



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16712-TDI/1651

**INFERÊNCIA POPULACIONAL URBANA BASEADA
NO VOLUME DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
USANDO IMAGENS IKONOS-II E DADOS LiDAR**

Lívia Rodrigues Tomás

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelas Dras. Leila Maria Garcia Fonseca, e Claudia Maria de Almeida,
aprovada em 31 de março de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.18.18.21>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

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

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

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-16712-TDI/1651

**INFERÊNCIA POPULACIONAL URBANA BASEADA
NO VOLUME DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS
USANDO IMAGENS IKONOS-II E DADOS LiDAR**

Lívia Rodrigues Tomás

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelas Dras. Leila Maria Garcia Fonseca, e Claudia Maria de Almeida,
aprovada em 31 de março de 2010.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.18.18.21>>

INPE
São José dos Campos
2010

Tomás, Livia Rodrigues.

T591in Inferência populacional urbana baseada no volume de edificações residenciais usando imagens IKONOS-II e dados LiDAR / Lívia Rodrigues Tomás. – São José dos Campos : INPE, 2010.
xx + 108 p. ; (INPE-16712-TDI/1651)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadoras : Dras. Leila Maria Garcia Fonseca, e Claudia Maria de Almeida.

1. Sensoriamento remoto. 2. Imagens de alta resolução espacial. 3. IKONOS. 4. LiDAR. 5. Modelo digital de superfície. 6. Inferência populacional urbana. I. Título.

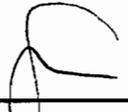
CDU 314:528.88

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

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

Dra. Evlyn Marcia Leão de Moraes Novo



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



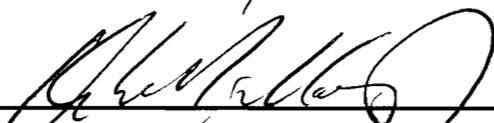
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dra. Claudia Maria de Almeida



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Antonio Miguel Vieira Monteiro



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luciano Vieira Dutra



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Paolo Gamba



Convidado(a) / UNIPV / Pávia - IT

Dr. Raul Queiroz Feitosa



Convidado(a) / PUC- RIO / Rio de Janeiro - RJ

Aluno (a): Livia Rodrigues Tomás

São José dos Campos, 31 de março de 2010

Aos meus pais, Luce Helena e Deni, pelo apoio incondicional na realização dos meus sonhos...

AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo financiamento do meu programa de Doutorado no Brasil e na Itália.

Ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) pela disponibilização de infra-estrutura, equipamentos, apoio e incentivo para realização do trabalho.

Às minhas orientadoras, Leila e Cláudia, pela oportunidade de trabalhar com um tema novo e desafiador.

Ao professor Paolo Gamba, da Universidade de Pavia, que me recebeu e auxiliou no período em que estive na Itália, desenvolvendo parte desta pesquisa de doutorado.

Aos colegas do curso de pós-graduação pelo apoio, amizade, companheirismo e 'suporte técnico', sobretudo Izabel Reis, Marcos Adami, Cleber Gonzalez, Lino Carvalho, Tatiana Saralegui e Caroline Leão.

À Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. pela doação do perfilamento a laser utilizado neste trabalho.

À Prefeitura Municipal de Uberlândia, em especial à servidora Maria Cristina Carneiro Batista da Secretaria de Planejamento Urbano, pelo fornecimento de dados essenciais ao desenvolvimento do trabalho.

Ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) pelo suporte na utilização do programa TerraScan, em especial aos funcionários Daniele Félix Zandoná, Fabiano Scheer Hainosz e Marlo Antônio Ribeiro Martins.

Finalmente, agradeço à minha família e amigos pelo apoio constante em toda minha trajetória acadêmica.

RESUMO

Esta tese propõe um método para inferir a população residente em áreas urbanas por meio do cálculo do volume de edificações residenciais, obtido a partir de imagens IKONOS-II e dados LiDAR, utilizando a cidade de Uberlândia – MG como área de estudo. O trabalho parte da hipótese de que o acréscimo da altura (coordenada z) irá aprimorar a inferência populacional até então obtida apenas através de dados bidimensionais. A metodologia compreendeu duas principais etapas: a construção de um modelo 3D e o cálculo da inferência populacional. Na construção do modelo 3D, foram obtidos os polígonos das edificações por meio de digitalização sobre a ortoimagem, e um Modelo Digital de Altura, a partir dos dados LiDAR. As edificações de uso residencial foram identificadas com trabalho de campo. Foram gerados os seguintes produtos: Modelo Digital de Superfície e ortoimagem através do estéreo-par de imagens IKONOS; Modelos Digitais de Superfície, de Terreno e de Altura, com dados LiDAR. A segunda etapa compreendeu a inferência populacional por setor censitário para o ano de 2004, realizado a partir do volume, superfície habitável e densidade populacional. A comparação entre a inferência populacional realizada e os dados de referência do IBGE se deu através de regressão linear. Os resultados mostram que houve sub-estimativa sistemática entre os valores. Em média, o modelo de inferência estimou 31 habitantes a menos que o dado de referência e apresentou valores 1,35% abaixo do esperado. Essa sub-estimativa pode ser explicada por incertezas introduzidas ao se reamostrar o dado de referência, originalmente disponível por bairro, para o nível de setores censitários, bem como por eventuais inconsistências nos dados cadastrais fornecidos pela Prefeitura Municipal de Uberlândia (PMU). Outro agravante reside no fato de que o cadastro da PMU apresenta os dados de área residencial construída cumulativos para o ano de 2009, sem explicitar o ano de conclusão das habitações lançadas, impossibilitando a sua reconstituição para o ano de análise (2004). Apesar da sub-estimativa, o dado de população inferida pode ser considerado equivalente ao dado de referência em um nível de significância de 1%.

URBAN POPULATION ESTIMATE BASED ON RESIDENTIAL BUILDINGS VOLUME USING IKONOS IMAGES AND LIDAR DATA

ABSTRACT

This PhD thesis proposes an alternative method to estimate urban population in the central area of Uberlândia city, located in Minas Gerais State, southeast of Brazil, using the volume of single houses and high-rise residential buildings, obtained from IKONOS-II images and LiDAR data. The central hypothesis is that the incorporation of information on height (z coordinate) will concur to refine the population estimates conducted so far, which have been solely based on areal data. The methodological stages are twofold: the construction of a 3D city model and the reckoning of urban population. In the first stage, the residential buildings borders were extracted by digitalization executed on the orthoimage. The height digital model, also generated in this first stage, was derived from LiDAR data. A field work was necessary to validate the residential use in the formerly identified buildings. This stage generated the following products: a digital surface model and an orthoimage derived from the IKONOS stereo-pair as well as surface, terrain, and height digital models derived from LiDAR data. The second stage comprised the estimates of population within each census district of the study area for the year 2004, what was accomplished by means of the calculated residential volume, habitable surface, and population density. The adjustment between the estimated population and the reference data supplied by the Brazilian Institute for Geography and Statistics (IBGE) was evaluated through linear regression and hypothesis tests associated with it. The results showed that there was a systematic underestimation of population. On average, the conducted estimates assessed 31 inhabitants less per district and lay 1.35% below the expected values in relation to the reference data. This underestimation can be explained by uncertainties introduced when the reference data, originally produced at the neighborhood level, were resampled to fit the territorial limits of census districts. Besides that, some inconsistencies are prone to be found in the data of residential built-up area supplied the Planning Department of the local government of Uberlândia, due to eventual omission or commission of information and the fact that these data refers to the cumulative residential area until 2009, what hinders a backward reconstitution of these data to the year of analysis (2004). In spite of the observed underestimation, the estimated population can be considered equivalent to the population provided by the reference data at a 1% level of significance.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Mapeamento da população utilizando técnicas dasimétricas.	11
Figura 2.2 - Método de correspondência baseado em área.....	32
Figura 2.3 - Efeito do terreno íngreme em imagens com a mesma escala.	35
Figura 2.4 - Pedra no Rio de Janeiro em imagens IKONOS correspondentes.	35
Figura 2.5 - Representação de pontos de um MDS e de um MDE ou MDT	38
Figura 2.6 - Nuvem de pontos proveniente do LiDAR.....	39
Figura 2.7 - Variações no modelo para o primeiro e último eco do LiDAR.....	40
Figura 2.8 - Sistema LiDAR aerotransportado, equipado com o sistema GPS-INS.	41
Figura 3.1 - Localização do município de Uberlândia no Triângulo Mineiro.	53
Figura 3.2 - Visão Panorâmica da Área de Estudo.	55
Figura 3.3 - Visão Panorâmica da Área de Estudo.	56
Figura 3.4 - Delimitação da Área de Estudo.....	56
Figura 4.1 – Fluxograma metodológico do trabalho.	59
Figura 4.2 - Localização dos GCPs sobre a imagem IKONOS.	62
Figura 4.3 - Primeira sub-etapa da metodologia.	63
Figura 4.4 - Localização dos ICPs sobre a imagem IKONOS.	65
Figura 4.5 - Parâmetros de ajuste para classificação de pontos.....	69
Figura 4.6 - Cálculo da superfície habitável.	73
Figura 5.1 - ICPs sobre MDS gerado através do estéreo-par IKONOS.	77
Figura 5.2 - Ortoimagem gerada através do MDS e ICPs.....	79
Figura 5.3 - Tipo de uso das edificações da área de estudo.....	81

Figura 5.4 - MDS e MDT gerados a partir dos pontos LiDAR.	82
Figura 5.5 - MDA obtido pela subtração entre o MDS e o MDT.	82
Figura 5.6 - Imagem intensidade e hipsométrica do MDS.....	83
Figura 5.7 - Distribuição dos ICPs utilizados na validação dos modelos.....	83
Figura 5.8 - Modelo 3D gerado, com a sobreposição da ortoimagem IKONOS.....	86
Figura 5.9 - Regressão linear entre os dados inferido e de referência.....	90

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Padrão de Exatidão Cartográfica.	48
Tabela 3.1 - Evolução da população em Uberlândia de 2000 a 2009.	54
Tabela 4.1 - Características de aquisição das imagens IKONOS utilizadas. ...	60
Tabela 4.2 - GCPs utilizados na geração do MDS.	61
Tabela 4.3 - ICPs utilizados na validação do MDS e ortoimagem.	64
Tabela 4.4 - Características do ALTM2025 da fabricante Optech.	67
Tabela 4.5 - População e taxa de crescimento entre 2000 e 2004.	71
Tabela 4.6 - População por setor censitário, em 2000 e 2004.	72
Tabela 4.7 - Área total construída e densidade populacional por setor censitário.	75
Tabela 5.1 - Discrepâncias altimétricas entre ICPs (H_c) e MDS (H_r).	78
Tabela 5.2 - Resultado dos testes estatísticos realizados.	78
Tabela 5.3 - Discrepâncias planimétricas entre ortoimagem e ICPs.	80
Tabela 5.4 - Resultado dos testes estatísticos realizados na ortoimagem.	80
Tabela 5.5 - Discrepâncias entre as coordenadas do GPS e MDS e MDT.	84
Tabela 5.6 - Estatística das discrepâncias altimétricas.	85
Tabela 5.7 - Análise de tendência do MDS e MDT.	85
Tabela 5.8 - Análise de precisão do MDS e MDT.	86
Tabela 5.13 - População inferida através do volume residencial, superfície.	88
Tabela 5.14 - Discrepâncias entre o dado inferido e o dado de referência.	89

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALS – Airborne Laser Scanning
ALTM – Airborne Laser Terrain Mapper
GCP – Ground Control Point
GPS – Global Positioning System
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP – Independent Check Point
INS – Inertial Navigation System
LiDAR – Light Detection and Ranging
MDA – Modelo Digital de Altura
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDS – Modelo Digital de Superfície
MDT – Modelo Digital de Terreno
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica
PMU – Prefeitura Municipal de Uberlândia
RFM – Rational Function Models
RPC – Rational Polynomial Coefficients
SC – Setor Censitário
SH – Superfície Habitável
SPOT – Système Pour l’Observation de la Terre
TIN – Triangular Irregular Network

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 PROPOSTA E CONTRIBUIÇÃO DA TESE	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DA TESE	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 INFERÊNCIA POPULACIONAL	7
2.1.1 <i>Interpoladores Espaciais</i>	9
2.1.2 <i>Modelos Estatísticos</i>	15
2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS TRIDIMENSIONAIS.....	27
2.2.1 <i>Fotogrametria</i>	28
2.2.1.1 Correspondência de imagens	31
2.2.1.2 Interseção Espacial.....	36
2.2.1.3 Interpolação / Geração do Modelo	37
2.2.2 <i>LiDAR</i>	38
2.3 EXTRAÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES.....	44
2.4 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS PRODUTOS GERADOS	46
3 ÁREA DE ESTUDO.....	53
4 METODOLOGIA	59
4.1 CONSTRUÇÃO DO MODELO 3D	60
4.1.1 <i>Geração de ortoimagem e digitalização das edificações</i>	60
4.1.2 <i>LiDAR</i>	66
4.2 CÁLCULO DA INFERÊNCIA POPULACIONAL	70
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
5.1 PRODUTOS DO ESTÉREO-PAR IKONOS: MDS E ORTOIMAGEM	77
5.2 PRODUTOS GERADOS A PARTIR DOS DADOS LIDAR: MDS, MDT E MDA	82
5.3 CÁLCULO DO VOLUME, SUPERFÍCIE HABITÁVEL E INFERÊNCIA POPULACIONAL	87
6 CONCLUSÕES	93
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1 INTRODUÇÃO

Para acompanhar a dinâmica espacial das cidades, que têm crescido de forma acelerada e desordenada, e suprir a falta de informações atualizadas sobre o crescimento das mesmas, é necessário escolher métodos de estudo apropriados para retratar as mudanças e complexidades do cenário urbano.

As mudanças desse cenário podem ser acompanhadas por meio das características da população nele existente. Vários parâmetros podem caracterizar uma população, tais como tamanho e composição socioeconômica. Saber quantas pessoas vivem em uma determinada área geográfica ou unidade político-administrativa é uma informação valiosa (JENSEN et al., 2002), sobretudo para o planejamento e intervenções no espaço urbano.

A fim de planejar ações públicas, monitorar e intervir no espaço urbano, possibilitando acesso à moradia, aos serviços e equipamentos urbanos, ao transporte público, ao saneamento básico, e a outros serviços públicos, é essencial que se tenham informações atualizadas sobre a dinâmica do crescimento urbano e demográfico, e sobre o padrão do uso e cobertura da terra.

A dinâmica do crescimento urbano, a composição e tamanho da população são conhecidos principalmente através do censo demográfico, realizado no Brasil a cada dez anos pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Nos períodos intercensitários, o IBGE realiza estimativas populacionais.

O mapeamento do uso e cobertura da terra é realizado principalmente por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto. A partir da interpretação de fotografias aéreas ou imagens de satélite, é possível identificar áreas com padrões homogêneos, visando à classificação de cobertura e uso da terra e à espacialização desses resultados através de cartas (JENSEN, 2009). O uso da terra está relacionado à função socioeconômica, tal como agricultura,

habitação, proteção ambiental etc., e o tipo de cobertura relaciona-se aos materiais naturais ou artificiais que recobrem a superfície terrestre (HEYMANN, 1994).

Os dados obtidos por meio de sensores remotos podem prover informações atualizadas acerca do espaço urbano e, assim, serem usados para realizar inferência populacional nos períodos intercensitários. Para inferir quantas pessoas vivem em uma determinada região, é necessário identificar as áreas classificadas como urbanizadas e de uso residencial. A classe residencial pode ser sub-dividida em unifamiliar (casa, sobrado etc.) ou multifamiliar (duplex, triplex, complexo de apartamentos ou condomínio) (JENSEN, 2009).

Muitos estudos utilizam dados bidimensionais provenientes de sensoriamento remoto a fim de mensurar a população residente nos períodos intercensitários (PORTER, 1956; GREEN, 1956; NORDBECK, 1965; TOBLER, 1969; LINDGREN, 1971; HSU, 1971; HSU, 1973; COLLINS; EL-BEIK, 1971; DUEKER; HORTON, 1971; LO; KRAUS et al., 1974; LO; WELCH, 1977; FORESTI, 1978; CHAN, 1980; MANSO, 1981; IISAKA; HGEDUS, 1982; LO, 1986; DUREAU, 1989; LO, 1989; ADENIYI, 1993; WEBER, 1994; LO, 1995; IKHUORIA, 1996; WEBSTER, 1996; PROSPERIE; EYTON, 2000; CHEN, 2002; HARVEY, 2002a; 2002b; LO, 2002; LO, 2003; SOUZA, 2003). Entretanto, estes métodos são limitados no sentido de que não utilizam a informação da altura das edificações para auxiliar na obtenção de dados populacionais mais precisos.

1.1 Proposta e Contribuição da Tese

Diante da discussão apresentada anteriormente, a questão científica desta tese pode ser colocada da seguinte forma: como obter informação atualizada sobre a quantidade de população residente nos períodos intercensitários?

Respondendo esta pergunta, este trabalho propõe um método diferenciado para inferir a população residente em áreas urbanas por meio do cálculo do volume de edificações residenciais, obtido a partir de imagens IKONOS-II e dados LiDAR (*Light Detection and Ranging*). A utilização de dados tridimensionais representa uma diferenciação em relação aos trabalhos na literatura indexada, pois os mesmos realizaram inferência populacional apenas com dados bidimensionais.

O trabalho parte da hipótese que o acréscimo da altura (coordenada z) irá aprimorar esses trabalhos existentes, pois não é possível calcular o número de pavimentos ou unidades residenciais existentes por edificação através de dados bidimensionais.

Para validar a metodologia, utilizou-se como estudo de caso uma região da cidade de Uberlândia – MG. A metodologia envolve as seguintes etapas:

- Geração de um Modelo Digital de Superfície e ortorectificação por meio de um estereopar de imagens ópticas orbitais.
- Geração de um Modelo Digital de Superfície e um Modelo Digital de Terreno por meio de dados LiDAR.
- Avaliação da acurácia planialtimétrica dos modelos digitais obtidos por imagens e por LiDAR através de métodos estatísticos.
- Extração do volume das edificações residenciais através do cruzamento de informações derivadas de imagens ópticas orbitais e LiDAR.
- Extração da superfície habitável (área) a partir da volumetria obtida.
- Inferência da população residente na área de estudo a partir da superfície habitável encontrada.
- Avaliação da inferência populacional, utilizando dados censitários como base comparativa.

A principal contribuição desta tese é o desenvolvimento de uma metodologia simples e eficaz para realizar inferência populacional, por meio de dados de sensoriamento remoto, cujos resultados permitem:

- acompanhar a dinâmica do crescimento populacional, suprindo a carência de dados atualizados nos períodos intercensitários;
- subsidiar o planejamento e execução de intervenções no espaço urbano para atender às políticas sociais;
- prover a informação básica necessária às políticas públicas (número de habitantes);
- prover informações para estudos de população mais precisas do que aquelas obtidas por meio de dados 2D.

1.2 Organização da Tese

Após a introdução sobre a temática central e motivação do trabalho, da exposição da proposta e contribuição da tese, o Capítulo 2 trata da fundamentação teórica acerca de inferência populacional e modelagem tridimensional.

Na primeira seção, encontra-se uma revisão bibliográfica sobre inferência populacional, contemplando uma visão geral sobre o Censo Demográfico, a mais importante referência para se conhecer a população; e sobre os métodos existentes para realizar inferência populacional através de Sensoriamento Remoto, abrangendo interpoladores espaciais e métodos estatísticos.

A segunda seção trata da aquisição de dados tridimensionais com o intuito de cálculo de volume, abrangendo fotogrametria e os métodos a ela pertencentes, LiDAR, extração e reconstrução de edificações, e avaliação da qualidade dos produtos gerados.

O Capítulo 3 fornece uma visão geral sobre a cidade de Uberlândia – MG, apresentando dados geográficos, socioeconômicos e históricos, focando nas características dos bairros contidos na área de estudo.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia da pesquisa, que se encontra dividida em duas partes: construção do modelo 3D e cálculo da inferência populacional. Na primeira, encontram-se as etapas realizadas através das imagens IKONOS-II e dados LiDAR; na segunda, os produtos gerados na etapa anterior são utilizados para cálculo da inferência. Em ambas, encontram-se a forma de aquisição dos dados e os métodos para processamento e validação dos resultados.

O Capítulo 5 reporta os resultados obtidos na construção do modelo 3D, dado utilizado para cálculo do volume e da inferência populacional. Os resultados estão divididos em quatro partes: produtos advindos do estéreo-par IKONOS, MDS e ortoimagem; produtos advindos dos dados LiDAR, MDS, MDT e MDA e, por fim, cálculo da volumetria residencial e da inferência populacional.

Finalmente no Capítulo 6, encontram-se as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Inferência populacional

Desde o período colonial, eram realizadas estimativas populacionais destinadas a atender aos interesses da Metrópole, que precisava conhecer seus domínios na América do Sul. Constam nos registros históricos vários censos realizados nesse período colonial. O primeiro deles data de 1808 e teve o objetivo de recrutar militares para as forças armadas. O Censo de 1872, em razão de sua maior complexidade e do controle a que foi submetido o levantamento, é considerado o primeiro Censo Demográfico realizado no Brasil (IBGE, 2003).

Após a Proclamação da República, foi realizado o I Censo da República em 1890. Houve grande morosidade na apuração dos dados. Cinco anos após sua realização, não havia sequer um estado onde as apurações do censo estivessem definitivamente concluídas. Somente em 1900, às vésperas do II Censo Decenal da República, foi anunciada a entrada no prelo do último volume da série de publicações do censo (IBGE, 2003).

Até 1900, o objetivo principal dos censos era a contagem populacional. A partir de 1920, houve incorporação de questões que apresentavam as características socioeconômicas da população brasileira (SOUZA, 2003).

Em 1934, foi criado o Instituto Nacional de Estatística. Mais tarde, passou a denominar-se Conselho Nacional de Estatística e integrou-se ao Conselho Nacional de Geografia, formando o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, em 1938. A partir de então, o IBGE passou a ser responsável pela realização dos censos, que se tornaram decenais e têm como objetivo contar os habitantes do território nacional, identificar suas características e revelar como vivem os brasileiros (IBGE, 2003).

A palavra censo vem do latim e quer dizer “conjunto dos dados estatísticos dos habitantes de uma cidade, província, estado, nação” (IBGE, 2003). Esse

conjunto de dados permite traçar o perfil demográfico e socioeconômico da população do país e realizar estimativas, estudos e diagnósticos com o objetivo de subsidiar o planejamento e o desenvolvimento de políticas e programas governamentais. Os resultados ajudam na compreensão, avaliação e entendimento da realidade nacional (SOUZA, 2003).

Demografia é o estudo das populações humanas e sua evolução temporal em relação ao seu tamanho, sua distribuição espacial, sua composição e suas características gerais (CARVALHO et al., 1998). Para Voss (2007), demografia espacial é o estudo demográfico formal de atributos demográficos agregados a alguns níveis dentro de uma hierarquia geográfica.

O censo demográfico consta de três etapas: pré-recenseamento, que é o planejamento do trabalho; recenseamento, que é o trabalho de campo; e pós-recenseamento, que compreende o processamento e a análise dos dados levantados, que posteriormente são publicados (HAKKERT, 1996).

Segundo o IBGE (2003), a metodologia utilizada para o levantamento das informações é baseada em dois questionários: um questionário básico, reduzido; e outro ampliado, que serve de apoio para a expansão dos dados detalhados sobre características socioeconômicas, levantadas através do questionário. As principais variáveis utilizadas no levantamento de campo realizado são:

- características dos domicílios: material utilizado na construção, localização, abastecimento de água, esgotamento sanitário, bens duráveis;
- características gerais dos indivíduos: sexo, idade, religião, cor, raça;
- características educacionais;
- características econômicas: ocupação, posição, ramo de atividade, horas trabalhadas, rendimento etc.;
- informações sobre mortalidade, fecundidade e migração;
- características das famílias: relação de parentesco.

Para o levantamento e coleta das informações, o município é dividido em setores censitários. Segundo o IBGE (2003), setor censitário é a unidade de controle cadastral, formada por área contínua urbana ou rural, cuja dimensão e número de domicílios ou de unidades não-residenciais permitem ao recenseador cumprir suas atividades em um prazo determinado.

Nos períodos intercensitários, o IBGE realiza estimativas populacionais, pela aplicação do modelo de tendência de crescimento demográfico (IBGE, 2008). Esse método leva em consideração a subdivisão de uma área maior, cuja estimativa já se conhece, em n áreas menores, de tal forma que seja assegurada ao final das estimativas das áreas menores a reprodução da estimativa, previamente conhecida, da área maior através da soma das estimativas das áreas menores (MADEIRA; SIMÕES, 1972).

Segundo Liu e Clarke (2002), existem três maneiras de se levantar dados demográficos: através dos censos demográficos, através de registros em cartórios e através de dados de sensoriamento remoto.

De acordo com Wu et al. (2005), muitos métodos para realizar estimativa populacional têm sido reportados em literaturas acerca de SIG e Sensoriamento Remoto, e dependendo do objetivo e da informação necessária, estes métodos podem ser agrupados em duas categorias: (a) interpoladores espaciais e (b) modelos estatísticos.

2.1.1 Interpoladores Espaciais

Os métodos que utilizam interpolação espacial foram desenvolvidos originalmente para resolver o problema de incompatibilidade entre unidades espaciais. Significa que os dados de entrada estão agregados a duas ou mais zonas de um sistema e devem ser combinados em um único registro para a análise, e que algumas zonas em um ou ambos os sistemas se estendem pelo território de duas ou mais zonas em outro sistema de zonas (REIBEL; AGRAWAL, 2007).

Esse método usa o censo demográfico como dado de entrada e aplica interpolação ou técnicas de desagregação para obter a uma superfície populacional refinada. Pode ser subdividido em: interpolação espacial sem informação auxiliar (a1) e interpolação espacial com informação auxiliar (a2) (WU et al., 2005).

Para a interpolação espacial sem informação auxiliar (a1), existem métodos baseados em ponto ou em área (centróides geométricos ou centros de massa de atributos). Um dos métodos baseados em ponto mais amplamente utilizados no Reino Unido é um interpolador *kernel* proposto por Martin (1989) (BRACKEN; MARTIN, 1989; BRACKEN, 1991; MARTIN; BRACKEN, 1991). O método baseado em área mais conhecido é o método picnofilático de Tobler (TOBLER, 1979).

O interpolador proposto por Martin (1989) gera superfícies a partir do uso do estimador *kernel* (BAILEY; GATRELL, 1995) através de centróides ponderados, que representam os locais de maior concentração populacional. Esses centróides fazem parte da base de dados censitários. O objetivo é redistribuir a contagem do censo associada aos centróides em células de uma grade regular, reconstruindo a geografia da distribuição e mantendo as áreas não populadas na superfície final (poderão existir células sem população ou com valor igual a zero) (AMARAL et al., 2002).

