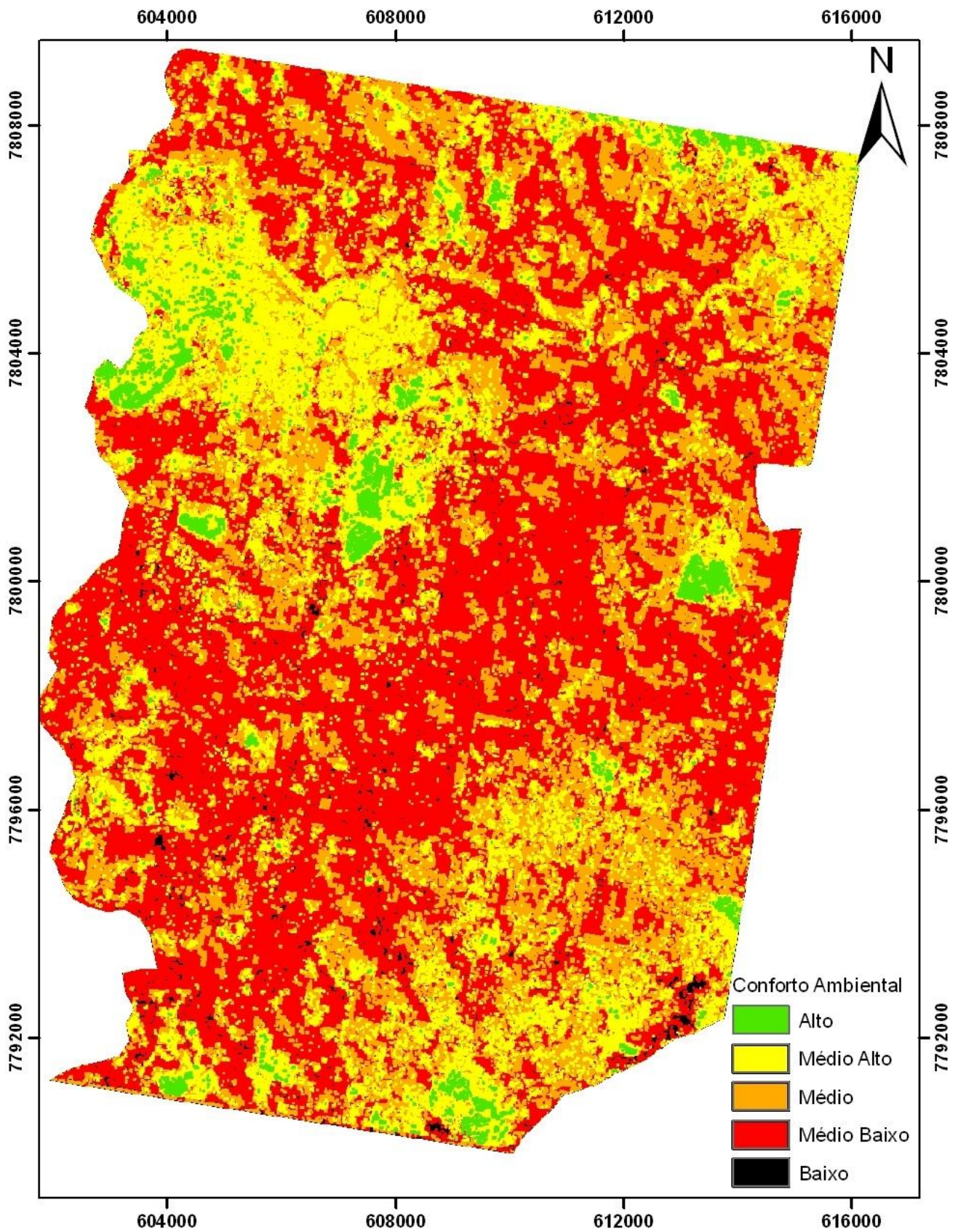


Figura 35: Mapa de Conforto Ambiental Urbano

O melhor resultado em relação ao conforto ambiental urbano foi observado na região da

Pampulha (Figura 37). Também foram observadas pequenas regiões com alto conforto, como citado, vizinhas às áreas verdes. Os corpos d'água, as matas e a vegetação rasteira apresentaram as menores temperaturas médias, o que confirmou a importância da água e da cobertura vegetal no aumento do conforto térmico em áreas urbanas tropicais.

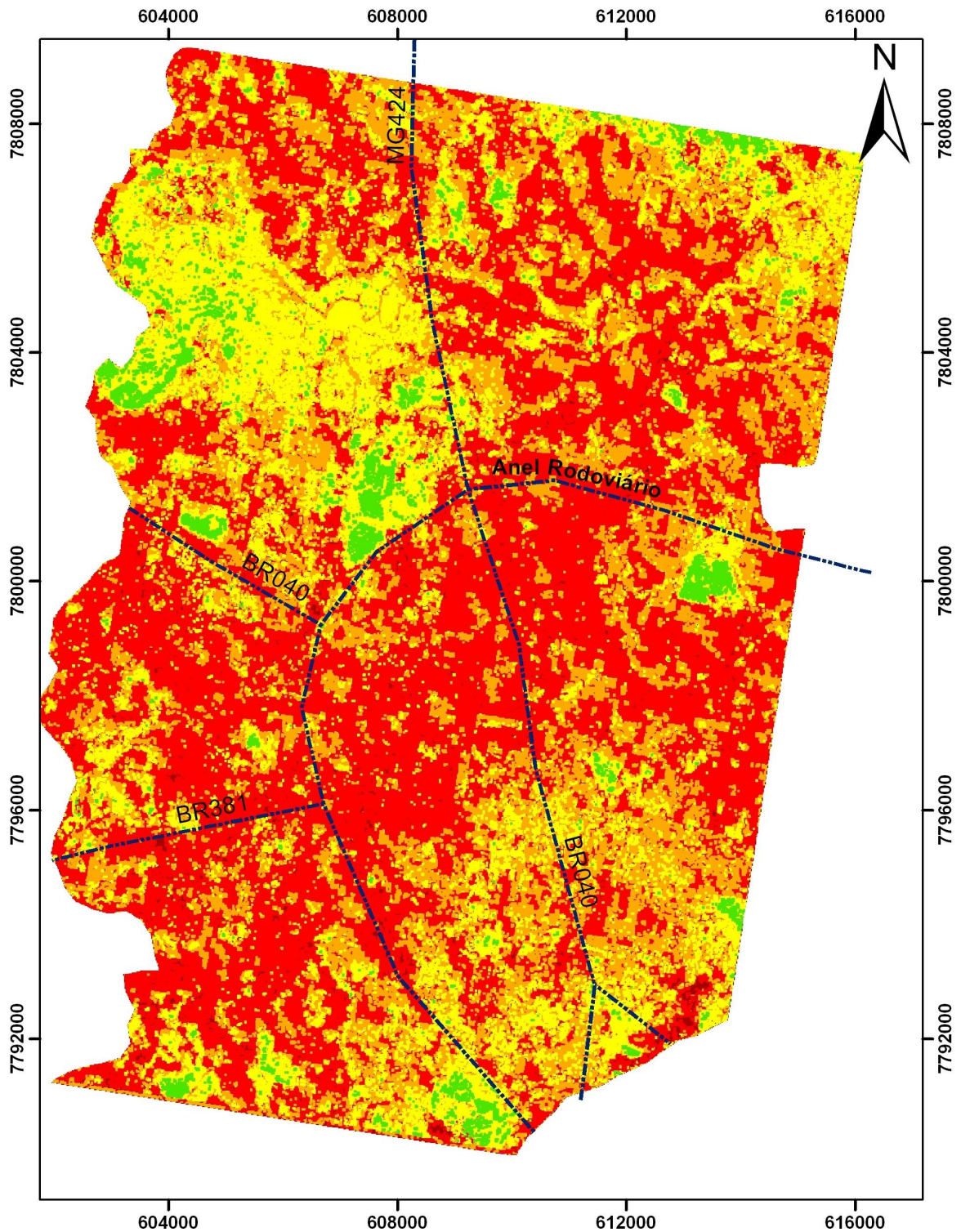


Figura 36: Mapa de conforto ambiental urbano e principais rodovias.

