



Universidade de Coimbra
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Matemática

Dissertação de Mestrado em Engenharia Geográfica
2013/2014

Produção automática de ortomosaicos e modelação 3D de zonas urbanas utilizando nuvens de pontos densas obtidas por software fotogramétrico de código aberto.

(Automatic orthomosaic production and 3D modelation of urban areas using point clouds obtained with photogrammetric open source software)

Diogo André Vicente Amorim Duarte

Orientador: Gil Gonçalves

Co-orientador: Alexandre Gomes

Coimbra, 2014

Nº do aluno: 2006114063

Nome: Diogo André Vicente Amorim Duarte

Título da dissertação:

Produção automática de ortomosaicos e modelação 3D de zonas urbanas utilizando nuvens de pontos densas obtidas por software fotogramétrico de código aberto.

Palavras-Chave:

- ortofoto
- modelo digital de superfície
- nuvem de pontos
- programas de código aberto
- fotogrametria

Resumo

Na actualidade e acompanhando o rápido desenvolvimento tecnológico, apresentam-se na área da engenharia, novas tecnologias e técnicas para explorar e outras que podem ser melhoradas ou modificadas. Na área da fotogrametria digital esse desenvolvimento também é notório. Estes avanços tecnológicos são referentes tanto a um aspecto computacional, devido principalmente à capacidade de processamento de dados recorrendo a unidades de processamento gráfico assim como a um nível mais técnico, onde os veículos aéreos não tripulados (VANT) ocupam grande destaque. A utilização de métodos da visão computacional para a resolução de problemas fotogramétricos também começa a ser, aos poucos, implementada. Esta permite a construção de nuvens de pontos através de informação bidimensional contida em imagens e abre todo um leque de oportunidades para a informação geoespacial devido principalmente à sua natureza tridimensional. Neste sentido, a dissertação presente estudará tanto a produção de informação geoespacial recorrendo a VANT assim como a utilização de nuvens de pontos como representação tridimensional em meio urbano. De um ponto de vista operacional serão utilizados programas de código aberto para a realização dos objectivos enunciados anteriormente, recorrendo-se pontualmente a programas comerciais, apenas para a manipulação dessa mesma informação.

Abstract

The rapid technological development, offers new possibilities to engineering, delivering new technologies and techniques to exploit and others to be improved or modified. In digital photogrammetry this development is also notorious. These technological advances are related to both a computational aspect, due mainly to the ability of data processing using graphics processing units as well as, at a more technical level, the unmanned aerial vehicles (UAV).. The use of computer vision methods for solving photogrammetric problems is also being gradually implemented. This allows the production of point clouds using two-dimensional information presented in images and opens up a whole new range of opportunities for geospatial information mainly due to its three-dimensional nature. Consequently, this thesis will examine both the production of geospatial information using UAV as well as the use of point clouds as three-dimensional representation of urban areas. From an operational point of view, open source programs will be used to achieve the objectives set out above, occasionally resorting to commercial software, only for the handling and manipulation of such information.

Índice

I Introdução	7
I.1 Programas de código aberto	10
I.2 Pacotes de programas utilizados.....	11
I.3 Processos Auxiliares.....	14
I.3.1 Introdução de informação Exchangeable image file format (exif) nas imagens.....	14
I.3.2 Introdução de informação nos ortofotos e nos modelos digitais de superfície.....	15
I.3.3 Transformação de coordenadas	15
II Fundamentação teórica.....	16
II.1 Visão computacional versus fotogrametria.....	16
II.2 Modelo de distorsão da câmara e ajustamento por feixe implementado no MicMac	20
II.3 Transformação de Helmert (7 parâmetros).....	23
III Produção automática de ortofotos em áreas urbanas utilizando veículos aéreos não-tripulados e software de código aberto.....	24
III.1 Introdução.....	26
III.2 Veículos Aéreos Não-Tripulados.....	27
III.2.1 O mini-VANT Swinglet CAM.....	29
III.3 PAMP: Software de Código Aberto em Fotogrametria Digital.....	30
III.3.1 PASTIS.....	31
III.3.2 APERO.....	32
III.3.3 MICMAC.....	33
III.3.4 PORTO.....	33
III.3.5 Parametrização formal da PAMP em XML.....	34

III.4 Caso de estudo: zona urbana de Coimbra.....	36
III.4.1 Dados.....	36
III.4.2 Resultados e Discussão.....	37
III.4.3 Comparação relativa.....	40
III.5 Conclusões.....	41
III.6Referências.....	43
IV Modelação tridimensional de superfícies urbanas recorrendo a nuvens de pontos obtidas por programas de código aberto . Casos de estudo.....	45
IV.1 Introdução.....	46
IV.1.1 Fotogrametria Aérea.....	47
IV.1.2 Fotogrametria terrestre.....	48
IV.1.3 Pacotes de programas utilizados.....	50
IV.2 Geração da nuvem de pontos.....	53
IV.2.1 MicMac.....	53
IV.2.2 VisualSfM.....	54
IV.2.3 Construção da malha.....	57
IV.3 Casos de estudo.....	59
IV.3.1Produção de nuvens de pontos utilizando câmaras fotogramétricas de médio formato	59
IV.3.2 Arqueologia.....	65
IV.3.3 Reconstrução de fachadas e criação de modelos urbanos tridimensionais.....	71
IV.3.4 Cartografia tridimensional.....	77
IV.3.5 Detecção de alterações.....	78
IV.4 Conclusões.....	84
IV.5 Referências.....	85
V Conclusões.....	88

I Introdução

Na actualidade e com o rápido desenvolvimento tecnológico, apresentam-se na área da engenharia, novas tecnologias e técnicas para explorar e outras que podem ser melhoradas ou modificadas. Na área da fotogrametria digital esse desenvolvimento também é notório. Estes avanços tecnológicos são referentes tanto a um aspecto computacional, devido principalmente à capacidade de processamento de dados recorrendo a unidades de processamento gráfico assim como a um nível mais técnico, onde os veículos aéreos não tripulados (VANT) ocupam grande destaque. A utilização de métodos da visão computacional para a resolução de problemas fotogramétricos também começa a ser, aos poucos, implementada. Esta permite a construção de nuvens de pontos através de informação bidimensional contida em imagens e abre todo um leque de oportunidades para a informação geoespacial devido à sua natureza tridimensional.

Ao nível da resolução de problemas fotogramétricos aéreos, as técnicas intrínsecas à fotogrametria digital continuam a ser geralmente utilizadas. Isto já não acontece na fotogrametria terrestre que tenha como objectivo a representação tridimensional, onde se têm vindo a inserir, de uma forma mais notória, métodos da visão computacional. Esta área científica, tendo como principal objectivo o reconhecimento (com um nível de capacidade humano) por parte do computador de informação tridimensional através da informação obtida em imagens bidimensionais, partilha deste modo alguns objectivos com a fotogrametria digital (Mundy, 1993). Há a ter em atenção, no entanto, que a fotogrametria digital tem como principal objectivo a produção de informação geoespacial com qualidade posicional. A exactidão joga, portanto, um papel fundamental na

produção fotogramétrica. Um equilíbrio entre estas duas áreas começa a ser desenvolvido para a resolução de problemas fotogramétricos. Nesse seguimento, têm surgido programas geoespaciais que utilizam métodos da visão computacional adicionando a rigidez fotogramétrica necessária às suas equações (Pierrot-Deseilligny and Clery, 2012) permitindo deste modo a sua utilização em projectos fotogramétricos. Uma das razões para a inserção destes referidos métodos prende-se principalmente na necessidade de orientar blocos de fotografias obtidos por uma máquina fotográfica comum, onde a sua atitude e posição são desconhecidas ou mal determinadas assim como os parâmetros internos dessa mesma câmara. Num contexto fotogramétrico comum esta situação seria difícil, se não mesmo impossível, de concretizar. É, no entanto, o que acontece na maioria dos projectos que recorrem a VANT para a realização de fotogrametria aérea, visto que o VANT não tem capacidade para suportar o peso inerente a unidades de medição inercial de alta precisão, receptores GNSS de dupla frequência e câmaras fotogramétricas para a utilização dos seus dados numa metodologia *tradicional* de fotogrametria (Remondino et al., 2011). A mesma situação está presente na realização de fotogrametria terrestre recorrendo a câmaras fotográficas convencionais para a realização de modelos tridimensionais, onde não existe qualquer informação acerca das capturas nem acerca da calibração da câmara.

O factor tridimensional intrínseco aos métodos da visão computacional permitem a produção de nuvens de pontos obtidas através de imagens bidimensionais. Nestas nuvens os pontos estão associados a um determinado modelo e são definidos pelas coordenadas X,Y e Z. Todas as coordenadas relacionadas com o objecto estão incluídas num ficheiro, este representa todos os pontos necessários à modelação da superfície exterior de um objecto tridimensional. Usualmente este tipo de produto espacial é associado à tecnologia *Light Detection And Ranging* (LIDAR).

Esta permite a obtenção de informação geoespacial com elevada exactidão, visto que o seu princípio básico assenta no tempo que um sinal laser transmitido demora a voltar à sua origem através do reflexo na primeira superfície que o seu sinal encontre. Ao longo deste trabalho as nuvens de pontos e como referido anteriormente, são o resultado da correlação digital entre imagens. Este facto comporta consigo uma importante vantagem, que se refere ao factor económico visto as tecnologias LIDAR serem usualmente dispendiosas devido principalmente ao material utilizado (Leberl et al., 2010). A principal desvantagem será a presente impossibilidade de obtenção de nuvens de pontos tão exactas como as que são realizadas por instrumentos LIDAR. Esta tecnologia associada ao poder de armazenamento e processamento disponível são uma mais valia para informação geoespacial devido à sua natureza tridimensional, permitindo uma visualização, compreensão e contextualização dos projectos que um modelo bidimensional não permite.

Neste contexto, a presente dissertação tem como objectivo, para além do estudo de algumas destas técnicas e tecnologias, a sua realização recorrendo a pacotes de programas de código aberto (secção I.1). Mais especificamente, e num primeiro estudo, a produção de ortofotos e modelos digitais de superfície recorrendo a VANT e numa segunda parte à geração de nuvens de pontos geradas através de correlação digital entre imagens. A dissertação estará, então, dividida em dois capítulos principais, estes capítulos estão expostos em dois artigos¹ :

Capítulo III: *Produção automática de ortofotos em áreas urbanas utilizando veículos aéreos não-tripulados e software de código aberto*

I O capítulo III foi apresentado como artigo longo nas 1ª Jornadas Lusófonas de Ciência e Tecnologia da Informação Geográfica, a realizar em Coimbra, de 11 a 13 de Setembro. O capítulo IV será submetido a uma conferência internacional.

Capítulo IV: *Modelação tridimensional de superfícies urbanas recorrendo a nuvens de pontos obtidas por programas de código aberto . Casos de estudo*

Cada capítulo, conterà, portanto, tanto o estado da arte que lhe é relativo assim como as soluções apresentadas para os objectivos propostos. A bibliografia utilizada nestes dois capítulos é igualmente apresentada no final de cada um deles.

1.1 Programas de código aberto

Os programas de código aberto, são pacotes de programas que permitem ao utilizador a consulta do seu código e apesar do termo *código aberto* não abranger a gratuitidade das aplicações, isso é o que geralmente acontece. Na maior parte dos casos e quando se salvaguarda o uso do programa, essa salvaguarda tem em conta uma componente comercial. Este tipo de programas comportam várias vantagens e também desvantagens. Em termos académicos, por exemplo, as vantagens são claras, pois num meio que se pretende pedagógico a compreensão do que os programas fazem e como o fazem é de relevante importância. Enquanto que hoje em dia as companhias de *software* (fechado) desenvolvem aplicações em que um dos objectivos principais é a eliminação da interacção com o usuário, tornando-os deste modo acessíveis virtualmente a qualquer pessoa, o mesmo não acontece no círculo académico, onde o objectivo principal é a compreensão dos processos para uma discussão fundamentada dos resultados. A melhor forma de compreender estes processos, estará portanto relacionada com a possível consulta do seu código, aliás, a filosofia adjacente a este tipo de programas é que o usuário realize esta consulta e possa contribuir de alguma forma, seja na discussão do código ou até mesmo na sugestão de implementação de uma alteração ou adição ao código existente. Neste sentido os programas de código aberto são, regra geral, acompanhados

por uma comunidade de utilizadores que se auto-ajuda, quer ao nível da compilação do programa quer ao nível da sua própria utilização. Esta comunidade, ao analisar o código, ajuda em última instância na produção de código seguro e estável (cloudtweaks, 2012).

Existem também desvantagens. Estas referem-se principalmente ao conhecimento aprofundado de tópicos relativos às ciências da computação inerentes ao uso deste tipo de programas. A grande maioria das vezes, estes programas são disponibilizados por compilar, onde é necessária a sua compilação, isto significa também que o usual é a não existência de qualquer interface, sendo necessário o recurso ao terminal assim como a possíveis ficheiros de parametrização. Não existindo o factor económico por parte dos criadores, estes programas seguem, geralmente, apenas os seus objectivos específicos (Noyes, 2010). Isto leva a que, e dependendo obviamente do projecto, o utilizador tenha que recorrer a vários programas diferentes, onde na esfera comercial necessitaria apenas de um. Outra desvantagem reside no facto de que as entidades que desenvolvem este tipo de programas não podem ser responsabilizadas por qualquer situação adversa que advenha da utilização do seu programa.

1.2 Pacotes de programas utilizados

Os programas utilizados ao longo da dissertação foram os apresentados na tabela 1. O *MicMac* (Pierrot-Deseilligny, 2014) é o programa principal e é referente à geração dos resultados discutidos nos capítulos III e IV. Este programa inicialmente criado por Marc Pierrot-Deseilligny, Institut Géographique National (IGN), é um pacote de programas criado para utilização interna nos laboratórios do IGN. Posteriormente, em 2007, foi criado um depósito de código aberto do *MicMac*. A sua origem esteve relacionada com a fotogrametria aérea no entanto, hoje em dia, é possível ter em conta cenas mais complexas e que requeiram uma geometria ou objectivos diferentes, como a modelação

tridimensional. Este programa foi então completado com o *Apero* que é um programa para a realização de uma orientação automática das imagens (Pierrot-Deseilligny and Clery, 2012). Actualmente a referência ao *MicMac*, é uma referência que engloba outros três programas:

- Pastis para o cálculo de pontos de ligação nas imagens utilizando o algoritmo SIFT (scale invariant feature transform).
- *Apero* para a realização do ajustamento por feixe com o objectivo da orientação automática das imagens.
- Porto para a criação de ortomosaicos (parametrização radiométrica).

Onde o *MicMac* acaba por ser outro programa de um pacote de 4, realizando a correlação e correspondência entre imagens. Uma exposição mais detalhada do *MicMac* está presente no capítulo III.3.

Tabela 1: Programas utilizados

Programa	Descrição	Autoria	Código aberto/livre
MicMac	Geração de ortofos e modelos digitais de superfície, Modelação tridimensional, fotogrametria terrestre	Marc Pierrot-Deseilligny <i>et al</i> , IGN (Pierrot-Deseilligny, 2014)	Sim/Sim
VisualSfM	<i>Structure from motion</i>	Changchang Wu (Wu, n.d.)	Sim/Não ¹
Monteverdi2	Pacote de programas para detecção remota e manipulação de dados vectoriais e raster	Centre National d'Etudes Spatiales (CNES, n.d.)	Sim/Sim
CloudCompare	Manipulação de nuvens de	Gerardieu, D. (Girardeau-	Sim/Sim

¹ Para fins comerciais é necessária uma licença.

	pontos e malhas	Montaut, n.d.)	
exiftool	Manipulação da informação <i>exif</i>	Harvey,Phil (Harvey, n.d.)	Sim/Sim
exiv2	Manipulação da informação <i>exif</i>	Huggel,Andreas (Huggel, n.d.)	Sim/Sim
proj4	Transformação de coordenadas	Evenden,G.,USGS (Evenden, n.d.)	Sim/Sim
MicroStation V8i	Programa de CAD, permite carregar nuvens de pontos	Bentley Systems ©	Não/Não
geotifcp (<i>geotiff</i>)	Introdução de informação relativa à projecção cartográfica em ortofotos e MDS	geotifcp ^I	Sim/Sim
ImageMagick	Manipulação de imagens, conversão	ImageMagick ^{II}	Sim/Sim
Quantum GIS	Sistema de informação geográfica	Quantum Gis Project ^{III}	Sim/Sim
GlobalMapper	Manipulação de informação espacial	Blue Marble Geographics©	Não/Não
<i>Sfm_georef</i> v2.3	Georreferenciação de nuvens de pontos	James and Robson, Universidade de Lancaster (James and Robson, 2012)	Sim/Sim

I <http://www.remotesensing.org/geotiff/geotifcp.html>

II <http://www.imagemagick.org>

III <http://www.qgis.org>

1.3 Processos Auxiliares

A utilização de programas de código aberto, requer que todas as operações sejam feitas pelo utilizador. Este facto comporta desde a manipulação da informação *exif* (secção 1.3.1) , à georreferenciação dos *.tif* obtidos, sejam estes MDS ou ortofotos (secção 1.3.2).