Segundo Wu et al. (2005), o maior problema dos métodos baseados em ponto é que a maioria não preserva o total de população regional. Para resolver esse problema, Martin (1996a) modificou o algoritmo original do interpolador baseado em *kernel* para garantir que houvesse preservação do volume.

O interpolador proposto por Tobler (1979) assume uma função de densidade suavizadora, que leva em consideração o efeito das zonas adjacentes e preserva o volume, através da construção de superfície baseada nos centróides geométricos das zonas ou unidades censitárias. Esse método é uma extensão da ponderação pela área, em que os valores da grade são

ponderados pela distância ao centróide. A superfície interpolada é suave, apresenta população em todas as localidades do plano (não há células sem população ou com valor zero), e a soma dos valores é igual ao total de população regional (AMARAL et al., 2002).

A interpolação espacial com informação auxiliar utiliza informações relacionadas à população, tal como tipo do solo ou redes de transporte, para distribuir a população nas superfícies de densidade. O método dasimétrico originalmente desenvolvido por Wright (1936) é o mais conhecido dessa categoria (WU et al., 2005).

Segundo Martin (1996b), o mapeamento dasimétrico permite a mudança na representação da unidade do dado original de entrada. Se os limites do tipo de uso do solo estiverem disponíveis, os mesmos podem ser sobrepostos às zonas residenciais, mascarando regiões não populadas, e assim apenas as regiões populadas seriam apresentadas (Figura 2.1).

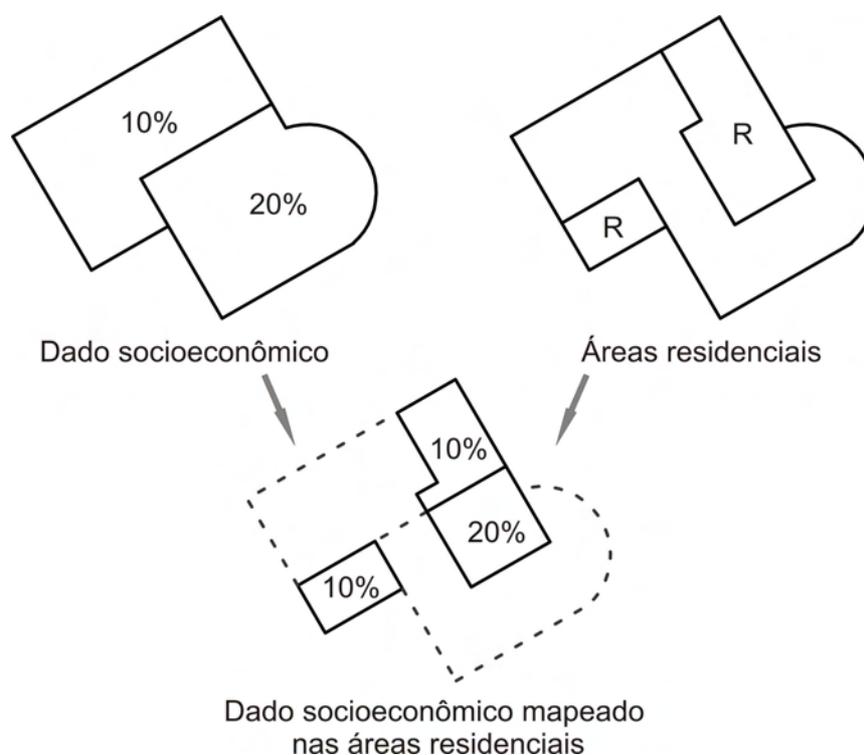


Figura 2.1 - Mapeamento da população utilizando técnicas dasimétricas.
Fonte: Martin (1996b)

Partindo do princípio que mapas coropléticos não fornecem uma representação válida da distribuição da população no interior das unidades, Wright (1936) utilizou o conhecimento da localidade para identificar áreas com diferentes densidades populacionais dentro dos setores (FISHER; LANGFORD, 1995). Nos seus mapas de densidade de Cape Cod – Estados Unidos, Wright fez partições binárias iterativamente para desagregar os setores em setores detalhados de densidade populacional, preservando a população original do setor.

Flowerdew e Green (1989; 1991) propuseram o uso de análise de regressão estatística para estimar a densidade populacional em subsetores. Langford et al. (1991) foram os primeiros a aplicar técnicas de regressão multivariadas para estimar a densidade populacional dasimétrica dos subsetores, com preservação do volume.

Apesar da fácil implementação, o método dasimétrico ainda está sujeito ao problema de distribuição uniforme dentro dos subsetores, ou seja, a diferença entre subsetores é reconhecida, entretanto as diferenças dentro das subsetores são ignoradas (WU et al., 2005).

A aplicação mais simples do método dasimétrico combinado com sensoriamento remoto é a divisão binária, na qual o tipo de uso do solo é classificado como 'populado' e 'não populado', e o censo demográfico é simplesmente redistribuído para as áreas classificadas como 'populadas'. São exemplos dessa aplicação: Langford e Unwin (1994), Fisher e Langford (1996), Spiekermann e Wegener (2000), Holt et al. (2004).

Outra forma de aplicação do método dasimétrico classifica a imagem em um número maior de classes de uso do solo e redistribui a população do censo para as classes criadas, como nos trabalhos de: Langford et al. (1991), Yuan et al. (1997), Eicher e Brewer (2001) e Mennis (2003). Nesses estudos, é necessário determinar a razão entre densidade populacional e classes de uso do solo. Alguns autores utilizaram um método de amostragem empírica

(MENNIS, 2003), outros utilizaram estatísticas de densidade populacional (EICHER; BREWER, 2001), ao passo que alguns utilizaram análise de regressão para obter uma estimativa da densidade populacional (LANGFORD et al., 1991; YUAN et al., 1997).

Segundo Wu et al. (2005), a análise de regressão tem destaque em relação às demais, por causa de sua objetividade nos testes de precisão do modelo através de testes de significância estatística.

Reibel e Agrawal (2007) afirmam que o interpolador espacial dasimétrico oferece vantagens em comparação às técnicas tradicionais de reagregação, e que o uso da cobertura do solo como fator de ponderação para interpolação tem mostrado elevada acurácia.

Harvey (2000; 2002a) adotou um método diferenciado para LiDAR com a homogeneidade dentro das subzonas, por meio da estimativa de densidade populacional na unidade espacial dos pixels. Segundo o autor, o método dasimétrico baseado em pixel apresenta várias vantagens em relação ao método baseado em zonas, tais como: residências individuais são melhores delineadas em nível de pixel; a fórmula matemática do método baseado em pixel é simples e robusta; e sua implementação e refinamentos da rotina são mais fáceis.

Amaral (2003) propôs o uso de imagens de luzes noturnas do Programa de Satélite de Defesa Meteorológico (*Defense Meteorological Satellite Program - DMSP*) da Amazônia Legal; e dos sistemas CCD-CBERS1 e TM-Landsat do município de Marabá-PA e técnicas de análise espacial para representar a população em superfícies de densidade. A autora aplicou técnicas de interpolação de superfícies de população em dois grupos, de acordo com o número de variáveis envolvidas no processo.

O primeiro grupo abrange os interpoladores que consideram apenas a variável população para as estimativas dos valores na superfície de saída; e o segundo,

utiliza variáveis auxiliares, indicadoras da presença humana, para distribuir a população nas superfícies de densidade.

Quanto à análise demográfica, os resultados de Amaral (2003) descrevem as superfícies e caracteriza a tendência global, possibilitando a realização de estudos demográficos sobre a redistribuição da população.

Amaral et al. (2006) analisaram o potencial de mosaico de imagens de luzes noturnas – *DMSP* para identificar a presença e estimar população urbana na região da Amazônia Brasileira. Todos os assentamentos urbanos com população superior a 10 mil habitantes foram precisamente detectados pelo *DMSP*. A maioria dos assentamentos (85%) com população entre 5 e 10 mil habitantes podem ser identificados nas imagens noturnas. E alguns assentamentos pequenos, com população urbana inferior a 5 mil habitantes, podem ser detectados nesse tipo de imagem.

Os resultados da regressão linear, com coeficientes de determinação superiores a 0,8, indicam o potencial de utilização de luzes noturnas para estimar população na região da Amazônia. Os resultados foram comparados com as projeções do IBGE e apontam que o uso de imagens *DMSP* pode monitorar a evolução da população em assentamentos com mais de 20 mil habitantes.

Segundo Wu et al. (2005), os métodos que utilizam informação auxiliar, particularmente o método dasimétrico, geralmente produzem resultados mais precisos do que aqueles sem informação auxiliar, assumindo que a informação auxiliar reflete a distribuição espacial das variáveis que está sendo mapeada. É válido destacar que os métodos nessas duas categorias podem ser incorporados com os outros para determinados fins. Por exemplo, Langford e Unwin (1994) aplicaram uma função suavizadora baseada em *kernel* ao resultado do método dasimétrico, a fim de criar um mapa cartográfico informativo e com boa apresentação, no qual o leitor não visse tanto detalhamento em nível de pixel.

Outra consideração é que muitos dos métodos da categoria sem informação adicional podem ainda utilizar informação adicional, quando disponível. Por exemplo, no caso do interpolador picnofilático de Tobler, se a informação sobre áreas residenciais está disponível, é possível designar primeiramente a população das zonas do censo aos polígonos residenciais dentro delas, assumindo que os polígonos não-residenciais não possuem população, e então, executar a operação de suavização do interpolador.

Turner e Openshaw (2001) compararam o desempenho dos interpoladores picnofiláticos de Tobler, ponderado por área e os que usam informação auxiliar, e observaram que os que utilizam informação auxiliar obtiveram melhores resultados nos casos em que a região de interesse a ser mapeada tem resolução espacial mais detalhada que a região de origem de coleta dos dados. Os autores alertam que os interpoladores que utilizam informação auxiliar são dependentes da existência de dados para guiar corretamente a interpolação. Segundo Amaral (2002), o uso dos interpoladores com informação auxiliar será eficiente quanto mais precisa for a escolha das variáveis e o conhecimento das inter-relações entre elas.

2.1.2 Modelos Estatísticos

Em contraste à interpolação espacial, os modelos estatísticos estão mais interessados em inferir a relação entre população e outras variáveis, com o objetivo de estimar a população total de uma área. A metodologia foi originalmente desenvolvida para estimar população em períodos intercensitários ou em áreas com difícil acesso na coleta de dados, embora possa ser incorporada no processo de interpolação do censo demográfico (Wu et al., 2005).

Esse método usa variáveis socioeconômicas e aplica teorias sobre geografia urbana para estimar a população. O censo demográfico participa apenas no processo de treinamento do modelo, ou seja, não é um dado de entrada.

A estimativa populacional através de modelagem estatística iniciou-se na década de 1950, com a motivação inicial de corrigir as deficiências do censo demográfico decenal, como o alto custo, baixa frequência, a intensidade de trabalho etc. (KRAUS et al., 1974). Esta abordagem também tem sido aplicada para validar os censos demográficos (CLAYTON; ESTES, 1980), e a inferência de características socioeconômicas, como o valor da habitação e da qualidade residencial (FORSTER, 1983).

Segundo Henderson e Xia (1998), o uso de dados provenientes de sensores remotos com o objetivo de realizar estimativa populacional começou em 1956 com Porter, que utilizou fotografias aéreas para contar o número de casas da cidade da Libéria. Tobler (1969) foi o primeiro a utilizar imagens de satélite para estudar a relação entre população e áreas urbanas (WU et al., 2005).

Várias escalas e diferentes tipos de imagens de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para realizar estimativa populacional através de modelos estatísticos (WU et al., 2005) e, de maneira geral, existem cinco categorias de abordagens, baseadas na relação entre população e (1) unidades de moradia, (2) dimensão das áreas construídas, (3) uso da terra, (4) características espectrais da imagem, e (5) outras características físicas ou socioeconômicas (LO, 1986; LIU, 2003).

Cada categoria apresenta vantagens e desvantagens em função das exigências de escala e nível de detalhamento e é escolhida de acordo com o tipo de dado disponível (HENDERSON; XIA, 1998).

A primeira categoria, baseada na contagem de moradias individuais, é considerada a mais precisa das técnicas de estimativa por meio de dados de sensores remotos (LI; WENG, 2005). A população total de uma área é estimada pela multiplicação do número total de moradias individuais pelo número médio de pessoas que vivem nas moradias, considerando-se que todas as moradias estão ocupadas. Também é possível caracterizar diferentes

padrões para as moradias, e aplicar pesos diversos para o número de pessoas residentes em cada categoria.

O número de pessoas por moradia pode ser obtido através de pesquisas de campo ou por meio do censo demográfico. O número total de moradias pode ser estimado por meio de imagens de sensoriamento remoto, com resolução espacial suficiente para identificar o tipo de edificação individualmente.

Em estudo para estimar a população de Birmingham no Alabama, Green (1956) utilizou critérios como a forma do telhado, presença de jardins, e garagens, para identificar as diferentes estruturas residenciais (unifamiliar, multifamiliar etc.) em pares estereoscópicos de fotografias aéreas pancromáticas, na escala de 1:7.500.

Lindgren (1971) utilizou fotografias aéreas coloridas na escala de 1:20.000 para identificar as unidades residenciais dentro da área metropolitana de Boston através da determinação de chaves de interpretação (tipo de telhado, tamanho do telhado, presença de muros, garagens etc.). A identificação das áreas residenciais obteve 99,5% de acerto. A principal dificuldade deste método é distinguir edifícios residenciais com mais de um pavimento de edifícios comerciais. Os resultados foram comparados com verdade de campo e, segundo o autor, foram satisfatórios.

Hsu (1971) usou fotografias aéreas coloridas, na escala 1:5.000, para estimar a população urbana e rural de Atlanta na Geórgia. A área de estudo foi dividida em células, de acordo com a densidade construtiva verificada nas fotografias. A cada célula foi adicionado um valor correspondente à fórmula: $(\text{habitante por domicílio}) \times (\text{número de domicílio}) / (\text{área da célula})$, sendo que as duas primeiras informações eram provenientes do censo.

Collins e El-Beik (1971) e Dueker e Horton (1971) identificaram diferentes tipos de edificações residenciais por meio de fotografias aéreas, a fim de estimar a

população através da densidade populacional calculada estatisticamente a partir do censo.

Lo e Chan (1980) utilizaram pesquisa de campo para calcular a densidade populacional média para diferentes tipos de padrões residenciais. Posteriormente, Lo (1989), utilizou dado raster para extrair a densidade populacional das edificações, em uma grade regular. Inicialmente, o autor calculou a possibilidade máxima de ocorrência de unidades residenciais em cada célula da grade em referência ao tamanho da unidade residencial. Então, o percentual de ocorrência de residências em cada célula foi estimado.

Adeniyi (1993) e Ikhuoria (1996) utilizaram fotografias aéreas pancromáticas nas escalas 1:6.000 e 1:20.000 em cidades da Nigéria para identificar áreas homogêneas em relação aos aspectos construtivos observados nas fotos. A estimativa populacional foi realizada através do cruzamento das áreas obtidas nas fotos com a densidade populacional e construtiva, coletadas em pesquisa de campo.

Segundo Wu et al. (2005), o grande problema desta categoria é o tempo, pois a contagem de unidades residenciais é feita de forma manual. Mesmo com o avanço nas técnicas de extração de feições, o processo ainda não é feito de forma automática. Uma possibilidade de avanço é a extração feita por meio de dados LiDAR.

A segunda categoria, baseada na dimensão da área construída, utiliza um modelo de crescimento que descreve a relação entre a área construída e o tamanho da população.

Inspirada na lei biológica de crescimento alométrico (HUXLEY, 1932), Nordbeck (1965) estudou a relação entre áreas urbanas e tamanho da população de muitas cidades americanas e concluiu que a área construída de um assentamento é proporcional à sua população elevada a certa potência e multiplicada por um coeficiente.

Tobler (1969) utilizou imagens de satélite para estudar a população de muitas cidades do mundo. Assumindo que as cidades podem ser consideradas circulares no formato, e que o formato varia de forma insignificante ao longo do tempo, o autor encontrou um coeficiente de correlação entre raio e população de 0,87 ou maior.

O resultado do estudo de Tobler (1969) também indicou que o coeficiente e o expoente da população das cidades dos Estados Unidos eram comparáveis com cidades da Suíça e Canadá; enquanto cidades do Japão e Delta do Nilo tinham coeficientes e expoentes que refletiam a estrutura densa e compacta dos assentamentos da Ásia e Oriente Médio.

A disponibilidade de imagens do satélite Landsat e o avanço no processamento de imagens permitiram que pesquisadores estudassem a relação entre população e áreas urbanas, embora uma das maiores dificuldades fosse diferenciar limites urbanos e rurais (LO; WELCH, 1977).

Lo e Welch (1977) utilizaram imagens MSS do Landsat dos anos 1972 a 1974 de dez grandes cidades da China, com 500 mil a 2 milhões de habitantes, e encontraram um coeficiente de correlação de 0,82 ou maior entre população e áreas classificadas. Utilizaram um modelo de crescimento alométrico (LEE, 1989; LO, 2003), que descreve que a taxa relativa de crescimento da população é proporcional à taxa relativa de crescimento da área residencial.

Foresti (1978) verificou a correlação entre área urbana e população, por meio de imagens do sensor MSS, do satélite Landsat, e dados do censo para 105 cidades brasileiras. O resultado encontrado aponta alta correlação positiva entre população e área em cidades de pequeno porte, com pouca verticalização.

Luzes urbanas também podem ser utilizadas para dimensionar a população urbana. Prosperie e Eyton (2000) encontraram um R^2 de 0,974 entre volume de luzes e população de 254 cidades do Texas utilizando imagens do Programa

de Satélite de Defesa Meteorológico (*Defense Meteorological Satellite Program - DMSP*).

Utilizando a mesma metodologia de Prosperie e Eyton (2000), Lo (2002) encontrou um coeficiente de correlação de 0,91 entre a área iluminada de cidades chinesas e suas populações urbanas.

A terceira categoria, baseada na dimensão de áreas com diferentes usos da terra, envolve classificação de imagens de sensores remotos em diferentes categorias de uso (LI; WENG, 2005). A população total de uma área é calculada através do somatório da multiplicação da área pela densidade populacional de cada tipo de uso do solo.

A função básica é similar ao método dasimétrico, mas diferencia-se do mesmo porque desagrega a população do censo, mantendo a contagem de população original por unidade, enquanto o método dasimétrico estima o total populacional (intercenso) para uma área.

Os diferentes tipos de uso do solo devem ser obtidos através da classificação de imagens, portanto a acurácia da estimativa populacional será dependente da classificação realizada.

Dureau (1989) estimou a população residente em Quito (Equador) através de técnica de amostragem. Através da classificação de imagem SPOT, a cidade foi estratificada em densidades de construção, que foram correlacionadas com o número de habitantes. A coerência interna das áreas estratificadas possibilitou a redução do universo amostral e apresentou bons resultados, segundo o autor.

Weber (1994) estimou a população da cidade de Estrasburgo na França através da classificação de imagens SPOT HRV XS, em seis tipos de uso do solo urbano, obtendo um coeficiente *Kappa* de 0,915. Então, o autor fez uma análise de regressão entre a contagem de população e áreas com tipos de uso

do solo de 2.812 setores censitários por meio da Equação (2.4) e obteve um R^2 de 0,91. Após aplicar o modelo de regressão para estimar o total de população da cidade, seu modelo estimado ficou 7,91% abaixo do censo demográfico.

Chen (2002) identificou zonas homogêneas quanto à densidade residencial, por meio de classificação de textura em imagens do sensor TM (satélite Landsat) com 30 m de resolução espacial e correlacionou a densidade residencial com o número de unidades residenciais levantadas pelo censo. Primeiro, o autor identificou três níveis de densidade residencial utilizando uma combinação da homogeneidade (textura estatística) com seis mapas temáticos provenientes do sensor TM (Landsat). Então, avaliaram-se as correlações entre os dados do censo com as densidades residenciais através de um teste de regressão múltipla. O resultado obtido mostra que a correlação entre os dados por unidade domiciliar do censo e das áreas com diferentes densidades foram maiores que aquela obtida entre dados por unidade domiciliar do censo e da área agregada de uma área residencial inteira.

Lo (2003) classificou imagens TM Landsat em seis tipos de uso do solo e obteve um coeficiente *Kappa* de 0,878. Foi realizada regressão entre a área classificada como baixa densidade urbana e a contagem populacional de 418 setores censitários, utilizando um modelo logaritmo transformado de crescimento alométrico. O resultado obteve um R^2 de 0,68. Então, o autor aplicou o modelo de regressão para estimar a população de 373 setores censitários, e o resultado teve um erro relativo de 14,80%, sendo que o resultado geral ficou 8,07% abaixo do dado de referência utilizado.

Souza (2003) realizou inferência populacional utilizando setores de texturas homogêneas (sth), número médio de habitantes por domicílio dos sth, densidade residencial dos sth e taxa de ocupação (Tr) dos sth para a cidade de São José dos Campos - SP. Para tal, a autora realizou classificação de imagens IKONOS, com o intuito de detectar a classe de uso residencial (unifamiliar, multifamiliar ou misto). Para as áreas classificadas como

residencial, foi aplicado o método de setorização residencial urbana, adaptado de Kurkdjian (1986), com identificação de texturas. Dessa forma, foram obtidos setores de texturas homogêneas.

A partir do cruzamento dos dados gerados por Souza (2003) com os dados populacionais do IBGE, a autora realizou a estimativa para os setores homogêneos, multiplicando: o número total de habitações do setor (estimado através de fotointerpretação), o número médio de habitantes por domicílio e o número total de habitações do setor (levantamento do IBGE).

A relação entre a morfologia urbana e características demográficas e socioeconômicas da população já havia sido explorada por Manso et al. (1979). Os autores utilizaram fotografias aéreas de São José dos Campos para obtenção da textura, para então calcular a estimativa populacional (MANSO, 1981).

Durand et al. (2004; 2006) avaliaram o uso de imagens de alta resolução espacial de áreas predominantemente residenciais e de ocupação horizontal para estimar população urbana em períodos intercensitários, utilizando imagens IKONOS-II da cidade de São José dos Campos. A cidade foi dividida em zonas residenciais unifamiliares homogêneas, e foi realizada contagem das unidades residenciais por setor censitário do IBGE. A estimativa foi obtida a partir da multiplicação do número de unidades residenciais (obtido a partir da análise visual das imagens IKONOS-II) pelo número médio de moradores por domicílio (obtido a partir de dados do Censo Demográfico 2000). O resultado foi comparado com o censo 2000 e apresentou um erro total de 0,41%.

Segundo Wu et al. (2005), a densidade populacional para cada tipo de uso do solo pode também ser determinada através de pesquisa de campo ou estatísticas do censo. Em Kraus et al. (1974), por exemplo, foi realizada estimativa populacional para quatro cidades da Califórnia, utilizando densidades populacionais para cada um dos quatro tipos de uso do solo, previamente classificados através do censo. A estimativa populacional urbana

foi realizada através da Equação (2.4), e os resultados variaram de -9,17% (subestimados) a +7,00% (superestimados) em comparação ao censo demográfico das quatro cidades.

A quarta categoria relaciona as características físicas espectrais das imagens de Sensoriamento Remoto com a densidade populacional. Hsu (1973) foi provavelmente o primeiro a sugerir a idéia de utilizar o valor do pixel de uma imagem para desenvolver um modelo de regressão múltipla para estimar população (LO, 1986). Entretanto, sua idéia não foi implementada até que o trabalho pioneiro de Iisaka e Hegedus (1982) para estimar população de Tóquio foi realizado.

Iisaka e Hegedus (1982) criaram um modelo matemático para expressar a relação entre a energia eletromagnética refletida de áreas-testes e a distribuição da população. Os autores utilizaram uma grade de 500 x 500 m. de dimensão como área mínima para encontrar correlação entre os valores espectrais médios das bandas 4, 6 e 7 do sensor MSS a bordo do Landsat com a densidade populacional. Os autores mostraram uma forte correlação entre densidade populacional e valores médios de reflectância dentro da grade, através dos resultados da regressão linear, entretanto não fica claro se as densidades populacionais advindas dessas equações resultariam em estimativas populacionais acuradas. Como o sensor MSS-Landsat apresenta baixa resolução espacial, o valor da reflectância é a média dos valores de diferentes tipos de cobertura de uma área de 79 x 79 m. Considerando que o valor da reflectância da área residencial, onde a estimativa precisa ser feita, é diluída, podemos considerar que a acurácia da estimativa populacional também será afetada por essa diluição.

Lo (1995) adotou um método similar para estimar a densidade populacional e densidade residencial em áreas urbanas de Hong Kong, correlacionando os valores espectrais de radiância da imagem com densidade residencial, por meio de imagens SPOT (20 m de resolução espacial). O autor encontrou um

coeficiente de correlação de -0,91 entre a densidade populacional e os valores espectrais médios da banda 3. O resultado geral, para toda área de estudo, foi considerado satisfatório ao autor, porém os resultados por setor ficaram superestimados, devido à similaridade de radiância dos pixels residenciais e os não-residenciais.

Webster (1996) afirmou que os valores espectrais sozinhos não são capazes de discriminar áreas com diferentes densidades populacionais efetivamente. Como alternativa, o autor combinou medidas de texturas e espectrais de imagens TM do Landsat em um modelo de regressão e constatou que as medidas de texturas têm um poder de predição mais significativo que as medidas espectrais no cálculo da densidade.

A correlação entre a densidade populacional do censo e a textura de imagens IKONOS foi investigada por Liu et al. (2006), utilizando para análise os setores censitários, com tipo de uso da terra homogêneo, como unidade espacial. A textura da imagem IKONOS foi descrita utilizando três métodos: a matriz de co-ocorrência de níveis de cinza (*gray-level co-occurrence matrix - GLCM*), semi-variância, e métricas espaciais. Os autores sugerem que a correlação não é suficientemente forte para predizer ou prever a população residencial, mas a textura da imagem provê parâmetros que podem ser utilizados para refinar a distribuição da população censitária utilizando sensoriamento remoto.

Harvey (2002a, 2002b) incorporou uma variedade de medidas espectrais transformadas, como razão entre bandas e razão entre diferença e soma das bandas, em adição às medidas texturais, a uma série de regressões para realizar estimativa populacional. O autor também desenvolveu um modelo dasimétrico para melhorar o poder de predição do modelo de regressão baseado nos valores espectrais dos pixels.

Reis (2005) utilizou técnicas desenvolvidas por Harvey (2002a; 2002b) para estimar população dos setores censitários urbanos de Belo Horizonte – MG, no ano de 1996, com o auxílio de imagens Landsat 5 (bandas 1 a 5 e 7). A autora

excluiu os setores especiais (asilos, orfanatos e presídios), e os de baixa densidade populacional (menos de 1 habitante por 10 m²) da análise. Os demais setores urbanos foram utilizados.