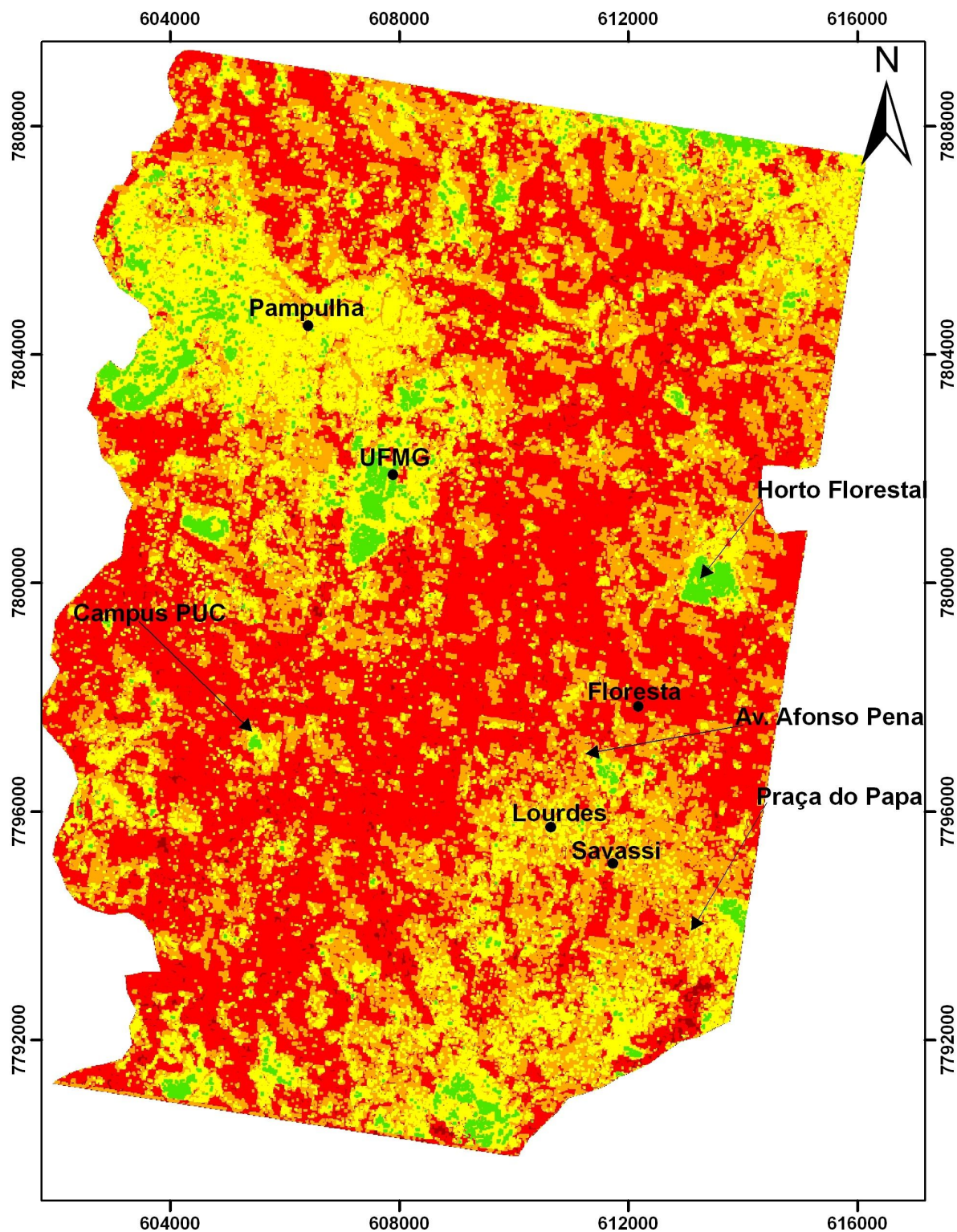


Figura 37: Mapa de conforto ambiental urbano e principais pontos da cidade

A maior ocorrência é da classe Médio Alto, cobrindo 34,72% da área estudada (Tabela 10). Já a classe com menor área é a do baixo conforto ambiental urbano (1,27km<sup>2</sup> ou 0,59% da área). Percebe-se que existe uma tendência positiva quando são observadas as

concentração do valor médio em relação ao baixo conforto ambiental e do valor médio em relação ao alto conforto ambiental (Tabela 10). De acordo com a medida das classes, existem mais áreas com valores médio a alto de conforto urbano do que aquelas com médio a baixo. Pode-se concluir que, em Belo Horizonte, predomina ainda uma realidade positiva em relação à qualidade ambiental.

Furlan (2004) salienta a importância da existência de áreas verdes como canteiros de avenidas, árvores isoladas, terrenos baldios e jardins internos de residências para medir a densidade de vegetação. Porém, ainda segundo Furlan (2004), nem sempre a existência de cobertura vegetal significa bem estar à população quando se diz respeito à usufruir desse espaço para o lazer. Muitas praças e jardins têm sido invadidas por ocupações irregulares ou não possuem manutenção e são sujeitas ao vandalismo. Diversas áreas verdes de lazer são inacessíveis por configurarem-se como áreas inóspitas como margens de córregos, parques cercados em função da violência e áreas abandonadas, o que reduz ainda mais a quantidade de áreas verdes disponíveis para o lazer da população. No entanto, estes espaços apesar de não possuírem função social direta e não refletirem benefícios à população de áreas carentes de espaços livres para lazer e recreação, apresentam benefícios no controle da qualidade ambiental.

<b>Classe</b>	<b>Km X Km</b>	<b>Porcentagem</b>
Baixo	1,27	0,59
Médio Baixo	62,51	29,36
Médio	53,93	25,33
Médio Alto	73,93	34,72
Alto	21,24	9,97
<b>TOTAL</b>	<b>212,91</b>	<b>100,00</b>

Tabela 10: Medidas em Km<sup>2</sup> e porcentagem em relação à área total para casa classe.

Nas análises realizadas entre o mapa de conforto ambiental urbano e dados sócio-econômicos e de infra-estrutura, percebeu-se baixos índices Kappa. Segundo Monteserud

e Leamans (1992) um valor Kappa acima de 0,75 é considerado alto, enquanto que abaixo de 0,4 é baixo. Os valores encontrados nos estudos de concordância giraram em torno de 0,2, dessa forma, foi considerada baixa a relação entre os dados usados (Tabela 11).