1.3.1 Introdução de informação *Exchangeable image file format (exif)* nas imagens

A *Exchangeable image file format (exif)* refere-se ao formato de gravação dos metadados em imagens/fotografias e que, de um modo geral, são guardados no arquivo aquando da sua obtenção (Tachibanaya, 1999). As máquinas fotográficas convencionais gravam as especificidades

```
File name      : IMG_1178.JPG
File size     : 4319519 Bytes
MIME type     : image/jpeg
Image size    : 4000 x 3000
Camera make   : Canon
Camera model  : Canon IXUS 220HS
Image timestamp : 2013:01:28 11:43:17
Image number  : 103-1178
Exposure time : 1/500 s
Aperture     : F2.7
Exposure bias : 0 EV
Flash        : No, compulsory
Flash bias   : 0 EV
Focal length  : 4.3 mm
Subject distance: 266
ISO speed     : 100
Exposure mode : Program (P)
Metering mode : Multi-segment
Macro mode    : Off
Image quality : Fine
Exif Resolution : 4000 x 3000
White balance : Auto
Thumbnail    : image/jpeg, 6257 Bytes
Copyright    :
Exif comment  :
```

Figura 1: Exemplo da informação *exif* associada a um ficheiro imagem.

da captura, assim como outras informações como data e hora do disparo (figura 1). Actualmente existe também a possibilidade de inserir, na informação *exif*, a posição num determinado sistema de coordenadas, do centro do disparo (*geotag*).

A manipulação de imagens obtidas através de máquinas fotográficas comuns exige, no *MicMac*, a presença de informação *exif* nos dados de entrada mais especificamente: a distância focal da lente e a *distância focal equivalente*

35 mm. O termo anterior aplica-se à variação de tamanhos de sensor presentes nas máquinas fotográficas digitais (Mansurov, 2010). Esta transformação refere-se portanto, à necessidade de possuir um valor normalizado de distância focal que contenha intrinsecamente o tamanho do respectivo sensor.

A informação *exif* , quando necessário, foi inserida recorrendo aos programas *exiv2* e *exiftool*.

I.3.2 Introdução de informação nos ortofotos e nos modelos digitais de superfície

Tantos os modelos digitais de superfície como os ortofotos que o *MicMac* gera não estão inicialmente georreferenciados, no entanto fornece toda a informação necessária à gravação dessa informação nos *tifs*. Para tal, recorreu-se ao programa *geotifcp* que permite gravar a informação de um ficheiro *.tfw* que contém informação relativa à orientação espacial do ortofoto, o tamanho do pixel e as coordenadas objecto do pixel correspondente à origem da imagem. No caso dos modelos digitais de superfície, a informação altimétrica é inserida recorrendo ao programa *Monteverdi2* (CNES, n.d.).

I.3.3 Transformação de coordenadas

Os processos referentes à transformação de coordenadas foi sempre realizado utilizando a biblioteca *proj4* (Evenden, n.d.). A utilização desta biblioteca requer na transformação entre alguns datums portugueses e o ETRS89, a obtenção dos ficheiros com as grelhas no formato NTV2¹ (Gonçalves, 2009).

¹ As grelhas podem ser descarregas em <http://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/coordenadas/>

II Fundamentação teórica

Este capítulo está dividido em 3 partes. Na primeira será exposta uma relação entre a visão computacional e a fotogrametria, imprescindível para uma melhor compreensão dos restantes capítulos. Na segunda serão apresentados aspectos teóricos contidos no *MicMac*, mais especificamente, o modelo de distorsão da câmara e o ajustamento por feixe utilizados no seu algoritmo. A terceira parte refere-se à transformação espacial realizada pelo programa *SfM_georef v2.3* (James and Robson, 2012).

II.1 Visão computacional versus fotogrametria

As equações fundamentais da fotogrametria, denominadas de equações de colinearidade (equação 1), têm a sua origem no facto de se admitir que um ponto no espaço $A(X_P, Y_P, Z_P)$ se conecta ao seu ponto imagem correspondente $a(x_p, y_p, z_p)$ através de uma linha que passa pelo centro de projecção $C(X_C, Y_C, Z_C)$ da imagem (equação 2).

$$\begin{aligned}x &= -f \frac{m_{11}(X_P - X_C) + m_{12}(Y_P - Y_C) + m_{13}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)} \\y &= -f \frac{m_{21}(X_P - X_C) + m_{22}(Y_P - Y_C) + m_{23}(Z_P - Z_C)}{m_{31}(X_P - X_C) + m_{32}(Y_P - Y_C) + m_{33}(Z_P - Z_C)}\end{aligned} \quad (1)$$

Ou em notação matricial:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P - X_C \\ Y_P - Y_C \\ Z_P - Z_C \end{bmatrix} \quad (2) \quad \text{onde} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_P - x_0 \\ y_P - y_0 \\ 0 - f \end{bmatrix}$$

Nestas equações, (x_0, y_0) corresponde ao ponto principal da imagem; os elementos m compõe a matriz que contém os cossenos directores da rotação objecto/imagem. Para definir espacialmente esta relação, temos então a determinar os 3 parâmetros de orientação interna (x_0, y_0, f) e os 6 parâmetros de orientação externa, onde a matriz m contém os 3 parâmetros angulares ω, φ, κ .

Na visão computacional esta relação objecto imagem é descrita num sistema de coordenadas homogéneas, também conhecidas como coordenadas projectivas (ver equação 3). Os sistemas de coordenadas homogéneas permitem a captura do conceito de infinito, conceito este que no espaço euclideano não existe. A sua utilização permite a simplificação de muitos conceitos geométricos e a sua consequente computação (Shene, C., cons. 2014).

$$M_1 M_2 \vec{X} = M \vec{X} \quad (3)$$

Onde $\vec{X} = (X, Y, Z, 1)^T$ contém os pontos objecto em coordenadas homogéneas, M_1 corresponde à orientação interna e M_2 corresponde à orientação externa sendo M uma matriz 3x4. (Zhang and Wanqiang, 2008). Apesar de os elementos de M não estarem relacionadas com nenhum significado físico esta forma é mais compacta matematicamente e consequentemente de melhor implementação algorítmica.

Vejam agora a orientação relativa. Esta, que em fotogrametria se refere ao posicionamento relativo entre imagens que contenham sobreposição, através da sua atitude e posição, tem como base que dois raios em diferentes fotos correspondentes ao mesmo ponto objecto intersectam um mesmo plano. A equação 4, que apesar de ser mais complexa que as equações de colinearidade, visto envolver parâmetros de orientação interna e externa das duas imagens permite, que não se tenha em conta as coordenadas objecto (Gonçalves, 2005). Temos

$(u_{1,2}, v_{1,2}, w_{1,2})$, que são as componentes do vector que unem cada ponto na imagem (1 e 2) ao plano que se considera coplanar e (b_x, b_y, b_z) as componentes do vector base que une os dois pontos projectados nesse mesmo plano.

$$\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_1 & v_1 & w_1 \\ u_2 & v_2 & w_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (4)$$

Na visão computacional, a orientação relativa é realizada através do cálculo da matriz F ou da matriz E e na sua relação entre um ponto homólogo partilhado por duas imagens. Tendo em conta que a geometria epipolar descreve as relações geométricas entre duas imagens que representam o mesmo objecto de posições diferentes, estas matrizes não são mais do que a representação algébrica da geometria epipolar (Hartley and Zisserman, 2004) . Vejamos a figura 2, esta representa dois sistemas de coordenadas (captura 0 e captura 1) . A sua relação é expressa pela rotação R e pela translação, T .

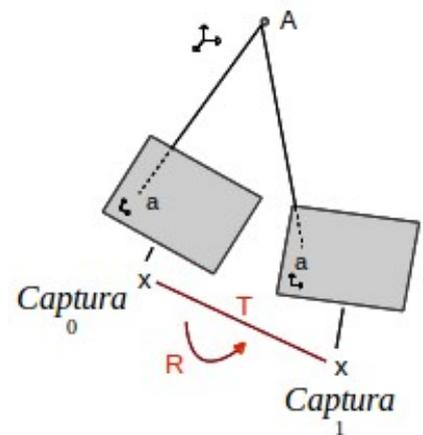


Figura 2: Relação espacial entre duas capturas

Logo temos:

$$X_0 = R X_1 + T \quad (5)$$

Onde X_0 e X_1 vêm em coordenadas normalizadas, cada uma respeitante à sua câmara. A geometria epipolar permite também considerar o vector entre os centros de projecção (O_0 e O_1) coplanares assim como os vectores $O_1 X_1$, $O_0 X_1$ (Birchfield, 1998)

Deste modo podemos:

$$X_0^T (T \times R X_1) = 0 \quad (6)$$

Definindo a matriz $[T]_x^{-1}$ como a matriz que para qualquer vector y , $[T]_x y = T \times y$ podemos reescrever a equação 6 como :

$$X_0^T ([T]_x R X_1) = 0 \quad (7)$$

Obtendo a denominada matriz essencial $E = [T]_x R$, que acaba por ser a representação algébrica da geometria epipolar no caso das calibrações das câmaras serem conhecidas (Fisher, 1997)

No caso das calibrações das câmaras não serem conhecidas é necessário, para transformar as coordenadas imagem normalizadas para coordenadas imagem pixel, os parâmetros internos de cada uma das câmaras ($P_{i_{0,2}}$):

$$x_0 = P_{i_0} X_0 \quad ; \quad x_1 = P_{i_1} X_1$$

Logo e substituindo em 7 :

$$x_0^T F x_1 = 0 \quad (8)$$

Onde $F = P_{i_1}^{-T} E P_{i_0}^{-1}$

Estamos em condições de considerar:

$$F = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Podendo esta ser expressa na sua forma linear:

I Denominada de matriz antissimétrica.

$$\begin{bmatrix}
 u'_1 u_1 & u'_1 v_1 & u'_1 & v'_1 u_1 & v'_1 v_1 & v'_1 & u_1 & v_1 & 1 \\
 u'_2 u_2 & u'_2 v_2 & u'_2 & v'_2 u_2 & v'_2 v_2 & v'_2 & u_2 & v_2 & 1 \\
 \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot \\
 u'_n u_n & u'_n v_n & u'_n & v'_n u_n & v'_n v_n & v'_n & u_n & v_n & 1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 e_{11} \\
 e_{12} \\
 e_{13} \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 e_{33}
 \end{bmatrix}
 = 0 \tag{10}$$

Este método utilizado pela visão computacional comporta tanto vantagens como desvantagens ao nível da sua utilização em fotogrametria. Do lado das vantagens existe o facto de não se necessitar de aproximações iniciais para se computar um resultado.(Zhang and Wanqiang, 2008) Este processo é também não iterativo e bastante rápido (Mundy, 1993)e tanto se pode recorrer à matriz E no caso de haver calibrações para as câmaras ou no caso de não existirem essas calibrações e recorrendo aos parâmetros internos das mesmas, utilizar a matriz F . A principal desvantagem deste modo são algumas inconsistências geométricas que em fotogrametria aérea não podem ser aceites (Zhang and Wanqiang, 2008) . O *MicMac* por exemplo, e apesar de utilizar métodos da visão computacional, introduz a rigidez fotogramétrica necessária às suas equações(Pierrot-Deseilligny and Clery, 2012).

II.2 Modelo de distorsão da câmara e ajustamento por feixe implementado no MicMac

O modelo utilizado, aquando da calibração da câmara, foi um modelo de distorção radial, no entanto o *MicMac* permite a utilização de outros modelos (Fish-eye por exemplo). O método das grelhas, que é o geralmente utilizado para câmaras fotogramétricas não foi ainda implementado. A equação 11 (Pierrot-Deseilligny, 2014) define o modelo radial utilizado:

$$D^R \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x \\ C_y \end{pmatrix} + (1 + R_3 \rho^2 + R_5 \rho^4 + R_7 \rho^6) \begin{pmatrix} d_u \\ d_v \end{pmatrix} \quad (11)$$

Onde $d_u = U - C_x$ $d_v = V - C_y$ $\rho^2 = d_u^2 + d_v^2$, sendo $C_{x,y}$ o centro de distorção U, V as coordenadas imagem e R_k os coeficientes de distorção.

Ao nível do ajustamento das observações, o *MicMac* realiza um ajustamento por feixe baseado em (Triggs et al., 1999). Designemos por (Pierrot-Deseilligny, 2014):

- R_i , C_i as incógnitas, atitudes e posições dos centros das imagens

- I_k a incógnita relativa às distorções e parâmetros de orientação interna com $k = k(i)$

- P_l as incógnitas relativas aos pontos do objecto correspondentes aos pontos de ligação e $p_{l,m}$ as coordenadas pixel da posição de P numa imagem diferente na qual é vista.

A função projecção será:

$$f(R_i, C_i, I_{k(i)}, P) \quad (12)$$

Pretendemos encontrar uma solução para o problema de orientação fotogramétrica, ou seja, encontrar R_i, C_i, I_k e consequentemente P_l respeitando:

$$\forall l, m, p_{l,m} = f(R_{i(l,m)}, C_{i(l,m)}, I_{k(i(l,m))}, P_l) \quad (13)$$

Na maioria dos casos, este problema será redundante. Para tal calcula-se R_i, C_i, I_k e P_l minimizando a seguinte função E :

$$res(l, m) = p_{l,m} - f(R_{i(l,m)}, C_{i(l,m)}, I_{k(i(l,m))}, P_l) \quad (14)$$

Onde:

$$E = \sum_{l,m} \|res(l, m)\|^2 \quad (15)$$

O problema é não linear e é *Apero* que lineariza as equações, no entanto vão ser precisas várias iterações. Para além disso a solução pode divergir o que requer o congelamento ou libertação de incógnitas consoante a análise pretendida. Visto que o problema da expressão anterior pode ter em consideração *outlayers*, é mais robusto considerar uma minimização da função:

$$E = \sum_{l,m} \|res(l, m)\| \quad (16)$$

No entanto como o cálculo numérico do mínimo do funcional anterior é complexo e requer também a construção de um sistema de equações consideravelmente grande será mais apropriado minimizar a função:

$$E = \sum_{l,m} \rho(res(l, m)) \|res(l, m)\|^2 \quad (17)$$

A função dos pesos ρ desempenha um papel importante, na solução e na convergência do método proposto. Teoricamente $\rho(x) = \frac{1}{x}$ conduz à minimização de 16 e 17, ou seja, uma solução muito próxima da solução, no entanto também pode divergir muito facilmente, neste sentido parametriza-se a função dos pesos :

$$\rho(x)_{B,\sigma} = \begin{cases} 0 & \text{if } (x > B) \\ \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{x}{\sigma})^2}} & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

O objectivo reside, então, na procura dos valores de B e σ que melhor se ajustem ao modelo. Neste contexto e quando se está afastado da solução, haverá resíduos altos e os valores de B e σ serão também altos, à medida que nos aproximamos da solução esses valores decrescem. A questão principal é saber se se está longe ou perto da solução. É aqui que entra o congelamento ou libertação de incógnitas, não existe uma metodologia que sirva todos os casos por isso é necessária atenção e consideração aquando da manipulação das incógnitas e da compreensão dos valores de resíduos e de B e σ (Pierrot-Deseilligny, 2014).

II.3 Transformação de Helmert (7 parâmetros)

A transformação de coordenadas presente no *SfM_georef v2.3* (James and Robson, 2012) permite georreferenciar ficheiros contendo nuvens de pontos, transformando os pontos de um sistema de coordenadas arbitrário para um sistema de coordenadas real. Esta transformação é denominada de Helmert (Helmert, 1884) ou transformação a 7 parâmetros (equação Error: Reference source not found).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + (1+dk) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

As quantidades $T_{x,y,z}$ são referentes à diferença entre os centros dos elipsóides; as rotações são igualmente referentes a cada eixo, $R_{x,y,z}$ e $x_{1,2}$, $y_{1,2}$ e $z_{1,2}$ são correspondentes ao ponto no sistema de coordenadas final e ao ponto no sistema de coordenadas inicial respectivamente. A resolução deste sistema requer pelo menos o conhecimento prévio de 3 pontos em cada um dos sistemas de coordenadas.

III Produção automática de ortofotos em áreas urbanas utilizando veículos aéreos não-tripulados e software de código aberto

DUARTE, Diogo ¹ e **GONÇALVES**, Gil ^{1,2}

¹ *Departamento de Matemática-Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Apartado 3008*

EC Universidade, 3001 - 454 Coimbra, Portugal

Tel: +351 239791150; Fax: +351 239793069; email: diogovad@gmail.com

² *Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra (INESC-Coimbra)
Rua Antero de Quental, Nº199*

3000 - 033 Coimbra, Portugal

Tel: +351 239791150; Fax: +351 239793069; email: gil@mat.uc

Resumo: Assistimos atualmente a uma crescente utilização fotogramétrica de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS) em diversas aplicações, que vão desde a monitorização ambiental à agricultura e silvicultura de precisão. Um dos produtos mais frequentemente requisitados à Fotogrametria Digital são os ortofotos. De facto, ao possibilitarem a integração, em ambiente SIG, dos dados radiométricos e/ou espectrais contidos nas imagens ópticas com os dados geográficos e/ou cartográficos, os ortofotos permitem expandir as análises espaciais para outros tipos de atributos. Neste trabalho é descrita uma metodologia para a utilização de VANTS na produção automática de ortofotos. Utilizando software de código aberto e tendo por base um caso de estudo

realizado na área urbana de Coimbra iremos analisar as potencialidades e os limites da utilização desta tecnologia no contexto da produção de ortofotos para actualização duma base de dados espacial municipal. Os resultados obtidos mostram que a utilização conjunto de VANTs com software fotogramétrico de código aberto permitem gerar ortofotos com uma excelente relação qualidade/preço.

Palavras-chave: Áreas urbanas, Fotogrametria Digital, VANTs, Ortofotos, Software de código aberto.