Foram adotados dois modelos, um baseado nos setores censitários, e outro baseado em pixels. Para o modelo baseado nos setores censitários, foi utilizada agregação espacial da reflectância associada a cada setor. Para o modelo baseado em pixel, foi utilizada a reflectância dos pixels (bandas 3, 4 e 5) classificados como urbanos em um modelo de regressão iterativo. Os resultados foram avaliados em dois níveis: micro (erro relativo médio, calculado para a estimativa populacional nos setores censitários) e macro (erro relativo total, calculado para a estimativa populacional urbana total).

O modelo em nível de setores não apresentou resultados satisfatórios, com erros relativos altos, principalmente em nível micro. O modelo em nível de pixel apresentou resultados comparáveis com os descritos na literatura. Em nível macro, o erro relativo total foi de apenas – 0,06%. Os melhores ajustes do modelo foram em nível macro, e a autora sugere como alternativa para melhorar o desempenho no nível micro a utilização da população dos setores nos modelos e realizar a estimativa para as unidades de planejamento.

Durand et al. (2007) realizaram inferência populacional por meio da análise da correlação entre população e área urbanizada. A área urbanizada foi obtida por meio do mapeamento das manchas urbanas geradas a partir de imagens Landsat do ano 2000. Os erros médios da estimativa populacional para os anos 1985 e 1991 foram de aproximadamente 6% ; e para o ano de 2005, os erros médios se mostraram mais elevados.

Os autores recomendam a incorporação de outras variáveis ao modelo para melhorar a precisão da estimativa, tais como uso do solo urbano e atividade econômica predominante do município, distâncias aos centros, zonas homogêneas intra-urbanas.

A correlação geral entre população e área urbanizada foi menor que as correlações por região, entretanto estatisticamente a diferença não é significativa, portanto, os autores optaram por utilizar a correlação geral, obtida para todos os municípios no modelo. Os autores apontaram como possíveis causas dos baixos valores de correlação: dificuldade na delimitação das áreas urbanas em que outros usos do solo foram mapeados como áreas urbanizadas; dificuldade na delimitação das áreas urbanização devido ao relevo de morros; diferenças de densidade populacional, tendo como caso extremo as áreas de intensa verticalização; variação das características das cidades em termos de atividade dominante, como por exemplo, as cidades turísticas, em que o número de domicílios é alto, mas a taxa de ocupação é baixa.

Existem também estudos que utilizam análise de textura de imagens para classificar pixels e, em seguida, correlacionar a contagem de pixels em diferentes categorias à densidade populacional, o que é semelhante à categoria (3), a qual relaciona população e uso da terra. Chen (2002) utilizou uma medida de homogeneidade de textura para classificar pixels de diferentes níveis de homogeneidade e correlacionar o número de pixels em cada categoria com a densidade habitacional.

A quinta categoria compreende outras variáveis físicas e socioeconômicas que também podem ser incorporadas à estimativa populacional. Um exemplo dessa categoria é o projeto *LandScan Global Population* (DOBSON et al., 2000), em que foram combinados: volume obtido através de imagens noturnas, cobertura da terra proveniente de vários tipos de imagens de sensores remotos e outras informações demográficas, topográficas e de proximidade de estradas em um modelo para estimar população em células de 30 x 30 segundos (aproximadamente 1 km² no Equador) para todo o globo. Através da combinação dessas variáveis, foi definido um coeficiente de probabilidade que distribui a população em uma superfície, a qual representa a 'população em risco' (*ambient population*), integrando movimento diurno e hábitos coletivos em

uma única medida. O objetivo desse projeto não foi apenas estimar a população residente, mas prover informações para medidas emergenciais no caso de desastres naturais ou decorrentes de atividade humana.

Segundo Liu e Clarke (2002), o total de população em áreas urbanas está correlacionado com a distância ao centro comercial, à acessibilidade ao sistema de transporte, à topografia e ao tempo que a comunidade residencial foi construída. Embora métodos multivariados tendam a melhorar a acurácia geral, em comparação aos métodos que utilizam uma única variável, a seleção de variáveis do modelo requer cautela e estudos na área de geografia urbana.

De maneira geral, independentemente das características utilizadas na modelagem estatística para estimar população, os estudos apontam que estimativas realizadas em áreas pequenas geralmente não são tão precisas quanto as realizadas em grandes áreas. Pode-se considerar que as subestimativas e superestimativas são canceladas em grandes áreas e, portanto, a acurácia total é alta (LO, 1995).

2.2 Aquisição de dados tridimensionais

Os atuais métodos de aquisição de dados tridimensionais por meio de sensores ópticos são advindos da fotogrametria analógica e são utilizados tanto para fotografias aéreas, como para câmeras digitais e imagens orbitais, por isso utiliza-se genericamente o termo “Fotogrametria” (BRITO; COELHO, 2002; MOLANDER, 2007).

A aquisição de dados tridimensionais por meio de sensores ativos pode ser realizada através de sensores radares por meio da radargrametria e da interferometria; bem como através da varredura a laser por meio do sistema LiDAR.

Neste trabalho, optou-se por utilizar uma combinação de dados ópticos com o LiDAR, haja vista a disponibilidade e adequação dos dados disponíveis ao objetivo do trabalho.

2.2.1 Fotogrametria

Fotogrametria significa medições executadas através de fotografias e segundo Brito e Coelho (2002), teve quatro fases: fotogrametria pioneira (1840-1900), fotogrametria analógica (1901-1950), fotogrametria analítica (1951-1990) e a fotogrametria digital (1990 - dias de hoje).

A fase atual, a fotogrametria digital, utiliza imagens digitais como dado de entrada e tem como objetivo principal a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de imagens bidimensionais, chamadas de espaço-imagem (BRITO; COELHO, 2002).

As imagens digitais podem ser obtidas a partir de plataformas terrestres, aéreas ou orbitais. A plataforma deve ser escolhida de acordo com o objetivo e área de estudo. Segundo Jacobsen (2007), a fotogrametria com imagens ópticas orbitais é de fácil acesso e permite uma visão geral de grandes áreas.

O uso de dados obtidos a partir de plataformas orbitais para reconstrução tridimensional de feições urbanas é mais recente, pois as primeiras imagens orbitais possuíam baixa resolução espacial. Somente a partir do lançamento do satélite SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*), a possibilidade de aplicação em restituição fotogramétrica tornou-se viável. Este sistema introduziu a capacidade de estereoscopia, pois a câmara poderia ser rotacionada, permitindo o imageamento da mesma região em outra órbita (BRITO; COELHO, 2002).

A estereoscopia consiste na extração de informações a partir de duas ou mais imagens de um mesmo local, adquiridas em ângulos diferentes de imageamento. É um ramo que surgiu dentro da aerofotogrametria, mas que

ganhou espaço com a utilização de sensores orbitais. Para visualizar a cena tridimensionalmente, as imagens da mesma cena são sobrepostas, por procedimentos geométricos automáticos.

O ideal é que o estéreo-par seja obtido na mesma órbita, para facilitar a identificação automática de pontos homólogos (*image matching*). Normalmente, a identificação automática é realizada através de correlação de imagens, e por isso, qualquer alteração de posicionamento da plataforma pode ocasionar mudanças nos níveis de cinza entre as imagens.

O sensor a bordo do IKONOS é capaz de gerar estéreo-pares na mesma órbita com uma largura de base de apenas 90 km, ou doze segundos de diferença de tempo, facilitando a detecção automática de pontos homólogos no terreno (JACOBSEN, 2003). A possibilidade de estereoscopia é oferecida em dois produtos: *Reference* e *Precision*, com resolução espacial de 1 m (pancromática). O sucessor do satélite IKONOS é o GeoEye-1, com resolução espacial de 41 cm (pancromática).

Adquirido no mínimo um estéreo-par da área, deve-se: (a) fazer a orientação das imagens; (b) reduzir o espaço de busca; (c) detectar pontos homólogos; (d) extrair as coordenadas espaciais e os valores de altitudes dos pontos homólogos por interseção espacial; (e) montar a grade de modelagem de superfície, e (f) interpolar os pontos amostrados na grade de modelagem de superfície para uma grade regular (POLIDORIO, 2007).

No caso de fotografias aéreas, é preciso realizar a orientação interior, que reconstrói a posição dos feixes perspectivos em relação à câmara no momento que a imagem foi adquirida. A orientação exterior permite relacionar o sistema da câmara (reconstruído na orientação interior) com o terreno imageado naquele instante, através da determinação dos seis parâmetros que regem a posição do centro de perspectiva na tomada da foto – coordenadas no espaço-objeto – para o centro de perspectiva (X_0 , Y_0 , Z_0) e ângulos de rotação ou de atitude do sensor (*roll*, *pitch* e *yaw*). (BRITO; COELHO, 2002).

A orientação de imagens de satélite de alta resolução (sistema de varredura) é mais complexa que as de imagens aéreas (sistema de quadros) devido à geometria de aquisição dinâmica, em que cada grupo de pixels é adquirido em momentos diferentes. Por causa da complexidade dos modelos rigorosos e pela ausência de informação dos dados orbitais de efemérides e orientação da plataforma, normalmente são utilizados os modelos não-paramétricos, que são baseados em polinômios racionais conhecidos como RFM (*Rational Function Models*) e em coeficientes chamados RPC (*Rational Polynomial Coefficients*) (BOCCARDO et al., 2004). Outra opção é o uso da transformação DLT (Direct Linear Transformation), considerada um caso particular da transformação matemática denominada de Razão de Polinômios (BALTSAVIAS et al., 2001).

Para reduzir o custo computacional e a possibilidade de ambigüidade na correspondência entre pontos homólogos, é necessário fazer uma redução do espaço de busca, que pode ser realizada através do princípio da geometria epipolar, no qual a área de busca é reduzida às linhas epipolares, e também através da busca hierárquica, na qual se utiliza uma pirâmide de imagens.

A redução do espaço de busca está implementada em diversos programas computacionais que fazem restituição fotogramétrica. Esses programas têm como base as equações de colinearidade (Equações 2.1, 2.2 e 2.3), que relacionam os parâmetros da orientação exterior, as coordenadas de um ponto na imagem e as coordenadas tridimensionais do mesmo ponto.

$$\begin{aligned} x &= m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \\ y &= m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \\ z &= m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0) \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.2)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (2.3)$$

em que:

- x, y, z - coordenadas do ponto no referencial fotogramétrico (cartesiano);
- X, Y, Z - coordenadas do ponto no referencial terrestre (cartesiano);
- X_0, Y_0, Z_0 - coordenadas do centro perspectivo da câmara no referencial terrestre;
- f - distância focal da câmera;
- $m_{i,j}$ - elementos da matriz de rotação (orientação).

2.2.1.1 Correspondência de imagens

A correspondência de imagens consiste na identificação e medição de pontos homólogos em duas ou mais imagens. Esta etapa é realizada em praticamente todos os processos fotogramétricos digitais, como a orientação de imagens, geração de modelos digitais de terrenos e extração automática de feições (BRITO; COELHO, 2002).

O que difere os algoritmos de correspondência é o tipo de primitiva utilizada no processo. Heipke (1996) considera como primitivas os tons de cinza e as feições presentes nas imagens e classifica os métodos em duas categorias: correspondência baseada em áreas e correspondência baseada em feições (feições locais ou relacionais). Schenk (1999) acrescenta um terceiro método, a correspondência simbólica, que engloba a correspondência relacional de Heipke (1996).

Em trabalhos recentes, percebe-se uma mistura de métodos para realizar a correspondência de imagens. Em Jacobsen (2006), foi utilizada, para pontos identificados em ambas as imagens, a correspondência baseada em feições, como informação inicial para os outros métodos que requerem aproximações; a correspondência por correlação em linhas epipolares e em linhas verticais; e também, a correspondência por mínimos quadrados.

De forma simplificada, o problema da correspondência de imagens abrange as seguintes etapas: selecionar uma primitiva (níveis de cinza ou feições) para correspondência em uma imagem; encontrar a primitiva conjugada na outra imagem; calcular a posição tridimensional da primitiva correspondida no espaço-objeto; e, por fim, avaliar a qualidade da correspondência.

A correspondência baseada em área compara a distribuição dos níveis de cinza de uma matriz de referência (*template*), criada a partir de uma imagem escolhida como referencial, com a janela de pesquisa, dentro de uma área de busca na imagem correlacionada (Figura 2.2).

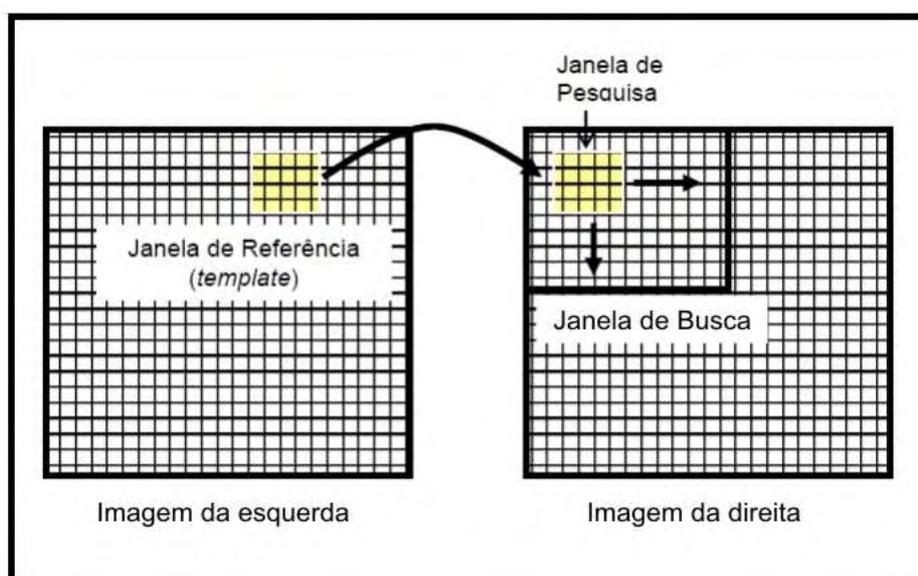


Figura 2.2 - Método de correspondência baseado em área.

Fonte: Costa (2006).

Para evitar problemas na correspondência, é importante definir uma boa localização e dimensão para as janelas de referência e pesquisa. A escolha da localização da janela de referência pode evitar falhas na correspondência de entidades. As falhas ocorrem devido à homogeneidade da região, oclusão da área selecionada na outra imagem, repetição de padrões, nuvens, entre outros fatores (SCHENK, 1999).

A comparação realizada por correlação baseia-se na medida de similaridade entre a janela de referência e a janela de pesquisa. Existem vários critérios de medida de similaridade, tais como a função-erro e a função-quociente, mas uma das funções mais conhecidas e utilizadas é o coeficiente de correlação normalizado (ρ) (KRAUS, 1993):

$$\rho = \frac{\sigma_{RP}}{\sigma_R \sigma_P} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m ((g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)(g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P))}{\sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_R(x_i, y_j) - \bar{g}_R)^2 * \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (g_P(x_i, y_j) - \bar{g}_P)^2}} , \quad (2.4)$$

em que:

σ_{RP} é a covariância entre as janelas de referência e de pesquisa;

σ_R é o desvio-padrão da janela de referência;

σ_P é o desvio-padrão da janela de pesquisa;

n, m são respectivamente o número de colunas e linhas da janela de referência;

$g_R(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de referência;

$g_P(x_i, y_j)$ é o nível de cinza da posição (x_i, y_j) na janela de pesquisa;

\bar{g}_R é a média dos níveis de cinza da janela de referência; e

\bar{g}_P é a média dos níveis de cinza da janela de pesquisa.

O fator de correlação é determinado para cada posição da janela de pesquisa na área de busca. O fator de correlação varia de -1 a 1 . O valor 1 corresponde à medida de similaridade máxima, o valor 0 indica que não há correlação entre as janelas, e o valor -1 indica correlação inversa.

O processo de correlação apresenta cinco etapas fundamentais: seleção de uma sub-imagem de referência em uma imagem; seleção da sub-imagem de busca em outra imagem; cálculo da correlação; identificação dos pontos de máximo ou mínimo para todas as possíveis combinações; e verificação da qualidade do processo realizado (COSTA, 2006).

Uma vez encontrada a janela correlacionada em nível do pixel, pode-se obter um refinamento dessa solução utilizando o método dos mínimos quadrados, a fim de se obter uma solução sub-pixel que minimiza a diferença entre os níveis de cinza da janela de referência e da janela correlacionada (SCHENK, 1999).

Segundo Fonseca (1999) e Fonseca et al. (2008), o método baseado no coeficiente de correlação apresenta melhor desempenho em comparação a outros métodos, tal como a detecção de similaridade seqüencial, a medida baseada na norma L_1 , e o operador de correspondência morfológica.

Na correspondência baseada em feições, as feições são extraídas previamente nas imagens, para então se realizar a correspondência. Essas feições podem ser locais (pontos, bordas, pequenas linhas e regiões) ou globais (polígonos ou estruturas, que são descrições mais complexas do conteúdo das imagens).

Cada feição é caracterizada por atributos, tais como posição (coordenadas), orientação e magnitude das bordas (gradientes), comprimento e curvatura de linhas, tamanho e brilho médio de regiões, entre outros.

Além dos atributos, podem ser estabelecidas relações entre as feições. Tais relações podem ser geométricas, como o ângulo entre dois lados de polígonos adjacentes ou a distância mínima entre duas bordas; radiométricas, como a diferença entre os tons de cinza ou sua variância entre duas regiões adjacentes; ou ainda topológicas. A correspondência utilizando feições globais é também chamada de correspondência relacional.

Habib et al. (2004) fazem algumas considerações acerca das técnicas de correspondência:

- a maioria das metodologias para realizar correspondência entre pontos homólogos em imagens assume que essas entidades conjugadas são quase uma cópia da outra, mas principalmente em áreas urbanas, o deslocamento do relevo (visão em perspectiva) causa grandes diferenças (Figuras 2.3 e 2.4);

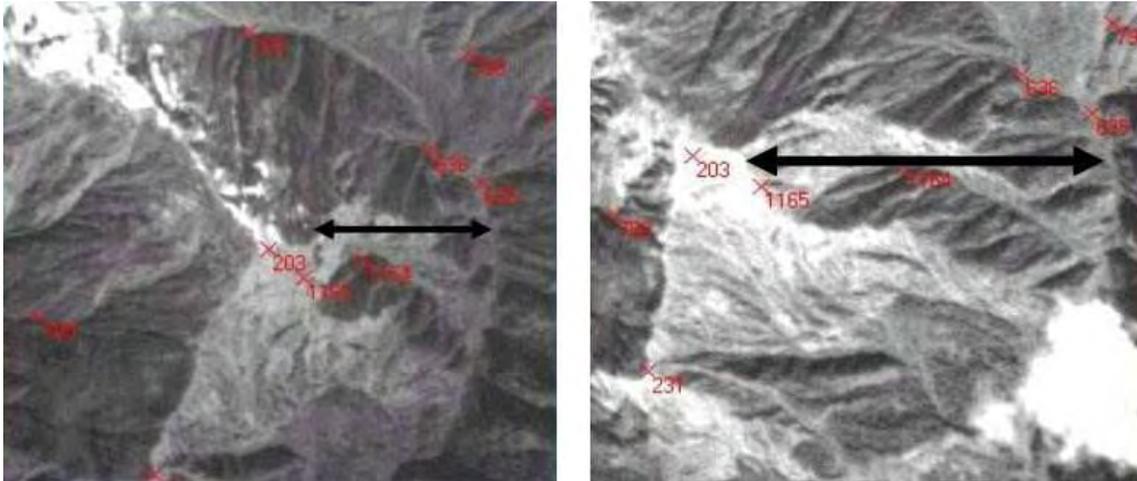


Figura 2.3 - Efeito do terreno íngreme em imagens com a mesma escala.

Fonte: Jacobsen (2007).

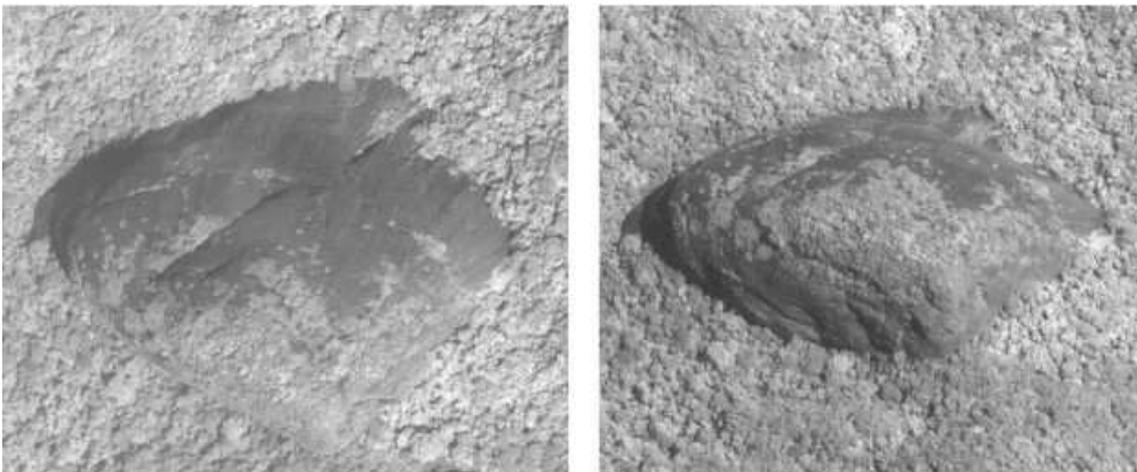


Figura 2.4 - Pedra no Rio de Janeiro em imagens IKONOS correspondentes.

Fonte: Jacobsen (2007).

- nem sempre é possível conhecer previamente os parâmetros de orientação para resolver o problema de correspondência, exigidos em alguns programas;
- as técnicas raramente consideram situações em que uma entidade, que aparece inteira em uma imagem, está particionada em mais de uma entidade na outra imagem por causa de oclusões, sombras, assim como deficiências no operador de extração de feições;

- a geometria perspectiva dos sistemas de imageamento não está explicitamente considerada no processo de correspondência.

Apesar desses problemas causarem ausência de informação nos pontos onde a correlação é baixa ou zero, na maioria dos casos, é possível editar essas regiões, por meio de interpolação ou manualmente, sem comprometer o resultado final.

2.2.1.2 Interseção Espacial

Através da detecção de pontos homólogos, é possível encontrar as coordenadas dos pontos no espaço-imagem (x, y), mas para gerar o Modelo Digital é preciso transformá-las em coordenadas tridimensionais no referencial do espaço-objeto (x, y e z do terreno). Essa conversão é realizada através do processo de interseção fotogramétrica ou interseção dos raios homólogos.

Esse procedimento permite determinar as coordenadas tridimensionais no espaço-objeto de quaisquer pontos pertencentes a um modelo que esteja devidamente orientado, ou seja, em que sejam conhecidos os parâmetros de orientação exterior da câmara. Para tanto, utilizam-se as coordenadas observadas no espaço-imagem, reduzidas ao sistema fotogramétrico (WOLF; DEWITT, 2000).

Esse cálculo pode ser efetuado através da aplicação das equações de colinearidade, considerando somente as coordenadas x, y e z como incógnitas. Assim, a determinação das coordenadas dos pontos é realizada resolvendo-se um sistema com quatro equações e três incógnitas, aplicando o método dos mínimos quadrados.

Através desse procedimento, é possível gerar um modelo de superfície do terreno obtido a partir da altura de todos os pontos homólogos do estéreo-par, ou então, para uma amostra representativa desses pontos.

2.2.1.3 Interpolação / Geração do Modelo

Como os pontos homólogos geralmente não estão distribuídos uniformemente e não representam completamente a superfície, é necessário fazer uma interpolação, para preencher os locais sem valores. Esse procedimento é chamado de Ajuste de Superfícies e inclui tanto as interpolações como os métodos de aproximação, com o objetivo de aproximação da superfície real. O número, distribuição e localização das amostras são a chave para construir um modelo de superfície bem representado.

As técnicas de modelagem digital têm o objetivo de representar superfícies contínuas (superfície terrestre) de forma discreta, através de amostras (COSTA, 2006). Essas amostras são pontos planialtimétricos representados em uma grade regular ou triangular (TIN) e formam uma superfície que, de acordo com a composição dos elementos ou feições integrantes, gera um modelo digital específico (ALEXANDRINI JUNIOR, 2005).

A malha regular ou *grid* é uma estrutura em que os dados são arranjados em uma matriz de linhas e colunas. O modelo TIN é gerado a partir de um conjunto de pontos irregularmente distribuídos.

Os Modelos Digitais podem ser classificados de diversas formas. Neste trabalho, foi adotada a classificação feita por Maune et al. (2007):

- **Modelo Digital de Elevação (MDE):** representação cartográfica digital da elevação do terreno em intervalos regularmente espaçados nas direções x e y , utilizando valores z referenciados a um datum vertical. Representa a superfície nua do terreno (exclui a vegetação e as feições artificiais).
- **Modelo Digital de Terreno (MDT):** pode ser similar ao MDE, mas também pode incorporar valores de elevação (z) de feições topográficas importantes através de massa de pontos e linhas de quebra, que são irregularmente espaçadas para melhor caracterizar a forma real da superfície nua do terreno.

- **Modelo Digital de Superfície (MDS):** similar ao MDE e MDT, mas incorpora valores de elevação (z) das feições naturais e artificiais que se encontram acima da superfície nua do terreno, como edificações, árvores e torres de energia.

A Figura 2.5 ilustra de forma simplificada os pontos utilizados para gerar um Modelo Digital de Superfície e um Modelo Digital de Elevação ou de Terreno.

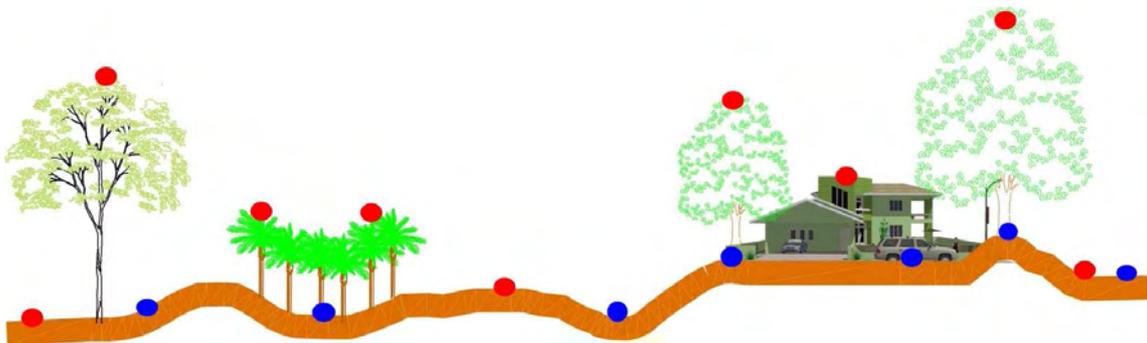


Figura 2.5 - Representação de pontos de um MDS (em vermelho) e de um MDE ou MDT (em azul).

Maiores detalhes sobre fotogrametria e modelos digitais de superfície podem ser encontrados em Kasser e Egels (2002), El-Sheimy et al. (2005), Li et al. (2005), Linder (2006), Kraus et al. (2007).