<b>Informação</b>	<b>Índice Kappa</b>
Índice de Desenvolvimento Urbano	0,2642
Acessibilidade à Atividades Urbanas	0,2651
Densidade Populacional	0,2965
Renda do Chefe de Família	0,2690
Infra-Estrutura Urbana	0,2826

Tabela 11: Índices Kappa encontrados no cruzamento entre o mapa de conforto ambiental urbano e os dados sócio-econômicos e de infra-estrutura.

Não existe porém dependência entre as variáveis constituintes do mapa de conforto e aqueles sócio-econômicos e de infra-estrutura. Porém o baixo desempenho observado nas concordâncias pode indicar que a distribuição do conforto ambiental da cidade não segue os padrões sociais e nem estruturais da cidade.

Observando detalhadamente as matrizes de confusão, percebe-se que os resultados adquiriram padrões, já que os dados cruzados se distribuíram nas classes medianas de conforto ambiental urbano. No cruzamento do mapa de conforto ambiental urbano e IDH, houve uma maior concordância entre a classe Baixo IDH e Médio a Baixo conforto (39,04%), seguido de 37,88% de concordância entre o Alto IDH e o Médio Alto conforto. Se percebe uma maior tendência relativa à concentrar os altos níveis de IDH ao maior nível de conforto, influenciado pela região da Pampulha que possui altas respostas para ambos os casos. Considerando que as demais regiões da cidade com alto IDH não adquiriram altos índices de conforto ambiental, o baixo desempenho do Kappa (0,2642) nesse caso, pode ser compreendido (Figura 38).



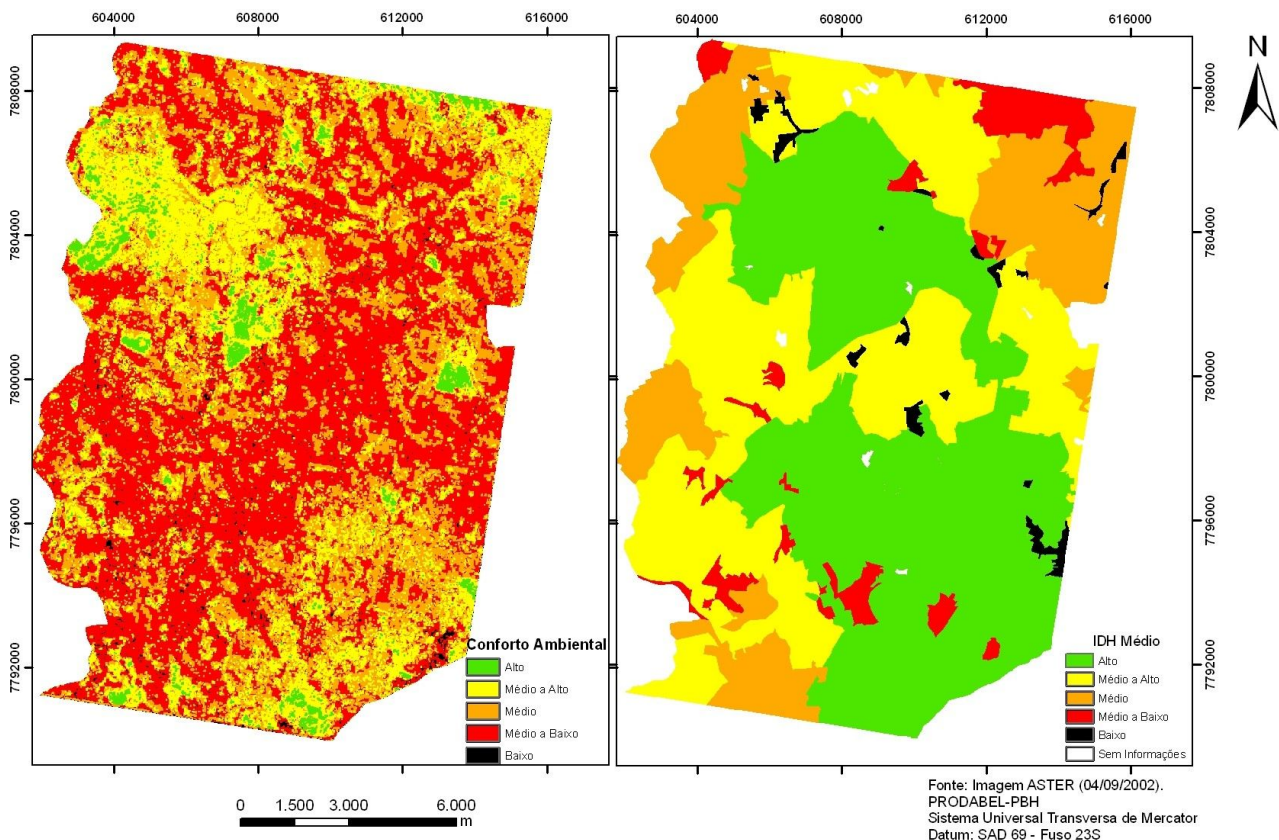


Figura 38: Confronto entre os mapas de conforto ambiental urbano e Índice de Desenvolvimento Humano.

Na análise de concordância com o mapa de acesso à atividades urbanas, nota-se maior resposta entre Baixo acesso e Alto conforto (25, 49%), motivado pelo fato que nas áreas com menor acessibilidade à atividades urbanas é menor a ocorrência de coberturas impermeáveis e conseqüentemente a temperatura. Isso se confirma com as maiores concordâncias observadas neste caso: 44,94% de Baixo acesso à atividades urbanas ocorrem em áreas com Médio a Alto nível de conforto, seguido de 42,75% de Alto acesso se encontram no Médio a Baixo Conforto (Figura 39).

Com o mapa de densidade populacional, observou-se que as baixas densidades coincidem mais com os mais altos níveis de conforto (Figura 40).