Abstract: Nowadays, the photogrammetric use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in several areas is a reality that grows from day to day in several market areas. In such areas, ranging from environmental monitoring to precision agriculture, the ortophotos are the most commonly requested digital photogrammetric product. In fact, by using a GIS platform, the ortophotos can enable the integration of radiometric and spectral image data with the geographic and cartographic data and allow us to expand the spatial analysis to other types of attribute data. In this paper we present a methodology for the automatic production of ortophotos in urban areas by using UAVs and open source photogrammetric software. The potential and limits of this technology are assessed in the context of updating a municipal spatial database. The results show that the synergistic use of UAVs and open source photogrammetric software can be effectively used to produce ortophototos of small urban areas with an excellent quality/price ratio.

Keywords: Urban areas, Digital Photogrammetry, UAVs, Ortophotos, Open source software

III.1 Introdução

A vulgarização da ortofotografia, que até há muito pouco tempo, estava directamente conotada com elevados custos, tanto económicos como de processamento, é uma realidade inquestionável devido à tremenda evolução tecnológica das câmaras digitais, do poder de cálculo e armazenamento dos computadores pessoais e à acessibilidade generalizadas aos VANTs. Actualmente, esta tecnologia permite um acesso generalizado da comunidade fotogramétrica e não fotogramétrica às técnicas de modelação tridimensional (3D) da superfície topográfica, as quais se baseiam num conjunto de imagens dessa superfície (ou objecto) e que obedecem a determinados protocolos intrínsecos à fotogrametria. Hoje em dia, com a ajuda dos VANTs e da grande comunidade que desenvolve ferramentas de *código aberto*, existe a possibilidade de tornar a realização de ortofotos uma tarefa mais agilizada e utilizá-la num maior leque de aplicações onde num passado recente não faria sentido devido aos seus elevados custos e à sua morosidade. A capacidade de intervenções rápidas e/ou sistemáticas, tornam os VANT a vanguarda de muitas operações, como por exemplo a análise de cenários de catástrofe ou a agricultura de precisão.

Em meio urbano e para apoio de várias actividades municipais é prática vulgar a utilização de ortofotos como camada básica de suporte a bases de dados espaciais (Skarlatos, 1999). De facto, ao possibilitarem a integração, em ambiente SIG, dos dados radiométricos e/ou espectrais contidos nas imagens ópticas com os dados geográficos e/ou cartográficos, os ortofotos permitem expandir as análises espaciais para outros tipos de atributos (Zhou et al., 2005).

Neste artigo iremos avaliar as potencialidades dos VANTs e do software de código aberto na produção de ortofotos em meio urbano. Na secção seguinte iremos apresentar a tecnologia VANTS e caracterizar a

plataforma aérea utilizada. De seguida descreveremos os principais módulos do software de código aberto de fotogrametria digital utilizado na produção do ortofoto: o PAMP. A avaliação das potencialidades desta tecnologia é feita depois quer em termos quantitativos, quer em termos qualitativos. Para avaliar quantitativamente as potencialidades desta tecnologia iremos utilizar dois dos produtos gerados, o ortomosaico (ou ortofoto) e o Modelo Digital de Superfície (MDS) e iremos calcular a raiz quadrada do erro médio quadrático utilizando pontos de verificação obtidos pela tecnologia GNSS em modo RTK. Na avaliação qualitativa iremos comparar visualmente o ortomosaico gerado por esta tecnologia e outro gerado por um pacote de fotogrametria digital, o Pix4D®.

III.2 Veículos Aéreos Não-Tripulados

Em geral os VANT foram sempre associados a actividades militares (Watts et al., 2012). Recentemente, a comunidade civil têm vindo a utilizá-los num grande leque de aplicações científicas e não-científicas. Para além do factor económico, os VANT abrem um conjunto de novas possibilidades. Em muitos casos e devido à sua alta mobilidade e baixo custo podem introduzir a componente tempo em projectos onde as alterações que ocorrem no objecto são consideravelmente rápidas e onde o recurso a plataformas tradicionais seria incomportável do ponto de vista económico. Além disso nem todos os projectos precisam da elevada exactidão e precisão decorrente de uma plataforma aérea tradicional, apesar de, em determinadas situações, se poderem atingir níveis de exactidão semelhantes à dos voos tradicionais (Turner et al., 2012). Uma das principais desvantagens existentes actualmente em Portugal na utilização dos VANTS para actividades fotogramétricas reside na falta de legislação que regulamente o sua utilização. No entanto, o seu uso tem crescido rapidamente, o que obrigará, num futuro próximo, à criação de regulamentos e de fiscalização próprias pelas autoridades competentes.

Outra desvantagem técnica importante, reside na deficiente exactidão das estimativa automática da orientação externa das imagens, dado que os VANT não são tão estáveis nem contêm unidades de medição inercial tão precisas como as utilizadas nas plataformas tradicionais (Küng et al., 2011). Na maior parte dos projectos é necessário a realização de ortofotos havendo apenas como dados entrada as fotos realizadas e apoio GNSS (usualmente em RTK).

Para uma melhor compreensão comparemos a obtenção de imagens recorrendo a plataformas tradicionais com a obtenção de imagens através de VANT. A diferença de alturas de voo é significativa. A sobreposição deve ser maior nos VANTs, devido ao processo de obtenção automática de pontos de ligação assim como à fraca determinação das posições das câmaras e da sua atitude. Esta sobreposição, apresenta, geralmente uma maior variação, de par para par de fotos, no seu valor ,relativamente às plataformas tradicionais. Outra diferença são as elevadas distorções de perspectiva devido principalmente à grande variação de alturas relativamente à altura de voo realizada. Os parâmetros de orientação externa tornam-se deste modo, desconhecidos, ou, quando medidos, não tenham a exactidão desejada, caso que não acontece nas plataformas tradicionais onde existem unidades de medição inercial, câmaras e receptores GNSS de alta qualidade onde nem o espaço nem o peso do material é relevante (Küng et al., 2011). Este último facto é de relativa importância, tendo em conta que o ajustamento por feixe de um bloco de fotografias necessita de uma boa aproximação inicial para calcular os parâmetros de orientação externa, podendo não convergir tal não aconteça. É usual, devido ao seu peso e dimensões, usar câmaras fotográficas amadoras de pequeno e médio formato. As imagens obtidas por VANTs apresentam também grandes variações tanto radiométricas como de resolução o que afecta também a qualidade final de um

ortomosaico, factor que deve ser tido em consideração aquando da realização do processamento das imagens.

III.2.1 O mini-VANT Swinglet CAM

Este VANT é composto por uma asa eléctrica (tipo delta) com um peso de 500g, incluindo o piloto automático e a câmara digital de 12 MPix (ver figura 3). O seu baixo peso combinado com a fuselagem em espuma, torna-o relativamente seguro em aplicações urbanas, dado que a sua energia de impacto é equivalente à de uma ave de tamanho médio (Küng et al., 2011). Por outro lado, a sua baixa velocidade-ar (aprox. 36 km/h), o facto da sua descolagem ser feita por lançamento manual e a aterragem ser feita em espirais apertadas e em espaços relativamente curtos, facilitam ainda o planeamento do voo em zonas urbanas.

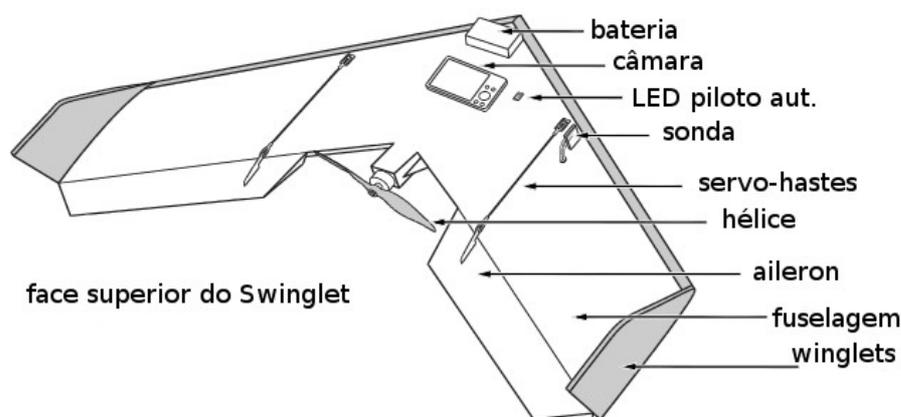


Figura 3: O VANT utilizado neste estudo. Adaptado de (Sensefly, 2014)

O swinglet CAM vem equipado do software eMotion (senseFly, 2014) que controla o piloto automático a partir dum computador portátil localizado em terra. Além disso permite também efectuar o planeamento da cobertura fotográfica e injectar a trajetória na memória do VANT juntamente com a localização das exposições.

III.3 PAMP: Software de Código Aberto em Fotogrametria Digital

Os pacotes de programas de código aberto são hoje em dia amplamente utilizados em todas as áreas científicas, devido tanto ao factor económico como à transparência dos métodos e algoritmos que são utilizados. Sendo o factor económico, hoje mais que nunca, importante, o controlo e a possibilidade de consultar o que o algoritmo faz e como o faz assume uma importância relevante, principalmente quando se tentam conhecer e quantificar as fontes de erro que podem afectar os outputs do software. Há ainda a salientar o facto de que muitas vezes o que acontece é a compra de licenças de código aberto por parte de empresas fabricantes de software para as poderem usar comercialmente, criando apenas interfaces gráficas que facilitam o acesso ao utilizador.

O PAMP (Pastis/Apero/Micmac/Porto) é um pacote de programas de código aberto criado por Marc Pierrot-Deseilligny do Instituto Geográfico Francês. Inicialmente continha apenas ferramentas para a correspondência de imagens. No entanto, foram integradas outras ferramentas já existentes, podendo actualmente realizar a maioria das tarefas, a montante e a jusante da correspondência de imagens com vista à modelação 3D de objectos a partir dum conjunto de imagens. Este pacote é escrito em C++ e contém várias ferramentas para:

- extracção de modelos digitais de superfície a partir de múltiplos pares estereo,
- modelação tridimensional de superfícies/objectos,
- registo de imagens multi-espectrais
- rectificação de imagens satélite utilizando coeficientes polinomiais racionais RPC's

produção de ortofotos

Este software recorre, por sua vez aos seguintes pacotes (também de código aberto), nomeadamente: i) o *SIFT* (*Scale Invariant Feature Transform*) para a identificação de pontos homólogos entre imagens; ii) o DCRAW para extrair informação *exif* das imagens; iii) o Image Magick para a manipulação e conversão entre diferentes formatos de imagens; iv) o proj4 para a transformação entre diferentes sistemas de coordenadas.

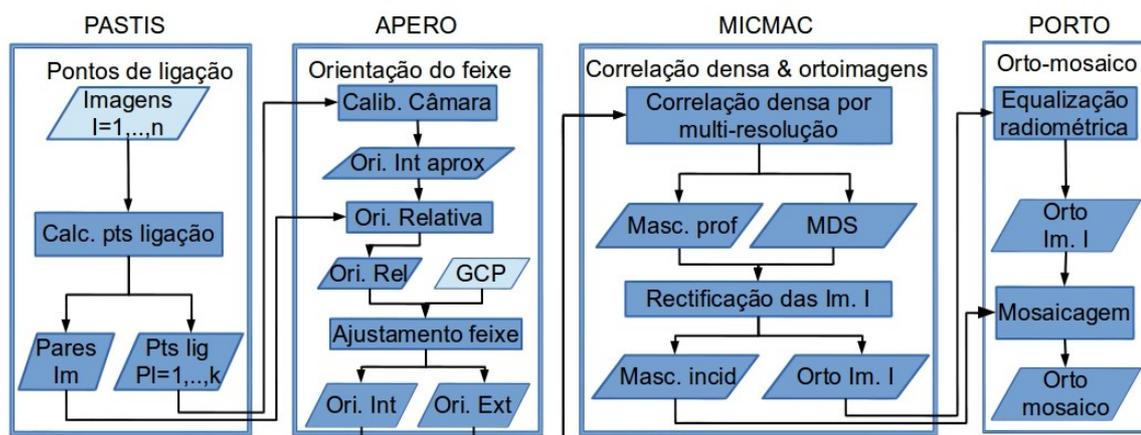


Figura 4: Pipeline seguida para a geração automática do orto e do MDS

O PAMP é composto por 4 módulos (ver figura 4): i) PASTIS para a determinação dos pontos de ligação entre as várias imagens do bloco; ii) APERO para o ajustamento por feixe do bloco de fotografias; iii) MicMac para a correlação densa entre múltiplos pares estéreo e produção das ortoimagens; iv) PORTO para a mosaicagem e equalização radiométrica das ortoimagens e a consequente produção do ortofoto da cobertura.

III.3.1 PASTIS

A primeira etapa do processo de construção do ortofoto consiste na determinação dos pontos de ligação entre as imagens que constituem a cobertura aérea e na consequente ordenação das imagens através da formação dos possíveis pares estereo (ver figura 4). Esta tarefa é feita

com o PASTIS (*Programme utilisant Autopano Sift pour les Tie-points dans les ImageS*). Numa primeira fase são determinados os pontos de interesse utilizando o detector SIFT os quais são supostamente robustos relativamente às variações de escala, às rotações e ao ruído. Numa segunda fase os pontos de interesse são emparelhados, ou seja, para cada imagem e para cada ponto são determinadas as imagens que contêm um ponto semelhante, definido segundo a norma euclidiana (Lowe, 2004).

III.3.2 APERO

Depois de termos determinado os pontos de ligação entre as imagens passamos à orientação do feixe de imagens num determinado referencial definido pelo utilizador. Esta etapa do processo é feita com o APERO (*Aérotriangulation Photogrammétrique Expérimentale Relativement Opérationnelle*). Os principais módulos do APERO são (Pierrot-Deseilligny and Clery, 2011):

- Um módulo para o cálculo da aproximação inicial da orientação do bloco, que recorre a: i) um algoritmo baseado na matriz essencial numa projecção cónica, utilizada vulgarmente na visão computacional; ii) à recessão espacial fotogramétrica (i.e orientação externa); iii) a um programador especial hierárquico que determinar a árvore óptima do bloco das fotografias (onde cada imagem com excepção da primeira tem um conjunto de pais relativamente à qual a sua orientação é calculada)
- Um módulo para o cálculo do ajustamento por feixe, baseado na linearização clássica das equações de colinearidade e no consequente processo iterativo de Gauss-Newton ou em opção o método de Levenberg-Marquardt para a resolução do sistema de equações não-lineares.

- Módulos para a determinação da orientação absoluta baseada em pontos de apoio ou definida a partir das imagens.
- Alguns módulos para a importação e exportação de dados: pontos de ligação, pontos de apoio, orientações interna e externa, coordenadas GPS dos centros de exposição (no caso de existirem).

III.3.3 MICMAC

A etapa seguinte do processo consiste na geração duma nuvem de pontos 3D utilizando a correspondência densa de imagens. No MicMac (*Multi-Images Correspondances, Méthodes Automatiques de Corrélation*) o problema de reconstrução da superfície por correlação densa é resolvido pela minimização dum funcional de energia dado por (Pierrot-Deseilligny and Paparoditis, 2006):

$$E_{\alpha}(Z(x, y)) = \sum (1 - \text{Corr}(x, y, Z(x, y))) + \alpha K(x, y) \quad (20)$$

Nesta equação $Z(x, y)$ é a superfície que pretendemos reconstruir (isto é o MDS), Corr é a função de correlação cruzada normalizada, α é um parâmetro de suavização e K é o termo de regularização dado por

$$K(x, y) = |Z(x+1, y) - Z(x, y)| + |Z(x, y+1) - Z(x, y)| \quad (21)$$

O mínimo global do funcional é encontrado em tempo polinomial utilizando uma implementação, em multi-resolução, da técnica clássica de optimização combinatória baseada no corte mínimo e no fluxo máximo de grafos (Roy and Cox, 1998).

III.3.4 PORTO

O Porto é a ferramenta utilizada para a produção de ortofotos (mosaicos de ortoimagens). Apesar de ainda estar num estado muito incipiente de desenvolvimento (Pierrot-Deseilligny, 2012) permite já

realizar a mosaicagem e a equalização radiométrica das diferentes orto-imagens que constituem o bloco. A equalização radiométrica de cada ortoimagem $O_{i(x,y)}$ é feita através dum polinómio local $P_{i(x,y)}$ e de um polinómio global $R_i(x,y)$ de forma a evitar uma possível deriva da radiometria:

$$O_{corr} = O_i(x,y)P_i(x,y)R_i(x,y) \quad (22)$$

Os coeficientes destes polinómios são determinados globalmente utilizando o método dos mínimos quadrados.

III.3.5 Parametrização formal da PAMP em XML

Do ponto de vista prático, um dos inconvenientes do pacote PAMP reside na parametrização formal em XML dos seus diferentes módulos. Como o seu desenvolvimento foi feito tendo em vista um grande leque de aplicações aéreas e terrestres a parametrização é complexa. No entanto, existe para cada módulo um ficheiro xml padrão que poderá ser customizado em função das especificidades de cada projecto.

No Pastis a informação necessária a incluir no ficheiro xml refere-se aos parâmetros iniciais de calibração da câmara, nos casos em que alguma desta informação não estiver contida na informação exif dos ficheiros imagem, isto é, as coordenadas imagem do ponto principal, a distância focal e o tamanho do sensor.

No caso do Apero esta parametrização em xml permite controlar os procedimentos de calibração da câmara e de orientação das imagens. Note-se que em muitos projectos fotogramétricos, este aspecto é muito importante pois é frequente ter alguns parâmetros de calibração/orientação previamente determinados e se pretende que estes se mantenham fixos durante o processo de refinamento dos parâmetros. Assim, as principais secções do ficheiro xml são:

- *<SectionBDD_Observation>* - onde se define os pontos de apoio e de ligação da cobertura,
- *<SectionInconnues>* - onde se lista a calibração da câmara (ou das câmaras) utilizadas no projecto e as imagens associadas. A primeira imagem da lista é posicionada de forma arbitrária,
- *<SectionSolveur>* - onde se especifica qual o algoritmo a utilizar na resolução da triangulação fotogramétrica,
- *<SectionCompensation>* - onde se definem as diferentes etapas do cálculo da triangulação.