2.2.2 LiDAR

LiDAR (*Light Detection And Ranging*) é um sistema topográfico que utiliza a porção infravermelha do espectro eletromagnético e se baseia na emissão e registro do retorno do sinal. O instrumento emite milhares de pulsos laser por segundo, de luz infravermelha, e mede as distâncias, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe (azimute e elevação), com o objetivo de determinar as elevações da superfície (LILLESAND; KIEFER, 2000; FOWLER, 2007).

A partir desses dados, é possível calcular as coordenadas cartesianas 3D dos pontos medidos e sua resposta espectral, que pode ser usada para criar uma

imagem semelhante à visível. O resultado final do processo de medição e processamento é uma nuvem de pontos (Figura 2.6), que poderia ser chamada genericamente de Modelo Numérico de Superfície, ao qual o valor de reflectância também pode ser associado (TOMMASELLI, 2003).

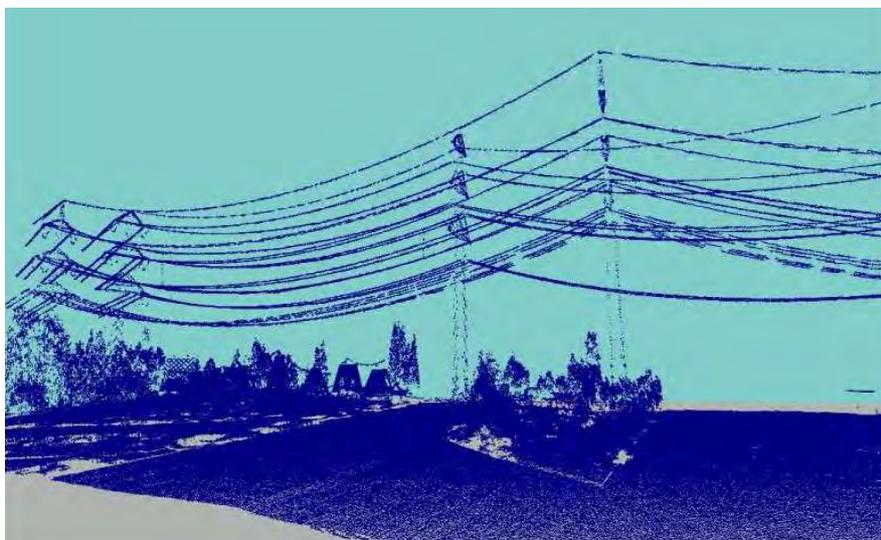


Figura 2.6 - Nuvem de pontos proveniente do LiDAR.

Fonte: Toposys (2007).

A nuvem de pontos, ou dados sem processamento, é o resultado da conversão de todas as medições em um sistema de coordenadas locais. A nuvem de pontos pode ser transformada em diferentes produtos e convertida em formato binário, em ASCII, por exemplo. Também é possível classificar a nuvem de pontos de acordo com a elevação em 'pontos no terreno' e 'pontos com elevação', tais como vegetação e edificações (TOPOSYS, 2007).

Os feixes laser retornam em tempos diferentes, sendo possível discriminá-los. Alguns receptores são capazes de detectar até sete diferentes ecos, enquanto outros podem registrar apenas o primeiro e o último eco (MACHADO, 2006). Um mesmo pulso pode atingir vários objetos em seu trajeto até a superfície levantada. O ponto mais próximo ocasionará um retorno mais rápido e o ponto mais distante ocasionará um retorno mais demorado (FALAT, 2005), sendo possível gerar produtos diferenciados a partir desses múltiplos retro-

espalhamentos. Geralmente, o último eco é proveniente da energia retro-espalhada pelo solo (Figura 2.7).

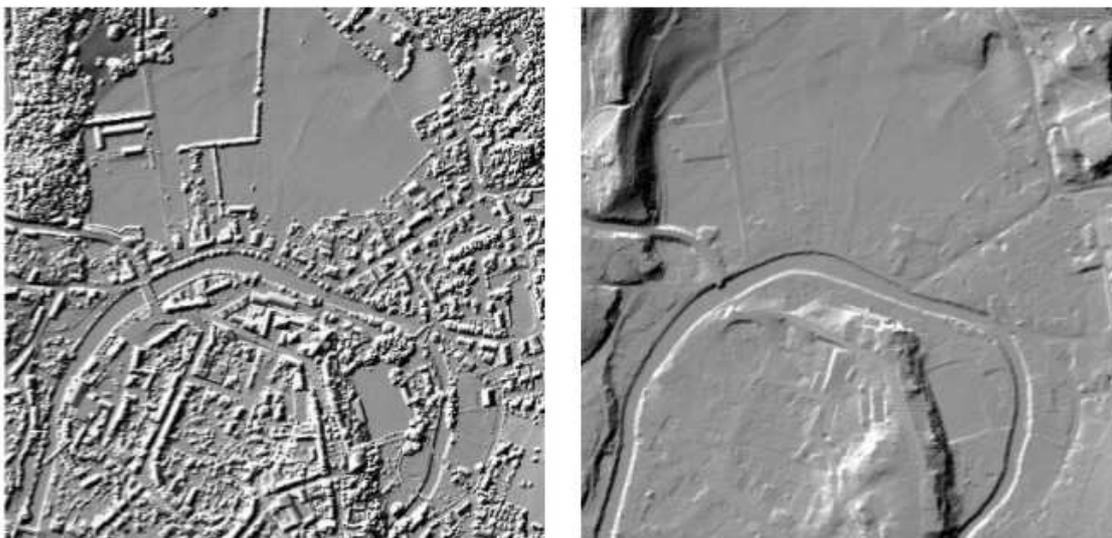


Figura 2.7 - Variações no modelo para o primeiro (direita) e último eco (esquerda) do LiDAR.

Fonte: Toposys (2007).

A resolução da nuvem de pontos, que define o número total e a distância entre os pontos, pode ser estabelecida antes da varredura. Esse parâmetro depende do tamanho do menor elemento que se deseja levantar e da distância ao objeto. Dependendo do modelo do scanner, pode-se refazer a varredura de alguns detalhes específicos com maior resolução espacial.

As nuvens de pontos com coordenadas dos pontos no espaço-objeto e seus valores de reflectância são coletadas de vários pontos de vista para eliminar as oclusões devido à perspectiva central. Para referenciar esses pontos a um sistema do espaço-objeto, são necessários alguns pontos bem definidos, normalmente proporcionados por alvos especiais (pelo menos quatro pontos).

O uso do sistema LiDAR aerotransportado é conhecido como ALS (*Airborne Laser Scanning*) e normalmente utiliza o seguinte processo: uma aeronave

sobrevoa uma região, e o equipamento laser efetua uma varredura no chão perpendicular à direção do voo, determinando a distância ao terreno. Essa distância R é calculada em função do tempo que o raio laser gasta para ir e voltar do equipamento ao terreno, na velocidade da luz (c), através de:

$$R = \frac{tc}{2} \quad , \quad (2.5)$$

em que t é o tempo de percurso de um pulso laser; e c , a velocidade da luz ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Para determinar a posição espacial dos pontos, é utilizado um sistema integrado contendo um Sistema de Posicionamento Global e um Sistema de Navegação Inercial (*Global Positioning System/Inertial Navigation System – GPS-INS*), que provê a posição e a atitude da aeronave, como ilustra a Figura 2.8 (MACHADO, 2006).

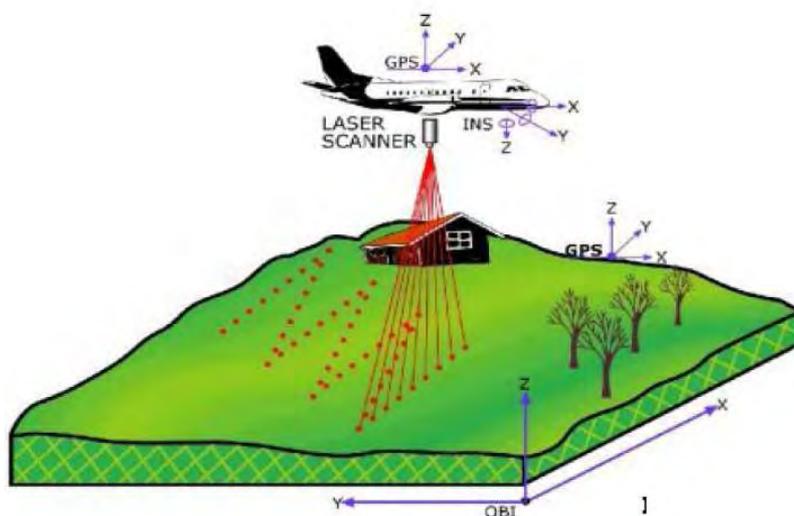


Figura 2.8 - Sistema LiDAR aerotransportado, equipado com o sistema GPS-INS.

Fonte: Jacobsen (2007).

Após a aquisição dos dados LiDAR, as informações das duas unidades GPS (uma localizada no solo e outra na aeronave) e do Sistema de Navegação

Inercial (*INS*) são pós-processadas, considerando-se a posição conhecida da antena da estação-base. Este processo determina a localização e trajetória exata da antena da aeronave durante todo o vôo. O arquivo de saída documenta a posição da aeronave e do sensor (*roll*, *pitch* e *yaw*) indexadas pelo tempo do GPS (JENSEN, 2009).

A área de cobertura de um pulso laser no terreno é aproximadamente circular e varia com o ângulo de varredura e a topografia do terreno (BALTSAVIAS, 1999). O diâmetro da visada instantânea laser (Fp_{inst}) no terreno é calculado por:

$$Fp_{inst} = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})\gamma} \quad , \quad (2.6)$$

em que h é a altitude da aeronave em relação ao solo; θ_{inst} é o ângulo de varredura instantâneo; e γ é a divergência do feixe laser (BALTSAVIAS, 1999; BOLAND, 2004).

A largura da faixa de cobertura perpendicular à trajetória (*sw – swath width*) é dada por:

$$sw = 2h \tan \frac{\theta}{2} \quad , \quad (2.7)$$

em que θ é o ângulo de varredura.

O espaçamento de pontos perpendiculares à trajetória ($P_{spacing}$) é dependente da frequência de repetição de pulso (*PRF*), da altitude da aeronave (h), da velocidade de varredura angular instantânea (α_{inst}) em radianos por segundo, e do ângulo de varredura instantâneo (θ_{inst}) (BALTSAVIAS, 1999):

$$P_{spacing} = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})} \cdot \frac{\alpha_{inst}}{PRF} \quad . \quad (2.8)$$

A densidade de amostragem real para uma área depende também da velocidade da aeronave. Para aumentar a densidade, é possível sobrepor múltiplas linhas de vôo para cobrir a área de estudo.

O ângulo máximo de varredura fora do nadir (off-nadir) pode ser ajustado de acordo com as necessidades da missão de coleta de dados.

Jacobsen (2007) faz as seguintes considerações sobre o sistema ALS: é possível realizar varredura com diversos ângulos, entretanto o uso de visão inclinada é limitado por causa das sombras em áreas construídas; a determinação da altura dos objetos é feita pela distância e direção da aeronave; a tendência é escolher altitudes de vôo elevadas, porque ocasiona maiores freqüências e largura de faixa, além da possibilidade do registro de vários ecos.

Existem mais de setenta organizações comerciais que realizam o sobrevôo com ALS, com mais de cinquenta sistemas, principalmente na América do Norte e Europa. As empresas geralmente operam com altura de vôo entre 50 e 5.000 metros e espaçamento dos pontos medidos de 0,25 a 10 metros e utilizam uma combinação do ALS com outros sensores, como câmeras digitais, scanners e sensores infravermelho. Os sistemas utilizam pontos de controle e ajuste de faixa para melhorar a geometria e fazem vetorização automática através de filtragem de objetos que não pertencem ao solo (JACOBSEN, 2007).

Segundo Falat (2005), o perfilamento a laser teve como primeiro objetivo o mapeamento de áreas de vegetação e, logo em seguida, o mapeamento de áreas onde a fotogrametria não era apropriada por não oferecer o contraste e textura necessários, como, por exemplo, em regiões costeiras contendo largas faixas de areia. Com a difusão da tecnologia, a aplicação foi diversificada, podendo ser utilizada na definição de volumes em áreas urbanas. Esses volumes podem ser facilmente distinguidos através do perfilamento a laser e utilização de algoritmos desenvolvidos para esse fim.

Para a identificação e classificação de edificações, Centeno e Mitishita (2007) recomendam a integração de dados altimétricos do laser com informações espectrais derivadas de fotografias aéreas ou imagens de satélites de alta resolução espacial, como IKONOS-II ou Quickbird. Neste contexto, deve-se levar em consideração a resolução espacial dos sensores e as características das imagens.

Um exemplo de combinação de dados pode ser encontrado em Falat (2005), que utilizou o perfilamento a laser combinado com imagens aéreas e dados cadastrais para detectar construções clandestinas e determinar altura de edificações em três cidades do estado de Minas Gerais: Ibirité, Santa Luzia e Uberlândia.

2.3 Extração e Reconstrução de Edificações

A fotogrametria e o sensoriamento remoto têm passado por um grande avanço tecnológico. A fotogrametria migrou do universo 'analógico' para o 'digital', apresentando técnicas progressivamente inovadoras, que aperfeiçoam os seus procedimentos rotineiros, tornando-os mais ágeis. Por sua vez, o sensoriamento remoto passou a contar com sensores de resolução espacial em nível submétrico. O que antes era uma tarefa clássica da fotogrametria, como mapeamento em grandes escalas ou geração de modelos de cidades, passou a ser possível também com imagens orbitais.

Muitas tarefas que antes eram feitas de forma analógica passaram a ocorrer de forma analítica e, desde então, surgiram vários programas computacionais que permitem realizar de forma automática tarefas antes realizadas manualmente. Apesar de todo esse avanço, a extração de feições em áreas urbanas ainda não é feita de forma totalmente automática.

De forma geral, a extração de edificações compreende duas fases: reconhecimento e reconstrução. A etapa de reconhecimento, ou classificação,

identifica onde estão as edificações; e a reconstrução determina os parâmetros geométricos das edificações encontradas na região de interesse.

O reconhecimento de edificações em uma imagem sobre área urbana que contém centenas de objetos, tais como estacionamentos, campos, estradas e veículos, apenas utilizando as propriedades espectrais não é suficiente (JAYNES et al., 2003). A situação se complica pela grande variedade de forma de telhados das edificações e pela oclusão causada por árvores, linhas de energia e outras edificações.

Geralmente, o reconhecimento parte de uma segmentação de área, separando a imagem em regiões de 'edificações' e 'não edificações' principalmente através de dados de elevação (que podem ser obtidos pela correspondência de imagens ou por LiDAR), NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou *Normalized Difference Vegetation Index*) ou medidas de textura.

Os dados de elevação podem auxiliar a refinar a classificação de cobertura do solo em análises orientadas a objeto. Com a disponibilidade da altura, por exemplo, é possível criar regras de pertinência que evitam confusão de classificação. Assim, definindo-se uma regra baseada na altura dos objetos, é possível resolver o problema de distinção entre classes que normalmente se misturam, como cobertura de cimento amianto escurecido e asfalto, ou então, discriminar solo exposto de telha cerâmica.

As técnicas mais recentes estão utilizando uma combinação de dados orbitais e laser, processados simultaneamente. Segundo Maas (2004), a combinação de laser scanner e imagens ópticas é a melhor solução para extração automática de edificações.

Segundo Brenner e Haala (1999) citado por Machado (2006), os diversos sistemas existentes para extrair edificações podem ser classificados segundo: (a) as fontes de dados empregadas, (b) o modelo utilizado para o objeto

(representação adotada), e (c) o tipo de operação pretendida: semi-automático ou totalmente automático.

As metodologias mais antigas para extração de edificações foram desenvolvidas principalmente sobre fotografias aéreas, devido à restrição da resolução espacial. A partir do lançamento de sensores de alta resolução, alguns autores começaram a trabalhar com imagens orbitais a fim de realizar reconstrução tridimensional.

Apesar de os métodos existentes ainda necessitarem de algum tipo de intervenção do operador, eles podem ser aprimorados para alcançar um grau de automatização maior. Os princípios gerais que norteiam as pesquisas atualmente são modelagem e reconstrução.

A modelagem utiliza modelos poliédricos genéricos, construídos a partir de vértices, linhas ou planos observados. O processo de reconstrução de edificações pode ser dividido nas fases de: detecção, reconhecimento, reconstrução geométrica e derivação adicional de atributos, quando possível.

2.4 Avaliação da Qualidade dos Produtos Gerados

A qualidade dos modelos gerados por meio das imagens IKONOS e LiDAR deve ser avaliada de acordo com as normas cartográficas vigentes no Brasil. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) das cartas elaboradas no Brasil é definido através do Decreto Federal nº 89.817 de 20 de junho de 1984 (BRASIL, 1984).

Esse Decreto estabelece que os padrões de exatidão planimétricos ou horizontais são definidos em função do denominador da escala da carta, e os padrões de exatidão altimétrico ou vertical são definidos em função da equidistância entre as curvas de nível.

O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) deve ser entendido como um conjunto de critérios e normas estabelecidas que norteiam os processos de determinação e quantificação da exatidão de uma carta.

Segundo o Artigo 8 do Decreto nº 89.817, as cartas, quanto à exatidão, devem obedecer ao Padrão de Exatidão Cartográfica, segundo os critérios abaixo discriminados:

- noventa por cento dos pontos bem definidos em uma carta, quando testados no terreno, não devem apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfico estabelecido; e
- noventa por cento dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfico estabelecido.

O Padrão de Exatidão Cartográfica é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% (noventa por cento) de probabilidade, que define a exatidão dos trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% (noventa por cento) corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão (PEC = 1,6449 x EP). O erro isolado em um trabalho cartográfico não pode ultrapassar 60,8% do Padrão de Exatidão Cartográfica.

O Decreto considera equivalente as expressões Erro Padrão, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático. O Erro Médio Quadrático é calculado da seguinte forma:

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \quad , \quad (2.9)$$

em que Δh_i é a diferença entre o dado de referência para um ponto i , e n é o tamanho da amostra (número de pontos de verificação independentes, também chamados de pontos de validação, ou, em inglês, *Independent Check Points - ICPs*).

De acordo com o Artigo 9 do Decreto nº 89817, as cartas, quanto à precisão, são classificadas nas classes A, B e C, de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Padrão de Exatidão Cartográfica.

Carta	PEC Planimétrico	Erro Padrão	PEC Altimétrico	Erro Padrão
Classe A	0,5mm x Escala	0,3mm x Escala	1/2 x Equidistância	1/3 x Equidistância
Classe B	0,8mm x Escala	0,5mm x Escala	3/5 x Equidistância	2/5 x Equidistância
Classe C	1,0mm x Escala	0,6mm x Escala	3/4 x Equidistância	1/2 x Equidistância

Fonte: BRASIL (1984).

Para cumprir essas especificações, é necessária a aplicação de uma análise estatística, considerando as discrepâncias entre as coordenadas dos pontos deste produto e as coordenadas dos pontos homólogos obtidos a partir de observações realizadas em campo, em um mesmo referencial.

De acordo com as Normas Cartográficas do Brasil, os testes específicos para a análise de exatidão são baseados em um nível de significância de 90% e são divididos em análise de tendência e análise de precisão. A análise de tendência baseia-se na distribuição *t-Student*, e a análise de precisão na distribuição qui-quadrado.

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise da exatidão de uma carta é baseada na análise estatística das discrepâncias entre as coordenadas observadas na carta e as coordenadas de referência, calculada para cada ponto *i*:

$$\Delta h_i = h_i^r - h_i^c \quad , \quad (2.10)$$

$$\Delta E_i = E_i^r - E_i^c \quad , \quad (2.11)$$

$$\Delta N_i = N_i^r - N_i^c \quad , \quad (2.12)$$

em que: h é a altimetria, E e N são as componentes planimétricas, r é o dado de referência (gerado) e c , a verdade terrestre (*check point*) em um determinado ponto i .

A média (Equação 2.13) e o desvio padrão (Equação 2.14) das discrepâncias amostrais são calculados por (HÖHLE; HÖHLE, 2009):

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad , \quad (2.13)$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \hat{\mu})^2} \quad , \quad (2.14)$$

em que Δh_i é a diferença entre o dado de referência para um ponto i , e n é o tamanho da amostra (número de ICPs).

Através do teste de *t-Student*, é possível verificar se a média das discrepâncias é igual a zero e se existe tendência ou deslocamento sistemático. Nesse teste, as seguintes hipóteses são avaliadas:

$$H_0 : \hat{\mu} = 0 \quad , \quad \text{contra} \quad (2.15)$$

$$H_1 : \hat{\mu} \neq 0 \quad (2.16)$$

Para este teste, calcula-se a estatística amostral t , e verifica-se se o valor encontra-se no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de t amostral é calculado por:

$$t_x = \frac{\hat{\mu}}{\hat{\sigma}} \sqrt{n} \quad , \quad (2.17)$$

e o intervalo de confiança por:

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)} \quad , \quad (2.18)$$

$\hat{\mu}$ representa a média das discrepâncias; $\hat{\sigma}$ é o desvio padrão amostral, e α é o nível de significância do teste.

Segundo Galo e Camargo (1994), se a estatística amostral t estiver fora do intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula. Ou seja, a carta não pode ser considerada como livre de tendências significativas na coordenada testada, para um determinado nível de confiança. Caso seja verificada a existência de tendência, é possível corrigi-la através da subtração do seu valor em cada coordenada do produto gerado (MDS ou ortomagem, por exemplo).

Para verificar a precisão, a análise é realizada através do teste qui-quadrado, comparando-se o desvio padrão das discrepâncias com o desvio padrão esperado para a classe desejada (classe A), tendo em vista a seguinte hipótese (ITAME, 2001):

$$H_0: \hat{\sigma}^2 = \sigma^2 \quad , \quad \text{contra} \quad (2.19)$$

$$H_1: \hat{\sigma}^2 > \sigma^2 \quad , \quad (2.20)$$

em que σ é o desvio padrão esperado para a classe de interesse (classe A).

Dado o valor de desvio padrão esperado, a análise estatística é realizada por meio da Equação:

$$\chi^2 = (n-1) \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma^2} \quad , \quad (2.21)$$

e verifica-se se o valor está no intervalo de aceitação, como segue:

$$\chi^2 \leq \chi^2_{(n-1; \alpha)} \quad . \quad (2.22)$$

Se a Equação (2.22) não for obedecida, rejeita-se a hipótese H_0 de que a carta atenda à precisão pré-estabelecida (ITAME, 2001).

Para a ortoimagem, a análise da precisão e tendência é realizada da mesma forma, substituindo-se as discrepâncias altimétricas pelas discrepâncias posicionais (ΔE_i e ΔN_i).

É importante salientar que a análise segura dos resultados depende do número de pontos utilizados na validação. Para Merchant (1982), a exatidão de um mapa em escala grande (1:20.000 e maiores) deve ser testada com um número mínimo de 20 pontos bem definidos no mapa e no terreno (pontos homólogos), como, por exemplo, interseções de ruas ou limites de propriedades.

O tamanho de uma amostra se refere à quantidade de unidades ou indivíduos que se extraem do universo de pesquisa ou análise. É sabido que a seleção das amostras deve ser realizada mediante um processo aleatório, a fim de que seja evitada uma possível tendenciosidade. Ao se determinar um tamanho ideal de amostra, a redução dos custos e do tempo empregado, bem como o aumento da confiabilidade dos dados são algumas das vantagens alcançadas (NOGUEIRA JR., 2003).

3 ÁREA DE ESTUDO

O município de Uberlândia está localizado no oeste do estado de Minas Gerais, na zona geográfica denominada Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba (Figura 3.1). O município tem uma área de 4.116 km² e faz limite com os municípios de: Tupaciguara, Araguari, Indianópolis, Uberaba, Veríssimo, Prata e Monte Alegre de Minas. A sede municipal está a 550 km da capital Belo Horizonte e tem como coordenadas geográficas: 18° 55' 07" S e 48° 16' 38" O (IBGE, 2009).

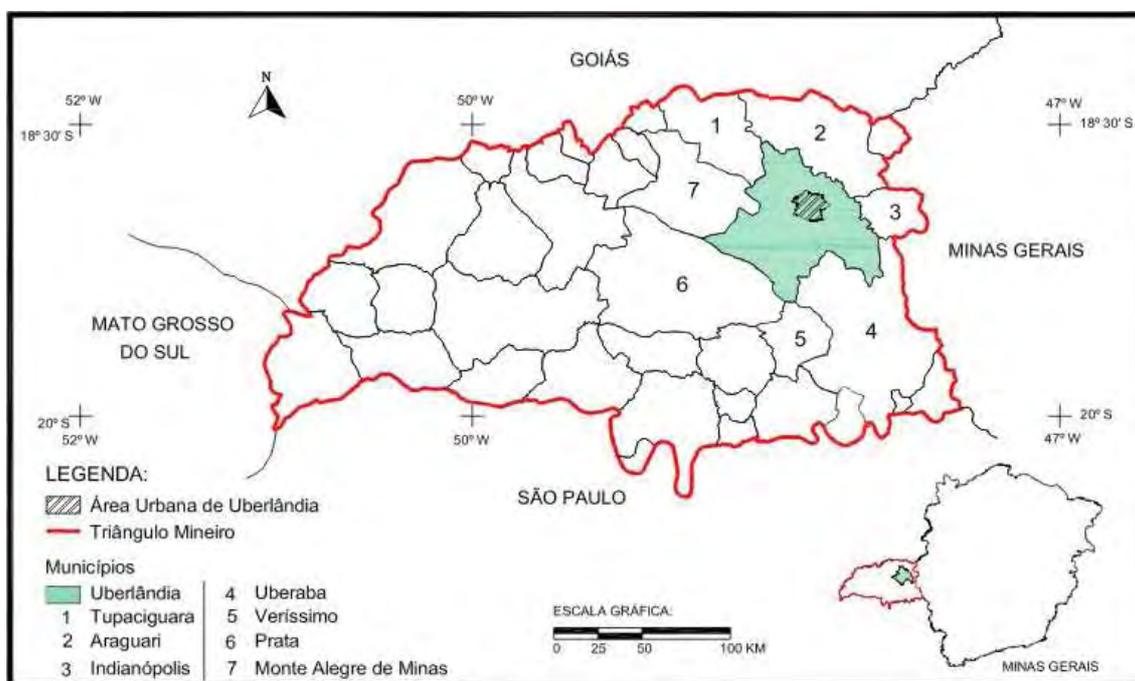


Figura 3.1 - Localização do município de Uberlândia no Triângulo Mineiro.

Fonte: Adaptado de Geominas (2007).

A cidade possui uma rede de relações com outras cidades, constituindo-se o município como pólo na microrregião de Uberlândia. Oferece atendimento na área de saúde, ensino e trabalho

Segundo o censo demográfico do IBGE do ano 2000 (IBGE, 2000), o município de Uberlândia possuía 501.214 habitantes e apresentava uma densidade

demográfica de 121,7 hab/km². Segundo a última estimativa do IBGE (do ano 2009), Uberlândia tem 634.345 habitantes e densidade demográfica de 154,1 hab/ km². A Tabela 3.1 mostra a evolução populacional anual ocorrida de 2000 a 2009.

