

## Construção de um mapa de conforto urbano de Belo Horizonte com uso de imagens ASTER e modelo múltiplo de mistura

Ana Maria Coimbra Carneiro <sup>1</sup>  
Luciano Vieira Dutra <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG  
Avenida Presidente Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – Belo Horizonte – MG, Brasil  
anamariacoimbra@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
dutra@dpi.inpe.br

**Abstract:** Data sensing has mainly been used in studies of urban areas, due to the increased availability of images with higher spatial resolution, spectral, radiometric and temporal. The major challenge, however, still lies in studies that combine data from remote sensing and socio-economic data, in which rich analysis can be conducted. In this work was used an ASTER image for the geoambiental analysis in the urban area of Belo Horizonte (MG). The Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) was used to extract fractions from the area, based on the model of Vegetation, Impervious Surface and Soil (VIS). Information about temperature and slope was also extracted from ASTER image. With the information obtained from VIS, temperature and slope, a new map of the city's urban environmental comfort was made. The Kappa indexes was then calculated between the map of comfort and the socio-economic and the infrastructure data. The analysis indicated that the distribution of environmental comfort in the city does not follow the social and infrastructural spatial trends. The results obtained, using MESMA, with the fraction-images were satisfactory because was possible the creation of a sub-pixel mapping in dense urban area, characterizing the most significant aspects of the city. The relationship between environmental indicators from the 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.

**Palavras-chave:** MESMA, V-I-S model, sub-pixel mapping, urban land cover, ASTER, modelo V-I-S, mapeamento sub-pixel, cobertura do solo urbano.

### 1. Introdução

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. 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. As imagens provenientes desse sensor podem ser utilizadas para estudos em mesoescala, pois apresentem uma série de vantagens espectrais em relação às imagens *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)/*LandSat* (Fuckner, 2007).

A escolha de se trabalhar com imagens ASTER com tal resolução para área urbana, apesar de haver disponibilidade de outras imagens com resolução espacial maior, 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.

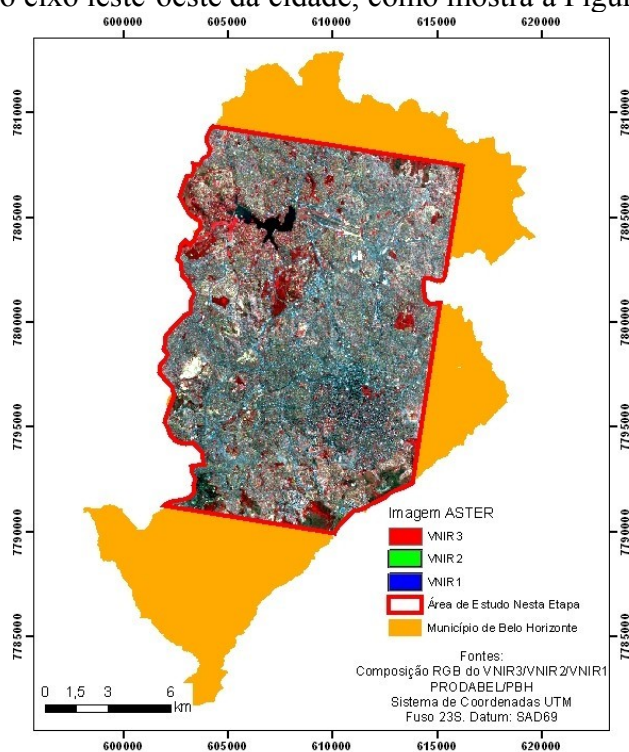
Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar uma análise geoambiental da área urbana de Belo Horizonte, a partir de dados de sensoriamento remoto. Além disso, pretende-se identificar as concordâncias entre os dados obtidos nas imagens orbitais e dados sócio-econômicos e de infra-estrutura da área.

Para se aproveitar dos benefícios da resolução espectral das imagens ASTER, foi utilizado um modelo de análise de mistura que busca selecionar como componentes para o

modelo *pixels* que representam a variabilidade espectral de uma determinada classe na cena. Dessa forma, em pesquisas anteriores, 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 do análise linear de mistura (ALM) por permitir que o número e o tipo de membros finais variem de *pixel* para *pixel* tanto quanto sua abundância.