No caso do MicMac a parametrização xml é em geral utilizada em projectos de fotogrametria terrestre, para se adaptar a geometria da rede de imagens na reconstrução 3D do objecto de estudo. É também neste ficheiro xml que se define espacialmente a área de trabalho e se parametrizam as várias etapas de multi-resolução referidas anteriormente. As secções mais importantes são:

- *<Section_Terrain>* - onde é definida a área sobre a qual o MicMac vai realizar a correspondência entre imagens, assim como o intervalo de profundidade
- *<Section_PriseDeVue>* - onde se definem as várias perspectivas de imageamento do objecto, com as suas imagens e parâmetros.
- *<Section_MEC>* - é onde se define as várias etapas multi-resolução e os seus respectivos parâmetros (zoom, janela de correlação, ...)

Por último a informação mais importante a considerar no ficheiro xml do Porto é relativa à montagem do mosaico (*<SectionFilatragelIn>*) e à aplicação das correcções radiométricas (*<SectionEgalisation>*) pretendidas. Tal como no MicMac a parametrização xml do Porto é feita em

geral em projectos de fotogrametria terrestre, devido à possibilidade de existirem diferentes perspectivas de imageamento do objecto.

III.4 Caso de estudo: zona urbana de Coimbra

III.4.1 Dados

O caso de estudo apresentado neste trabalho situa-se na zona central da cidade de Coimbra, cobrindo uma área urbana, a Praça da República, e uma área de vegetação, o Parque de Santa Cruz (Figura 4). O campo de jogos do Parque serviu como zona de descolagem e de aterragem do VANT.



Figura 5: Localização da zona de estudo, dos centros das imagens e dos pontos de apoio e verificação

O voo foi efectuado no dia 28 de Janeiro de 2013 e consta dum bloco de 76 imagens obtidas com o swinglet CAM da senseFly (ver Figura 5). A

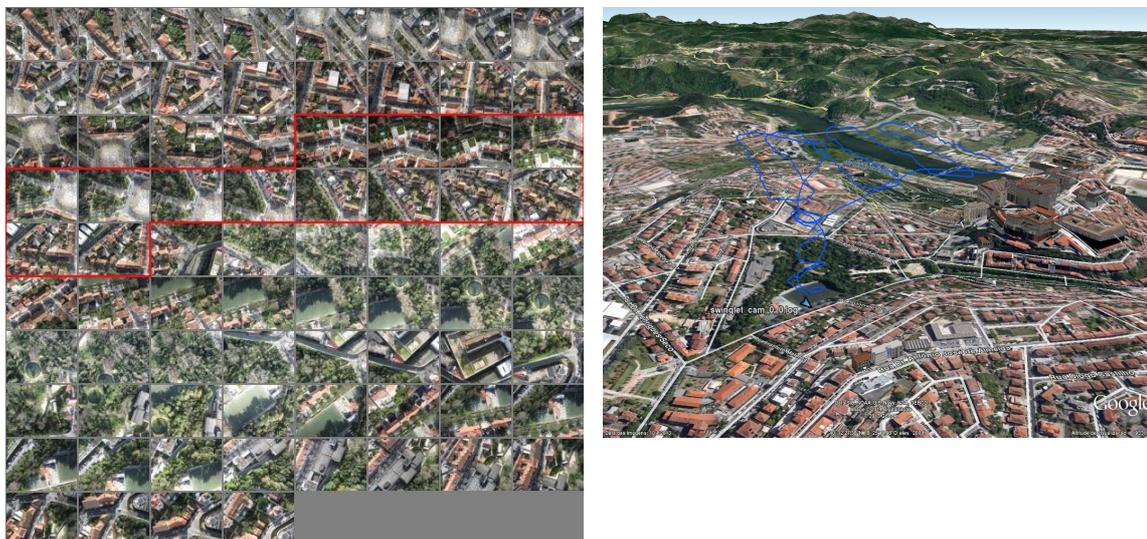


Figura 6: Bloco de 76 imagens que compõem a cobertura aérea da área de estudo e correspondente trajectória. A vermelho imagens utilizadas na calibração inicial da câmara.

recolha dos pontos de apoio (GCPs) e dos pontos de verificação (CHP) foi feita por técnicas GNSS em modo RTK (ver Figura 5). O planeamento de voo foi feito com o software eMotion com os requisitos de 80% de sobreposição longitudinal, 60% de sobreposição lateral e uma altura de voo média de 100 (aproximadamente) acima do solo urbano. A localização dos centros de exposição é também ilustrada na figura 5.

III.4.2 Resultados e Discussão

A figura 7 mostra o ortofoto da cobertura aérea obtido pelo pacote de software fotogramétrico de código aberto PAMP, utilizando a configuração descrita seguidamente. Para a calibração inicial da câmara utilizaram-se 14 imagens do bloco (figura 6) e o modelo de distorção radial das lentes estendido definido com os 5 parâmetros (C_x , C_y , R_3 , R_5 , R_7),

além da posição do ponto principal (Pierrot-Deseilligny, 2012). Para apoio da triangulação do bloco das 76 imagens no sistema de coordenadas PT-TM06/ETRS89 utilizaram-se 11 pontos de apoio (figura 5). para a normalização radiométrica das ortoimagens.

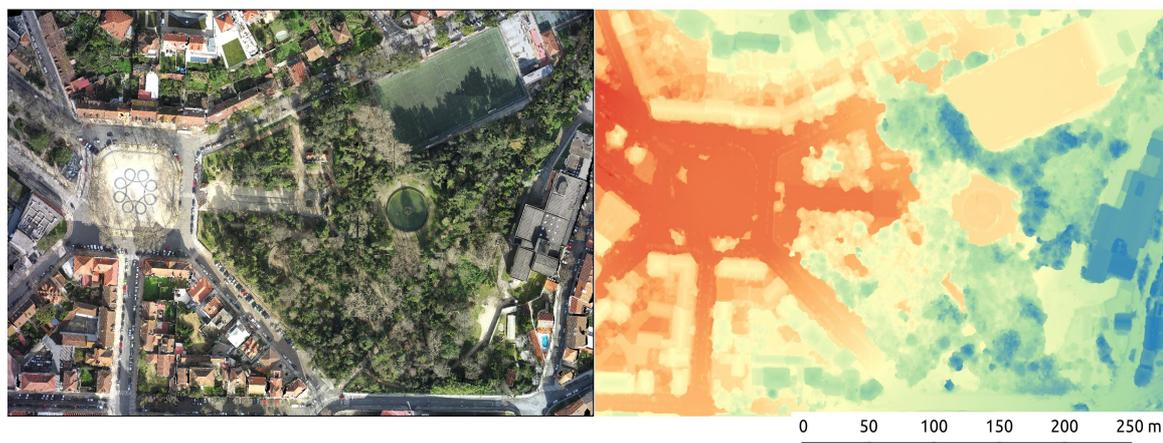


Figura 7: Ortofoto da cobertura e correspondente MDS obtido per correlação densa (ambos com resolução espacial de 4cm)

A figura 8 mostra uma perspectiva da nuvem de pontos 3D obtida pelo software de código aberto PAMP e colorida pelos valores RGB das 76 imagens da cobertura. Esta nuvem é composta por 136 296 981 pontos e ocupa um volume aproximado de 2,0GB.

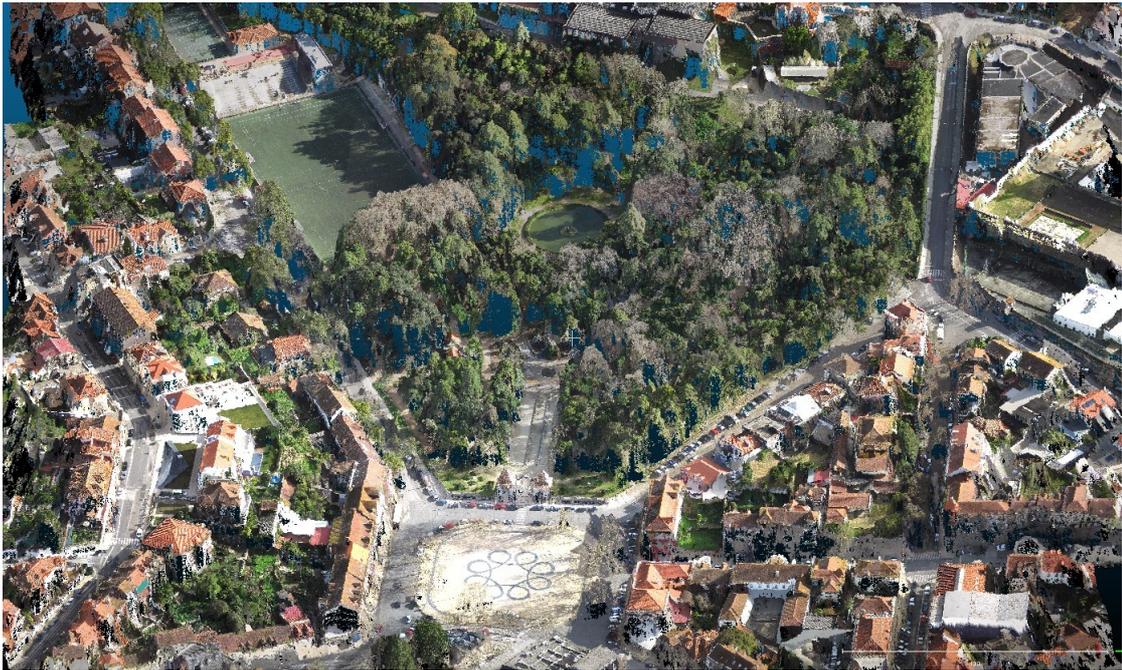


Figura 8: Nuvem de pontos 3D contendo 136 296 981 pontos

A tabela 2 mostra os resultados obtidos na avaliação da exactidão posicional do orto e na avaliação da exactidão vertical do MDS. No cálculo da tabela consideraram-se as seguintes expressões:

$$\Delta = C_{GPS} - C_{Orto}; remq = \sqrt{\frac{(\Delta M)^2 + (\Delta P)^2}{n}} = \sqrt{rem_M^2 + remq_P^2} \quad (23)$$

Os valores obtidos mostram que a exactidão posicional do orto avaliada pelo indicador da raiz quadrada do erro médio quadrático do orto é de 19cm a qual se mostra perfeitamente adequada para actividades municipais.

Tabela 2: Avaliação da exactidão posicional do ortofoto e vertical do MDS

CHP	<i>Resíduos Orto (m)</i>			<i>MDS</i>
	ΔM	ΔP	<i>Erro_xy</i>	ΔH (m)
02	0,109	0,048	0,119	-0.774
03A	-0,087	0,005	0,087	-1.299
06	0,051	0,129	0,139	-0,152
08	-0,023	0,008	0,024	-0,144
09	-0,128	0,221	0,255	0,195
10	0,058	-0,057	0,081	1,353
11A	-0,069	0,013	0,070	-0.799
12	-0,113	-0,01	0,113	0,341
13	-0,082	-0,005	0,082	1.194
14	-0,149	0,005	0,149	0.054
remq_M = 0,07m ; remq_P = 0,08m ; remq_Orto = 0,11m; remq_MDS = 0.80m;				

Para avaliarmos a influência do número dos pontos de apoio (GCPs) na triangulação por feixe repetiu-se o procedimento anterior mas considerando desta vez apenas os 4 pontos GCPs seguintes: 07, 08A, 09A, 11. Os resultados globais obtidos foram diferentes dos indicados na tabela 2 obtendo-se: rmeq_Orto=0.25 m e rmeq_MDS=2.24 m.

III.4.3 Comparação relativa

Afim de testarmos a performance deste software de código aberto num contexto de produção, surgiu a ideia de se efectuar uma comparação relativa entre o orto gerado nas secções anteriores e orto gerado pelo software comercial Pix4D®. A figura 8 mostra uma comparação relativa visual entre estes dois ortos. Na figura 8-a é apresentado o orto produzido

pelo Pix4D®. Na figura 8-b é apresentado a diferença RGB entre este orto e o produzido pelo PAMP (figura 8-a); note-se que a cor cinzenta representa os pixels com valores semelhantes de RGB. Nas figura 8-c e 8-d é apresentado o mesmo detalhe no orto gerado pelo PAMP e pelo Pix4D, respectivamente. O mesmo acontece nas figuras 9-e e 9-f.

Apesar de globalmente a qualidade radiométrica dos dois ortos ser muito semelhante existem pequenas diferenças que interessa salientar: i) no PAMP existem alguns pixels sem valor RGB (pixels a preto); ii) no PIX4D apesar de não existirem pixels pretos alguns deles são substituídos por valores incorrectos de RGB originando os chamados pixels fantasma.

III.5 Conclusões

Pode-se dizer que os VANT não vão tornar as técnicas da fotogrametria aérea clássica obsoletas. Antes pelo contrário, vêm abrir um novo leque de oportunidades na área da Fotogrametria Digital, trazendo consigo a necessidade de desenvolver e utilizar novos pacotes de software fotogramétrico capazes de lidar tanto com a quantidade de informação obtida, assim como a de ultrapassar a utilização de imagens obtidas por câmaras de grande consumo e o facto destas imagens serem captadas em posições e atitudes não convencionais necessárias à maioria dos programas clássicos de aerotriangulação por feixe de blocos de imagens.

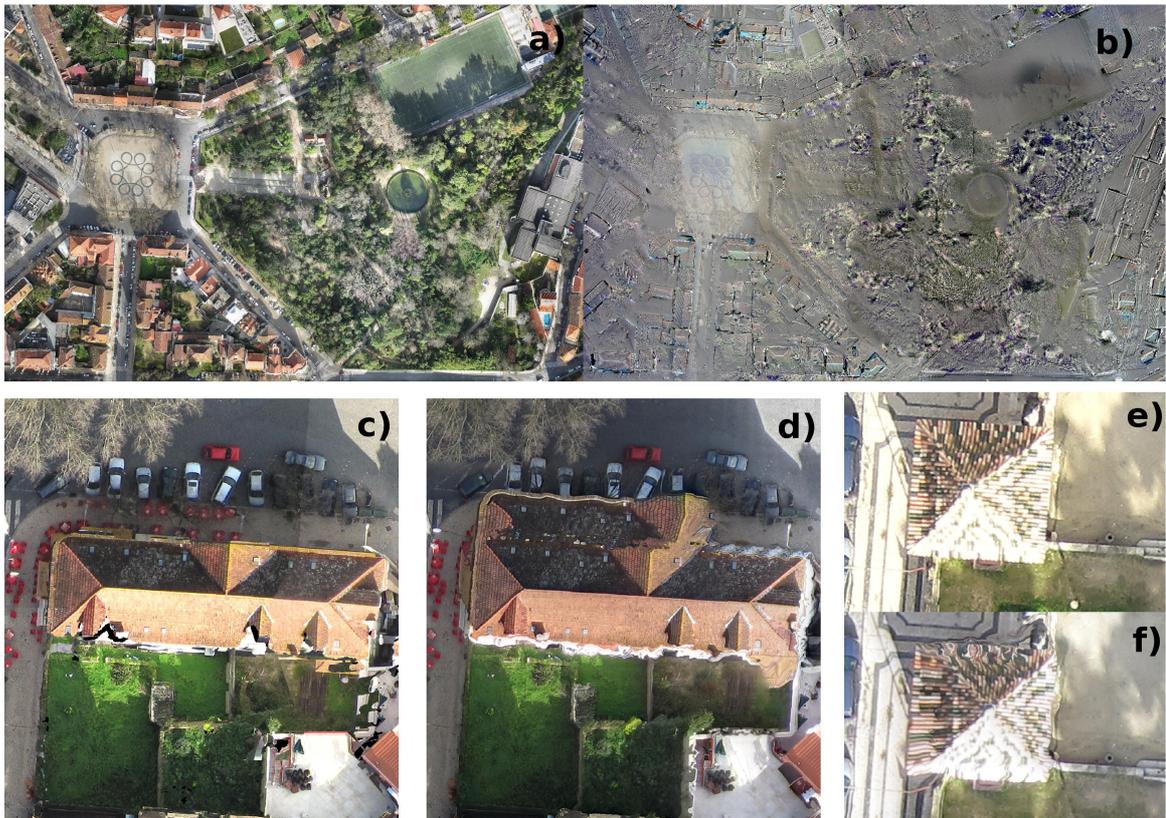


Figura 9: Comparação visual entre os dois ortofotos: a) ortofoto produzido pelo Pix4D®; b) diferença radiométrica RGB pixel a pixel entre os dois ortofotos; c-e) e d-f) representam, respectivamente, detalhes dos ortofotos produzidos pelo PAMP e pelo Pix4D.

Os resultados obtidos para os indicadores de exactidão posicional do orto ($remq_orto = 11\text{ cm}$) mostram que os VANTs conjugados com o software de código aberto são uma tecnologia a considerar seriamente para a produção de ortofotos em meio urbano pelas autarquias. No entanto a presença de alguns artefactos (pixeis sem valor de RGB ou pixeis fantasmas) pode ainda constituir um obstáculo para potenciais utilizadores.

Por outro lado, os resultados obtidos para os indicadores de exactidão vertical do MDS ($remq_MDS = 0.80\text{ m}$) sugerem que esta tecnologia poderá ser utilizada com fiabilidade na geração de produtos 3D, como por exemplo nuvens de pontos 3D, e constituir uma fonte dados

economicamente viável para variados fins, tais como o cadastro predial 3D.