Tabela 3.1 - Evolução da população em Uberlândia de 2000 a 2009.

POPULAÇÃO										
Área	2000 ¹	2001 ²	2002 ²	2003 ²	2004 ²	2005 ²	2006 ²	2007 ²	2008 ²	2009 ²
Urbana	488.982	505.167	521.888	539.162	556.133	570.982	585.720	593.526	607.245	615.496
Rural	12.232	12.637	13.055	13.487	13.909	14.280	14.648	14.843	15.196	18.849
TOTAL	501.214	517.804	534.943	552.649	570.042	585.262	600.368	608.369	622.441	634.345

Fonte: Adaptada de Prefeitura Municipal de Uberlândia (2007).

Nota: ¹ Censo Demográfico – IBGE – 2000

² Estimativa Populacional Anual do IBGE

O processo de formação do município de Uberlândia remete à ocupação e colonização do Brasil, período em que ocorreram várias expedições com o intuito de explorar o interior do país. Em 1888, foi oficialmente fundada a cidade que cresceu e se desenvolveu graças à sua localização privilegiada. A criação da Ferrovia Mogiana (Companhia Mogiana de Estradas de Ferro) em 1895 e a posterior construção de Brasília fortaleceram a influência da cidade como marco logístico do Brasil.

As mudanças na paisagem urbana da cidade se iniciaram em 1940, com o advento da industrialização e o aumento no êxodo rural (MOURA, 2003). As primeiras edificações com mais de quatro pavimentos surgiram nas décadas de 1940 e 1950, dando início ao processo de verticalização. Também nessa época, iniciou-se o asfaltamento das ruas da cidade, a fim de melhorar as condições de transporte.

A década de 1960 também foi marcante, ocorrendo várias mudanças no espaço urbano de Uberlândia. Segundo Moura (2003), houve um alargamento do sítio urbano, por meio da expansão das periferias, principalmente com a implantação dos conjuntos habitacionais, associado ao processo de

verticalização da área central. Houve também a criação do setor industrial, levando infra-estrutura ao entorno e criação de novos bairros residenciais a fim de abrigar os funcionários das indústrias.

As décadas de 1970 e 1980 foram marcadas pelo intenso crescimento populacional devido à intensificação da industrialização. O parque industrial cresceu de forma desorganizada, levando à formação de vários bairros periféricos, o que gerou, por sua vez, uma intensificação da verticalização na área central.

Na década de 1990, com o Plano Diretor da cidade já implantado, inicia-se uma nova dinâmica urbana, com crescimento horizontal e vertical. A verticalização passa a ocorrer nos bairros adjacentes ao centro e surgem também, em áreas periféricas, os condomínios horizontais fechados para atender à população com renda elevada.

A área de estudo está contida na parte mais verticalizada da cidade (Figuras 3.2 e 3.3), abrangendo os bairros Centro e Fundinho, e parte dos bairros Tabajaras, Martins e Osvaldo Rezende (Figura 3.4).



Figura 3.2 - Visão Panorâmica da Área de Estudo.

Fonte: Prefeitura Municipal de Uberlândia (2007).



Figura 3.3 - Visão Panorâmica da Área de Estudo.
 Fonte: Prefeitura Municipal de Uberlândia (2007).

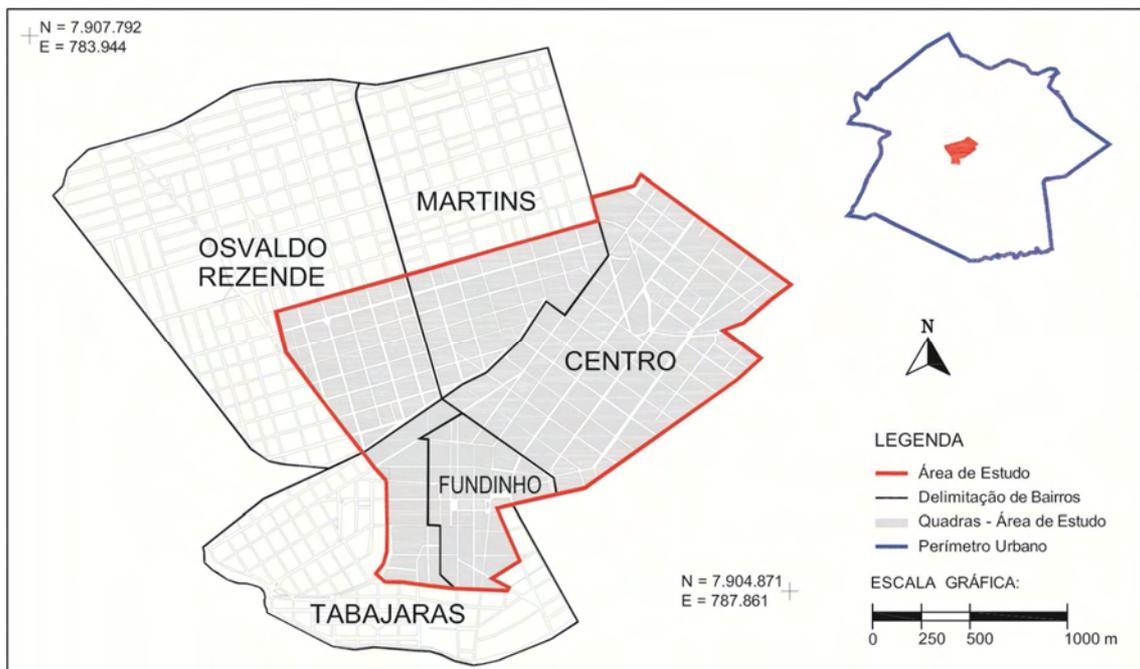


Figura 3.4 - Delimitação da Área de Estudo.
 Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Uberlândia (2007).

O bairro Fundinho é uma área histórica da cidade. A formação inicial de Uberlândia se deu nesse bairro, de ruas e calçadas estreitas. O bairro conserva, parcialmente, o arruamento original e é ocupado, predominantemente, por construções de uso residencial unifamiliar, com tendência à substituição por comércio e serviços.

O bairro ainda mantém construções referenciais para a história da cidade, como a Biblioteca Municipal, Casa da Cultura, Oficina Cultural, Museu Municipal, Igreja de Nossa Senhora do Rosário, Coreto da Praça Clarimundo Carneiro, dentre outras edificações.

A forte pressão imobiliária provocou várias demolições de casas antigas, para dar lugar a prédios altos, alterando as características do bairro. Atualmente, as típicas residências do Fundinho dividem o espaço com várias casas comerciais e prédios altos.

A definição do bairro Fundinho como zona especial de revitalização, estabelecida pela lei de parcelamento e zoneamento de uso e ocupação do solo (UBERLÂNDIA, 2000), conteve parcialmente a descaracterização do bairro e freou a pressão imobiliária.

O bairro Centro foi planejado com o objetivo de ampliar o perímetro urbano a partir do núcleo antigo de cidade (Fundinho). O Plano de Expansão (de 1907) já previa a criação dessa nova área, o Centro, dotada de largas e extensas avenidas arborizadas em forma de tabuleiro de xadrez. Assim, foram criadas as avenidas: Afonso Pena e Floriano Peixoto, destinadas ao comércio; João Pinheiro e Cipriano Del Fávero, destinadas à habitação das elites emergentes.

Aos poucos, as residências foram se transferindo para os bairros vizinhos, como Martins e Osvaldo Rezende, e o Centro passou a ser basicamente comercial.

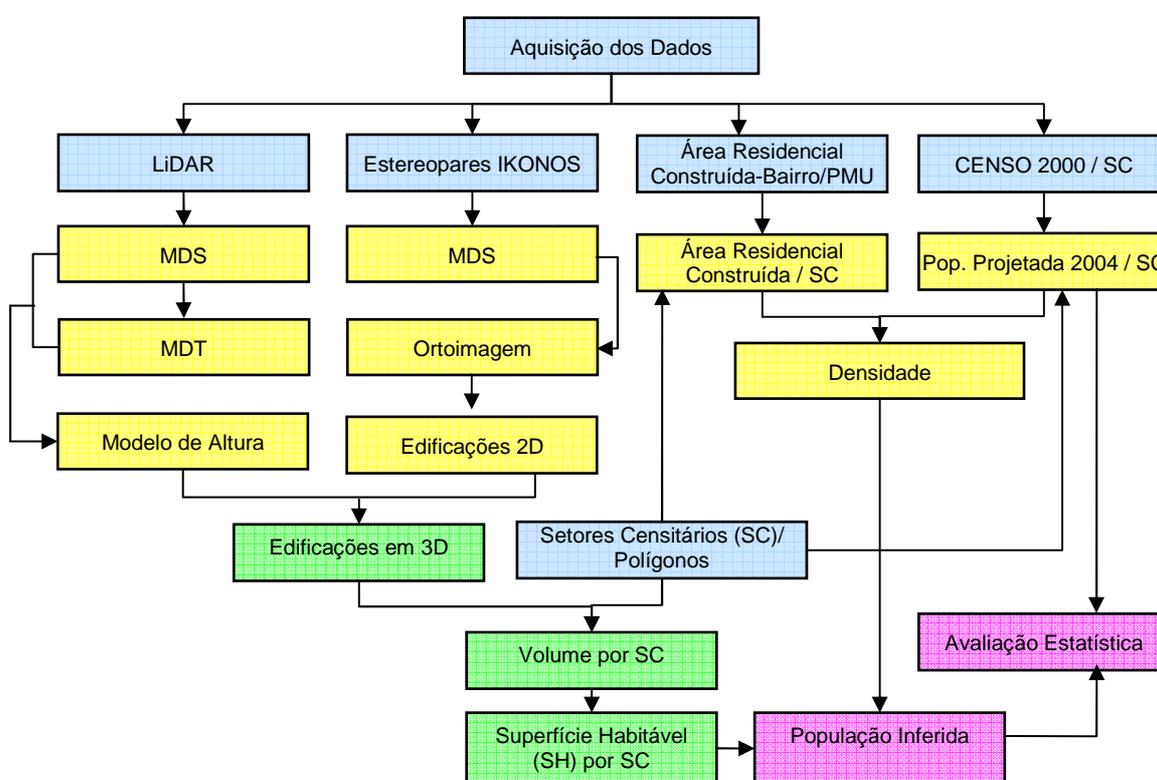
A porção dos bairros Martins e Osvaldo Rezende contida na área de estudo é constituída principalmente de residências, mas com grande número de serviços diversos nas ruas Vasconcelos Costa e Belo Horizonte, e na avenida Raulino Cotta Pacheco.

No bairro Martins, verifica-se a presença de várias clínicas médicas na avenida Getúlio Vargas, na rua Arthur Bernardes e demais ruas paralelas de acesso ao Hospital Santa Genoveva e especialmente nas suas proximidades. No entanto, o entorno da Praça Sérgio Pacheco apresenta uso basicamente comercial, com configuração diferenciada do setor do bairro que abriga equipamentos de saúde.

A porção do bairro Tabajaras pertencente à área de estudo é formada principalmente por residências com tipologia térrea ou assobradada, e com alguns edifícios de porte médio, de 3 a 5 pavimentos, contando mais recentemente com a presença de edificações com 8 a 12 pavimentos, aproximadamente. Nota-se igualmente estabelecimentos de comércio de pequeno porte, em menor grau. A avenida Getúlio Vargas nesse trecho possui algumas clínicas médicas e estabelecimentos de comércio diversos.

4 METODOLOGIA

A metodologia pode ser resumida conforme a Figura 4.1 e compreende duas principais etapas: a primeira é a construção do modelo 3D, e a segunda, o cálculo da inferência populacional. A construção do modelo 3D pode ser subdividida em duas sub-etapas: obtenção dos polígonos das edificações por meio das Imagens IKONOS e geração do MDA a partir dos dados LiDAR. A segunda etapa compreende a junção dos dados de saída da primeira e segunda sub-etapas para cálculo da inferência populacional.



Legenda:

- Dados de entrada;
- Produtos Gerados;
- Resultados (cruzamento de produtos);
- Produto Final (Inferência Populacional).

Figura 4.1 – Fluxograma metodológico do trabalho.

4.1 Construção do Modelo 3D

Para a primeira etapa da metodologia, que compreende a construção do modelo 3D, foram utilizadas imagens IKONOS e dados LiDAR. As imagens IKONOS foram utilizadas para gerar a ortoimagem e digitalizar as edificações da área de estudo. Os dados LiDAR foram utilizados para gerar o Modelo de Altura.

4.1.1 Geração de ortoimagem e digitalização das edificações

Foram utilizados: 1) 55 pontos de controle coletados em junho de 2009, com equipamentos GPS Geodésicos de uma frequência, no modo relativo estático; e 2) um par de imagens estereoscópicas IKONOS-II do tipo *Reference*. A Tabela 4.1 mostra as características de aquisição das imagens utilizadas.

Tabela 4.1 - Características de aquisição das imagens IKONOS utilizadas.

Data de aquisição	27/06/2008	27/06/2008
Posição estéreo	esquerda	direita
Elevação do sensor	60,84°	81,80°
Azimute do sensor	27,17°	117,45°
Azimute solar	32,76°	32,55°
Elevação solar	40,55°	40,66°

Para essa etapa, realizaram-se:

- a) planejamento do levantamento de campo;
- b) execução do levantamento de campo;
- c) processamento e avaliação dos pontos GPS levantados em campo com equipamentos GPS geodésicos;
- d) coleta dos pontos de controle e validação sobre o estéreo-par de imagens IKONOS-II;
- e) geração do MDS;
- f) avaliação estatística do MDS;
- g) geração de ortoimagem (imagem mais vertical, à esquerda);
- h) avaliação estatística da ortoimagem;
- i) digitalização das edificações a partir da ortoimagem.

As bandas multiespectrais (R, G, B, IV próximo) com 4 m de resolução espacial e 11 bits de resolução radiométrica foram fusionadas com a banda pancromática, com 1 m de resolução espacial, através do método de GranSchmidt (LABEN; BROWER, 2000) no programa ENVI. A geração do MDS e ortomagem, foi realizada no módulo OrthoEngine da PCI Geomatics; e por fim, a avaliação e digitalização foram executadas no ArcGis.

O planejamento do levantamento de campo foi realizado a partir das imagens IKONOS-II, selecionando pontos notáveis e bem distribuídos na área do estéreo-par para serem coletados em campo. Foram coletados 54 pontos de campo, 25 foram utilizados na geração do MDS (Tabela 4.2 e Figura 4.2), e os outros 29, para validação (*Independent Check Points - ICPs*).

Tabela 4.2 - GCPs utilizados na geração do MDS.

ID GCP	E (m)	N (m)	H (m)
03	785627,901	7905607,972	806,681
09	787811,803	7906462,168	848,836
13	786103,518	7906482,948	844,737
14	785278,783	7906335,680	834,367
18	786231,299	7904970,391	823,254
24	786411,987	7905983,247	833,096
27	785950,947	7906126,419	832,899
32	787391,486	7905921,729	842,557
34	782952,295	7910419,700	827,087
35	786001,749	7910562,309	844,248
36	790507,244	7910006,627	888,098
37	781388,970	7907233,673	828,961
38	785584,441	7907473,134	809,233
39	790075,994	7906931,585	843,080
40	781324,428	7901181,548	858,919
41	787175,450	7901753,276	839,331
42	790998,841	7901116,298	894,511
45	786552,500	7906391,974	838,130
46	786297,035	7905811,481	831,791
47	787078,497	7906374,641	856,455
49	786282,849	7905427,027	838,043
50	781892,013	7903929,583	827,192
51	790572,750	7904606,216	878,743
52	786789,635	7904085,166	787,719
57	787068,913	7907004,465	855,684

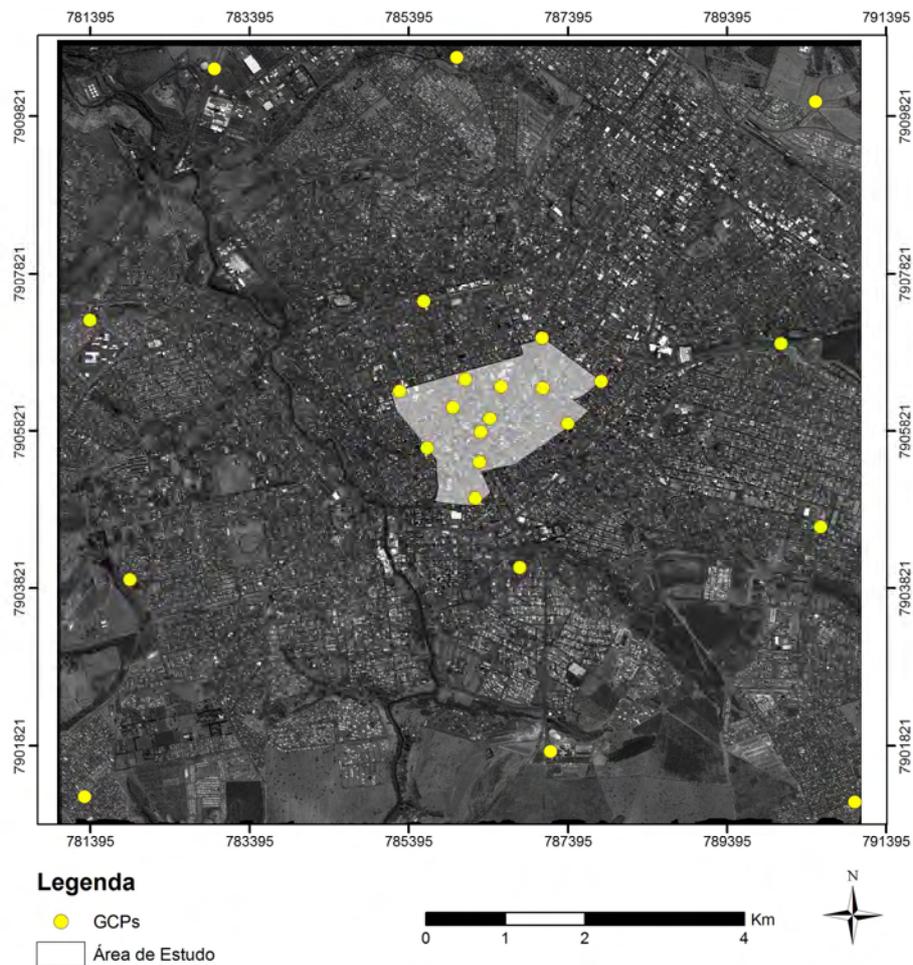


Figura 4.2 - Localização dos GCPs sobre a imagem IKONOS.

Os pontos de controle foram inseridos nas duas imagens do par estereoscópico, tomando como base os croquis de campo, seguindo as configurações de GCPs pré-estabelecidas.

Após essa etapa, foi calculado o modelo matemático para a geração das imagens epipolares, geração e geocodificação (georreferenciamento) do MDS com 1 m de resolução espacial, geração da ortoimagem e vetorização das edificações (Figura 4.3).

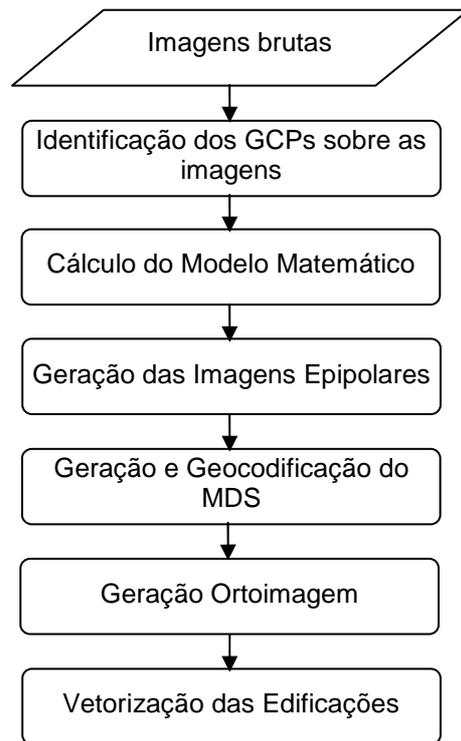


Figura 4.3 - Primeira sub-etapa da metodologia.

Por fim, a avaliação da acurácia do MDS e da ortoimagem foi realizada com base nos 29 ICPs localizados na área de estudo (Tabela 4.3 e Figura 4.4).

Tabela 4.3 - ICPs utilizados na validação do MDS e ortorectificação.

ID ICP	E (m)	N (m)	H (m)
00	786930,203	7906678,580	852,323
01	785344,653	7906157,557	831,667
02	785400,554	7905897,695	822,974
04	785921,646	7905812,134	814,446
05	786374,718	7905445,631	840,552
06	787310,877	7906209,758	854,826
07	786532,599	7905967,028	838,332
08	787640,059	7906333,298	851,009
10	787213,453	7906900,216	858,172
11	786848,214	7906907,144	853,264
12	786480,256	7906688,847	847,657
15	786172,704	7906297,553	837,970
16	786331,571	7906090,659	827,100
19	786176,481	7905002,275	823,995
20	786637,267	7905777,069	845,108
21	786481,278	7906274,037	833,255
22	786086,162	7905925,489	818,212
23	786006,430	7905119,957	820,335
25	785763,037	7906385,373	841,993
26	786140,012	7906074,255	827,691
28	785650,795	7905917,673	825,222
30	785948,627	7905053,596	814,015
31	786942,750	7905946,349	849,386
33	785970,595	7905385,260	828,066
43	785594,008	7906114,089	834,381
48	787002,448	7905588,465	840,249
53	786388,894	7905063,781	826,508
54	786178,130	7905291,655	835,699
55	786355,255	7905171,252	831,036

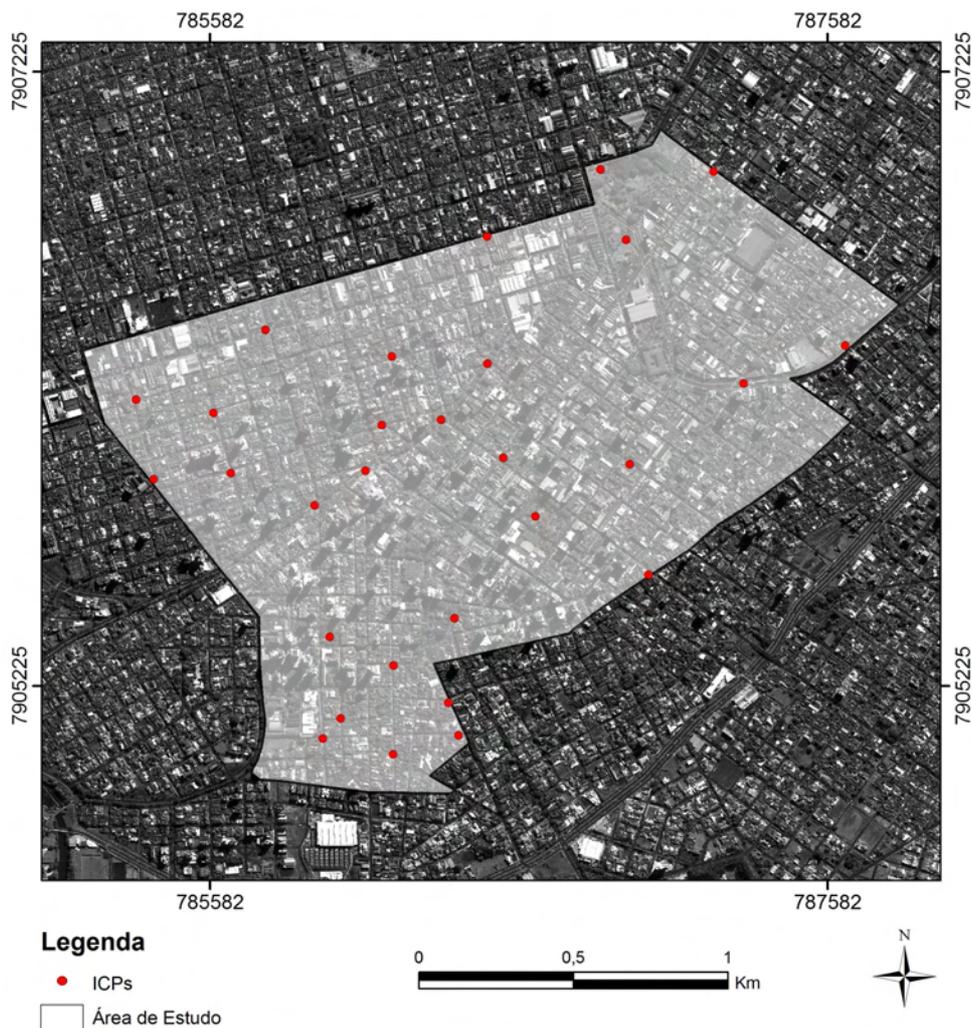


Figura 4.4 - Localização dos ICPs sobre a imagem IKONOS.

A partir das coordenadas UTM (E, N) de cada ICP, foram calculadas as discrepâncias dos valores altimétricos h de cada ponto i sobre o MDS e posicional (E, N) de cada ponto i sobre a ortoimagem.

A análise da precisão e tendência do MDS e ortoimagem baseou-se na metodologia proposta por Galo e Camargo (1994), e compreendeu as seguintes fases:

- cálculo da média e desvio padrão das discrepâncias amostrais;
- cálculo da estatística amostral t e respectivo intervalo de confiança;

- cálculo da precisão através do teste qui-quadrado;
- cálculo do erro médio quadrático.

A partir dos polígonos digitalizados sobre a ortoimagem, fez-se trabalho de campo para identificar quais edificações são residenciais. O trabalho de campo foi necessário porque os materiais, formatos e tamanhos dos telhados das edificações não são suficientes para definir o uso por meio de classificação visual ou automática.

Após a identificação das edificações residenciais, efetuou-se o cruzamento com os setores censitários, obtendo-se edificações residenciais por setor censitário. Dessa forma, o dado de saída desta sub-etapa são polígonos das edificações residenciais por setor censitário.

4.1.2 LiDAR

Foi utilizado o perfilamento a laser (LiDAR) da cidade de Uberlândia – MG, realizado e processado em 2004 pela empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A. O perfilamento a laser foi realizado com o aparelho ALTM 2025 (*Airborne Laser Terrain Mapper*) da fabricante canadense Optech Inc., com a seguinte configuração:

- Datum altimétrico: Marégrafo de Imbituba/SC
- Datum planimétrico: SAD-69
- Sistema de projeção: UTM, MC 51º, Zona 22
- Data do levantamento: 02/2/04 a 18/6/04
- Repetição do laser (Hz): 25.000
- Frequência scanner (Hz): 33
- Ângulo de abertura: 12º

O fabricante do ALTM 2025 estabelece como tolerâncias aceitáveis para a qualidade planimétrica dos pontos LiDAR, após processamento, valores na ordem de $1/1.000 \times H$ a $1/2.000 \times H$, em que H é a altura de vôo. Assim, a qualidade planimétrica esperada para uma altura de vôo de 750 m é de 0,38 a 0,75 m, e para uma altura de vôo de 1.200 m, de 0,60 a 1,20 m. Em Uberlândia, as curvas de nível são de m/m, então a precisão altimétrica determinada pelo PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) é de 1/2 equidistância, o que corresponde a 0,5 m. A Tabela 4.4 mostra as características do aparelho.