## 2. Metodologia

A imagem ASTER utilizada do nível 1B, com aplicação dos coeficientes para correções radiométrica e geométrica incluídas. A imagem é de setembro de 2002, uma quarta feira, dia típico na cidade de Belo Horizonte, sem a presença próxima de feriado, o que confere à imagem adquirida uma visualização instantânea de uma situação ordinária para a área. O retângulo envolvente inclui o centro de Belo Horizonte e importantes áreas periféricas como a região da Pampulha e o eixo leste-oeste da cidade, como mostra a Figura 1.



Figural: Localização da área de estudo

### 2.1 Modelo Múltiplo de Mistura

Para a aplicação do modelo de mistura espectral foram utilizadas bandas adquiridas por dois subsistemas do sensor ASTER, as 3 do VNIR e as 6 bandas 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 foi obtida no nível 1B, já corrigida geométrica e radiometricamente. Essas imagens (nível 1B) 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. 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).

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 transformação das imagens de reflectância aparente para reflectância de superfície foi efetuada empregando-se um modelo de correção do 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 (Mather, 2004). Para a misura 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).

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) criado por Roberts et al. (2007). Desenvolvido em linguagem IDL, *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*®.

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 auxílio de uma imagem *Ikonos* da mesma área para facilitar a detecção dos objetos. 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. 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 1.

Tabela 1: Categorias e classes mapeadas

<b>Categoria</b>	<b>Classe</b>
Vegetação	Cerrado
	Gramínea
	Mata
Superfícies Impermeáveis	Asfalto
	Área Central
	Periferia
	Cobertura (Zinco)
Solo Exposto	Solo Exposto

Foram adotadas duas formas para otimizar a biblioteca espectral. A primeira foi a técnica do menor EAR (*Endmember Average RMSE*), técnica adotada por Fuckner (2007), Dennison e Roberts (2003) e Powell et al. (2007). Em um segundo momento, foram selecionados espectros que possuíam o menor EAR, menor MASA (*Minimum Average Spectral Angle*) e

maior InCoB (*Count-based Endmember Selection*). Nessa técnica, se escolhe os candidatos com melhor desempenho em cada uma das métricas.

Na criação do modelo de mistura, foram empregados dois parâmetros diferentes: primeiramente foi utilizado os parâmetros padrão do programa, indicados por Roberts et al. (2007), que são -0.05 a 1.05 de brilho da fração; 0,8 máximo de sombra; *RMSE threshold*: 0,025). Em seguida, foram utilizados 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).

## 2.2 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., 1999). Esta etapa foi executada a fim de criar o modelo digital de elevação da área e posterior criação do mapa de declividades.

## 2.3 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). O algoritmo de correção atmosférica usado foi Algoritmo de Compensação Atmosférica da Cena (*In-Scene Atmospheric Compensation Algorithm - ISAC*), implementado no ENVI 4.2. A imagem temperatura é adquirida em Kelvin e foi transformada em Celsius.

## 2.4. Dados Ambientais e sócio-econômicos

Foram analisadas de forma integrada os dados obtidos a partir das técnicas expostas anteriormente como também análises combinadas com dados obtidos a partir utilizando como referência mapas infra-estrutura e serviços urbanos e sócio-econômicos da área de estudo (dados da prefeitura de Belo Horizonte).

Foi criado um mapa de conforto ambiental urbano a partir de álgebra de mapas, considerando que o conforto ambiental aqui proposto segue as seguintes regras: extremos de temperatura, superfícies impermeáveis e altas declividades são inversamente proporcionais ao conforto ambiental urbano, enquanto que a vegetação lhe é diretamente proporcional.

Cada mapa temático de entrada teve suas variáveis divididas em três categorias, nomeadas em Alto, Médio e Baixo, que possuem notas de 6,4 e2, respectivamente. Cada resultado possível encontrado possui portanto uma pontuação que o inclui numa certa classe do mapa final como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Regras do mapa de conforto ambiental urbano

Pontuação	Classes de Conforto Ambiental
2,0 a 2,833	Baixo
2,833 a 3,666	Médio a Baixo
3,666 a 4,499	Médio
4,499 a 5,332	Médio a Alto
5,332 a 6,0	Alto

Na análise entre o mapa de conforto ambiental urbano e os dados sócio-econômicos, foram calculados os índices 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.