No entanto, atendendo a que PAMP, é um pacote de software que pretende abranger um grande leque de tarefas, requer também uma grande parametrização (ficheiros *.xml*), o que aliado à não existência de um interface gráfico torna a sua utilização pouco amigável e algo complexa. A realização duma interface gráfica dentro dum ambiente SIG de código aberto (por exemplo o QGIS ou o GRASS) será alvo de futuro desenvolvimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à SINFIC pela cedência das imagens e pelo orto gerado no software Pix4D®. Agradecem também à Câmara Municipal de Coimbra pelos trabalhos de campo efectuados na recolha dos pontos de controlo (GCP) e dos pontos de validação (CHP). Por último salientam o facto deste trabalho ser financiado parcialmente pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projecto PEst-OE/ EEI/UI308/2014 e pelo Projecto EMSURE - Energy and Mobility for Sustainable Regions (CENTRO-07-0224-FEDER-002004) da iniciativa Energy for Sustainability da Universidade de Coimbra.

III.6 Referências

Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., and Gervais, F. (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics (UAV-g), Zurich, Switzerland. ISPRS Archives - Volume XXXVIII-1/C22*, p. 125-130.

Lowe, D. G. (2004). *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*, International Journal of Computer Vision 60: p. 91-110.

Pierrot-Deseilligny, M. 2012. MicMac, Aperro, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!. Disponível online <http://logiciels.ign.fr/?Micmac>. Acedido em 2014-06-16

Pierrot-Deseilligny, M., and Clery, I. (2011). Aperro, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. In *Proceedings of the ISPRS Symposium, 3DARCH11*, p. 269-277.

Pierrot-Deseilligny, M., and Paparoditis, N. (2006). A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In *ISPRS Workshop on Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites) Vol. 36 (Part 1/W41)*, Ankara, Turkey

Roy, S., and Cox, I.J. (1998). A maximum-flow formulation of the N-camera stereo correspondence problem. In *Computer Vision, 1998. Sixth International Conference on*, p. 492-499.

senseFly 2014. The swinglet CAM. Disponível online <http://www.sensefly.com/>. Acedido em 2014-06-16.

Skarlatos, D. (1999). *Orthophotograph Production in Urban Areas*, The Photogrammetric Record 16 : 643-650.

Turner, D.; Lucieer, A. & Watson, C. (2012). *An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds*, Remote Sensing 4 : 1392-1410.

Watts, A. C.; Ambrosia, V. G. & Hinkley, E. A. (2012). *Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use*, Remote Sensing 4 : 1671-1692.

Zhou, G.; Chen, W.; Kelmelis, J. & Zhang, D. (2005). *A Comprehensive Study on Urban True Orthorectification*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43: 2138-2147.

IV Modelação tridimensional de superfícies urbanas recorrendo a nuvens de pontos obtidas por programas de código aberto . Casos de estudo

(Tridimensional reconstruction of urban scenes with point clouds)

Diogo DUARTE¹ e Gil GONÇALVES^{1,2}

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra,

² Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra,

diogovad@gmail.com, gil@mat.uc.pt

Resumo

O recurso a tecnologias relacionadas com a representação tridimensional tem vindo a ser implementada, tanto na sociedade em geral como na área da engenharia. Têm contribuído para tal tanto o rápido desenvolvimento tecnológico assim como o facilitado acesso a essas mesmas tecnologias. Claramente o paradigma da informação bidimensional está a mudar para um outro, o tridimensional. Neste trabalho serão expostas várias metodologias para realizar uma representação tridimensional do espaço

urbano através da construção de nuvens de pontos georreferenciadas e sua aplicação multidisciplinar. Serão utilizadas plataformas de fotogrametria terrestre (fachadas, faces verticais) assim como de fotogrametria aérea (terreno, faces horizontais), permitindo uma modelação completa e com qualidade, tanto visual como posicional.

Palavras-chave: Fotogrametria Terrestre, Modelação Tridimensional Urbana, Nuvens de pontos

IV.1 Introdução

O conceito de nuvem de pontos, que na área da engenharia geográfica sempre foi associado a tecnologias LIDAR pode ser hoje em dia o resultado da correlação de imagens. Variados avanços tecnológicos, nomeadamente o desenvolvimento de unidades de processamento gráfico, permitem actualmente que a utilização de imagens para a produção de nuvens de pontos, seja uma alternativa às mesmas obtidas por LIDAR. Esta técnica, onde através de imagens bidimensionais, se criam modelos tridimensionais denomina-se, na área da visão computacional de *structure from motion*. Leberl et al., 2010 realizaram um estudo em que confrontam a tecnologia LIDAR com a da visão computacional para fins fotogramétricos, tanto ao nível de exactidão como dos custos associados seja no processamento ou na aquisição dos dados. As suas conclusões sugerem que o uso da visão computacional é, no geral, vantajosa, realçando entre outras, o baixo custo das plataformas fotográficas, a automatização facilitada e a densidade das nuvens de pontos obtidas. Ao nível da exactidão (Harwin and Lucieer, 2012) e (Wenzel et al., 2012) também obtiveram resultados favoráveis e com erros sempre na ordem do pixel. Em relação à densidade da nuvem de pontos, é necessário ter em atenção que esta está relacionada com a resolução da imagem e a distância que separa o objecto da câmara fotográfica (Furukawa and Ponce, 2010).

Neste contexto o trabalho vai analisar várias aplicações das nuvens de pontos tirando proveito tanto da elevada automatização presente em alguns programas assim como do manuseamento das nuvens de pontos como produto espacial, possibilitando deste modo, novas perspectivas de estudo em diversas áreas. Ao longo deste trabalho será também proposta uma metodologia para a criação de nuvens de pontos recorrendo ao sistema fotogramétrico móvel Trimble ® MX1. Será também sugerida uma metodologia para a criação de nuvens de pontos para trabalhos arqueológicos, detecção de mudança e cartografia tridimensional. Serão expostos os recursos utilizados e uma breve descrição dos processos inerentes ao algoritmo de um programa que recorre à técnica *structure from motion* (secção IV.2.2).

Os programas utilizados encontram-se apresentados na secção IV.1.3. Nos processos referentes à geração das nuvens de pontos os programas utilizados são de código aberto, no entanto existem tarefas realizadas com *software* comercial, nomeadamente a extracção de informação georreferenciada a partir da visualização tridimensional desta nuvem de pontos.

IV.1.1 Fotogrametria Aérea

Câmara fotogramétrica de pequeno formato

A câmara fotogramétrica de pequeno formato utilizada (figura 10) nos casos de estudo em que se recorreu a fotografia aérea, foi uma DigiCAM-H/39 assim como o respectivo material associado:



1.AEROcontrol Precise Positioning & Attitude Determination - para a determinação dos centros de projecção das fotografias assim como a sua atitude.

Figura 10:
DigiCAM-H/39

2.CCNS Computer Controlled Navigation System – utilizado como instrumento de navegação para uma correcta cobertura fotogramétrica.

3.Mount Adapter – instrumento onde a câmara é aplicada.

IV.1.2 Fotogrametria terrestre

A fotogrametria terrestre refere-se ao campo da fotogrametria em que o eixo óptico da câmara fotográfica está localizado no sólo ou perto deste (Gonçalves, 2013). No entanto, nos casos de estudo apresentados vão ser utilizadas técnicas da visão computacional e não da denominada fotogrametria terrestre (ver capítulo IV.2.2).

O sistema fotogramétrico Trimble MX1®

O Trimble MX1 (Trimble®), denomina-se de sistema fotogramétrico terrestre móvel. Insere-se num conjunto de três produtos móveis da Trimble para a realização de fotogrametria terrestre. Neste caso o MX1 tem como principal objectivo o de ser uma solução complementar para a recolha georreferenciada de inventário rodoviário e suas envolências. Os outros dois produtos contêm sistemas LIDAR onde a diferença principal é que estes dois últimos permitem a construção automática de nuvens de pontos das zonas abrangidas pelos sensores dos respectivos veículos e onde os preços são também mais elevados.



Figura 11: Trimble MX1 com a sua correspondente aplicação num veículo

A versão do MX1 utilizado, (figura 11) é constituído por 6 câmaras de alta-resolução (15 Mpx) previamente calibradas, contêm unidades de medição inercial e receptores *global navigation satellite system* (GNSS), tendo, deste modo a atitude de cada captura e a localização do seu centro de projecção. Permite a captura e gravação contínua de dados ao longo de 24 horas, podendo-se escolher o modo de captura por intervalos de tempo ou de distância. Este produto tem óbvias vantagens pois permite para além da execução de inventário rodoviário, também a detecção de alterações nesse mesmo inventário.

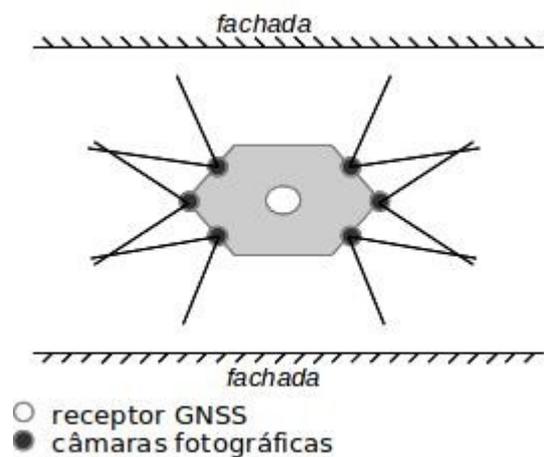


Figura 12: Esquema do MX1, vista superior

Pela figura 12, podemos observar que as 6 câmaras não realizam panorâmicas de 360°, a Trimble para tal, têm outro produto que o permite

fazer, no entanto é uma vantagem que encareceria o produto. Pode-se igualmente observar na figura, que aquando da captura as câmaras traseiras não tem sobreposição com as dianteiras. No entanto as 3 câmaras traseiras tem entre si, ~10% de sobreposição, o mesmo se passa com as dianteiras. Esta geometria indica, à partida, que o sistema fotogramétrico não foi concebido para capturar informação sobre as fachadas mas sim sobre as vias. Estas câmaras produzem ficheiros de vídeo que são posteriormente convertidos a imagens, onde se realizam os trabalhos fotogramétricos.

IV.1.3 Pacotes de programas utilizados

Os pacotes de programas utilizados foram os seguintes:

1. *MicMac* (Pierrot-Deseilligny, n.d), pacote de programas fotogramétricos
2. *VisualSfM* (Wu, n.d.) aplicação gráfica para a construção de nuvens de pontos contendo:
 - *SiftGPU* (Wu, 2007), algoritmo sift utilizando unidades de processamento gráficas
 - *Clustering Views for Multi-view Stereo (CMVS)* (Furukawa and Ponce, 2010);
 - *Multi Core Bundle Adjustment* (Wu, 2011), ajustamento por feixe
 - *Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2)* (Furukawa and Ponce, 2010) ,
3. *SfM_georef v2.3* (James and Robson, 2012) para a georreferenciação das nuvens de pontos;

4. *CloudCompare* (Girardeau-Montaut, n.d.) manipulação de nuvens de pontos;
5. *Screened Poisson Surface Reconstruction* (Version 5.71) (Kazhdan et al., 2006) na reconstrução de faces através de nuvens de pontos.
6. *Monteverdi2* (*Centre National D'Études Spatiales, CNES*) , pacote de programas de código aberto para a manipulação de rasters.
7. *MicroStation v8i* (Bentley Systems®), programa de CAD, permite carregar nuvens de pontos e extrair informação geométrica tridimensional (pontos, linhas, áreas, volumes)
8. *GlobalMapper* (Blue Marble Graphics®) , programa para a manipulação de dados espaciais

O *MicMac* , escrito em C++, é um programa de código aberto criado por M. Pierrot-Deseilligny (Institut Géographique National), realiza um grande leque de trabalhos fotogramétricos, desde fotogrametria terrestre até à fotogrametria aérea recorrendo desde a técnicas tradicionalmente fotogramétricas como a técnicas de visão computacional, introduzindo sempre a rigidez fotogramétrica às equações utilizadas (Georgantas et al., 2012) . É um programa bastante abrangente no que toca às tarefas possíveis de realizar no entanto este facto também torna o seu manuseamento algo complexo devido à elevada parametrização necessária (Pierrot-Deseilligny, 2014).

O *MicMac* contém várias ferramentas para :

- criação de modelos digitais de superfície
- criação modelos tridimensionais de superfícies/objectos,
- registo de imagens multi-espectrais

- produção de ortofotos
- rectificação de imagens satélite utilizando coeficientes polinomiais racionais RPC's

Este é constituído tanto por programas individuais que permitem a conversão de coordenadas, picotagem dos pontos fotogramétricos entre outras, como contém módulos principais de cálculo. Vejamos os módulos : PASTIS para a determinação dos pontos de ligação entre as várias imagens; ii) APERO para a calibração da câmara, cálculo da orientação relativa entre imagens e para o ajustamento por feixe do bloco de fotografias; iii) MicMac para produção dos modelos digitais de superfície (MDS) e ortimagens; iv) PORTO para a mosaicagem e equalização radiométrica das ortoimagens e a consequente produção do ortofoto.

Sendo de código aberto este programa apresenta algumas dependências, desde a manipulação de rasters , ImageMagick, manipulação de informação *exif*, *exiv2*, *exiftool* ,DCRAW, SIFT para o cálculo dos pontos de ligação e o proj4 para a transformação de coordenadas

É o programa pilar do artigo recorrendo-se a ele para a realização das nuvens de pontos, através de fotografias aéreas, que serão apresentadas nos diversos casos de estudo. Para a modelação de fachadas, IV.3.3, foi utilizado o *VisualSFM* (Wu, n.d.), não se recorreu ao *MicMac* pois a geometria das capturas não permite a construção de um modelo geométrico coerente com o utilizado pelo *MicMac* . Este programa é bastante poderoso por esse facto, não necessita de uma geometria de captura coerente ou que se mantenha ao longo de todo o projecto mas apenas que haja elevada sobreposição entre as fotos, conseguindo computar resultados com um grande leque de tipos de dados . Note-se que esta sobreposição não se consegue numa dada captura, no entanto

com o movimento do veículo haverá grande área de sobreposição entre as várias capturas.

O *Sfm_georef v2.3* foi utilizado nas georeferenciação das nuvens de pontos geradas pelo *VisualSFM*. O *CloudCompare* permite a visualização de nuvens de pontos densas e foi o visualizador e manipulador de nuvens de pontos utilizado ao longo do trabalho. A *Screened Poisson Surface Reconstruction* usa as nuvens de pontos geradas para a criação de faces entre os pontos, gerando deste modo uma malha contínua.

IV.2 Geração da nuvem de pontos

IV.2.1 MicMac

A obtenção de nuvens de pontos texturadas através de fotogrametria aérea, utilizando o MicMac, passa pela obtenção de um ortofoto e o seu modelo digital de superfície correspondente. Este facto comporta consigo que a qualidade posicional da nuvem de pontos estará dependente da qualidade do modelo digital de superfície assim como do ortofoto. Esta solução recorre a todos os módulos do *MicMac* referidos em IV.1.3. Estes módulos foram descritos com mais detalhe em (Georgantas et al., 2012).

IV.2.2 VisualSfM

VisualSfM (VSfM) (Changchang Wu, University of Washington), é um

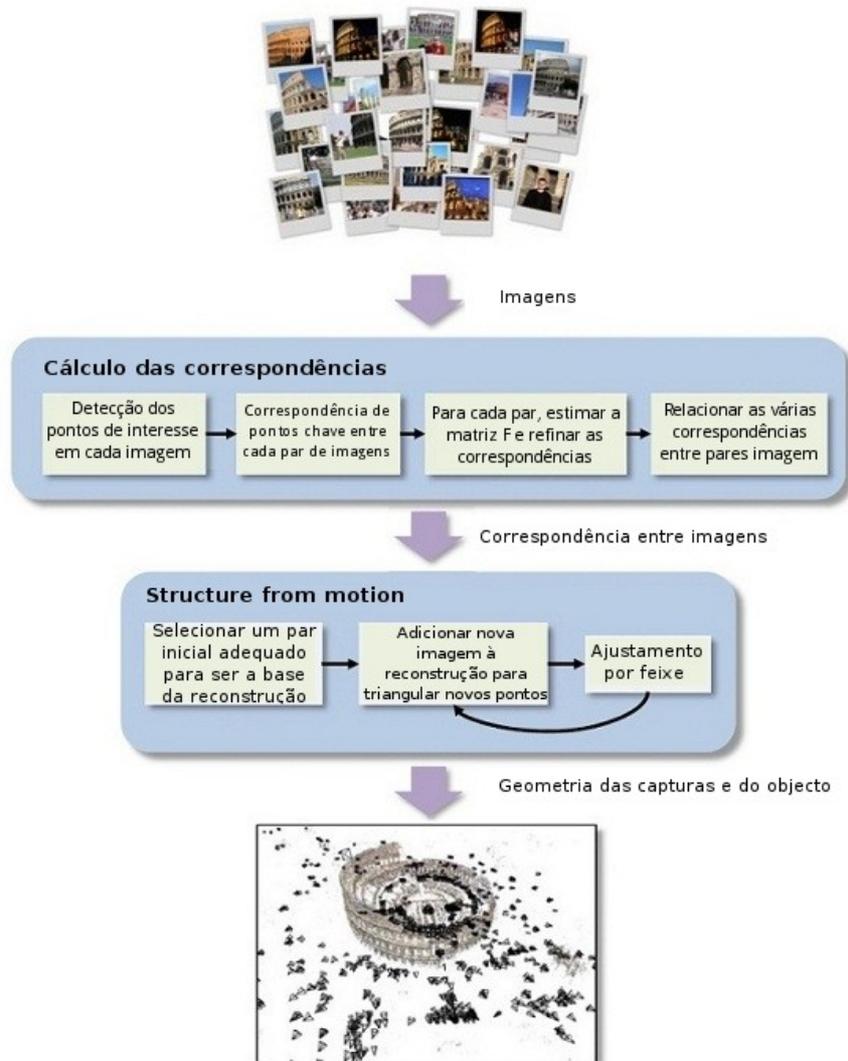


Figura 13: Fluxograma da geração da nuvem de pontos - Adaptado de (Snavely, 2008)

programa de código aberto que permite a reconstrução 3D de objectos através da tecnologia *structure from motion* (SfM). Todo o programa utiliza pacotes de programas que se aproveitam do poder de cálculo dos novos processadores podendo processar os dados em paralelo e/ou utilizando unidades de processamento visual (placas gráficas). A figura 13 descreve, de um modo geral, as várias fases concretizadas pelo programa.