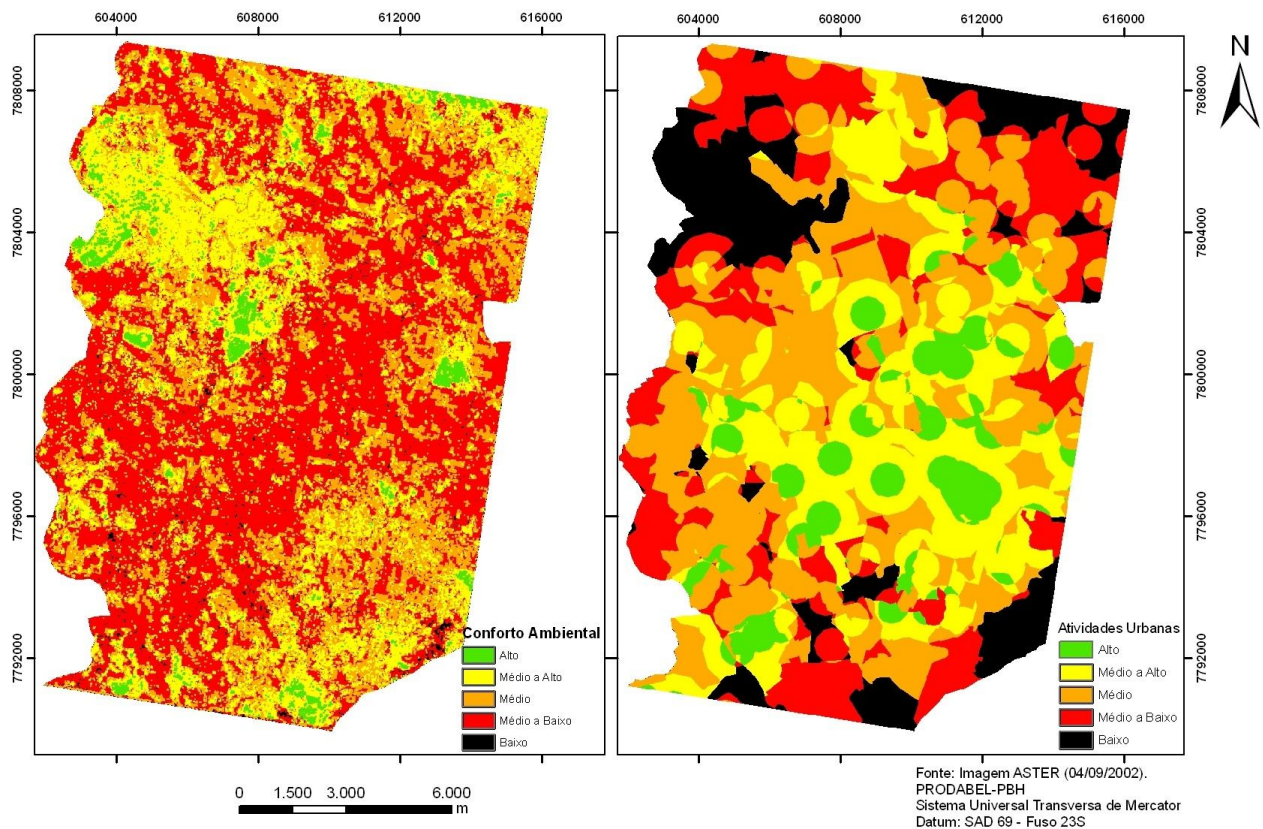


Figura 39: Confronto entre os mapa de conforto ambiental urbano e acesso à atividades urbanas.

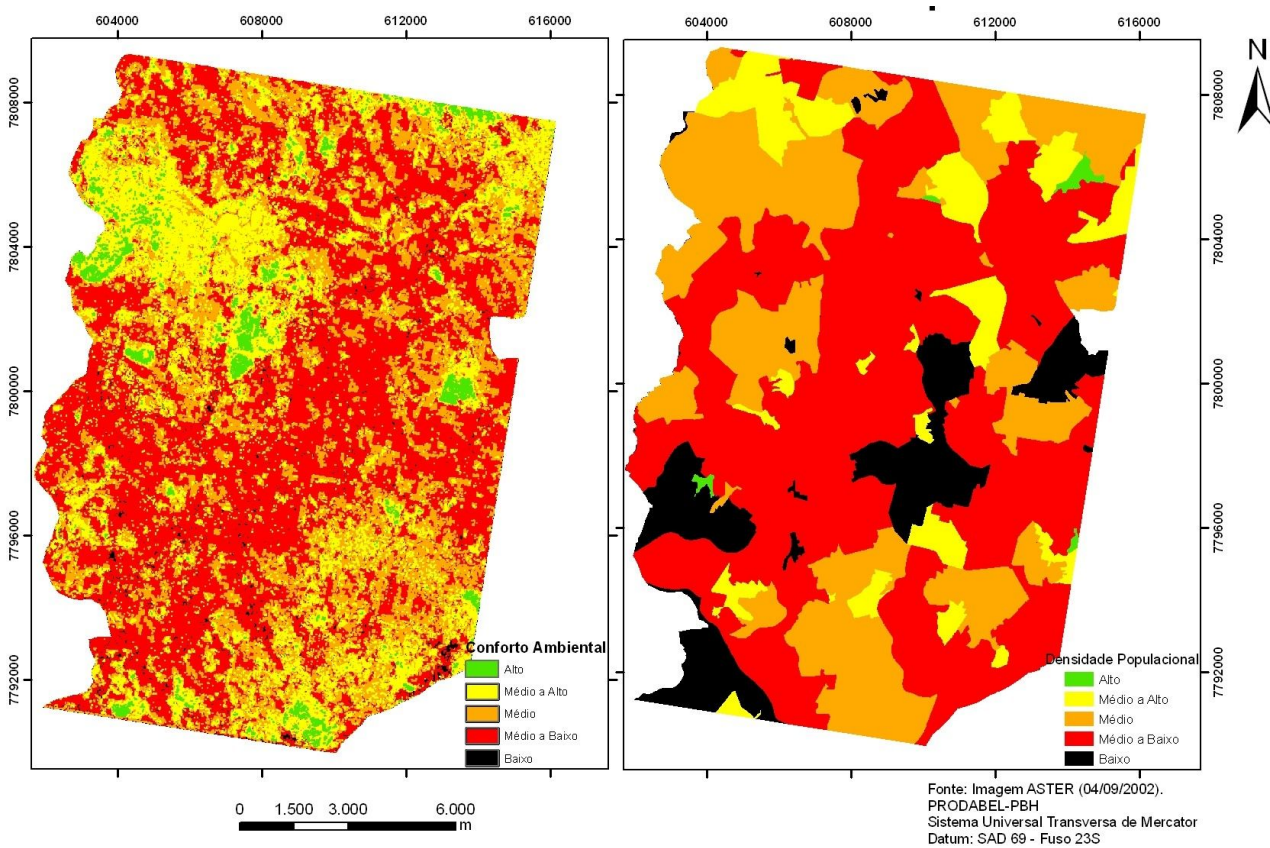


Figura 40: Confronto entre os mapas de conforto ambiental urbano e densidade populacional.

Porém não foram observados resultados marcantes neste caso. Assim como com o mapa de renda do chefe de família. Em ambos os casos, percebe-se uma divisão homogênea entre as classes medianas de conforto ambiental. No caso dos dados sobre a renda, percebe-se que aqueles com baixa renda, não estão necessariamente nas áreas com menores índices de conforto. Cerca de 30% das áreas com a presença de baixa renda se encontram em áreas com índices medianos de conforto. Isso pode ser devido ao fato que áreas não nobres da cidade apresentam maiores índices de vegetação, como terrenos baldios ou margens de córregos e até mesmo os parques que muitas vezes não são utilizados pela população, mas que contribuem para o bem estar ambiental do entorno (Figura 41).