Tabela 4.4 - Características do ALTM2025 da fabricante Optech.

Altitude de operação	250 – 3.000 m nominal
Acurácia altimétrica	15 cm a 1.200 m; 25 cm a 2.000 m (1 sigma)
Resolução em <i>range</i>	1 cm
Ângulo de abertura	Variável de 0 a $\pm 20^\circ$
Largura da faixa de perfilamento	Variável de 0 a $0,68 \times$ altitude
Freqüência de perfilamento	Variável, depende do ângulo de abertura; por exemplo, 28 Hz para $\pm 20^\circ$ de abertura
Acurácia horizontal	Melhor que $1/2.000 \times$ altitude
Receptor GPS	Novatel Millennium
Taxa de repetição do laser	25 kHz
Divergência do feixe	Variável, 0,2 mrad (1/e) ou 1,0 mrad
Classificação do laser	Classe IV (FDA CFR 21)
Varição segura aos olhos	250 m @ 1,0 mrad, 550 m @ 0,2 mrad nominal *

Fonte: Optech Inc. (2007).

Os dados LiDAR foram recebidos em formato ASCII com informações das coordenadas X, Y, Z e intensidade do MDS e do MDT separadamente. Os arquivos ASCII que compõem o MDS agrupam todos os pontos levantados, sejam eles no terreno ou acima do terreno. Os arquivos do MDT pertencem na sua totalidade ao MDS e são extraídos do mesmo.

Optou-se por realizar uma nova classificação do MDS, a fim de se obter o MDT, por não se conhecer os procedimentos adotados no dado recebido.

Dessa forma, utilizou-se o programa TerraScan (fabricado pela empresa TerraSolid, Finlândia) no MicroStation (Bentley) para localizar os pontos no terreno (MDT).

O TerraScan recebe a nuvem de pontos 3D irregularmente espaçada, e através do classificador de terreno, chamado de “densificador progressivo de TIN” por Axelsson (1999, 2000), obtêm-se os pontos localizados na superfície nua do terreno. O algoritmo classifica pontos no terreno através da construção iterativa de uma TIN.

O algoritmo se inicia através da seleção do parâmetro “tamanho máximo de edificação”. Se o tamanho máximo de edificação for 60 m, o aplicativo assume que qualquer área de 60 x 60 m terá pelo menos um ponto no terreno e que o ponto mais baixo pertence ao terreno. O tamanho máximo de edificação utilizado neste trabalho foi de 85 m.

O algoritmo constrói uma rede TIN inicial a partir dos pontos selecionados como “menor elevação”. As faces dos triângulos da TIN inicial estão na sua maioria abaixo do terreno, sendo que apenas os vértices tocam o terreno. A rotina então começa a mover a TIN para cima, através da adição iterativa de novos pontos da nuvem à rede. Cada ponto adicionado faz com que a TIN se aproxime mais do terreno.

Os parâmetros de iteração determinam quão próximo um ponto precisa estar da face do triângulo para ser aceito como ponto no terreno e ser acrescentado à TIN. O ângulo de iteração é o ângulo máximo entre um ponto, sua projeção na face do triângulo e o vértice do triângulo mais próximo. O parâmetro de distância de iteração garante que a iteração não salte de forma abrupta quando os triângulos forem grandes. Isto faz com que pequenas edificações não sejam incluídas no modelo.

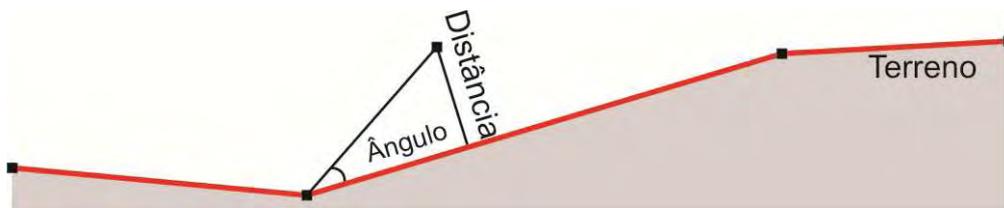


Figura 4.5 - Parâmetros de ajuste para classificação de pontos.

Fonte: TerraSolid (2010).

Quanto menor o ângulo de iteração, menos sensível o algoritmo será para detectar mudanças na nuvem de pontos (pequenas ondulações no terreno ou pontos em vegetações baixas). Segundo a TerraSolid (2010), é recomendável usar um ângulo pequeno (próximo de 4.0) em áreas planas e um ângulo grande (próximo de 10.0) em áreas montanhosas. É possível corrigir erros onde a classificação automática não apresentou bons resultados, através da opção 'adicionar ponto ao terreno'.

Segundo Axelsson (1999, 2000), o ponto positivo desse algoritmo é sua habilidade em lidar com superfícies descontínuas, o que é particularmente útil em áreas urbanas.

A partir do resultado da classificação dos pontos, foram gerados dois arquivos no formato TXT, contendo um arquivo para o MDS, com 3.729.559 pontos, e outro para o MDT, com 543.271 pontos. Os arquivos TXT foram importados no programa ArcGis (ESRI) para a geração de superfícies. Adotou-se um procedimento utilizado por Patenaude et al. (2004), em que uma grade triangular TIN é criada baseada na triangulação de Delaunay e, em seguida, a TIN é convertida em grade regular (raster) através de um interpolador linear com intervalos constantes de 1 m. Por meio desse procedimento, obteve-se o MDT e MDS da área com 1 m de resolução espacial.

Através do Spatial Analyst e 3D Analyst no ArcGis (ESRI), efetuou-se uma subtração algébrica entre os modelos (MDS – MDT) e obteve-se o Modelo Digital de Altura (MDA). Este modelo de altura é utilizado como dado de

entrada, juntamente com os polígonos das edificações (obtidos a partir da imagem IKONOS) para cálculo de volume das residências.

Para efeito de visualização dos modelos, gerou-se uma imagem intensidade e hipsométrica no programa Quick Terrain Modeler (Applied Imagery).

A validação do MDS e MDT foi realizada por Leonardi (2010) e seguiu as mesmas etapas realizadas com o MDS gerado por meio das imagens IKONOS e com a ortoimagem.

4.2 Cálculo da Inferência Populacional

Para o cálculo da inferência populacional, foram utilizados: censo demográfico do ano 2000 (por setor censitário e por bairro) (IBGE, 2000) e estimativa populacional de 2004 (por bairro) (IBGE, 2007), realizados pelo IBGE, setores censitários (em formato *shape*) fornecidos pelo IBGE (IBGE, 2007), dados cadastrais fornecidos pela Prefeitura Municipal de Uberlândia (PMU, 2009) e o volume residencial obtido na primeira etapa.

A estimativa populacional foi realizada por setor censitário, visto que as estimativas seriam conduzidas de modo mais refinado que em nível de bairros, pois os bairros, em sua maioria, agregam vários setores censitários, tendo como referência o ano de 2004, no qual os dados de altura (LiDAR) foram levantados.

Como a estimativa populacional de 2004, gerada pelo IBGE, encontra-se agregada por bairro, foi necessário aplicar a taxa de crescimento populacional por bairro, entre os anos 2000 e 2004, à população por setor censitário do ano 2000, para se obter o dado populacional de referência, utilizado na validação dos resultados. A taxa de crescimento é dada pela razão entre a população no ano 2004 pela população no ano 2000 (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 - População e taxa de crescimento entre 2000 e 2004.

Bairros	População		Taxa de Crescimento
	Ano 2000	Ano 2004	
Centro	7.042	8.008	1,1372
Fundinho	2.746	3.122	1,1369
Martins	9.264	10.535	1,1372
Oswaldo Rezende	19.947	22.686	1,1373
Tabajaras	6.295	7.156	1,1368
TOTAL	45.294	51.507	

Fonte: IBGE, 2000; 2007.

No caso de setores censitários parcialmente contidos na área de estudo, foi aplicado um percentual derivado da razão entre a área do setor contida nos limites da área de estudo e a área total do setor, para se obter a população proporcional da área de estudo no ano 2000 (Tabela 4.6).

A partir da população proporcional calculada no ano 2000, foi aplicada a taxa de crescimento populacional (Tabela 4.5), obtendo-se a população projetada em 2004 por setor censitário contido na área de estudo (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - População por setor censitário, em 2000 e 2004.

Código do Setor	Bairro	Área do SC (m ²)	% do SC na Área de Estudo	Pop. Censo 2000	Pop. Prop. em 2000	Taxa de Crescimento	Pop. Proj. em 2004
317020605000001	Centro	102.793,00	1,00	467	467	1,1372	531
317020605000002	Centro	119.251,00	1,00	544	544		619
317020605000003	Centro	206.859,50	1,00	553	553		629
317020605000004	Centro	87.349,50	1,00	531	531		604
317020605000005	Centro	74.233,00	1,00	590	590		671
317020605000006	Centro	119.400,00	1,00	622	622		707
317020605000007	Centro	237.772,00	1,00	586	586		666
317020605000008	Centro	136.407,50	1,00	638	638		726
317020605000009	Centro	103.119,50	1,00	779	779		886
317020605000010	Centro	87.850,50	1,00	626	626		712
317020605000011	Centro	66.600,00	1,00	464	464		528
317020605000012	Centro	30.405,00	1,00	642	642		730
317020605000045	Fundinho	59.855,50	1,00	638	638	1,1369	725
317020605000046	Fundinho	130.909,00	1,00	659	659		749
317020605000047	Fundinho	103.970,00	1,00	661	661		751
317020605000508	Fundinho	81.512,50	1,00	788	788		896
317020605000081	Martins	98.952,00	0,30	638	190	1,1372	217
317020605000083	Martins	211.153,50	0,56	619	349		397
317020605000084	Martins	131.006,00	1,00	633	633		720
317020605000085	Martins	102.621,00	0,14	860	117		133
317020605000088	Martins	81.005,00	1,00	796	796		905
317020605000089	Martins	102.895,00	1,00	709	709		806
317020605000059	Oswaldo Rezende	83.322,00	0,08	798	63	1,1373	72
317020605000066	Oswaldo Rezende	114.732,00	0,25	763	190		216
317020605000067	Oswaldo Rezende	132.185,50	0,47	624	292		332
317020605000074	Oswaldo Rezende	104.418,00	1,00	722	722		821
317020605000075	Oswaldo Rezende	170.981,00	0,06	802	52		59
317020605000076	Oswaldo Rezende	96.202,50	1,00	804	804		914
317020605000077	Oswaldo Rezende	71.777,00	1,00	760	760		864
317020605000078	Oswaldo Rezende	85.229,50	1,00	838	838		953
317020605000048	Tabajaras	121.761,50	0,38	856	326	1,1368	371
317020605000049	Tabajaras	102.538,50	0,84	651	549		624
317020605000055	Tabajaras	89.967,50	1,00	631	631		717

Assim sendo, a população em 2004 foi projetada por setor censitário com base no crescimento populacional por bairro, obtido a partir da razão entre população estimada em 2004 por bairro (IBGE) pela população por bairro extraída do censo do ano 2000, aplicada à população proporcional no ano 2000.

Seguindo metodologia de Almeida et al. (2009), o cálculo da inferência populacional foi realizado com base na superfície habitável (*SH*). A superfície habitável é a área útil em metros quadrados, dada pela razão entre volume e pé-direito médio:

$$SH = V / PD \quad , \quad (4.1)$$

em que *V* é o volume residencial, proveniente da primeira etapa; e *PD* é o pé-direito médio das edificações.

Supondo uma edificação contendo um pavimento térreo e um assobradado justapostos, com cômodos de 9 m² de área e volume de 27 m³ (3 x 3 x 3 m.) cada, a superfície habitável seria igual ao volume total dividido pelo pé-direito médio (Figura 4.6).

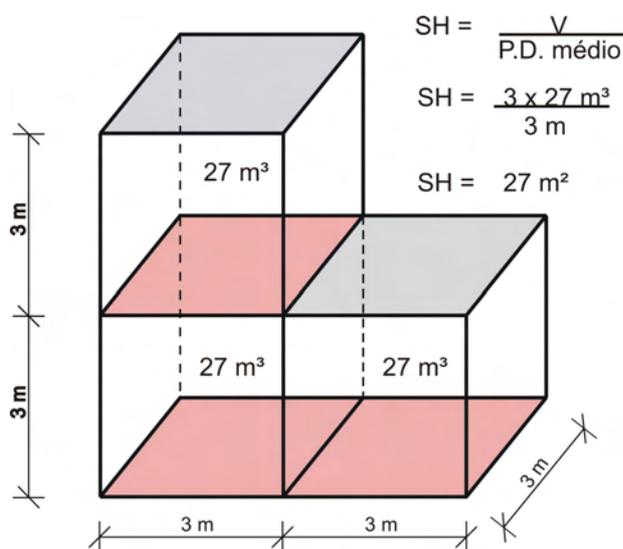


Figura 4.6 - Cálculo da superfície habitável.

A partir do volume, a população inferida por setor censitário será dada pela multiplicação da densidade populacional por setor censitário (D_{sc}) pela superfície habitável por setor censitário (SH):

$$População\ Total = D_{sc} \times SH \quad . \quad (4.2)$$

A densidade populacional por setor censitário (D_{sc}) (ALMEIDA et al., 2009) foi calculada por:

$$D_{sc} = \frac{População\ projetada\ em\ 2004\ por\ setor\ censitário}{Área\ residencial\ do\ setor\ censitário} \quad . \quad (4.3)$$

A área residencial do setor censitário foi calculada através do cruzamento dos dados cadastrais fornecidos pela PMU, em formato *shape*, com os setores censitários, também em *shape*. O cruzamento desses dados permitiu a extração da densidade populacional por setor censitário (D_{sc}) (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 - Área total construída e densidade populacional por setor censitário.

Código do Setor	Área Residencial (m²)	Pop. Projetada em 2004	Densidade Populacional
317020605000001	50.501,21	531	0,010516033
317020605000002	49.916,73	619	0,012393376
317020605000003	45.849,03	629	0,013716138
317020605000004	32.274,92	604	0,018709671
317020605000005	57.489,66	671	0,011670760
317020605000006	74.253,13	707	0,009526042
317020605000007	39.859,73	666	0,016718609
317020605000008	40.404,99	726	0,017956537
317020605000009	44.049,82	886	0,020110839
317020605000010	54.243,23	712	0,013123982
317020605000011	42.716,96	528	0,012352490
317020605000012	64.363,82	730	0,011343055
Total	595.923,22		
317020605000045	44.031,83	725	0,016473134
317020605000046	49.340,77	749	0,015184543
317020605000047	50.183,66	751	0,014974811
3170206050000508	62.558,61	896	0,014320605
Total	206.114,88		
317020605000081	6.980,92	217	0,03101796
317020605000083	15.335,60	397	0,025882837
317020605000084	37.915,01	720	0,018985821
317020605000085	2.012,12	133	0,065903492
317020605000088	48.991,99	905	0,018476717
317020605000089	62.087,33	806	0,012986141
Total	173.322,98		
317020605000059	3.694,22	72	0,01943458
317020605000066	3.232,77	216	0,066900009
317020605000067	10.610,56	332	0,031320164
317020605000074	45.649,61	821	0,017987681
317020605000075	1.618,74	59	0,036563636
317020605000076	46.323,06	914	0,019739394
317020605000077	58.897,44	864	0,014675475
317020605000078	73.588,20	953	0,012951225
Total	243.614,63		
317020605000048	67.528,16	371	0,005489343
317020605000049	31.371,98	624	0,019888249
317020605000055	48.938,10	717	0,014657717
Total	147.838,24		

A comparação entre a população inferida e de referência foi realizada através de uma regressão linear simples:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad , \quad (4.4)$$

em que:

Y é a população estimada pelo IBGE (referência);

X é a população inferida neste trabalho;

β_0 é o intercepto;

β_1 coeficiente angular;

ε é o termo do erro aleatório com $E(\varepsilon_i)=0$ e $\sigma^2(\varepsilon_i)= \sigma^2$.

Para que a população de referência (IBGE) e a inferida neste trabalho sejam correspondentes, espera-se que β_0 seja igual a zero ($\beta_0 = 0$); e que β_1 seja diferente de zero e igual a 1 ($\beta_1 \neq 0$; $\beta_1 = 1$). Estas hipóteses serão testadas usando-se o teste *t-Student*. Para maiores informações a respeito desta estatística, consultar Neter et al. (1996).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão divididos em: MDS e ortomagem IKONOS, LiDAR e inferência populacional.

5.1 Produtos do estéreo-par IKONOS: MDS e ortomagem

Após a geração e geocodificação do MDS (Figura 5.1), foi realizada a validação do modelo, através do cálculo das discrepâncias dos valores altimétricos h de cada ICP sobre o MDS (Tabela 5.1).

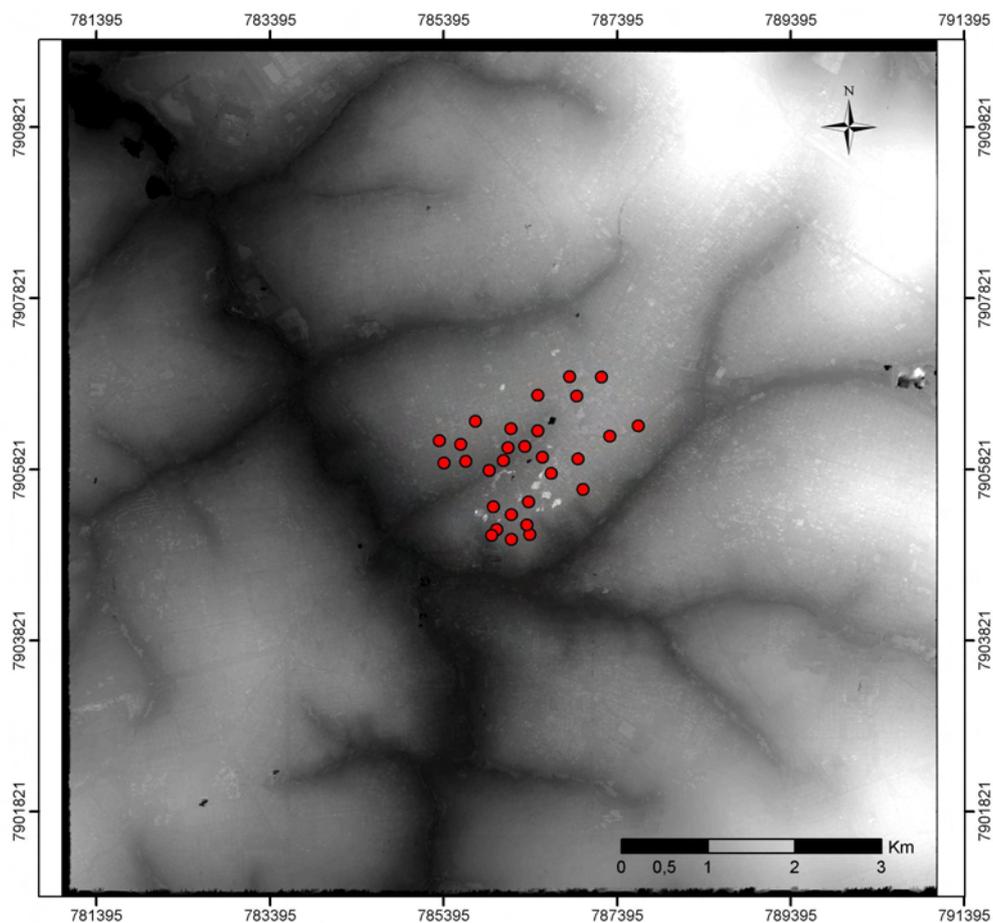


Figura 5.1 - ICPs sobre MDS gerado através do estéreo-par IKONOS.

Tabela 5.1 - Discrepâncias altimétricas entre ICPs (H_c) e MDS (H_r).

ID	H_c (m)	H_r (m)	Δh (m)
00	852,323	839,878	-12,445
01	831,667	820,771	-10,896
02	822,974	813,003	-9,971
04	814,446	801,934	-12,512
05	840,552	830,927	-9,625
06	854,826	842,322	-12,504
07	838,332	827,027	-11,305
08	851,009	839,246	-11,763
10	858,172	844,877	-13,295
11	853,264	840,403	-12,861
12	847,657	835,611	-12,046
15	837,970	827,091	-10,879
16	827,100	814,680	-12,420
19	823,995	812,564	-11,431
20	845,108	833,442	-11,666
21	833,255	820,748	-12,507
22	818,212	805,582	-12,630
23	820,335	810,735	-9,600
25	841,993	831,254	-10,739
26	827,691	815,809	-11,882
28	825,222	813,804	-11,418
30	814,015	802,406	-11,609
31	849,386	837,164	-12,222
33	828,066	816,252	-11,814
43	834,381	822,738	-11,643
48	840,249	835,740	-4,509
53	826,508	817,074	-9,434
54	835,699	825,774	-9,925
55	831,036	820,579	-10,457

A partir das discrepâncias altimétricas, foram calculados: média, desvio padrão e os testes estatísticos descritos na metodologia. A Tabela 5.2 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.2 - Resultado dos testes estatísticos realizados.

<i>DESVIO PADRAO</i>	1,669
<i>MÉDIA (BIAS)</i>	-11,242
<i>ERRO MIN</i>	-4,509
<i>ERRO MAX</i>	-13,295
<i>t (amostral)</i>	36,282
<i>t(20;5%)</i>	1,701
<i>SEM TENDÊNCIA</i>	FALSO
<i>Qui-quadrado (Classe A Escala 1:10.000)</i>	28,063
<i>Qui-quadrado (20;5%)</i>	37,916
<i>DSM ATENDE À PRECISÃO 1:10.000 CLASSE A</i>	VERDADEIRO
<i>EMQ</i>	1,669
<i>PEC</i>	2,74

Apesar de apresentar tendência, o MDS atendeu à precisão 1:10.000 para Classe A, portanto o mesmo foi utilizado na geração da ortoimagem (Figura 5.2).

Considerando-se a acurácia posicional, a ortoimagem foi então validada através dos mesmos ICPs utilizados na validação do MDS, apresentando as discrepâncias planimétricas mostradas na Tabela 5.3.

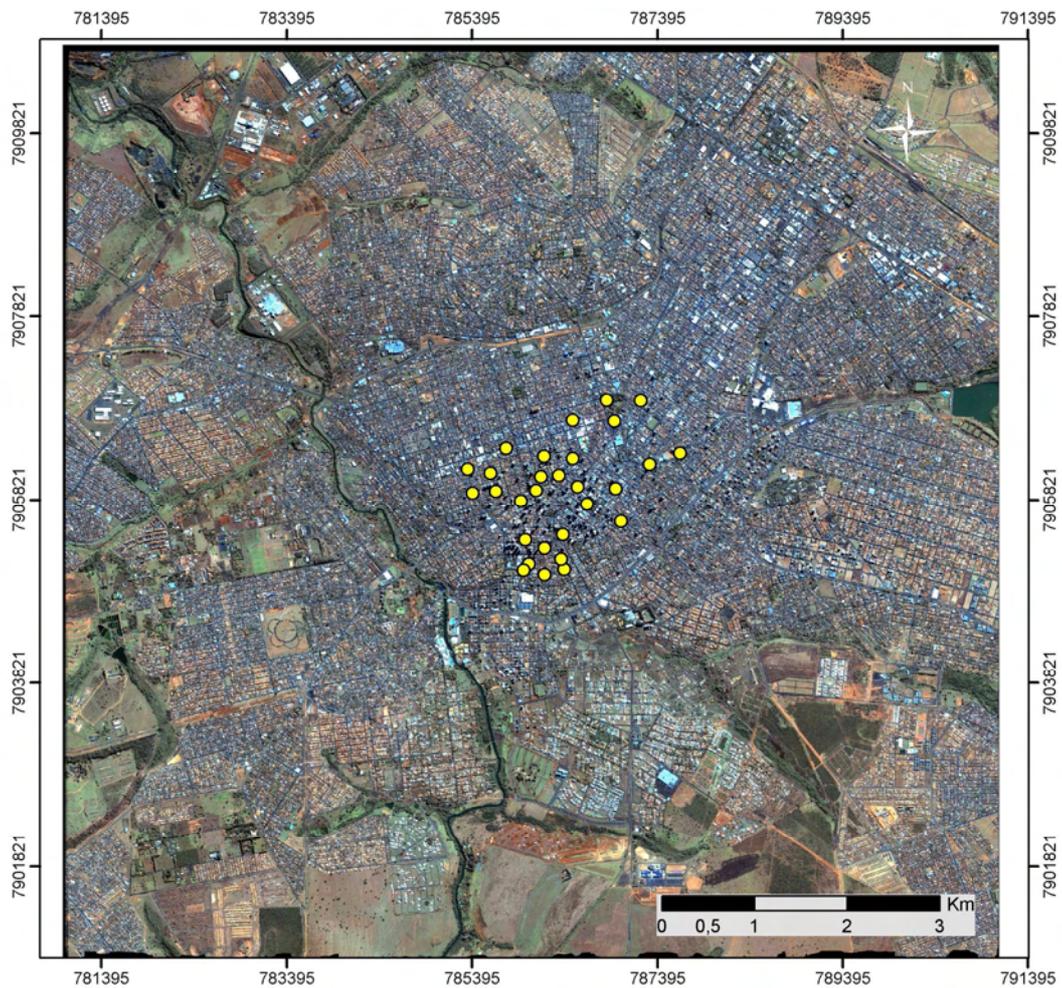


Figura 5.2 - Ortoimagem gerada através do MDS e ICPs (em amarelo).

Tabela 5.3 - Discrepâncias planimétricas entre ortoimagem e ICPs.

ID ICP	ΔE (m)	ΔN (m)	Resultante (m)
00	0,627	-0,410	0,749
01	-0,963	-0,257	0,997
02	0,186	0,105	0,214
04	-0,286	0,346	0,449
05	0,242	-0,181	0,302
06	-0,257	-0,898	0,934
07	0,641	0,572	0,859
08	0,431	0,002	0,431
10	0,087	-0,416	0,425
11	-0,134	0,036	0,139
12	-0,376	-0,747	0,836
15	-0,504	-0,403	0,645
16	0,269	0,271	0,382
19	-0,161	0,755	0,772
20	-0,177	0,581	0,607
21	0,752	-0,007	0,752
22	0,528	0,391	0,657
23	-0,470	0,273	0,544
25	0,763	-0,533	0,931
26	-0,122	0,035	0,127
28	-0,065	0,267	0,275
30	-0,487	0,084	0,494
31	0,180	-0,469	0,502
33	-0,095	-0,060	0,112
43	-0,138	0,291	0,322
48	0,002	-0,035	0,035
53	-0,394	0,599	0,717
54	-0,310	0,465	0,559
55	-0,485	0,798	0,934

A partir das discrepâncias planimétricas, obtiveram-se os seguintes resultados (Tabela 5.4):

Tabela 5.4 - Resultado dos testes estatísticos realizados na ortoimagem.