Cálculo de pontos homólogos e correspondências

O cálculo de pontos homólogos no VisualSfM é feito recorrendo ao *SIFT*, *scale-invariant feature transform* (Lowe, 2004). Neste caso particular a aplicação foi concebida para que também recorra a unidades de processamento gráfico aquando do seu processamento, diminuindo deste modo o tempo de cálculo e relaxando o processador para a realização paralela de outras tarefas. Esta aplicação é denominada SiftGPU (Wu, 2007)).

Posteriormente ao cálculo dos pontos homólogos, é construída uma árvore de relações entre esses pontos nas várias imagens. Recorrendo à geometria epipolar vai ser possível criar uma rede geométrica de restrições removendo possíveis *outlayers*.

Estimação da posição das câmaras e reconstrução esparsa

Depois de realizado o cálculo dos pontos homólogos, pretende-se localizar relativamente as posições das capturas. A ideia principal por detrás deste método é o de encontrar inicialmente um par de capturas e localizá-las relativamente uma à outra.

Através da denominada matriz essencial, E (Longuet-Higgins, 1981), e com a calibração da câmara, é possível determinar uma relação entre os pontos objecto e os pontos imagem:

$$(X_1)^T E X_0 = 0 \quad (24)$$

Onde $X_{0,1}$ vêm em coordenadas imagem normalizadas correspondentes a um mesmo ponto objecto.

Tendo em conta a equação 24 pode-se afirmar que todo o processo de reconstrução do objecto está baseado na quantidade de pontos

homólogos que se conseguem encontrar, pois vai tornar a estimação da posição das câmaras mais robusta (Snavely, 2008). Através desta equação, é também possível inferir uma rotação(R na figura 14) e uma translação (T na figura 14) entre as capturas, onde, juntamente com os parâmetros de calibração da câmara se estima a sua posição relativa. Os raios de projecção funcionam como restrições ao modelo onde se pretende minimizar os erros de projecção que vão desde os pontos objecto (na figura 14 A,B e C), passando pelos pontos imagem (a,b e c) até ao centro de projecção das capturas (captura 0 e captura 1) (figura 14) . Podemos, agora, adicionar novas câmaras (captura t) ao modelo utilizando sucessivas resseções e realizando sempre um ajustamento por feixe do bloco depois de adicionada nova captura. O resultado será os pontos objecto utilizados (nuvem de pontos esparsa) e as posições das câmaras

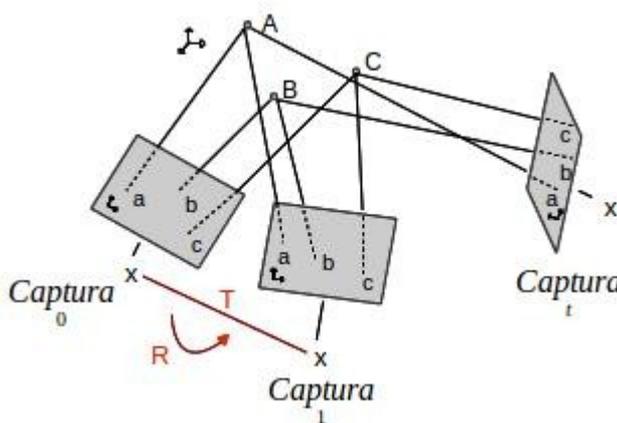


Figura 14: Adição da nova captura t ao modelo inicial.

ajustadas.

Esta nuvem esparsa e como o nome o indica, não é ainda suficiente para uma boa representação do objecto. Vejamos o seguinte ponto.

Reconstrução densa tridimensional

A reconstrução densa é feita utilizando um algoritmo MVS (*multi view stereovision*) , esta aplicação consiste muito basicamente na

atribuição de um ponto objecto, em várias imagens, a cada pixel imagem. Obviamente que esta atribuição tem que ser feita recorrendo a uma grande quantidade de imagens para reduzir ambiguidades e realizar correctamente a atribuição. A versão PMVS (*Patch-based Multi View Stereo*) (Furukawa and Ponce, 2010) consiste na utilização do referido anteriormente MVS, onde, no entanto, o modelo não é construído num só bloco mas sim distribuído por vários sub-modelos tangentes à superfície a representar. Apesar desta informação não ser usada directamente para a reconstrução densa do objecto, é utilizada no refinamento do modelo através de restrições na sua geometria e na visibilidade dos pontos, tendo assim como resultado uma nuvem mais densa e melhor representativa do objecto.

Georreferenciação da nuvem de pontos

No que toca à georreferenciação das nuvens de pontos utilizou-se o *SfM_georef v2.3* (James and Robson, 2012). Este programa utiliza uma transformação de Helmert (7 parâmetros) relacionando vários pontos nos dois sistemas, calculando os parâmetros de transformação e aplicando-os à nuvem de pontos original.

IV.2.3 Construção da malha

As nuvens de pontos, devido à sua natureza discreta, não se adequa a determinados projectos, nomeadamente os que requeiram uma componente visual mais aproximada da realidade. Para tal é construída uma malha de faces através da nuvem de pontos, obtendo deste modo um resultado contínuo e mais próximo, visualmente, da realidade.

O método utilizado foi o de Poisson (Kazhdan et al., 2006), este método consiste na reconstrução de superfícies de malhas como solução para a equação de *Poisson*. Para tal os pontos obtidos na nuvem de pontos

necessitam de ter normais, onde, na sua ausência têm de ser atribuídas pois sem elas é impossível reconstruir a malha.

A equação 24 mostra a equação de Poisson, onde \vec{V} é o campo de vectores formado pelas normais.

$$\Delta \tilde{x} = \nabla \cdot \vec{V} \quad (25)$$

Pretende-se resolver a função para \tilde{x} . Não existe uma solução exacta para o problema. Para além disso \vec{V} é não integrável, o objectivo será a de encontrar a melhor aproximação através dos mínimos quadrados, aplicando o operador da divergência a esse campo de vectores (Kazhdan et al., 2006).

IV.3 Casos de estudo

Nesta secção serão apresentadas tanto metodologias de produção de nuvens de pontos assim como a sua possível aplicação. O primeiro caso de estudo (secção IV.3.1), que aborda a metodologia de produção de nuvens de pontos utilizando câmaras fotogramétricas de pequeno formato, terá a sua aplicação evidenciada na modelação tridimensional urbana (secção IV.3.3), na cartografia tridimensional (secção IV.3.4) e na detecção de alterações (secção IV.3.5) . O segundo caso de estudo (secção IV.3.2) contém uma simples metodologia para a criação de modelos tridimensionais através do *VisualSfM* permitindo um acesso facilitado a outras áreas científicas, neste caso a arqueologia. Esta metodologia será igualmente utilizada na representação tridimensional das fachadas.

IV.3.1 Produção de nuvens de pontos utilizando câmaras fotogramétricas de médio formato

O exemplo apresentado de seguida, tem como finalidade a compreensão da metodologia utilizada para a realização do MDS e ortofoto e conseqüente nuvem de pontos através do *MicMac*. A figura 15

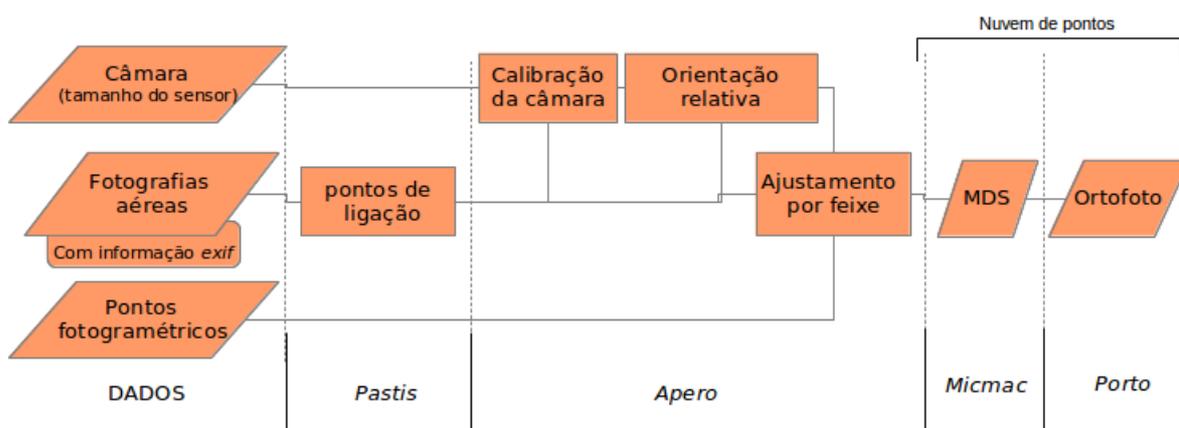


Figura 15: Várias fases do projecto e respectivos módulos do MicMac utilizados

apresenta um fluxograma que pretende, de um modo geral, enunciar as

várias fases de execução do *MicMac* na construção de uma nuvem de pontos através de fotografias aéreas, correspondendo essas mesmas fases aos módulos indicados na secção IV.2.1 .



Figura 16: à esquerda painel com as fotografias utilizadas, à direita pontos de apoio GNSS

A zona do projecto é referente a Coimbra e foram obtidas 27 fotografias através da câmara fotográfica apresentada em IV.1.1 . Este voo foi realizado com sobreposições 70% - 40% e na direcção E-O. A figura 16 mostra um painel com as imagens utilizadas assim como os pontos de apoio disponíveis para o projecto.

A primeira tarefa a realizar é a de adicionar a câmara utilizada ao *MicMac*. A informação necessária ao *MicMac*, relativamente à câmara do projecto, é a atribuição de um nome a essa mesma câmara e o seu respectivo tamanho do sensor. Em relação aos dados, fotografias aéreas, é necessário que contenham tanto a distância focal como a *distância focal equivalente 35mm'*, na sua informação *exif*. Esta informação será utilizada

I Refere-se à distância focal equivalente numa película de 35 mm

para calcular as aproximações iniciais necessárias relativas à calibração da câmara.

O segundo passo refere-se ao cálculo dos pontos de ligação, onde estes são obtidos através do *Pastis*. Neste momento, os pontos de ligação juntamente com a informação do sensor e a informação *exif* permitem o cálculo da calibração da câmara. Esta calibração foi realizada com todas as fotografias do projecto, visto serem apenas 27. No caso de um projecto maior é usual escolher um sub-conjunto de imagens que seja representativa do projecto, para a realização da calibração da câmara (Pierrot-Deseilligny, 2014). Não foi utilizada uma calibração da câmara existente visto o método das grelhas não ter sido implementado no *MicMac*, até à data da realização do projecto.

A calibração permite, agora, calcular a orientação relativa das imagens, esta é efectuada num referencial de cálculo arbitrado pelo *MicMac*. A utilização deste referencial na resolução das suas equações, obriga a que os pontos fotogramétricos utilizados sejam transformados para esse mesmo sistema de coordenadas (Pierrot-Deseilligny, 2014). Depois de transformados, os pontos fotogramétricos são identificados nas imagens, estando em condições de realizar o ajustamento por feixe.

A obtenção de 10 pontos de apoio, recorrendo à tecnologia GNSS, vão permitir a realização de dois projectos independentes, um com a utilização de 5 pontos fotogramétricos e outro com a utilização de 7. A

Tabela 3: Pontos fotogramétricos e de controlo utilizados

	5 pontos	7 pontos
Pontos fotogramétricos	A - C - D - I - J	A - C - D - I - J - B - E
Pontos de controlo	B - E - F - G - H	F - G - H

organização desses mesmos pontos pode ser analisada através da tabela 3. Esta distribuição tem em conta tanto a geometria dos pontos no bloco de fotografias assim como a presença de 3 pontos de controlo comuns para uma melhor discussão dos resultados.

A tabela 4 mostra a qualidade posicional obtida através dos pontos disponíveis. Assinalado a verde, estão os pontos de controlo comuns aos

Tabela 4: Qualidade posicional utilizando, respectivamente, 5 e 7 pontos fotogramétricos (módulo das diferenças)

Ponto	ΔX m	ΔY m	ΔZ m
B	0.116	0.045	0.843
E	0.036	0.099	3.132
F	0.035	0.117	0.006
G	0.061	0.351	2.396
H	0.168	0.172	1.023
média	0.083	0.157	1.480

Ponto	ΔX m	ΔY m	ΔZ m
F	0.041	0.175	0.415
G	0.130	0.257	1.870
H	0.073	0.174	0.414
média	0.081	0.202	0.900

dois projectos. Esta tabela mostra que tanto utilizando 5 ou 7 pontos as diferenças planimétricas entre si não são consideráveis. É, no entanto, perceptível que perpendicularmente à linha de voo as diferenças são maiores. Em altimetria o erro no projecto de 7 pontos é consideravelmente menor.

A figura 17 apresenta uma visualização da sobreposição de imagens,

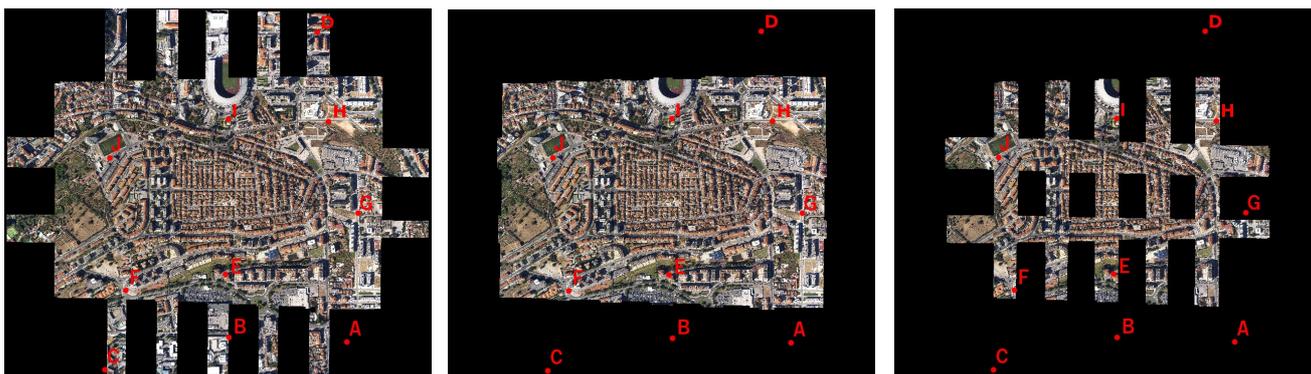


Figura 17: Zonas de 3, 4 e 5 fotografias sobrepostas, respectivamente onde, da esquerda para a direita, temos a zona correspondente à sobreposição de 3, 4 e 5 fotografias. Os pontos de apoio GNSS que se

encontram dentro da zona de sobreposição de 5 fotografias são os seguintes : E, F ,I , J e H.

Vejam os pontos G (tabela 4). Este apresenta, nos dois casos, diferenças superiores relativamente ao ponto F e H. Se tomarmos em atenção a localização destes dois pontos, eles encontram-se numa zona onde estão sobrepostas 5 imagens. Isto não acontece com o ponto G, no entanto e na tabela 4 (esq.) o ponto E também se encontra numa zona onde se sobrepõe 5 imagens e no entanto não apresenta melhores resultados que o ponto B. O ponto G apresenta diferenças sempre superiores às demais tanto nos 5 como 7 pontos. É também notória a diferença das diferenças entre o eixo X e o Y. A linha de voo (E-O), referente ao X, apresenta melhores resultados quando comparado com os resultados na sua perpendicular , eixo dos Y. Os valores obtidos neste estudo vão ao encontro dos obtidos em (Duarte and Gonçalves, 2014), não existem, no entanto, tantos pontos de controlo disponíveis para uma análise mais aprofundada.

A figura 18 apresenta dois pormenores do MDS e respectivo ortofoto. O ortofoto é verdadeiro visto ser baseado num MDS.

Estamos em condições de construir a nuvem de pontos com os seus pontos coordenados no sistema de coordenadas escolhido com o



Figura 18: Pormenores do MDS e do ortofoto correspondente

correspondente valor RGB e coordenadas XYZ. A figura 19, apresenta a nuvem de pontos de uma zona do projecto (esq.), apresenta também uma vista pormenorizada (dir.) . É este tipo de resultado, nuvem de pontos (figura 19), que vai ser considerado nos casos de estudo a seguir apresentados (secções IV.3.3, IV.3.4 e IV.3.5).