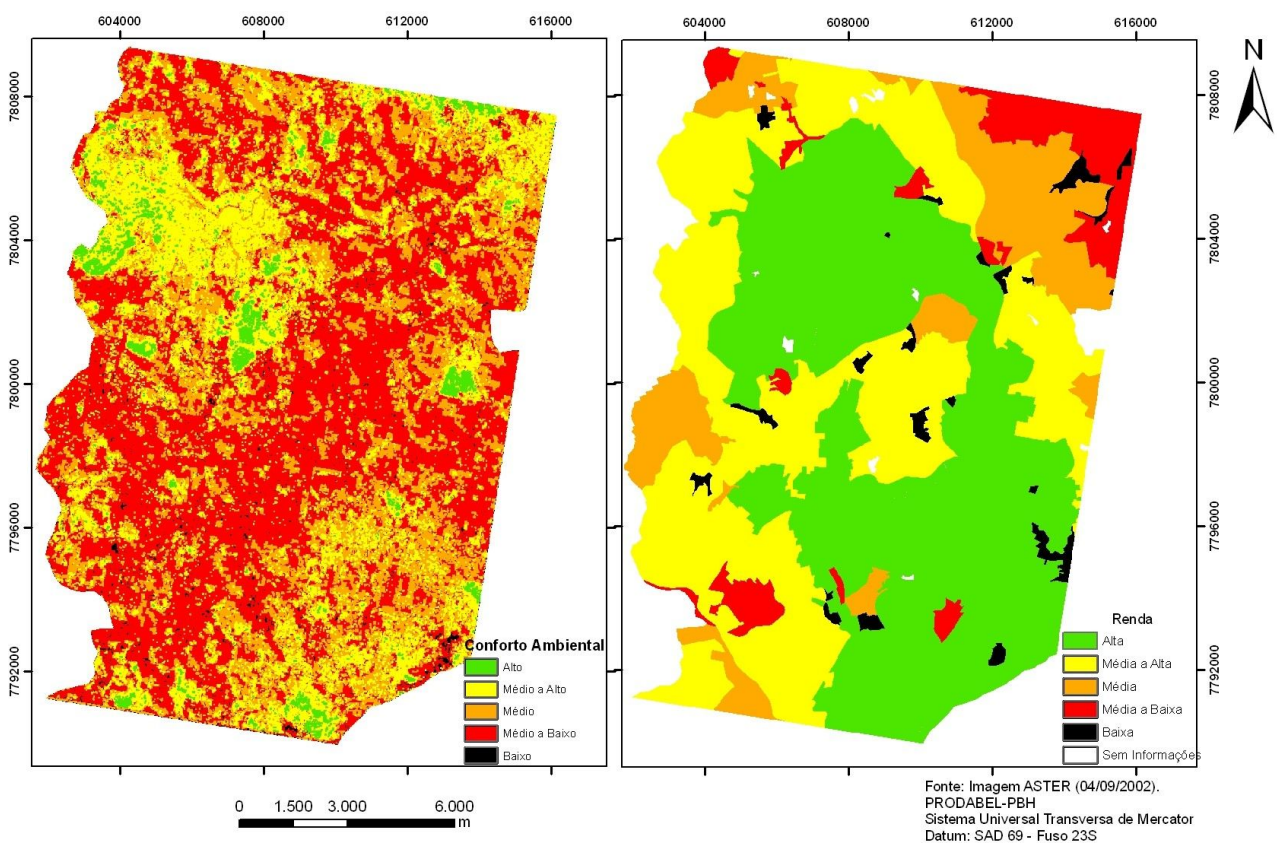


Figura 41: Confronto entre os mapas de conforto ambiental urbano e renda do chefe de família.

Por fim, com os dados de infra-estrutura urbana, observa-se uma discreta relação direta entre os níveis mais altos desse índice com o mais altos valores de conforto. Por exemplo, 37,41% da Alta infra-estrutura coincide com Médio a Alto conforto e 35,98% do

Média a Alta infra-estrutura concorda com Médio a Alto conforto. Mais uma vez, esses resultados podem ter sido influenciados pelos resultados obtidos na região da Pampulha (Figura 42).

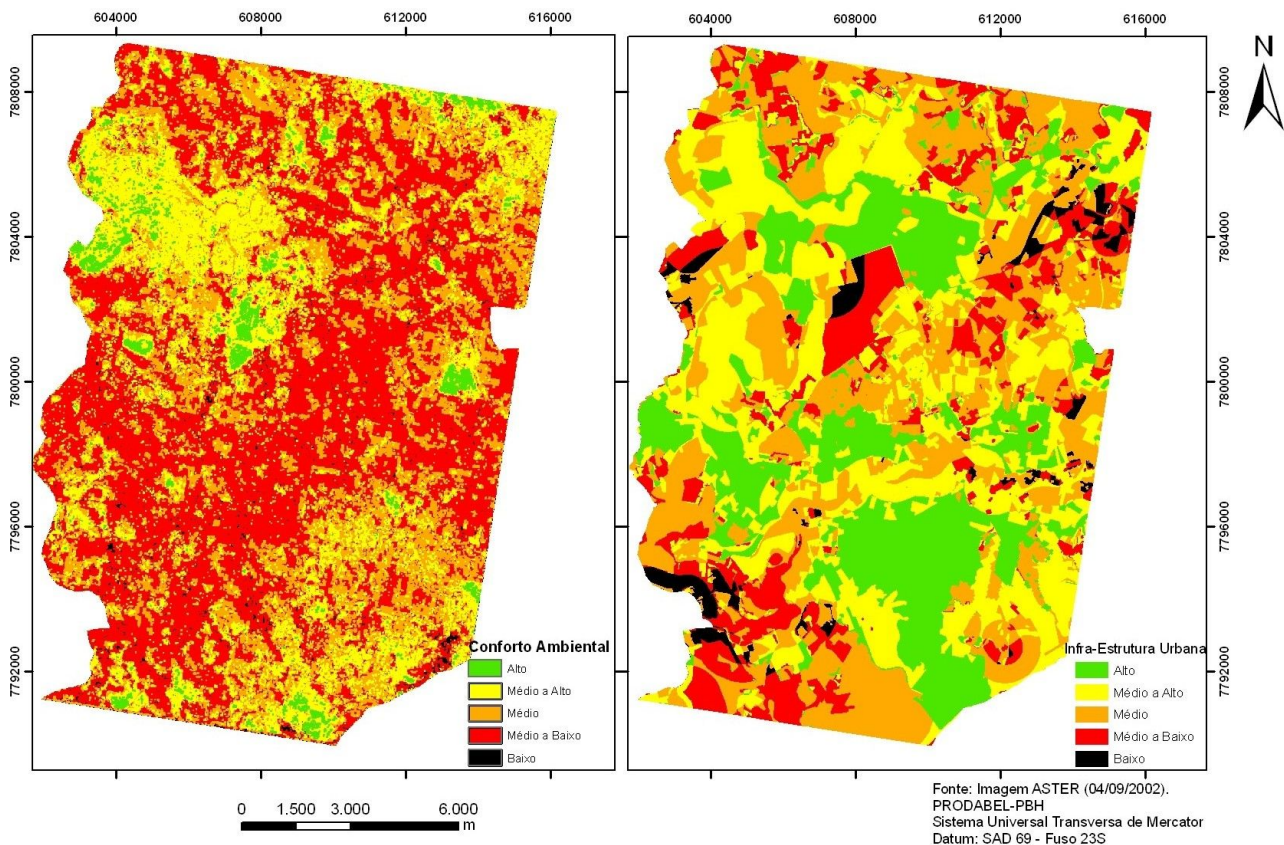


Figura 42: Confronto entre os mapas de conforto ambiental urbano e infra-estrutura urbana.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos vêm comprovar o potencial do uso de dados de sensoriamento remoto para estudos urbanos. A partir dos objetivos traçados, conclui-se que é possível que uma análise geoambiental urbana seja feita com base em imagens de sensoriamento remoto, ainda que os dados sejam de mesoescala.