	ΔE	ΔN	Resultante
Desvio Padrão	0,429	0,441	0,615
Média	-0,025	0,050	0,056
EMQ	0,429	0,444	0,618
Análise de Tendência			
t_x	0,310	0,613	0,490
$t_{(n-1; \alpha/2)}$	1,701	1,701	1,701
$ t_x < t_{(n-1; \alpha/2)}$	verdadeiro	verdadeiro	verdadeiro
Análise de Precisão - Classe A			
$\sigma_x (1:2.000 - \text{Classe A})$	0,424	0,424	0,600
χ^2_x	28,565	30,258	29,411
$\chi^2_{(n-1, \alpha)}$	37,916	37,916	37,916
$\chi^2_x \leq \chi^2_{(n-1, \alpha)}$	verdadeiro	verdadeiro	verdadeiro

Os resultados dos testes estatísticos mostram que tanto a resultante, como as componentes X e Y , não apresentam tendência e possuem precisão compatível com a escala 1:2.000 para a Classe A.

A alta precisão alcançada pela ortoimagem se deve ao fato de se tratar de terreno plano e pela qualidade do MDS, que foi gerado com GCPs de alta qualidade e bem distribuídos.

A partir da ortoimagem, os limites das edificações foram digitalizados e posteriormente classificados de acordo com os tipos de uso, através do trabalho de campo.

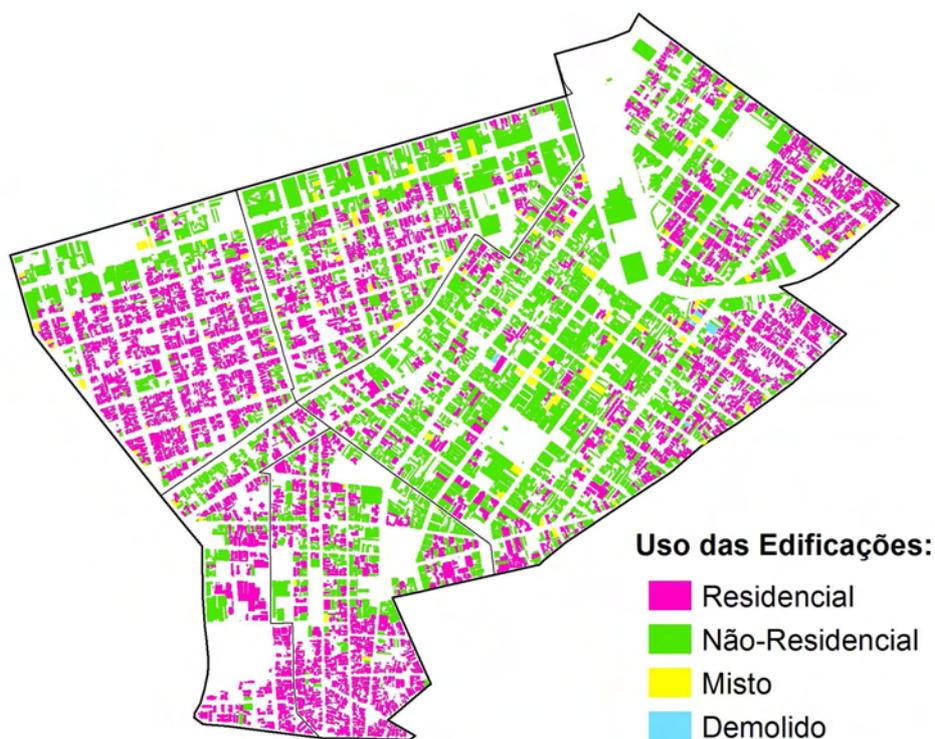


Figura 5.3 - Tipo de uso das edificações da área de estudo.

Os polígonos classificados como residenciais são o produto final dessa sub- etapa e foram cruzados com o volume gerado pelo MDA para a obtenção do volume residencial.

5.2 Produtos gerados a partir dos dados LiDAR

Conforme metodologia apresentada na Seção 4.1.2, foram gerados: MDS e MDT (Figura 5.4), MDA (Figura 5.5), imagem intensidade e hipsométrica do MDS (Figura 5.6), a partir dos dados LiDAR.

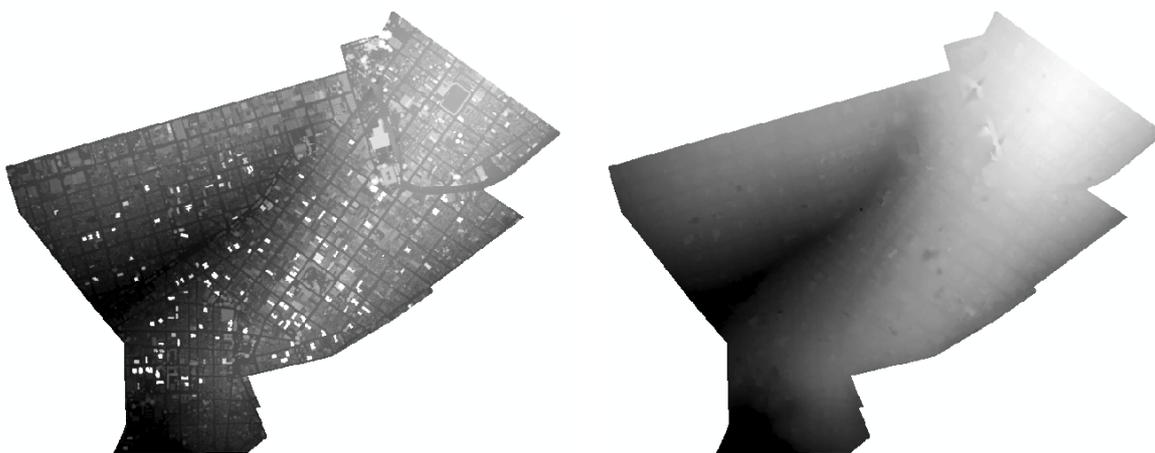


Figura 5.4 - MDS e MDT gerados a partir dos pontos LiDAR.



Figura 5.5 - MDA obtido pela subtração entre o MDS e o MDT.

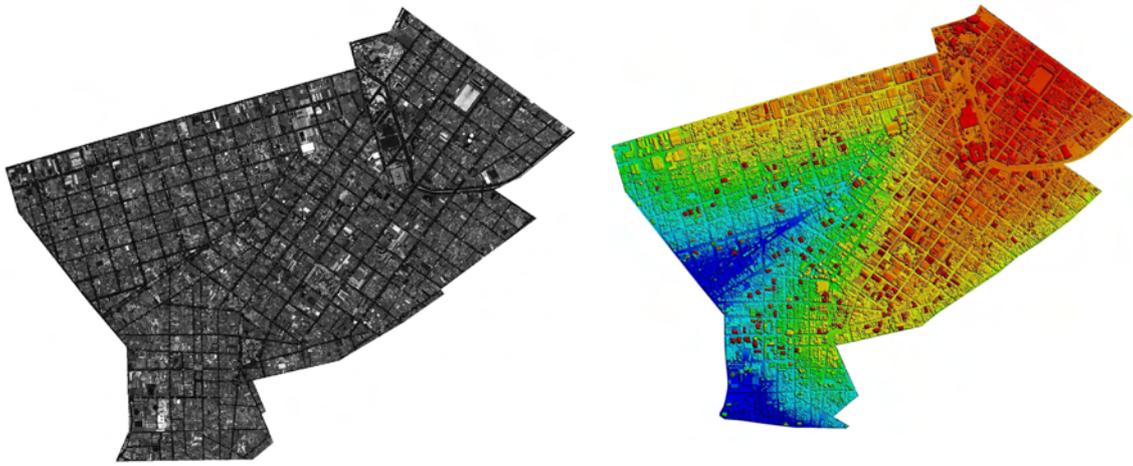


Figura 5.6 - Imagem intensidade e hipsométrica do MDS.

O MDS e MDT foram validados por Leonardi (2010), com base em 42 ICPs (Figura 5.7) localizados em regiões notáveis e bem distribuídos na área de estudo, para realizar o controle de qualidade dos modelos.

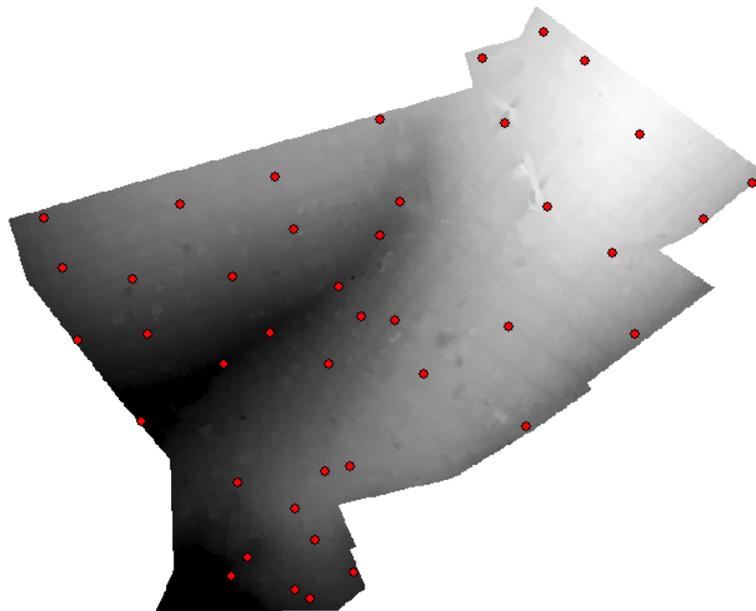


Figura 5.7 - Distribuição dos ICPs utilizados na validação dos modelos.

As coordenadas dos pontos levantados em campo e suas respectivas coordenadas no MDS e MDT, discrepâncias e erro planimétrico são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Discrepâncias entre as coordenadas do GPS e MDS e MDT.

ID	N (m)	E (m)	H (GPS) (m)	H (MDS) (m)	DISCRE-PÂNCIAS (m)	H (MDT) (m)	DISCRE-PÂNCIAS (m)
00	786930,2069	7906678,589	862,19	862,333	0,147	862,418	0,232
01	785344,6567	7906157,567	841,3	841,569	0,272	841,413	0,116
02	785400,5575	7905897,704	832,59	833,079	0,486	833,582	0,989
03	785627,9055	7905607,981	816,59	816,69	0,102	816,863	0,275
05	786374,7217	7905445,64	850,5	850,79	0,291	850,671	0,172
06	787310,8831	7906209,778	864,65	864,41	-0,244	864,968	0,314
07	786532,6025	7905967,038	848,08	848,807	0,725	848,521	0,439
08	787640,0632	7906333,317	860,74	861,193	0,456	861,214	0,477
09	787811,811	7906462,187	858,59	858,851	0,264	859,149	0,562
10	787213,4572	7906900,227	867,91	868,377	0,469	868,459	0,551
11	786848,2195	7906907,157	863,14	863,719	0,581	863,34	0,202
12	786480,2593	7906688,856	857,36	857,79	0,433	858,023	0,666
13	786103,5212	7906482,958	854,57	855,002	0,429	855,08	0,507
14	785278,7872	7906335,689	844,12	844,812	0,692	844,998	0,878
15	786172,7068	7906297,562	847,77	848,066	0,293	848,496	0,723
16	786331,5748	7906090,668	837,01	837,173	0,16	837,165	0,152
18	786231,2991	7904970,405	832,82	833,432	0,608	833,639	0,815
19	786176,4802	7905002,29	833,66	834,037	0,381	834,272	0,616
20	786637,2702	7905777,079	854,86	855,274	0,418	855,461	0,605
21	786481,2863	7906274,046	843,16	843,413	0,257	843,404	0,248
22	786086,1659	7905925,498	828,13	828,374	0,249	828,427	0,302
23	786006,4341	7905119,966	829,93	830,482	0,551	830,56	0,629
24	786411,991	7905983,257	842,91	843,419	0,506	843,333	0,42
25	785763,0409	7906385,382	851,76	852,148	0,387	852,525	0,764
26	786140,0165	7906074,264	837,4	837,68	0,279	837,617	0,216
27	785950,9508	7906126,429	842,86	842,822	-0,041	843,018	0,155
28	785650,7995	7905917,683	835	835,551	0,548	835,834	0,831
29	787410,4093	7906631,984	869,66	870,478	0,819	870,313	0,654
30	785948,6307	7905053,606	823,75	824,211	0,457	824,301	0,547
31	786942,7542	7905946,358	859,09	859,109	0,015	859,531	0,437
32	787391,4899	7905921,738	852,05	852,587	0,54	852,889	0,842
33	785970,5992	7905385,27	837,83	838,344	0,517	838,348	0,521
43	785594,011	7906114,099	844,1	844,621	0,522	844,972	0,873
45	786552,4989	7906391,97	847,95	848,346	0,4	848,369	0,423
46	786297,0387	7905811,49	841,56	842,121	0,561	842,004	0,444
47	787078,5013	7906374,65	866,48	866,388	-0,089	866,424	-0,053
48	787002,4521	7905588,475	850,04	850,648	0,605	850,486	0,443
49	786282,8532	7905427,037	847,74	848,27	0,529	848,164	0,423
53	786388,8976	7905063,791	835,99	836,893	0,907	836,576	0,59
54	786178,1386	7905291,668	845,2	845,798	0,597	845,767	0,566
55	786355,2558	7905171,258	840,68	840,894	0,21	841,249	0,565
57	787068,9206	7907004,474	865,45	866,277	0,826	865,78	0,329

A partir das discrepâncias altimétricas, foram calculados média, desvio padrão e erro médio quadrático, para o MDS e MDT, conforme mostra a Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.6 - Estatística das discrepâncias altimétricas.

	MDS	MDT
MÉDIA	0,408	0,484
DESVIO PADRÃO	0,246	0,251
EMQ – (N)	0,475	0,474

O valor do *EMQ* é considerado significativo, para o MDS e MDT, apresentando problemas quanto à tendência, ou seja, indica influências sistemáticas. Os resultados para análise de tendência do MDS e MDT são apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Análise de tendência do MDS e MDT.

	MDS	MDT
<i>n</i>	42 pontos	42 pontos
$\hat{\mu}$	0,4076 m	0,4871 m
$\hat{\sigma}$	0,2463 m	0,2405 m
$EP_{1:5.000}$	0,6667 m	0,6667 m
σ_x	0,6667	0,6667
$t_{41;0,05}$	1,6829	1,6829
t_H	10,7259	3,0258
Análise	$ t_H > t_{amostral}$	$ t_H > t_{amostral}$
Componente H	apresenta tendência	apresenta tendênci

Os resultados da Tabela 5.7 mostram que a comparação do valor de *t* amostral com o valor teórico indica uma existência de tendência na direção H, no MDS e MDT.

Considerando-se que há influências sistemáticas na coordenada H, toma-se o valor médio do intervalo de influência com sinal contrário ($\hat{\mu} = -0,4076$) e se introduz o mesmo nesta coordenada, como forma de diminuir as discrepâncias.

Os resultados da análise de precisão do MDS e MDT são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Análise de precisão do MDS e MDT.

	MDS	MDT
n	42 pontos	42 pontos
$\chi^2_{41:10\%}$	52,9485	52,9485
$\hat{\sigma}$	0,2463m	0,2405
σ_x	0,3333m	16,6667
$\chi^2_{H(Classe A)}$	22,3768	0,0085
Análise	$\chi^2_{(Classe A)} < \chi^2_{41:10\%}$	$\chi^2_{(Classe A)} < \chi^2_{41:10\%}$
Escala a ser utilizada	1:5.000	1:5:000

Apesar da falta de exatidão, o MDS e MDT apresentam precisão para a escala 1:5.000. Desta forma, os modelos atenderiam ao quesito de precisão na referida escala, porém uso deve observar algumas restrições em vista da tendência calculada.

A junção do MDS com a ortoimagem resultou em um modelo tridimensional da área de estudo (Figura 5.8).

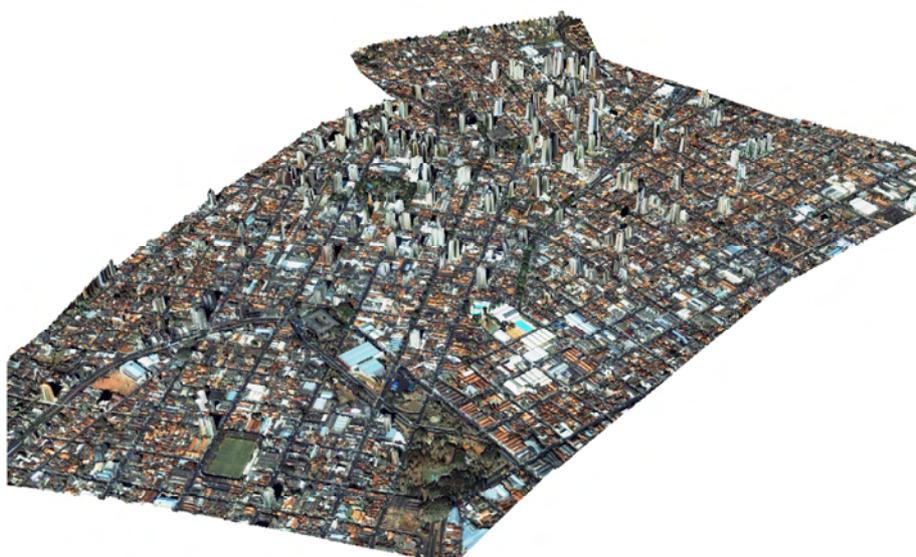


Figura 5.8 - Modelo 3D gerado, com a sobreposição da ortoimagem IKONOS fusionada em composição colorida verdadeira ao MDS.

Tanto o MDS quanto o MDT apresentaram tendência, porém, ambos atingiram a precisão PEC classe “A” para a escala 1:5.000. Portanto, o MDA originado da subtração entre o MDS e o MDT foi aceito para utilização no cálculo do volume residencial.

O MDA foi cruzado com os polígonos residenciais e setores censitários no ArcGis, utilizando-se a ferramenta *Zonal Statistics*, para cálculo do volume residencial por setor censitário.

5.3 Cálculo do Volume, Superfície Habitável e Inferência Populacional

A partir do volume residencial, calculou-se a superfície habitável, adotando-se um pé-direito médio igual a 3 metros. Por fim, a população a ser inferida foi calculada multiplicando-se a densidade pela superfície habitável, por setor censitário (Tabela 5.13).

Tabela 5.9 - População inferida através do volume residencial, superfície habitável e densidade.

Bairro	ID Setor Censitário	Volume Residencial (m³)	Superfície Habitável (m²)	Densidade	População Inferida
Centro	317020605000001	151.197,7038	50.399,2346	0,010516033	530
	317020605000002	142.334,0994	47.444,6998	0,012393376	588
	317020605000003	142.824,4577	47.608,1526	0,013716138	653
	317020605000004	112.401,7640	37.467,2547	0,015320044	574
	317020605000005	145.491,8051	48.497,2684	0,01315538	638
	317020605000006	250.051,3910	83.350,4637	0,008326288	694
	317020605000007	128.300,1463	42.766,7154	0,014310194	612
	317020605000008	118.953,8972	39.651,2991	0,018612253	738
	317020605000009	134.703,4820	44.901,1607	0,020110839	903
	317020605000010	157.040,7567	52.346,9189	0,013123982	687
	317020605000011	124.104,5332	41.368,1777	0,01235249	511
	317020605000012	183.812,9122	61.270,9707	0,011343055	695
	Total	1.791.216,9486	597.072,3162		7823
Fundinho	317020605000045	177.197,6088	59.065,8696	0,012731549	752
	317020605000046	238.071,0416	79.357,0139	0,009009916	715
	317020605000047	162.673,1679	54.224,3893	0,014679741	796
	3170206050000508	105.163,1557	35.054,3852	0,024162455	847
		Total	683.104,9740	227.701,6580	
Martins	317020605000081	18.279,7321	6.093,2440	0,03101796	189
	317020605000083	35.119,7974	11.706,5991	0,031435261	368
	317020605000084	118.351,4813	39.450,4938	0,018985821	749
	317020605000085	1.684,2810	561,4270	0,174555196	98
	317020605000088	164.152,5400	54.717,5133	0,017252246	944
	317020605000089	184.350,3831	61.450,1277	0,012986141	798
		Total	521.938,2149	173.979,4050	
Oswaldo Rezende	317020605000059	10.651,1180	3.550,3727	0,01943458	69
	317020605000066	8.654,7074	2.884,9025	0,066900009	193
	317020605000067	25.957,7187	8.652,5729	0,031320164	271
	317020605000074	132.423,9600	44.141,3200	0,017987681	794
	317020605000075	7.056,1910	2.352,0637	0,036563636	86
	317020605000076	154.564,0186	51.521,3395	0,018652465	961
	317020605000077	174.781,3909	58.260,4636	0,014675475	855
	317020605000078	165.621,3987	55.207,1329	0,017896238	988
		Total	679.710,5033	226.570,1678	
Tabajaras	317020605000048	238.279,8967	79.426,6322	0,005061275	402
	317020605000049	105.288,3041	35.096,1014	0,016554545	581
	317020605000055	168.443,6906	56.147,8969	0,012449264	699
		Total	512.011,8914	170.670,6305	

As discrepâncias encontradas entre a inferência e o dado de referência encontram-se na Tabela 5.14.

Tabela 5.10 - Discrepâncias entre o dado inferido e o dado de referência.

Bairro	ID Setor Censitário	População Inferida	População Referência	Discrepâncias
Centro	317020605000001	530	531	-1
	317020605000002	588	619	-31
	317020605000003	653	629	24
	317020605000004	574	604	-30
	317020605000005	638	671	-33
	317020605000006	694	707	-13
	317020605000007	612	666	-54
	317020605000008	738	726	12
	317020605000009	903	886	17
	317020605000010	687	712	-25
	317020605000011	511	528	-17
	317020605000012	695	730	-35
	Total	7823	8008	-185
Fundinho	317020605000045	752	725	27
	317020605000046	715	749	-34
	317020605000047	796	751	45
	317020605000508	847	896	-49
	Total	3110	3122	-12
Martins	317020605000081	189	217	-28
	317020605000083	368	397	-29
	317020605000084	749	720	29
	317020605000085	98	133	-35
	317020605000088	944	905	39
	317020605000089	798	806	-8
	Total	3146	3177	-31
Oswaldo Rezende	317020605000059	69	72	-3
	317020605000066	193	216	-23
	317020605000067	271	332	-61
	317020605000074	794	821	-27
	317020605000075	86	59	27
	317020605000076	961	914	47
	317020605000077	855	864	-9
	317020605000078	988	953	35
	Total	4217	4233	-16
Tabajaras	317020605000048	402	371	31
	317020605000049	581	624	-43
	317020605000055	699	717	-18
	Total	1682	1712	-30

A Figura 5.9 mostra a regressão linear realizada entre o dado inferido e de referência. Nota-se um bom ajuste entre os valores ($R^2 = 0,99$; $t = 47,8$; $\text{valor-}P < 0,01$).

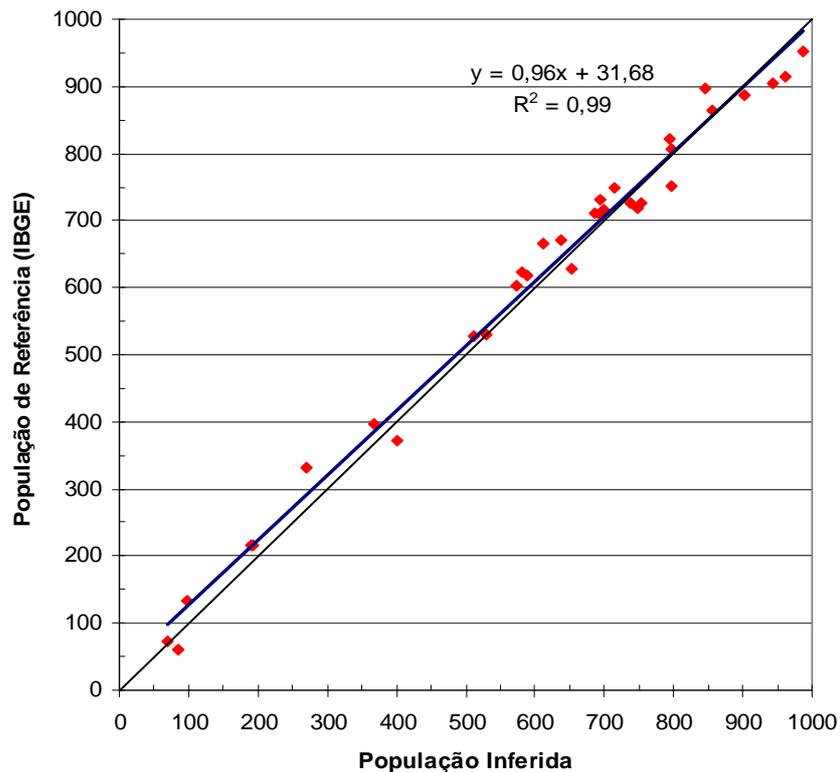


Figura 5.9 - Regressão linear entre os dados inferido e de referência.

O teste t indicou que $\beta_1 = 1$ ($t = -1,92$; $\text{valor-}P = 0,06$) e que $\beta_0 \neq 0$ ($t = 2,39$; $\text{valor-}P = 0,02$), adotando-se 5% de significância. A inferência realizada ficou abaixo do dado de referência, em média, em 31 habitantes.

As discrepâncias entre o dado inferido e o dado de referência mostram, de forma geral, a ocorrência de uma sub-estimativa sistemática no cálculo realizado (Tabela 5.14 e Figura 5.9). O total de população inferida (19.978 habitantes) ficou 1,35% abaixo da população de referência (20.252 habitantes). Essa tendência se repete ao se analisar os resultados em nível de bairro. Entretanto, se as discrepâncias forem analisadas de forma pontual (por setor censitário), percebe-se uma oscilação nos valores, ora positivos, ora negativos (Tabela 5.12).