Figura 19: Nuvem de pontos de uma porção do projecto à esquerda, pormenor à direita

IV.3.2 Arqueologia

A utilização de representações tridimensionais como uma ferramenta em trabalhos arqueológicos tem vindo a ser discutida ao longo dos últimos anos, estas representações são, no entanto, inseridas na área da visão computacional e da fotogrametria extravazando o conhecimento de base dos arqueólogos. Allen et al., recorrendo à tecnologia LIDAR e à fotogrametria implementaram uma metodologia para a representação tridimensional de uma escavação arqueológica, conseguindo deste modo enquadrar a escavação com o seu entorno e modelando as várias etapas do projecto, sendo possível a sua posterior análise. Ao nível da inventariação de património cultural e com o objectivo de criar modelos com grande resolução, sub-milimétrica, Wenzel et al., propuseram uma metodologia alternativa ao LIDAR que utiliza imagens obtidas através de

câmaras fotográficas convencionais e outros sensores, nomeadamente de infravermelhos, para a realização desses modelos.

A utilização de LIDAR neste tipo de trabalhos acresce consideravelmente o custo dos projectos, devido tanto aos dispositivos LIDAR utilizados assim como toda a metodologia envolvida. Existem contudo, metodologias que não utilizam sistemas LIDAR, por exemplo (Wenzel et al., 2012) e (Wulff, 2010), no entanto, e apesar de não recorrerem a tecnologias LIDAR, favorecendo o factor económico dos projectos, estas ainda são metodologias que requerem um grande control de outras áreas disciplinares como a fotogrametria. As representações tridimensionais acabam por ser apenas utilizadas em projectos que tenham orçamento para tal ou quando existe algum tipo de cooperação interdisciplinar dentro de pólos universitários.

Neste contexto, a utilização do *VisualSfM* é vantajosa pois com



**Figura 20: Passos para a realização da nuvem de pontos
(Adaptado de (Wu, n.d.))**

apenas uma câmara fotográfica e um receptor GNSS é possível a realização de modelos tridimensionais de objectos e sua consequente georreferenciação. Para além disso tanto a instalação como o interface do *VisualSfM* é bastante simples e permite a obtenção de resultados em apenas 4 passos (Torres et al., 2012)(ver figura 20). Esta versatilidade

permite a recolha de dados em várias etapas do projecto se assim for necessário.

A georreferenciação pode ser realizada recorrendo ao programa referido anteriormente *SfM_georef v2.3* (James and Robson, 2012). Este programa permite a introdução de uma escala ao modelo, quando não exista apoio GNSS, ou a completa georreferenciação do mesmo, caso exista.

A figura 21 apresenta um simples fluxograma para a realização de um modelo tridimensional num projecto de arqueologia. Apesar do programa ser bastante versátil no que toca à geometria de captura (necessitando principalmente de elevadas sobreposições) e as fotografias não precisarem de nenhum cuidado técnico aquando da sua obtenção (Snavely, 2008), existem tanto geometrias de captura, assim como aspectos técnicos fotográficos que favorecem a qualidade do resultado final. Neste sentido o primeiro passo na execução do projecto é o planeamento da aquisição fotográfica. Para tal existem algumas

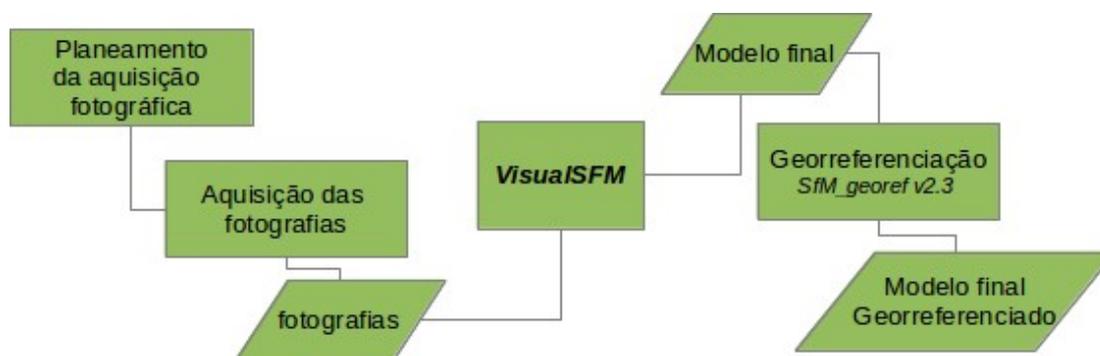


Figura 21: Fluxograma de etapas para a realização de um modelo tridimensional

directrizes, não só do aspecto geométrico da captura mas também das especificidades técnicas da câmara fotográfica.

Neste contexto, as imagens devem obedecer a alguns aspectos técnicos fotográficos. A definição do resultado final dependerá da resolução dos dados iniciais, quanto melhor definição desses dados

melhor será a qualidade nos resultados. A distância focal deverá estar fixa ao longo do projecto, quanto maior for a distância focal e quanto maior for a proximidade com o objecto mais densa será nuvem de pontos final. Visto que se pretende, igualmente, obter a profundidade dos objectos a *abertura* deve ser o máxima possível (f máximo) mantendo deste modo uma maior área da foto focada. O *iso* também deve ser o mais baixo possível (maior definição, menos ruído), o flash deve ser evitado e as fotografias devem ser realizadas todas numa sessão de captura, ou seja não se deverá misturar fotografias de várias sessões (evitando assim alterações de textura, cor, luminosidade, etc). Tendo isto em conta as sombras não serão um problema. Deve-se também evitar áreas com apenas uma cor e sem textura, pois não aparece no resultado ou cria ruído. É possível ultrapassar este problema relativo às áreas homogéneas, no entanto é necessário recorrer a outros aparelhos que não as câmaras fotográficas convencionais. Wenzel et al., 2012 utilizam na sua metodologia um processo no qual projectam uma textura artificial no objecto a representar. Esta textura é projectada recorrendo a um laser infravermelho próximo e onde é necessária a utilização de lentes que consigam representar esse comprimento de onda.

Em relação à geometria do bloco de fotografias tenha-se em conta os seguintes esquemas:

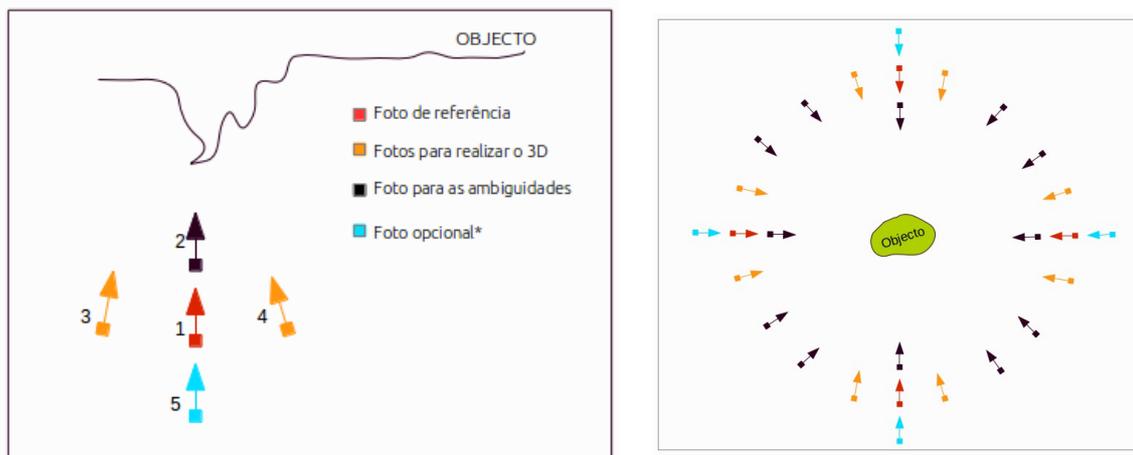


Figura 22: Geometria do bloco de fotografias para criar estereoscopia à esquerda e exemplo de um esquema de aquisição fotográfica quando se pretende circundar o objecto à direita.- Adaptadas (Clery, 2012)

Este representa uma geometria de fotografias que consegue criar estereoscopia e conseqüentemente 3D da saliência do objecto. A foto opcional (*), denomina-se de opcional pois apenas vai permitir uma maior precisão do resultado. Se o objecto de estudo for contornável, pode ser utilizada a geometria da figura 21 (dir.), onde a geometria da figura 21 (esq.), é repetida 4 vezes, dependendo do projecto, da exactidão e densidade desejada, esta geometria pode ser repetida mais vezes. Apesar de tudo apontar para a realização do maior número de fotografias possível é importante realçar que o tempo de processamento também vai aumentar consideravelmente. Um equilíbrio entre sobreposições (que deve ser no mínimo 80%) o número de zonas com estereoscopia e o número geral de fotos tem que ser encontrado. Existem situações que por falta de acessibilidade ao local ou pela sua própria forma, não seja possível criar uma geometria de captura como a indicada, no entanto e como foi referido anteriormente o algoritmo é bastante versátil e seguindo um princípio de toda a parte do objecto que se pretende modelar aparecer em mais do que 3 fotos é, na maioria dos projectos, suficiente para uma boa modelação.

Para a georreferenciação, o *SfM_georef v2.3*, necessita de pontos no objecto com coordenadas conhecidas e apesar de matematicamente 3 pontos serem necessários a sua quantidade juntamente com uma boa distribuição aumentam a precisão do modelo. Actualmente já existem muitas câmaras fotográficas que podem inserir em forma de *geotag*, a posição do centro de projecção das fotografias na informação *exif*. Harwin and Lucieer, obtiveram, com a georreferenciação através da *geotag*, erros entre 2-8 metros enquanto que pelo método de pontos de controlo obtiveram erros de 5-20 centímetros. A utilização de pontos de controlo depende assim da exactidão que se pretende obter.

O caso de estudo realizado refere-se à representação tridimensional da estátua de D.Dinis situada em Coimbra. A metodologia seguida foi a apresentada anteriormente (figura 20), não sendo realizada a fase

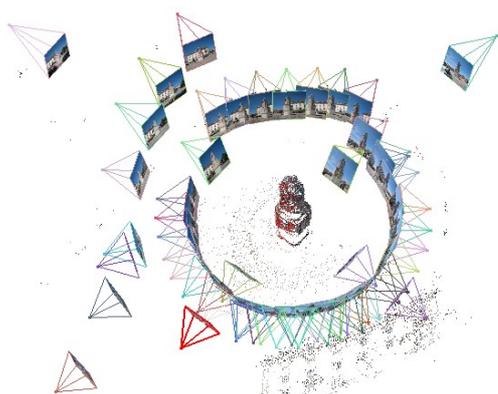


Figura 23: Posição das fotografias relativamente ao objecto a representar

respectiva à georreferenciação visto que os pontos para tal seriam coplanares. A aquisição fotográfica teve em conta a geometria indicada na figura 22, a um nível técnico as fotografias foram capturadas com uma máquina *Canon PowerShot SX240HS*, utilizando as definições automáticas da máquina, ou seja, as especificidades técnicas (distância focal, abertura, etc) são variáveis ao longo da fase de captura. Foram obtidas 58 fotografias circundando a estátua (figura 23). O resultado final é apresentado na figura 24 onde à esquerda é apresentada a figura antes da construção da malha através dos pontos e das suas normais e à direita se encontra o resultado já transformado na malha.



Figura 24: Resultado final, da esquerda para a direita, as duas perspectivas são referentes às nuvens de pontos, as restantes à construção da malha

A base da estátua, visto ser homogénea e com uma única cor é de difícil correlação para o algoritmo. É notória igualmente que existem zonas da estátua, nomeadamente a parte dos ombros, onde é possível observar que na fronteira estátua/céu o programa atribuiu pixels azuis ao modelo. Isto também se deve ao facto de não haver nenhuma fotografia que modele a vista superior da estátua e conseqüentemente que crie restrições geométricas e de cor suficientemente fortes para a remoção desses artefactos.

IV.3.3 Reconstrução de fachadas e criação de modelos urbanos tridimensionais

A modelação tridimensional urbana, abordada neste caso de estudo, consiste essencialmente na recolha de dados fotográficos, tanto através do sistema fotogramétrico terrestre Trimble MX1, como de uma plataforma de fotografia aérea e posterior geração de nuvens de pontos que representem tridimensionalmente o conteúdo das fotografias. Ou seja, o modelo tridimensional gerado não vai ser mais do que uma representação tridimensional do espaço urbano num determinado momento. Para além da abordagem realizada neste artigo existem outras. (Steinle and

Vögtle, 2000) propuseram uma metodologia em que através da utilização de dados LIDAR e de ortofotos realizam modelos tridimensionais. Os edifícios são definidos no ortofoto e a informação altimétrica é retirada dos dados LIDAR. Esta representação e tendo em conta o anterior exposto, é apenas uma representação do volume dos edifícios. Utilizando o mesmo método de captura utilizado neste caso de estudo, vídeografia terrestre, (Akbarzadeh et al., 2006) reconstruíram fachadas de edifícios utilizando uma metodologia mais complexa, onde através de unidades de medição inercial e sistemas GNSS posicionam os fotogramas no espaço para uma posterior reconstrução densa. Apesar de o sistema Trimble MX1 conter igualmente posicionamento GNSS e unidades de medição inercial que capturam a posição e atitude dos fotogramas, essa informação apenas foi utilizada no planeamento do projecto e na georreferenciação do modelo.

Este tipo de representação pode ter várias aplicações, desde a indústria cinematográfica, de videojogos (Furukawa and Ponce, 2010) e até mesmo no turismo. A tecnologia WebGL(Web Graphics Library) (“WebGL - OpenGL ES 2.0 for the Web,” n.d.), permite também hoje em dia a renderização interactiva de modelos tridimensionais em *browser* e sem o recurso a qualquer *plugin*, criando outras aplicações para este tipo de modelos urbanos, podendo ser utilizados, por exemplo, em visitas virtuais interactivas.

A figura 12, representativa da geometria de captura do Trimble MX1, indica que a sua geometria varia de acordo com alguns aspectos da via, seja o seu declive, o seu percurso ou até mesmo o seu conteúdo. Este facto torna o uso do *VisualSfM* a escolha acertada para este tipo de projecto tanto pelo facto da geometria como pela baixa parametrização necessária para utilizar o programa .

O Trimble MX1, fornece, para além dos vídeos, a posição do centro de cada fotograma, permitindo assim a organização do projecto projectando os centros num sistema de informação geográfica procedendo

à seguinte segmentação e cálculo no *VisualSfM*. A informação acerca dos centros das *fotogramas* permite também uma georreferenciação de cada segmento em que se está a trabalhar.

O desafio num projecto destes é a manipulação de quantidades consideráveis de informação. Torna-se então necessária uma segmentação da área urbana a representar, realizando modelos segmentados que numa fase final serão agregados num único modelo.

A figura 25 apresenta um fluxograma para a realização de modelos

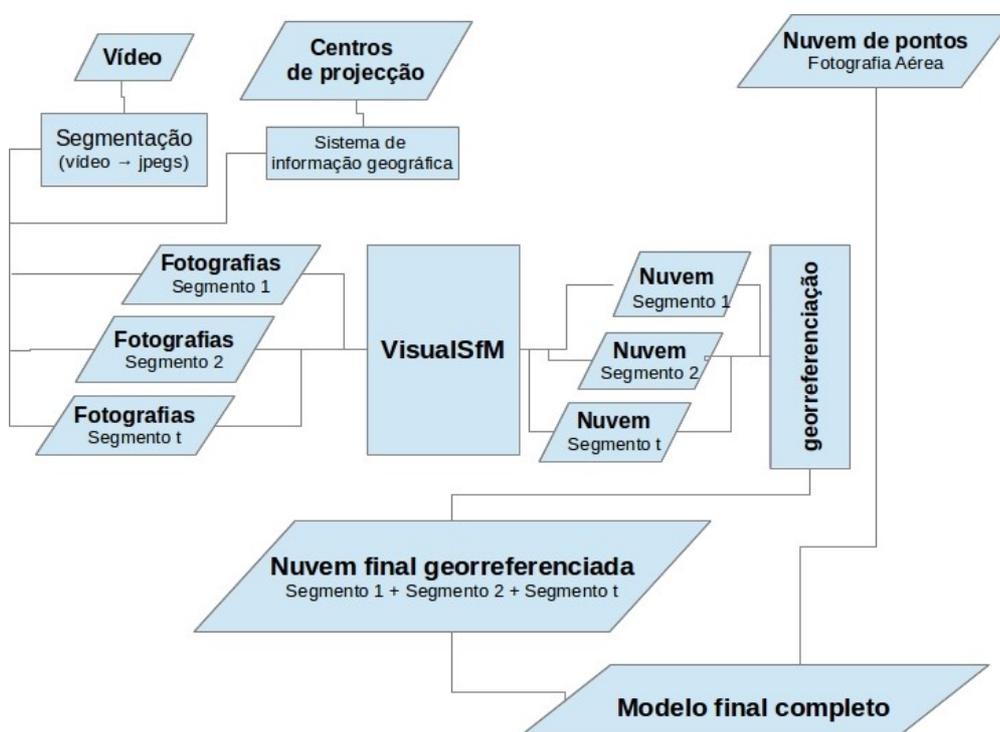


Figura 25: Fluxograma para a criação de modelos completos tridimensionais de área urbana

tridimensionais completos utilizando este sistema fotogramétrico terrestre. Pode-se observar que a fase inicial é a segmentação do vídeo em *fotogramas* .jpeg, para tal recorre-se aos centros de projecção que sendo projectados num sistema de informação geográfica viária, por exemplo, permite a organização e segmentação do projecto, definindo as fotos que pertencem a cada segmento. Estes segmentos vão então ser processados recorrendo ao *VisualSfM*. A georreferenciação vai permitir a união dos

vários segmentos num modelo final ao qual vai ser posteriormente adicionado a nuvem de pontos obtida através da fotografia aérea.