Foram confrontados o mapa de conforto ambiental urbano e os seguintes dados sócio-econômicos: mapa do índice de desenvolvimento humano (IDH); mapa de acesso à atividades urbanas resultante do cruzamentos do número de estabelecimentos industriais, comerciais, de serviços, de cultura, de saúde e proximidade à áreas de lazer; mapa de densidade populacional; mapa de renda do chefe de família; mapa de infra-estrutura urbana, que incluem abastecimento de água, coleta de lixo, rede de esgoto, drenagem pluvial e acessibilidade viária.

### 3. Resultados e Discussão

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 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 3).

Tabela 3: Testes realizados e seus respectivos tipos de otimização e parâmetros

Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
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)

Os modelos aplicados após a realização dos devidos testes contemplaram o número e as classes de componentes conforme listados na Tabela 4. 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.

Tabela 4: Modelo de múltiplos componentes adotado

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

Observando os resultados (Tabela 5), 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.

Tabela 5: Desempenho dos testes no ViperTools

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

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*. Aqueles não modelados pelo MESMA foram os *pixels* mais 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. O teste 4 apresentou o melhor desempenho, por realizar um mapeamento mais fiel à realidade da cidade, além de possuir o maior número de *pixels* modelados (Figura 2).

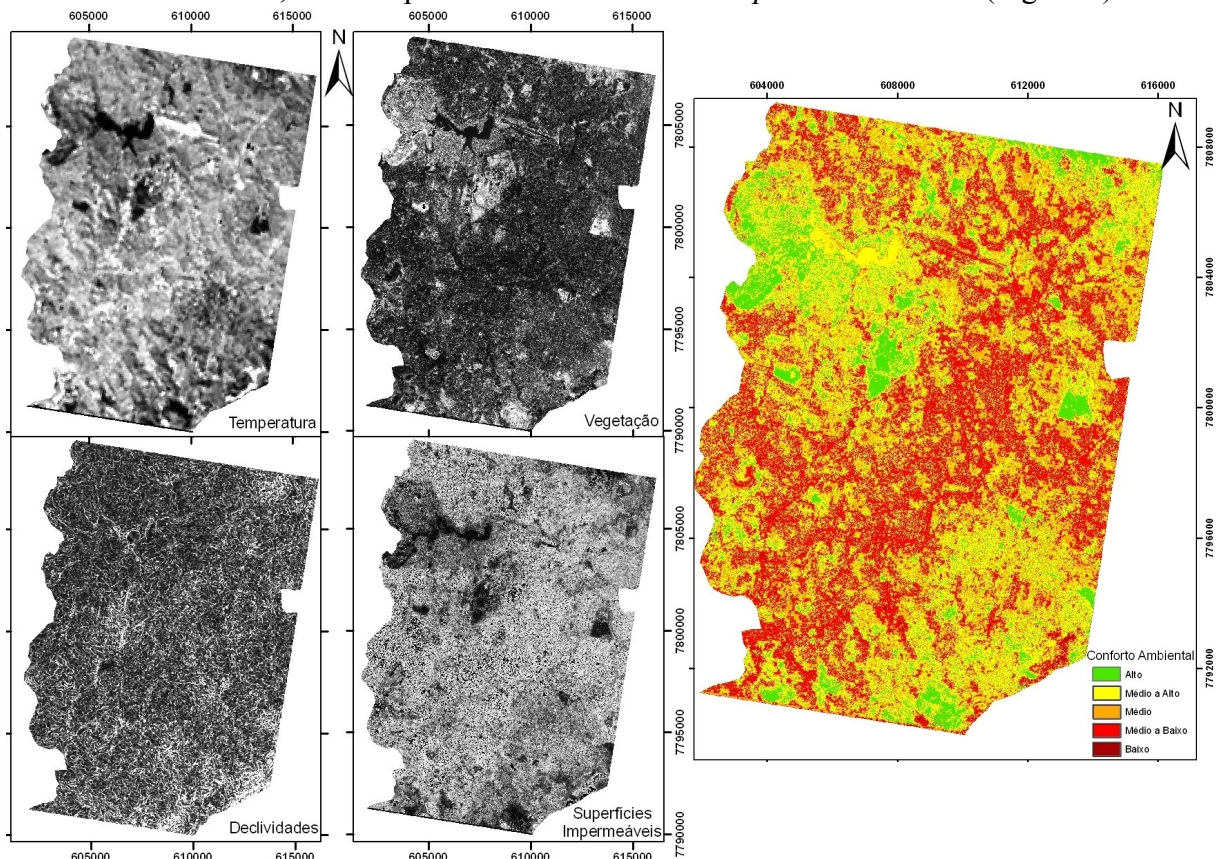


Figura 2: Mapas de temperatura, declividades e imagens-fração de vegetação e superfícies impermeáveis e Conforto Ambiental Urbano

Dos dados obtidos a partir do modelo digital de terreno, foram extraídas as declividades do terreno e este foram comparados visualmente com dados obtidos a partir de imagens SRTM. Os dados obtidos a partir das bandas estereoscópicas do ASTER e do SRTM se assemelham na precisão (Oliveira, 2005). Foi considerado satisfatório os resultados obtidos



(Figura 2). Na imagem temperatura nota-se que áreas com maior ocorrência de superfícies impermeáveis foram aquelas com as temperaturas mais altas (Figura 2). Por sua vez, as regiões com maiores índices de vegetação e nas 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 valores de temperatura ali observados, se deve ao fato da existência da lagoa. Valores menores de temperatura também foram observados em outras áreas verdes da cidade como a Estação Ecológica da UFMG, o horto florestal na zona leste da cidade, alguns parques como o Parque Municipal e na região da Serra do Curral. 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.