Essa sub-estimativa pode ser explicada por incertezas introduzidas ao se reamostrar o dado de referência, originalmente disponível por bairro, para o

nível de setores censitários, bem como por eventuais inconsistências nos dados cadastrais fornecidos pela Prefeitura Municipal de Uberlândia (PMU). Outro agravante reside no fato de que o cadastro da PMU apresenta os dados de área residencial construída cumulativos para o ano de 2009, sem explicitar o ano de conclusão das habitações lançadas, impossibilitando a sua reconstituição para o ano de análise (2004). Apesar da sub-estimativa, o dado de população inferida pode ser considerado equivalente ao dado de referência em um nível de significância de 1%.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver um método diferenciado para inferir população em áreas urbanas por meio de Sensoriamento Remoto e, em vista dos resultados obtidos, destacam-se as seguintes conclusões:

- a) A utilização de pontos de controle de qualidade, bem distribuídos em área e altimetria, e o fato de o terreno utilizado ter pouca variação altimétrica (podendo ser considerado plano) fizeram com que a precisão cartográfica da ortoimagem superasse a escala recomendada pelo distribuidor das imagens.
- b) Os modelos digitais advindos do LiDAR apresentam uma precisão altimétrica elevada, porém a delimitação de bordas é imprecisa, dificultando a extração de edificações.
- c) A combinação de informação espectral, proveniente de imagens ópticas orbitais ou aéreas com o LiDAR é de suma importância para a interpretação e identificação das feições de interesse. Para melhor extração de bordas, sugere-se o uso de imagens, e para conhecimento da altura, o LiDAR.
- d) Mesmo de posse de dados com alta precisão planialtimétrica, como imagens IKONOS e LiDAR, muitas vezes não é possível delimitar edificações residenciais utilizando apenas informação espectral, tamanho, textura ou altura das regiões segmentadas, e dessa forma, é necessário recorrer à pesquisa de campo ou a cadastros confiáveis para obtenção da informação.
- e) A ausência de estimativa populacional por setor censitário para o ano de 2004 (ano utilizado para a inferência) constitui-se na inserção de incerteza nos dados utilizados como referência, pois foi necessário

aplicar a taxa de crescimento populacional por bairro para a obtenção dos valores de referência em nível de setor censitário.

- f) O cálculo do percentual de superfície dos setores censitários parcialmente contidos na área de estudo, efetuado com fins a ajustar proporcionalmente o número de habitantes nesses setores, constituiu-se igualmente em procedimento passível de introdução de incerteza nos dados de referência.
- g) Os dados cadastrais fornecidos pela PMU apresentavam inconsistência quanto à localização dos imóveis residenciais no campo "bairro". O dado foi editado, para que o cálculo de área residencial construída por bairro pudesse ser executado sem a inclusão de erros.
- h) Se a PMU mantivesse um cadastro de imóveis atualizado e fosse possível realizar consultas por ano de interesse, o cálculo da área residencial construída seria mais preciso, e conseqüentemente, os resultados também. Assim, o cálculo da inferência foi realizado para o ano de 2004, mas a consulta nos dados da PMU foi realizada para o ano de 2009 (data da consulta).
- i) A comparação entre a inferência populacional realizada e o dado de referência mostra que ocorreu uma sub-estimativa de 1,35%. Essa sub-estimativa pode ser explicada basicamente pelo acúmulo de incertezas na geração do dado de referência por setor censitário e pelo fato de o cadastro de área residencial construída referir-se ao ano de 2009.
- j) Em termos estatísticos, os dados de população inferidos podem ser considerados equivalentes aos dados de referência fornecidos pelo IBGE em um nível de significância de 1%.

k) Apesar do alto custo de aquisição dos dados LiDAR e de plataformas computacionais para o seu processamento, acredita-se que, a exemplo das imagens de satélite, a acessibilidade a esse tipo de dado e aos aplicativos correlatos será facilitada no médio prazo, viabilizando financeiramente o emprego do método proposto por parte de órgãos públicos de planejamento local.

Como trabalho futuro, pretende-se explorar a classificação da nuvem de pontos LiDAR, com o intuito de identificar os limites das edificações de forma precisa, permitindo assim a automatização do processo de digitalização desses polígonos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADENIYI, P. An aerial photographic method for estimating urban population. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, n.4, p.545-560, 1993.

ALEXANDRINI JUNIOR, M. J. **Estimativa da altura da vegetação utilizando dados Airborne Laser Scanner**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2005.

ALMEIDA, C. M.; OLIVEIRA, C. G.; RENNÓ, C. D.; FEITOSA, R. Q. **Object-based image analysis and 3D urban modeling to support studies of informal settlements**. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal. Trabalho apresentado na Mesa Redonda "Abordagens Recentes em Sensoriamento Remoto de Áreas Urbanas". São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2009.

AMARAL, S. **Geoinformação para estudos demográficos: representação espacial de dados de população na Amazônia Brasileira**. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2003.

AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; QUINTANILHA, J. A. Interpoladores Espaciais para Geração de Superfícies de Densidade Populacional na Amazônia Brasileira: problemas e perspectivas. In: GEOINFO, 2002, Caxambu. **Anais...** Belo Horizonte: IV Simpósio Brasileiro de Geoinformática, 2002. p. 73-82.

AMARAL, S.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; QUINTANILHA, J. A. DMSP/OLS night-time light imagery and urban population estimates in the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 5, p. 855-870, 2006.

AXELSSON, P. Processing of laser scanner data – algorithms and applications. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 138-147, 1999.

AXELSSON, P. DEM generation from Laser Scanner data using adaptive TIN models. **IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, part B4/1, p 110-117, 2000.

BAILEY, T.C.; GATRELL, A.C. **Interactive spatial data analysis**. Essex, England: Longman Scientific & Technical, 1995.

BALTSAVIAS, E. P. Airborne Laser Scanning: basic relations and formulas. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 54, p. 199-214, 1999.

BALTSAVIAS, E. PATERAKI, M. ZHANG, I. Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo images and their use for 3D guiding modelling. **ISPRS joint Workshop "High Resolution Mapping From Space 2001"**, Hanover, Germany, 2001.

BOCCARDO, P; MONDINO, E. B; TONOLO, F. G; LÍNGUA, A. Orthorectification of high resolution satellite images. In: .XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul, Turquia. **Proceedings...** Istanbul, Turquia: ISPRS, 2004.

BOLAND, J. Cameras and sensing systems: overview of state-of-the-art sensors. In: McGlone, J. C. (ed). **Manual of photogrammetry**. 5a ed. Bethesda: ASP&RS, p 629-636, 2004.

BRACKEN, I. A surface model approach to small area population estimation. **Town Planning Review**, v. 62, n. 2, p. 225-237, 1991.

BRACKEN, I.; MARTIN, D. The generation of spatial population distributions form Census centroid Data Source. **Environment and Planning A**, v. 21, n. 4, p. 537-543, 1989.

BRASIL. **Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984**. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 de junho de 1984.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria digital**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <<http://www.efoto.eng.uerj.br/ebook-pt.html>> Acesso em: abril 2009.

CARVALHO, J. A. M.; SAWYER, D. O.; RODRIGUES, R. do N. **Introdução a alguns conceitos básicos e medidas em demografia**. 2ª ed. São Paulo: ABEP, 1998. 64 p.

CENTENO, J. A. S; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas. In: Almeida, C. M.; Camara, G.; Monteiro, A. M. V. **Geoinformação em urbanismo: cidade real x cidade virtual**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 366 p.

CHEN, K. An approach to linking remotely sensed data and areal census data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n.1, p. 37-48, Jan. 2002.

CLAYTON, C; ESTES, J. Image analysis as a check on census enumeration accuracy. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, p. 757-765, 1980.

COLLINS, W. G.; EL-BEIK, A. H. A. Population census with the aid of aerial photographs: an experiment in the city of Leeds. **Photogrammetric Record**, v. 7, p. 16-26, 1971.

COSTA, E. R. **Geração automática de modelos digitais de terreno a partir de imagens de câmaras digitais**. 142 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2006.

DOBSON, J. E.; BRIGHT, E. A.; COLEMAN, P. R.; DURFEE, R. C.; WORLEY, B. A. LandScan: a global population database for estimating populations at risk. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66. n. 7, p. 849-857, 2000.

DUEKER, K.; HORTON, F. Toward geographic urban change detection systems with Remote Sensing inputs. In: 37th Annual Meeting, American Society of Photogrammetry, 1971, [S.l.]. **Technical Papers...** [S.l.]: ASPRS, 1971. p. 204-218.

DURAND, C.; SOUZA, I. M. E.; PEREIRA, M. N.; FREITAS, C. C. Análise do ambiente residencial urbano visando a inferência populacional a partir do uso de dados de sensoriamento remoto orbital de alta resolução. In: XIV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, 2004, Caxambu/MG. **Anais...** Caxambu: ABEP, 2004.

DURAND, C.; SOUZA, I. M. E.; PEREIRA, M. N.; FREITAS, C. C. Análise do ambiente residencial urbano visando a inferência populacional a partir do uso de dados de sensoriamento remoto orbital de alta resolução. **Geografia**, v. 31, p. 371-402, 2006.

DURAND, C.; PEREIRA, M. N.; MOREIRA, J. C.; FREITAS, C. C. Análise da correlação entre população e área (km²) visando a inferência populacional por meio do uso de imagens orbitais. **Geografia**, v. 16, p. 113-142, 2007.

DUREAU, F. **El metodo de muestreo de areas com base en imagenes de satelite: una solución para la observación de las poblaciones urbanas**. Bogotá: CEDE – ORSTOM, 1989 (CEDE/086).

EICHER, C. L.; BREWER, C. A. Dasymeric mapping and areal interpolation: implementation and evaluation. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 28, n. 2, p. 125-138, 2001.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation and applications**. Boston, MA : Artech House, 2005. 257 p.

FALAT, R. D. Perfilamento a laser para detecção de construções clandestinas e determinação de altura de edificações. In: XXII Congresso Brasileiro de Cartografia, 2005, Macaé. **Anais...** Macaé, Rio de Janeiro: CBC, 2005.

- FISHER, P. F., LANGFORD, M. Modeling the errors in areal interpolation between zonal systems by Monte Carlo simulation. **Environment and Planning A**, v. 27, p. 211-224, 1995.
- FISHER, P. F., LANGFORD, M. Modeling sensitivity to accuracy in classified imagery: a study of areal interpolation by dasymetric mapping. **Professional Geographer**, v. 48, n. 3, p. 299-309, 1996.
- FLOWERDEW, R., GREEN, M. Statistical methods for inference between incompatible zonal systems. In: GOODCHILD, M.; GOPAL, S. (Ed). **Accuracy of spatial databases**. London, UK: Taylor and Francis, 239-247, 1989.
- FLOWERDEW, R., GREEN, M. Data integration: statistical methods for transferring data between zonal systems. In: MASSER, I; BLAKEMORE, M. (Ed). **Handling geographical information: methodology and potential applications**. Harlow, UK: Longman, 38-54, 1991.
- FONSECA, L. M. G. **Registro automático de imagens de sensoriamento remoto baseado em múltiplas resoluções**. 219 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.
- FONSECA, L. M. G.; COSTA, M. H. M.; KORTING, T.S.; CASTEJON, E.; SILVA, F.C. Multitemporal image registration based on multiresolution decomposition. **RBC - Revista Brasileira de Cartografia**, v. 3, p. 271-286, 2008.
- FORESTI, C. **Estimativas populacionais e de crescimento de áreas urbanas no Estado de São Paulo, com utilização de imagens Landsat**. 1979. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1978.
- FORSTER, B. C. Some urban measurements from Landsat data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 49, p. 1693-1707, 1983.
- FOWLER, R. Topographic LiDAR. In: Maune, D. F. (Ed.). **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. Bethesda: ASPRS, 2007. Cap. 7, p. 207-236.
- GALO, M.; CAMARGO, P. O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (COBRAC-1994), v. 1., 1994, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 1994.
- GEOMINAS. **Kit de mapas de Minas Gerais**. Governo do Estado de Minas Gerais/GEOMINAS. Disponível em <http://www.geominas.gov.br>. Acesso em: nov. 2007.

- GREEN, N.E. Scale analysis of urban structures: a study of Birmingham, Alabama. **American Sociological Review**. v. 21, n. 1, p.8-13, 1956.
- HABIB, A.; KIM, E. M.; MORGAN, M; COULOIGNER, I. DEM generation from high resolution satellite imagery using parallel projection model. In: XXth ISPRS Congress, 2004, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul, Turkey: ISPRS, 2004.
- HAKKERT, R. **Fontes de dados demográficos**. Belo Horizonte: ABEP, 1996. 72 p.
- HARVEY, J. T. Small area population estimation using satellite imagery. **Statistics in Transition**, v. 4, n. 4, p. 611-633, 2000.
- _____. Estimating Census district populations from satellite imagery: Some approaches and limitations. **International Journal of Remote sensing**, v. 23, n. 10, p. 2071–2095, 2002a.
- _____. Population estimation models based on individual TM pixels. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 11, p. 1181-1192, 2002b.
- HEIPKE, C. Overview of image matching techniques. In: Workshop on the Application of Digital Photogrammetric Workstations, 1996, Lausanne. **Proceedings....** Lausanne: OEEPE, 1996.
- HENDERSON, F. M.; XIA, Z-G. Radar applications in urban analysis, settlement detection and population estimation. In: LEWIS, A. J.; HENDERSON, F. M. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging Radar**. 3 ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. Vol. 2.
- HEYMANN, Y. **Corine land cover technical guide**. Luxembourg: European Commission, 1994. 136 p.
- HÖHLE, J; HÖHLE, M. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. 64, p. 398-406, 2009.
- HOLT, J. B, LO, C. P., HODLER, T. W. Dasymeric estimation of population density and areal interpolation of Census data. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 31, n. 2, p. 103-121, 2004.
- HSU, S. Y. Population estimation. **Photogrammetric Engineering** , v.37, n.5, p. 449-454, May, 1971.
- _____. Population estimation from ERTS imagery: methodology and evaluation. In: 39th Annual Meeting of the American Society of Photogrammetry, 1973, Washington. **Proceedings...** Washington, USA: ASPRS, 1973, p. 583-591.

HUXLEY, J. **Problems of Relative Growth**. London, UK: Methuen, 356 p, 1932.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico do ano 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: Novembro de 2007.

_____. **Metodologia do Censo Demográfico 2000**. Série Relatórios Metodológicos, v. 25. Rio de Janeiro: IBGE, 2003. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/metodologia/metodologiacemento2000.pdf>. Acesso em: Novembro de 2009.

_____. **Contagem da População 2007 - Notas técnicas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem2007/default.shtm>. Acesso em: Novembro de 2009.

_____. **Metodologia das Estimativas das Populações Residentes nos Municípios Brasileiros para 1º de Julho de 2008: Um a abordagem demográfica para estimar o padrão histórico e os níveis de subnumeração de pessoas nos censos demográficos e contagens da população**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

IBGE. **Consulta aos dados populacionais levantados pelo IBGE**. Disponível em <http://www.ibge.org.br>. Acesso em Novembro, 2009.

IBGE. **Contagem da População 1996 - Conceituação das características**. Rio de Janeiro: IBGE, 1997. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/contagem/default.shtm>. Acesso em: Novembro de 2009.

IISAKA, J. ;HEGEDUS, E. Population estimation from Landsat imagery. **Remote Sensing of the Environment**, v. 12, p. 259-272, 1982.

IKHUORIA, I. A. An aerial frame technique for population estimation: problems, accuracy and potentials. **Geografia**, v. 21, n.1, p. 131-152, 1996.

ITAME, O. Y. **Controle de qualidade aplicado na modelagem digital de terreno**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2001.

JACOBSEN, K. DEM generation from satellite data. In: EARSeL Conference, 2003, Bélgica. **Proceedings...** Ghent, Bélgica: EARSeL, 2003.

JACOBSEN, K. Digital surface models of city areas by very high resolution space imagery. In: 1st EARSeL Workshop of the SIG Urban Remote Sensing, 2006, Berlim. **Proceedings...** Berlim: EARSeL, 2006.

JACOBSEN, K. **Mapping from space**. Slides do Curso ministrado na PUCRIO em Março de 2007.

JAYNES, C; RISEMAN, E; HANSON, A. Recognition and reconstruction of buildings from multiple aerial images. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 90, p. 68-98, 2003.

JENSEN, J. R. ET AL. **Down to Earth: geographic Information for sustainable development in Africa**. Washington: National Academy Press, 2002, 155 p.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598 p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science). Tradução de: Remote sensing of the environment: an earth resource perspective.

KASSER, M.; EGELS, Y. **Digital photogrammetry**. London, England : Taylor & Francis, 2002. 351 p.

KRAUS, K. **Photogrammetry: v1 - fundamentals and standard processes**. 4a ed. Dummler/Bonn, v. 1, 1993.

KRAUS, K.; HARLEY, I.; KYLE, S. **Photogrammetry: geometry from images and laser scans**. Berlin, Germany : Walter de Gruyter, 2007. 459 p.

KRAUS, S. P.; SENGER, L. W.; RYERSON, J. M. . Estimating population from photographically determined residential land use types. **Remote Sensing of Environment**, v. 3, n. 1, p. 35-42, 1974.

KURKDJIAN, M.L.N.O. **Um método para identificação e análise de setores residenciais urbanos homogêneos, através de dados de Sensoriamento Remoto com vistas ao planejamento urbano**. 158p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

LABEN, C. A.; BROWER, B. V. Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening. **Technical Report**. New Jersey, EUA: Eastman Kodak Company, 2000.

LANGFORD, M.; MAGUIRE, D. J; UNWIN, D. J. The areal interpolation problem: estimating population using remote sensing in a GIS framework. In: MASSER, L.; BLAKEMORE, M. **Handling geographical information: methodology and potential applications**. New York: Longman Scientific & Technical and John Wiley & Sons, Inc, 1991.

LANGFORD, M.; UNWIN, D. J. Generating and mapping population-density surfaces within a Geographical Information-System. **Cartographic Journal**, v. 31, n. 1, p. 21-26, 1994.

LEE, Y. An Allometric analysis of the United States urban system: 1960-80. **Environment and Planning A**, v. 21, n. 4, p. 463-476, 1989.

LEONARDI, F. **Abordagens cognitivas e mineração de dados aplicadas a dados ópticos orbitais e de laser para a classificação de cobertura do solo urbano**. 172 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

LI, G.; WENG, Q. Using Landsat ETM+ imagery to measure population density in Indianapolis, Indiana, USA. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 71, n. 8, 2005, p. 947-958. ASPRS: 2005.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. Boca Raton, FL: CRC, 2005. 323 p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. Microwave and LiDAR sensing. In:_____. **Remote sensing and image interpretation**. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 700-710.

LINDER, W. **Digital photogrammetry: a practical course**. 2 ed. Berlin, Germany: Springer-verlag, 2006. 214 p.

LINDGREN, D. T. Dwelling estimation with color-IR photos. **Photogrammetric Engineering**, v.37, n.4, p. 373-373, 1971.

LIU, X. H.; CLARKE, K. Estimation of residential population using high resolution satellite imagery. In : International Symposium On Remote Sensing Of Urban Areas, 3. , 2002, Istambul. **Proceedings...** Istambul: ISRS, p.153-160.

LIU, X. Estimation of the spatial distribution of urban population using high spatial resolution satellite imagery. 175 p. Tese (Doutorado) Universidade de California, Santa Barbara, 2003.

LIU, X., CLARKE, K., HEROLD, M. Population density and image texture: a comparison study. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 2, p. 187-196, 2006.

LO, C. P. **Applied remote sensing**. New York: Longman, 1986.

LO, C. P. A raster approach to population estimation using high-altitude aerial and space photographs. **Remote Sensing of Environment**, v. 27, n. 1, p. 59-71, 1989.

LO, C. P. Automated population and dwelling unit estimation from high-resolution satellite images: a GIS approach. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, n.1, p. 17-34, 1995.

LO, C. P. Urban indicators of China from radiance-calibrated digital DMSPOLS nighttime images. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 92, n. 2, p. 225-240, 2002.

LO, C. P. Zone-Based estimation of population and housing units from satellite-generated land use/land cover maps. In: Mesev, V. (Ed.). **Remotely sensed cities**. London, UK/New York, NY: Taylor & Francis, 157-180, 2003.

LO, C. P.; CHAN, H. F. Rural population estimation from aerial photographs. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 46, p. 337-345, 1980.

LO, C. P.; WELCH, R. Chinese urban population estimates. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 67, n. 2, p. 246-253, 1977.

MAAS, H-G. LiDAR: very interesting and promising. **Interview in GIM International**, v. 18, n. 2, p. 6-9, 2004.

MACHADO, A. M. L. **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LiDAR**. Curitiba: nº 44, 2006. 201 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

MADEIRA, J. L.; SIMÕES, C. C. da S. Estimativas preliminares da população urbana e rural segundo as unidades da federação, de 1960/1980 por uma nova metodologia. **Revista Brasileira de Estatística**, v. 33, n. 129, p. 3-11. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. Disponível em http://biblioteca.ibge.gov.br/colecao_digital.htm. Acesso em: nov. 2008.

MANSO, A. P.; BARROS, M. S.S.; OLIVEIRA, M. L. N. Determinação da população urbana através de sensoriamento remoto In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,1. (SBSR), 1981, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1981, v.1, p.339-409.

MANSO, A. P.; BARROS, M. S.S.; OLIVEIRA, M. L. N. **Determinação de zonas homogêneas através de Sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 1979. (INPE1470-RPE/021).

MARTIN, D. Mapping population data from zone centroid locations. **Transactions of the Institute of British Geographers**, New Series, v. 14, n. 1, p. 90-97, 1989.

MARTIN, D. An assessment of surface and zonal models of population. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n. 8, p. 973-989, 1996a.

MARTIN, D. **Geographic information systems: socioeconomic applications**. 2 ed. Routledge, Taylor & Francis Group: London, 1996b. 182 p.

MARTIN, D.; BRACKEN, I. Techniques for modeling population-related raster databases. **Environment and Planning A**, v. 23, n. 7, 1069-1075, 1991.

MAUNE, D. F. et al. Introduction. In: Maune, D. F. (Ed.). **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. Bethesda: ASPRS, 2007. Cap. 1, p. 1-34.

MENNIS, J. Generating surface models of population using dasymetric mapping. **Professional Geographer**, v. 55, n. 1, p. 31-42, 2003.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. **Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping**, v. 1, p. 222-231, 1982.

MOLANDER, C. W. Photogrammetry. In: MAUNE, D. F. (Ed.). **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. Bethesda: ASRS, 2007. Cap. 5, p. 121-142.

MOURA, G. G. **Imagens e representações da periferia de Uberlândia - MG: um estudo de caso do setor oeste**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2003.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4 ed. Boston, MA: McGraw-Hill, 1996.

NOGUEIRA JÚNIOR, J. B. **Controle de qualidade de produtos cartográficos: uma proposta metodológica**. 2003. 143p. Dissertação (Mestrado em Cartografia) - UNESP, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, 2003.

NORDBECK, S. The law of allometric growth. Michigan Inter-University Community of Mathematical Geographers. **Discussion Paper**, n. 7, 1965.

OPTECH INC. **Dados técnicos sobre ALTM 2025**. Disponível em <http://www.optech.ca>. Acesso em Dezembro, 2007.

PATENAUDE, G. ; HILL, R. A.; MILNE, R.; GAVEAU, D. L. A.; BRIGGS, B. B. J.; DAWSON, T. P. Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, p. 368-380, 2004.

POLIDORIO, A. M. **Detecção automática de feições em imagens aéreas multiespectrais e dados de elevação de regiões urbanas complexas adquiridas com alta resolução espacial**. Presidente Prudente: [s.n.], 2007. 327 p. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2007.

PORTER, P. W. **Population distribution and land use in Libéria**. Tese (Doutorado). London School of Economics and Political Science, Londres, 1956.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA. **Banco de dados integrados resumido de Uberlândia**. Uberlândia: SEPLAMA (Secretaria Municipal de Planejamento Urbano e Meio Ambiente), 2007. Disponível em <http://www.uberlandia.mg.gov.br>. Acesso em Novembro, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERLÂNDIA. **Consulta de área residencial construída – IPTU por bairro**. Uberlândia, 2009

PROSPERIE, L.; EYTON, R. The relationship between brightness values from a nighttime satellite image and Texas county population. **Southwestern Geographer**, v. 4, p. 16-29, 2000.

REIBEL, M.; AGRAWAL, A. Areal interpolation of population counts using pre-classified land cover Data. **Population Research and Policy Review**, n. 26, p. 619-633, 2007.

REIS, I. A. Estimação da população dos setores censitários de Belo Horizonte usando imagens de satélite. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, v. 1, p. 2741-2748.

SCHENK, T. **Digital photogrammetry**. V. 1. Ohio: Terra Science, 1999. 428 p.

SOUZA, I. M. **Análise do espaço intra-urbano para estimativa populacional intercensitária utilizando dados orbitais de alta resolução espacial**. 104 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) - Universidade do Vale do Paraíba – Univap, São José dos Campos, 2003.

SPIEKERMANN, K.; WEGENER, M. Freedom from the tyranny of zones: towards new GIS-based spatial models. In: Fotheringham A. S.; Wegener, M. (Eds.). **Spatial models and GIS - new potential and new models**. London: Taylor & Francis, 2000.

TERRASOLID. **TerraScan user's guide**. 308 p., 2010. Disponível em: <http://www.terrasolid.fi>. Acesso em: dez. 2009.

TOBLER, W. R. Satellite confirmation of settlement size coefficients. **Area**, v. 1, n. 3, p. 30-34, 1969.

TOBLER, W. R. Smooth pycnophylactic interpolation for geographical regions. **Journal of the American Statistical Association**, v. 74, n. 367, p. 519-530, 1979.

TOMMASELLI, A. M. G. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. **Geodésia online**, n. 4, 2003.

TOPOSYS. **LiDAR systems**. Imagens. 2007. Disponível em <<http://www.toposys.com>>. Acesso em 10/08/2008.

TURNER, A.; OPENSHAW, S. **Disaggregative spatial interpolation**. In: GISRUK Conference, 2001, Glamorgan. **Proceedings...**: Glamorgan, Wales: GISRUK, 2001.

UBERLÂNDIA. **Lei Complementar nº 245 de 30 de novembro de 2000**. Dispõe sobre o Parcelamento e Zoneamento do Uso e Ocupação do Solo do Município de Uberlândia e Revoga a Lei Complementar nº 224 de 23 de dezembro de 1999 e suas Alterações Posteriores. Diário Oficial de Uberlândia, Uberlândia, 30 de novembro de 2000.

VOSS, P. R. Demography as a spatial social science. **Population Research and Policy Review**, v. 26, n. 5–6, 2007.

WEBER, C. Per-zone Classification of urban land use cover for urban population estimation. In: FOODY, G. M. ; CURRAN, P. J. (eds.). **Environmental remote sensing from regional to global scales**. New York, NY: Wiley, 142-148, 1994.

WEBSTER, C. J. Population and dwelling unit estimation from space. **Third World Planning Review**, v. 18, n. 2, p. 155-176, 1996.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A. **Elements of photogrammetry: with applications in GIS**. 3. ed. New York, NY: McGraw-hill, 2000. 608p.

WRIGHT, J. K.. A method of mapping densities of population. **The Geographical Review**, v. 26, n. 1, p. 103-110, 1936.

WU, S-S.; QIU, X. Q.; WANG, L. Population estimation methods in GIS and remote sensing: a review. **GIScience & Remote Sensing**, v. 42, n. 1, p. 80-96, 2005.

YUAN, Y.; SMITH, R. M.; LIMP, W. F. Remodeling census population with spatial information from LandSat TM imagery. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 21, n. 3-4, p. 245-258, 1997.