O MESMA se mostrou uma ferramenta útil para o mapeamento de áreas urbanas, uma vez que este tipo de análise intra-pixel aproveita de forma eficiente os dados espectrais das 14 bandas do ASTER. Recomenda-se que novas pesquisas sejam feitas no intuito de esgotar as possibilidades do módulo ViperTools no processamento do MESMA, seja na otimização da biblioteca espectral, seja nos parâmetros para criação das imagens-fração. Nota-se que é também necessário o uso de outras imagens, sejam elas multi-espectrais ou mesmo de alta resolução espacial. Imagens como *Ikonos*, com relativa baixa resolução espectral, porém alta resolução espacial podem apresentar resultados interessantes no mapeamento da complexidade urbana. Além disso, estudos em áreas tropicais, assim como a criação de uma biblioteca espectral para alvos urbanos tropicais podem promover grandes avanços, uma vez que a elaboração da biblioteca espectral é uma das partes cruciais desse processo. Os resultados obtidos com as imagens-fração foi satisfatório pois possibilitou um mapeamento intra-pixel de mesoescala em área urbana densa, caracterizando os objetos mais significativos da cidade.

Um aspecto importante, também notado por Rashed (2004), é que a utilização de 4 componentes no modelo de mistura (V-I-S + Sombra/Água) fornece resultados mais corretos, se comparados aos modelos com 3 componentes somente. Isso indica que o modelo de Ridd (1995) requer algumas modificações quando aplicadas em outras áreas que diferem morfologia das cidades estadunidenses.

Alguns limitações foram observadas em relação ao modelo de mistura como a falta de clareza na identificação do número de componentes para a biblioteca espectral. Além disso, os componentes gerados a partir de uma imagem não poderiam ser reutilizados para analisar outras imagens que tenham datas diferentes, mesmo sendo da mesma área. Esse fator impõe dificuldades em aplicações que almejem detectar alterações urbanas que utilizam imagens de série histórica.

Os resultados do processamento de dados dos cinco canais termais do ASTER permitiram caracterizar os contrastes termais do espaço intra-urbano. Também possibilitou identificar relações entre as imagens-fração e os dados de temperatura, como por exemplo, a relação temperatura e vegetação, superfícies impermeáveis e sombra. Assim como com os dados de declividades que justificam certos dados termais, como por exemplo, na Serra do Curral.

O mapa de conforto ambiental urbano e as concordâncias com os dados sócio-econômicos e de infra-estrutura afirmam que a região fora da Avenida do Contorno, então não incluída no planejamento original da cidade de Belo Horizonte foi construída sem planejamento. A partir dos índices de concordância elaborados, as classes sociais estão divididas homogeneamente nas zonas de conforto, de forma que não houve até então, privilégios em relação à zonas mais confortáveis, de acordo com as variáveis consideradas neste estudo.

Dentro do contexto climático brasileiro, vale ressaltar que Belo Horizonte, situada na porção sudeste do estado de Minas Gerais, está em uma região de clima tipicamente misto, com parte do ano úmido (verões chuvosos) e parte, seco (inverno), o que dificulta gerar recomendações que atendam às condições de conforto durante o ano todo. Além disso, percebe-se a mudança climática que a cidade vem sofrendo, ficando cada vez mais esquecido o fato que Belo Horizonte era conhecida pelo seu clima ameno. De modo geral,

observa-se que a cidade parece hoje mais árida e quente e deixando de ser conhecida por seu clima agradável e saudável, apesar da sua existência da Serra do Curral. Sendo assim, são pertinentes estudos comparativos com uso de imagens de períodos diversos que retratem as diferenças climáticas. Bem como pesquisas que contemplem diferentes períodos históricos, afim de possibilitar a compreensão das mudanças climáticas que Belo Horizonte experiencia.

Diversas pesquisas sobre conforto urbano têm como foco principal a temperatura. Acredita-se que para a descrição e compreensão do conforto nas cidades deve-se considerar primeiramente a escala de estudo e, enfim, abranger as variáveis a fim de modelar a realidade de maneira fiel. A boa qualidade dos ambientes é resultado da combinação de diversas variáveis que se interrelacionam como um sistema. Dessa forma, a associação justa dos fatores que condicionam o espaço é a fase crucial para seu o entendimento.

Nos últimos anos, percebe-se uma corrente na literatura que promove a idéia que a melhoria na resolução espacial dos sensores remotos é a única maneira para aperfeiçoar a informação nas análises urbanas. Os resultados deste trabalho indicam que a melhoria nas medições dos dados de sensoriamento remoto não se limitam à resolução espacial. Não se considera que uma maior precisão espacial não é importante. Porém é necessário pensar em novas metodologias que usem dados já existentes que possibilitem a compreensão dos fenômenos urbanos.

Finalmente, relacionar indicadores ambientais provenientes do sensoriamento remoto e dados sócio-econômicos ainda é pouco discutido. Os resultados dessa pesquisa podem contribuir para o planejamento urbano de forma mais abrangente. Acredita-se que esse argumento tem ainda muito a ser explorado.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK; S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER users handbook**. Pasadena: JPL, 2002. 135p. Disponível em:

<[ASTERweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/ASTER\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://ASTERweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/ASTER_user_guide_v2.pdf)>.

Acesso em: 23 de novembro de 2007.

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. **SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III**, 1999, v. 3756, p 1-10. Disponível em: <[www.spectral.com/sr115.pdf](http://www.spectral.com/sr115.pdf)>. Acesso em: 26 de março de 2008.

ADAMS, J. B.; ADAMS J. Geologic mapping using Landsat MSS and TM images: Removing vegetation by modeling spectral mixtures. **Third Thematic Confederation of Remote Sensing for Expl. Geol. ERIM**, 1984, n. 2, p. 615-622.

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; GILLESPIE, A. R. Imaging Spectroscopy: Interpretation based on Spectral Mixture Analysis. In **Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition**, Cambridge: Cambridge University Press, 1993, p. 145-166.

ADAMS, J. B.; SMITH, M. O.; JOHNSTON, P. E. Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander Site. **Journal of Geophysical Research**, 1986, n 91.

ARNOLD, C. L.; GIBBONS C. J. Impervious Surface Covarage: the emergence of a key environmental indicator. **Journal of the American Planning Association**, 1996; v. 62, n. 2, p. 243-258.

ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote Sensing of Environment**, 1982, v. 12, n. 4, p. 313-329.

BAPTISTA, G. M. M. Ilhas urbanas de calor. **Scientific American Brasil**, 2003 , v. 01, n. 08, p. 55-59.



BARROS, J. M. O Discurso da Modernidade. a Fundação de Belo Horizonte como Marco Enunciativo. **Os Urbanistas. Revista de Antropologia Urbana**. Ano 1, vol. 1, numero 1, 2004. Disponível em <[www.aguaforte.com/.../jorgemarciobarros.html](http://www.aguaforte.com/.../jorgemarciobarros.html)>, acessado em 26 de março de 2008.

BELO HORIZONTE. **Anuário estatístico de Belo Horizonte 2000**. Belo Horizonte: Prefeitura de Belo Horizonte, Imprensa Oficial, 2000.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Legislação urbanística de Belo Horizonte: Plano Diretor, lei nº 7.165, de 27 de agosto de 1996. Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo Urbano, lei nº 7.166, de 27 de agosto de 1996**. Belo Horizonte, 1996., 301p.

BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping Target Signatures via Partial Unmixing of AVIRIS Data. **Summaries, Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop**, JPL, 1995, n 95-1, v. 1, p. 23-26.

BRAGA, T. M. **Belo Horizonte: Desafios da Dimensão Ambiental nas Políticas Urbanas**. Tese de Doutorado, UNICAMP. Campinas, 2001. 199p.

BRAGA, T.M.; FREITAS, A. P. G.; DUARTE, G. S. Índice de sustentabilidade urbana. I Encontro Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. In: **Anais...**, Indaiatuba, São Paulo, 2002. Disponível em: [http://www.anppas.org.br/encontro\\_anual/encontro1](http://www.anppas.org.br/encontro_anual/encontro1). Acessado em: 26 de maio de 2008.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R. Desenvolvimento de um procedimento simplificado do método multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) para o tratamento de imagens hiperespectrais. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu. In: **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1249-1256. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.20.17.38/doc/1249.1256.111.pdf>>. Acesso em: 26 de março de 2008.

CHEN, W.; ZHOU, G. Comparison of satellite measured temperatures using Terra ASTER and LandSat ETM+ data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**,

2004, v. 3, p. 1723-1726.

CHRYSOULAKIS, N. Estimation of the all-wave urban surface radiation balance by use of ASTER multispectral imagery and in situ spatial data. **Journal of Geophysical Research**, 2003, vol. 108, p 1-10.

COSTA, H. S. M.; PEIXOTO, M. C. D. Dinâmica imobiliária e regulação ambiental: uma discussão a partir do eixo-sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Revista Brasileira de estudos de população**, São Paulo, 2007, v. 24, n. 2, p. 317-336.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, 2003, v. 87, n. 2-3, p. 123-135.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER. **Cross-Talk correction software user's guide**. Tokyo: ERSDAC, 2003. 21p. Disponível em: <[http://www.gds.ASTER.ersdac.or.jp/gds\\_www2002/service\\_e/u.tools\\_e/cross/GUIDEED.PDF](http://www.gds.ASTER.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/u.tools_e/cross/GUIDEED.PDF)> Acesso em: 11 dezembro de 2007.

FUCKNER, M. A. **Aplicação de Imagens ASTER no Estudo do Ambiente Urbano de São Paulo e Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. INPE. São José dos Campos, 2007. 218p.

FURLAN, S. A. Paisagens sustentáveis: São Paulo e sua cobertura vegetal. In: **Geografias de São Paulo: a metrópole do século XXI**. São Paulo: Contexto, 2004. p. 255-283.

GODOY, S. C.; DIAZ, E. G. Aplicación del modelo digital de elevaciones de ASTER en geomorfología. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. In: **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2405-2412. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.50/doc/2405-2412.pdf>> Acesso em: 14 de novembro de 2007.

HERCULANO, S. A qualidade de vida e seus indicadores. **Ambiente & Sociedade**, 1998,. ano I, nº 2, 1998.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N. C, CLARKE, K, C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modelling. **Remote Sensing of Environment**, 2003, n 86, p. 286–302.

HORWITZ, H. M.; NALEPKA, R. F.; HYDE, P. D.; MORGENSTERN, J. P. Estimating the proportions of objects within a single resolution element of a multispectral scanner. **Remote Sensing of Environment**, 1971, p. 1307-1320.

HUETE, A. R. Separation of soil-plant spectral mixture by factor analysis. **Remote Sensing of Environment**, 1986, n 19, p. 237-251.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2000**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/default.shtm>>. Acesso em: 21 de março. 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades@**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007a. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default.php>>. Acessado em 26 março de 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Setor de serviços faz Barueri (SP) ter maior aumento de participação no PIB brasileiro de 2002 para 2005**. Rio de Janeiro, 2007b. Disponível em: < [http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=1061&id\\_pagina=1](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1061&id_pagina=1)>. Acessado em 26 de março de 2008

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.

ISLA, M. A review of the urban indicators experience and a proposal to overcome current situation. The application to the municipalities of the Barcelona province. World Congress of Environmental and Resource Economists. In: **Anais...**, Itália, 1998. Disponível em: <http://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/document/isla.pdf>. Acessado em: 26 de maio de 2008.

JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and

socio-economic attributes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 1999, v. 65, n. 5, p. 611–622.

JET PROPULSION LABORATORY. **ASTER OverViews**. California Institute of Technology Disponível em: <[http://www.science.ASTER.ersdac.or.jp/en/documnts/users\\_guide/index.html](http://www.science.ASTER.ersdac.or.jp/en/documnts/users_guide/index.html) >. Acesso em: 21 de Março de 2008.

KATZSCHNER, L. Urban climate studies as tools for urban planning and architecture. ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. In: **Anais...**, Salvador: FAU-UFBA/LACAM, ANTAC, 1997. p.49-58.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Projeto de Normalização em Conforto Ambiental**, UFSC, 1998, 27p. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/conforto/textos/termica/t1-termica/texto1-1298.html>>. Acessado em 19 de maio de 2008.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de Calor nas Metrôpoles: o Exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.

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**, 2006, v. 104, n. 2, p. 157-167.

MADHAVAN, B. B.; KUBO, S.; KURISAKI, N.; SIVAKUMAR, T. V. L. N. Appraising the Anatomy and Spatial Growth of the Bangkok Metropolitan Area Using a Vegetation-Impervious-Soil Model through Remote Sensing. **International Journal of Remote Sensing**, 2001, n 22, p.789-806.

MASCARÓ, L. R. de. **Ambiência urbana: urban environment**. Porto Alegre: Sagra/DC Luzzatto, 1996. 199p.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images: an introduction**. John Wiley and Sons. 3ª Edição. Gran Bretanha, 2004, 340p.

MONTE-MÓR, R. L. M. Belo Horizonte, Capital de Minas, século XXI. **Revista Vária História**, Belo Horizonte, 1997, n. 18.

MONTSERUD, R. D; LEAMANS, R. **Comparing Global Vegetation Mapas with the Kappa Statistic**. Ecological Modelling, 1992, n 62, p275-293.

MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano**. Belo Horizonte: Editora da autora, 2003, 294 p.

MUSTARD, J.F.; HEAD, J.W. Buried stratigraphic relationships along the southwestern shores of Oceanus Procellarum - Implications for early lunar volcanism. **Journal of Geophysical Research-Planets**, 1996, n. 101, p. 18913-18925.

NAMIKAWA, L. M.; FELGUEIRAS, C. A.; MURA, J. C.; ROSIM, S.; LOPES, E. S. S. **Modelagem Numérica de Terreno e Aplicações**. São José dos Campos, SP, Inpe, 2003. 142 p.

NETZBAND, M.; STEFANOV, W.L. **Urban Land Cover and Spatial Variation Observation Using ASTER and MODIS Satellite Image Data**. 2004. Disponível em <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm7/papers/253.pdf>. Acessado em 26 de março de 2008.

NUNES, S. S.; SOUZA JÚNIOR, C. M. **Avaliação de modelos de mistura de pixel para áreas urbanas**. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. In: **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6885-6892. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.18.11/doc/6885-6892.pdf>> Acesso em: 20 de agosto de 2007.