Nas análises realizadas entre o mapa de conforto ambiental urbano e dados sócio-econômicos e de infra-estrutura, percebeu-se baixos índices Kappa. Segundo Montserud 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, como mostra a tabela 6.

Tabela 6: Resultados dos índices Kappa

<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

Não existe porém dependência entre as variáveis constituintes do mapa de conforto e aqueles sócio-econômicos e de infra-estrutura. Todavia 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.

#### **4. Considerações finais**

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 bandas do ASTER. Recomenda-se que novas pesquisas sejam feitas no intuito de esgotar as possibilidades do módulo ViperTools no processamento do MESMA, seja no uso de imagens de outros sensores, na otimização da biblioteca espectral ou nos parâmetros para criação das imagens-fração.

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 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, não incluída no planejamento original da cidade de Belo Horizonte, foi construída ao de maneira desordenada. 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 para a criação do mapa de conforto ambiental urbano.

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 mesoescala.

## 5. Referências Bibliográficas

- Abrams, M.; Hook, S.; Ramachandran, B. **ASTER users handbook**. Pasadena: JPL, 2002. Disponível em: <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. Disponível em: <www.spectral.com/sr115.pdf>. Acesso em: 26 de março de 2008.
- Dennison, P. E.; Roberts, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2-3, p. 123-135, 2003.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center. **Cross-Talk correction software user's guide**. Tokyo: ERSDAC, 2003. Disponível em: <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**. 2007. 218 p. (INPE-15203-TDI/1303). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007.
- Mather, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images: an Introduction**. Chichester, England: John Wiley and Sons. 3ª Edição. 2004, 340 p.
- Montserud, R. D; Leamans, R. Comparing Global Vegetation Mapas with the Kappa Statistic. **Ecological Modelling**, vol. 62, n 4, p. 275-293, 1992.
- 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.
- 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**, v. 16, n. 12, p. 2165-218, 1995
- 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**, n 65, p. 267-279, 1998b.
- Roberts, D. A.; Halligan, K., Dennison, P. **ViperTools user manual**. Version 1.4. Santa Barbara: University of Califórnia Santa Barbara, 2007. Disponível em: <http://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**, v.1, n. 92-14, p. 38-40, 1992.
- 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.
- Voogt, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370-384, 2003.