OKIN, G.S.; ROBERTS, D.A.; MURRAY, B.; OKIN, W.J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. **Remote Sensing of Environment**, 2001, n. 77, p. 212-225.

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra de Carajás (PA)**. Dissertação de Mestrado, Instituto

Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2005., p. 184.

PAINTER, T. H.; J., DOZIER, D. A.; ROBERTS, R. E.; DAVIS, R. O.; GREEN. Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, 2003, n 85, p.64-77.

PARMA, G. C. Processamento de imagem ASTER para obtenção do MDE e da imagem ortorretificada do município de Palhoça, SC, Brasil. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. In: **Anais...**, São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6019-6026. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.57/doc/6019-6026.pdf>> Acesso em: 20 de agosto de 2007.

PHINN, S.; STANFORD, M.; SCARTH, P.; MURRAY, A.T.; SHYY, P.T. Monitoring the composition of urban environments based on the vegetation-impervious surface-soil (VIS) model by subpixel analysis techniques. **International Journal of Remote Sensing**, 2002, n 23. p. 4131-4153.

PICADA, G. S. Tópicos de conforto Ambiental. **Revista Tecnológica**, UFSM, 1999, 11p. Disponível em : <[http://www.revistatecnologica.ct.ufsm.br/arquivos/artigo\\_42.pdf](http://www.revistatecnologica.ct.ufsm.br/arquivos/artigo_42.pdf) >. Acessado em 19 de maio de 2008.

POLIDORI, M.; KRAFTA, R.; GRANERO, J. **Software Medidas Urbanas** <sup>®</sup>. Pelotas, Laboratório de Geoprocessamento da UFPel, 2001.

POWELL, R.L, ROBERTS, D. A, DENNISON P. E. HESS. L. 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.

RASHED, T. Multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) of ASTER data for Cairo. Apresentação In: **Workshop on Applied Urban Remote Sensing**. Arizona State University, Tempe, AZ, 2004. Disponível em: <<http://elwood.la.asu.edu/grsl/UEM/>> Acesso em: 26 de março de 2008.

RASHED, T.; WEEKS, J. R. **Exploring the spatial association between measures from satellite imagery and patterns of urban vulnerability to earthquake hazards.**

Disponível em:  
<[http://geography.sdsu.edu/Research/Projects/IPC/Rashed\\_Weeks\\_Regensburg\\_2003.pdf](http://geography.sdsu.edu/Research/Projects/IPC/Rashed_Weeks_Regensburg_2003.pdf)>. Acessado em 18 de dezembro de 2007.

RASHED, T.; WEEKS, J. R.; ROBERTS D. A.; ROGAN, J.; POWELL, R. L. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple endmember spectral mixture models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 2003 .v. 69, n. 9, p. 1011-1020.

RESEARCH SYSTEMS INCORPORATED. **ENVI user's guide**. Version 4.2. Boulder: RSI, 2005.

RICHARDSON, A. J.; WIEGAND, C. L.; GAUSMAN, H. W.; CUELLAR, J. A.; GENERMANN, A. H. Plant, soil and Shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetry Engineering Remote Sensing**, 1975, n 41, p. 1401-1407.

RIDD, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation – impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, 1995, v. 16, n. 12, p. 2165-2185.

ROBERTS, D. A.; BATISTA, G. T.; PEREIRA, J. L. G.; WALLER, E. K.; NELSON, B. W. Change Identification Using Multitemporal Spectral Mixture Analysis: Applications in eastern Amazonia. In **Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Applications and Methods**, 1998a, p. 137-161.

ROBERTS, D.A.; DENNISON, P.E.; GARDNER, M.; HETZEL, Y.; USTIN, S.L.; LEE, C. Evaluation of the Potential of Hyperion for Fire Danger Assessment by Comparison to the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer. **IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING**, 2003, 41, p. 1297-1310.

ROBERTS, D.A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R.O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, 1998b, n 65, p. 267-279.

ROBERTS, D. A.; HALLIGAN, K.; DENNISON, P. **ViperTools user manual**. Version 1.4. Santa Barbara: University of California Santa Barbara, 2007 95p. Disponível em: [http://www.ViperTools.org/download/VIPER\\_Tools\\_user\\_manual\\_v12.pdf](http://www.ViperTools.org/download/VIPER_Tools_user_manual_v12.pdf) Acesso em: 14 março de 2008.

ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O.; SABOL, D. E.; ADAMS, J. B.; USTIN, S. Mapping the Spectral variability in photosynthetic and non-photosynthetic vegetation, soils and shade using AVIRIS. **Summaries 3rd Annual JPL Airborne Geoscience Workshop** , JPL, 1992, n. 92-14, v.1, p. 38-40.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 1991, v. 29, n. 1, p. 16-21.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1980. 593p.

SMALL, C. A global analysis of urban reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, 2005, v. 26, n. 4, p. 661–681.

SMALL, C. A. Multitemporal analysis of urban reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 2002, n 81, p. 427-442.

SMITH, A. M. S. **How to convert ASTER radiance values to reflectance: an online guide**. Disponível em: <<http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>> Acesso em: 26 de março de 2008.

SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Interpretation of AIS images of Cuprite, Nevada, using constraints of spectral mixtures. **Proc. Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop**, JPL, 1985, n. 85-41, p. 62-68.

SOUZA, C. J. S. **Carta de vulnerabilidade à erosão como subsídio ao zoneamento ecológico-econômico em área intensamente antropizada**. Dissertação Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999. 172p.



SOUSA, D. O.; BAPTISTA, G. M. M. Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. In: **Anais...**, Goiânia, 2005, INPE, p. 4525-4530.

TEZA, C. T. V.; BAPTISTA, G. M. M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER on demand 08 – Kinetic Temperature (III): metrópoles brasileiras. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. In: **Anais...**, Goiânia, 2005, INPE, p. 3911-3918.

TOMPKINS, S.; MUSTARD, J. F.; PIETERS, C. M.; FORSYTH, D. W. Optimization of endmembers for Spectral Mixture Analysis. **Remote Sensing of Environment**, 1997, n 59, p. 472- 489.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, 2003 v. 86, n. 3, p. 370-384.

WARD, D.; PHINN, S. R.; MURRAY, A. T. Monitoring Growth in Rapidly Urbanization Areas Using Remotely Sensed Data. **The Professional Geographer**, 2000, n. 52, p. 371-385.

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

WOOSTER, M. J. In orbit calibration of the ATSR-I 1.6µm channel using high resolution data from the JERS-1 (Fuyo-1) optical sensor. **International Journal of Remote Sensing**, 1996, v. 17, n. 5, p. 1069-1074.

WU, C. S. Normalized spectral mixture analysis for monitoring urban composition using ETM plus imagery. **Remote Sensing of Environment**, 2000, n. 4, p. 480-492.

YOUNG, S. J.; JOHNSON, B. R.; HACKWELL, J. A. An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data. **Journal of Geophysical Research**, v. 107,

n. D24, 4774, ACH 14, 2002.

ZHU, G.; BLUMBERG, D. G. Classification Using ASTER Data and SVM Algorithms: The Case Study Of Beer Sheva, Israel. **Remote Sensing of Environment**. 2002, v. 80, n. 2, p. 203-240.