As nuvens de pontos vão ser então georreferenciadas à semelhança do que acontece no caso de estudo IV.3.2, utilizando o *SfM_georef v2.3*. Os sub-modelos devidamente georreferenciados, permitem criar a nuvem final relativa às informação vertical do meio urbano. A fotografia aérea vai completar a nuvem final georreferenciada inserindo a informação horizontal ao modelo criando deste modo um modelo final completo, contendo tanto a informação horizontal como vertical do terreno.

A figura seguinte (figura 26) apresenta duas vistas do modelo



Figura 26: Duas vistas do modelo urbano tridimensional de Montalegre -nuvem de pontos

urbano tridimensional de Montalegre. Pela sua observação, denotam-se as zonas de oclusão, apresentadas a azul, assim como a diferença de resolução entre o modelo obtido por fotogrametria terrestre e o obtido por fotogrametria aérea. As zonas de oclusão, principalmente na figura 26 (esquerda), têm a sua origem na limitação que o veículo tem à rede viária existente. Deste modo, todas as fachadas que se pretendam representar pelo sistema fotogramétrico utilizado, necessitam de uma via automóvel adjacente. As oclusões pontuais, numa zona específica de um edifício por exemplo, terá a sua origem ou na geometria da via ou na homogeneidade da superfície a representar. A geometria de captura (fig. 12) realizada pelo sistema fotogramétrico, juntamente com a geometria da rede viária urbana e do seu mobiliário tornam impossível a modelação de

determinadas zonas do projecto. A vila de Montalegre, objecto do caso de estudo, apresenta uma geometria complexa para a modelação de alguns segmentos, principalmente na relação altura dos edifícios/largura da via. Nestas zonas seria necessária uma recolha fotográfica recorrendo a outros meios que não o sistema fotogramétrico terrestre em estudo. Em relação às zonas homogéneas, que são representadas como oclusões, a solução será apresentada de seguida visto esta ser uma condicionante do algoritmo e não dos processos de recolha das imagens.

A diferença de resolução entre o



Figura 27: Pormenor da nuvem de pontos em dois edifícios



Figura 28: Aplicação da triangulação de Poisson

modelo terrestre e o modelo da fotografia aérea tem a sua origem na resolução das imagens, enquanto que as fotografias aéreas foram capturadas com o tamanho do pixel a 0.1m as fotografias terrestres têm uma resolução, que apesar de ser variável é sempre bastante superior à da fotografia aérea. Assim deveriam ser usadas fotografias aéreas com uma maior resolução recorrendo, por exemplo, a um veículo aéreo não tripulado. A utilização deste tipo de modelos tridimensionais insere-se, na maioria das vezes, em produtos no qual existe alguma exigência acerca do seu aspecto visual. Neste sentido a figura 27, não cumpre o objectivo, principalmente devido ao facto de ser uma representação discreta. A construção de uma malha contínua, foi, neste caso, a solução encontrada para transformar um modelo discreto, pontos, num um modelo contínuo, faces. A figura 28 apresenta o resultado da construção da malha através

da resolução da equação de Poisson apresentada em IV.2.3. Pode-se observar a continuidade do modelo e, conseqüentemente o seu aspecto visual melhorado.

A criação deste tipo de modelos e com esta metodologia merece um abordagem aos tempos de processamento realizados. A tabela 5 apresenta os tempos de processamento obtidos nas várias etapas do procedimento relativo à fotogrametria terrestre.

Tabela 5: Tempos de processamento VisualSfM

Número de fotos	Pontos de interesse e correspondência entre imagens	Reconstrução esparsa	Reconstrução densa
119	19 min	57s	~7min
114	18 min	173s	~6min
115	16 min	115s	~7min
117	17 min	131s	23min
671	569min	371s	42min
251	141m	211s	43min

Pela tabela observa-se que os tempos de reconstrução densa nos dois últimos segmentos são idênticos, no entanto o número de fotos utilizada é totalmente díspar. Este facto relaciona-se com o próprio conteúdo das fotografias e com a área que representam. Devido a vários factores existe uma variação ao longo do projecto entre o número de fotografias utilizadas e a área a representar. Isto deve-se tanto à velocidade do veículo e das suas paragens como da geometria da via.

A realização deste tipo de modelos tridimensionais urbanos e com o recurso ao sistema fotogramétrico Trimble MX1 é possível. No entanto merece alguns comentários. Em primeiro lugar a sua junção com uma

nuvem de pontos obtida através de fotografia aérea com uma resolução menor que 5 cm tornaria o resultado mais coerente no que diz respeito à resolução. No caso de o anterior não ser possível poder-se-à diminuir a resolução de imagens obtidas através dos vídeos segmentados. Em segundo lugar e a nível de tempo de processamento, vimos que são processos que exigem muito tempo, no entanto trata-se de tempo máquina, onde operador não necessita de efectuar qualquer operação.

IV.3.4 Cartografia tridimensional

Actualmente, nas operações em que é necessária a componente tridimensional recorre-se a uma estação fotogramétrica e a pares estéreo. Com a utilização das nuvens de pontos, essa metodologia pode ser alterada. Tendo em conta o carácter tridimensional intrínseco às nuvens de pontos, a vectorização tridimensional, seja de cursos de água, vias rodoviárias ou até mesmo edifícios torna-se possível sem o recurso a material dispendioso como é o caso da aquisição de uma estação fotogramétrica. Para além do exposto, há que ter em conta que a utilização de uma estação fotogramétrica requer um período de treino e adaptação por parte do operador.

O MicroStation v8i (Bentley Systems ©) contém, entre outras, uma



Figura 29: Vectorização sobre nuvem de pontos - vista Aérea

ferramenta onde é possível carregar uma nuvem de pontos. Torna-se então possível a vectorização de informação geográfica contendo a informação relativa às altitudes e que pode ser feita num computador convencional e sem custos adicionais

associados a essa mesma tarefa. Este programa, sendo de base um programa de desenho técnico assistido, permite que os ficheiros nuvens de pontos sejam carregados e manuseados à semelhança de um outro ficheiro espacial qualquer que contenha dados vectoriais, como por exemplo, uma *shapefile*. A vectorização tridimensional torna-se, deste modo, possível. A sua realização é complexa visto a natureza tridimensional da nuvem de pontos, para tal o *MicroStation* oferece as ferramentas necessárias. A desvantagem da utilização das nuvens de pontos obtidas através do MicMac para a realização deste tipo de vectorização é o facto de a presença de um maior número de artefactos ser na fronteira topo do edifício/sólo. A figura 30 mostra a zona da figura 29, com duas vistas oblíquas e onde apesar dos artefactos referidos anteriormente, a vectorização é, ainda assim, possível, sendo neste caso, os contornos da cobertura o objectivo da vectorização.

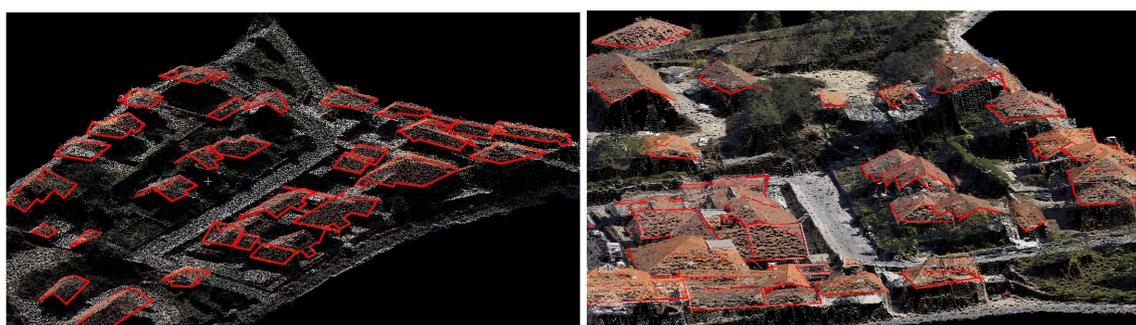


Figura 30: Vectorização sobre a nuvem de pontos - duas vistas oblíquas

IV.3.5 Detecção de alterações

A detecção de mudança na superfície terrestre refere-se à comparação temporal de dados, sejam estas fotografias rectificadas, dados LIDAR ou ortofotos. Esta análise pode ser relativa ao valor radiométrico do pixel, valor da altura de um MDS, comparação de dados

LIDAR e/ou modelos híbridos que abarcam todas as técnicas referidas anteriormente.

A análise e quantificação destas mudanças é um tema, onde para além de existirem várias metodologias, existem também variados objectivos. Takagi et al., 2011 utilizaram imagens de satélite (ALOS/PRISM) para construção de modelos digitais do terreno (MDT), monitorizando zonas de desastre, mais especificamente, para detectar alterações no terreno devido ao deslizamento de terras. Ao nível do comportamento da vegetação, Agone and Bhamare, 2012 , utilizando igualmente dados de satélite (LANDSAT), estudaram o comportamento temporal da vegetação através dos valores da reflectância espectral respectivos a cada momento de estudo. A erosão do sólo também é um objectivo da detecção da mudança, Aher et al., 2012 utilizaram uma metodologia que envolve desde cartografia até imagens de satélite e onde pretendem estudar a erosão do sólo ao longo do percurso de um rio. A monitorização/fiscalização de construções também pode ser um objectivo da detecção de alterações, Xu et al., 2013 recorrendo a dados LIDAR desfazados temporalmente, conseguiram detectar alterações tanto em edifícios recentes como a alteração de edifícios já existentes.

A metodologia apresentada anteriormente, IV.3, permite a comparação de nuvens de pontos. Isto não é mais do que uma comparação entre MDS desfazados temporalmente, no entanto esta é realizada sobre as nuvens de pontos e não sobre o MDS (raster), deste modo é possível ter uma percepção tridimensional das mudanças assim como a sua localização.

Para a comparação das nuvens de pontos será usado o CloudCompare (Girardeau-Montaut, n.d.). O programa permite que a comparação seja referente a qualquer um dos eixos ou seja absoluta, no entanto e para este caso a comparação será referente ao eixo dos Z, extraindo deste modo apenas a diferença de altitudes. Esta diferença é

projectada através de um gradiente de cores que pode ser manipulado consoante o objectivo desejado.

Nas figuras seguintes, mostram-se os resultados obtidos num caso de estudo de Matosinhos. As fotografias aéreas são referentes aos anos de Agosto de 2010 (28 fotografias) e de Junho de 2013 (26 fotografias). Os pontos de controlo utilizados foram 2 vértices geodésicos, de primeira e segunda ordem e 2 pontos obtido através de receptores GNSS. Os pontos utilizados foram os mesmos nos dois projectos. O tamanho do pixel é de 10cm e a sobreposição realizada foi de 60%-30%. A câmara utilizado foi a referida em IV.1.1.



**Figura 31: Nuvem de pontos -
Matosinhos 2010 - Vista Aérea**

Apresentam-se, de seguida duas vistas pormenorizadas do resultado obtido através da comparação das nuvens de pontos. As figuras 31 e 32 apresentam vistas das nuvens de pontos, 2010 e 2013 , respectivamente e a figura 33 apresenta o gradiente de cores de diferença de altitudes entre os anos em estudo. O gradiente de cores é apenas uma maneira de visualizar as diferenças altimétricas. Esta diferença pode ser quantificada através do GlobalMapper© onde exportando os dados numéricos do gradiente de cores obtido anteriormente, o programa permite a quantificação dessas mudanças volumetricamente.



**Figura 32: Nuvem de pontos -
Matosinhos 2013 - Vista Aérea**

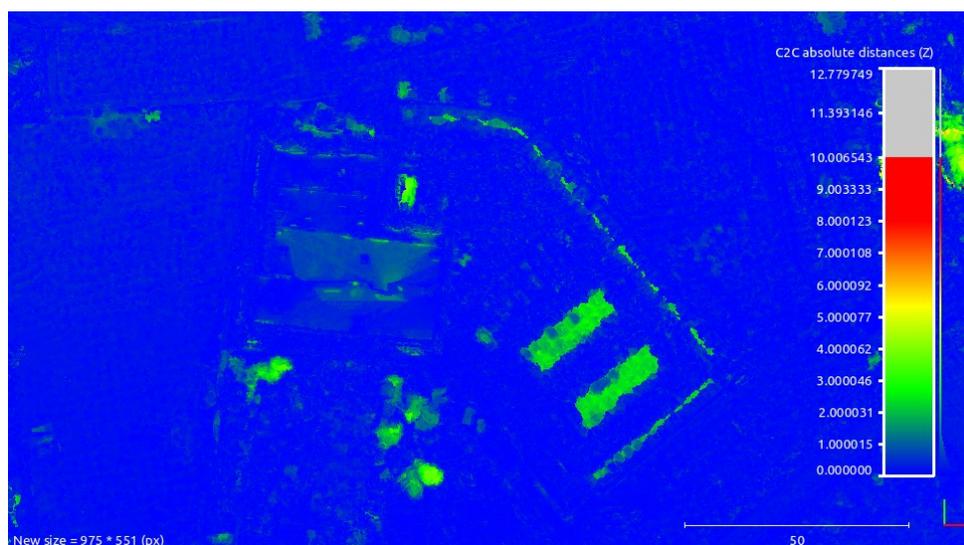


Figura 33: Diferença entre as nuvens de pontos visualizadas numa escala de cores - Matosinhos 2010/2013

Analiseemos agora as figuras 34 e 35. Pode-se observar directamente que a cobertura existente no parque de estacionamento presente na nuvem de pontos de 2013, não existia em 2010.



Figura 34: Nuvem de pontos - Matosinhos 2010 - Vista Aérea

Na figura 33 temos representada a diferença indicada anteriormente. A cobertura do parque de estacionamento é representada, nesta figura, em tons de verde. Associadas a este tom de verde estão os valores ~ 2-4 metros. É também notório que apesar de a diferença ser detectada existem troços em

que a diferença não representa a área total da construção. Este facto pode ter origem tanto no facto de ser uma cobertura que apresenta algum

reflexo e possa não ser correctamente correlada, como na parametrização efectuada no *MicMac* aquando da etapa de construção do MDS. O edifício central apresentado nas figuras, aparentemente não sofreu qualquer alteração no entanto na figura 33 são apresentadas diferenças de aproximadamente 1 metro. Mais uma vez o factor de a superfície ser homogénea acresce a dificuldade da correlação. Existem alguns focos para além da cobertura e do edifício. Ao analisar essas zonas, principalmente na zona inferior das figuras, é notório o abate de algumas árvores e o crescimento de outras.



**Figura 35: Nuvem de pontos -
Matosinhos 2013 - Vista Aérea**

A figura 35 evidencia a construção de uma nova estrutura dentro do espaço temporal em estudo. Evidencia igualmente, que houve abate de árvores no canto inferior direito.

Neste contexto a figura 36 apresenta a diferença relativa à zona onde a estrutura foi construída e também à movimentação de terras ocorrida. Os valores mais altos apresentados a vermelho, referem-se, a valores compreendidos entre os 8 e os 10 metros, aproximadamente, estes indicam o abate de árvores aí presentes. Outro pormenor que é evidente é a mudança agrícola ocorrida na parte superior direita das figuras.

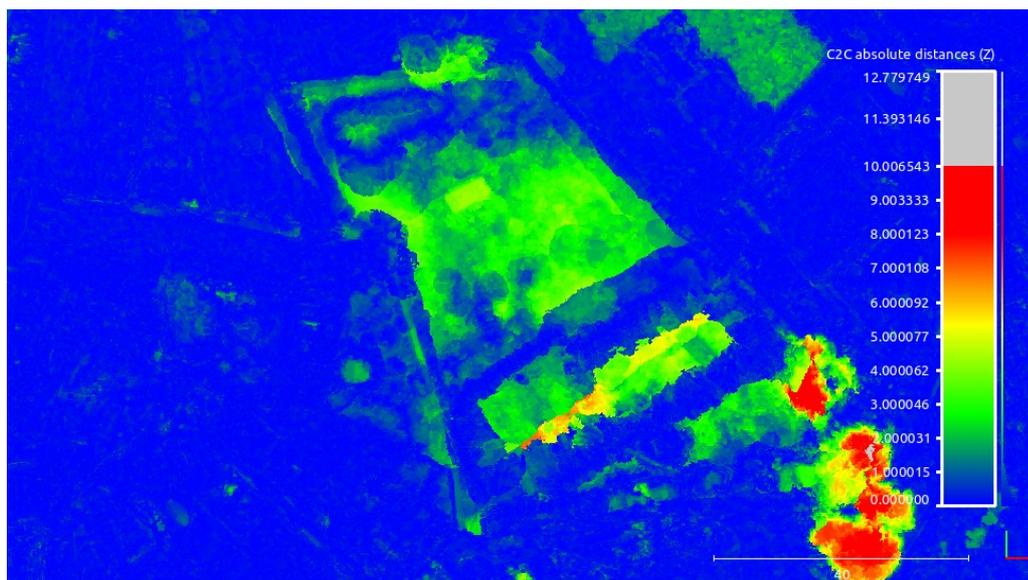


Figura 36: Diferença entre as nuvens de pontos visualizadas numa escala de cores - Matosinhos 2010/2013

A presença de indefinições na fronteira topo do edifício/sólo, é perceptível pela forma dos edifícios, por exemplo na figura 33. A presença de objectos que produzem reflexos ou são homogéneos também são difíceis de correlar, isto acontece, principalmente em grandes coberturas que são homogéneas. A realização do projecto com o apoio de mais pontos fotogramétricos seria um aspecto a considerar, visto terem sido usados apenas 4. Um futuro estudo poderia abranger um método híbrido onde para além de se utilizar a comparação volumétrica esta poderia ser associada a mudanças de reflectância espectral, construindo um sistema automático de detecção de mudança, atribuindo um significado físico a cada mudança.

Este tipo de procedimento para a identificação de mudanças volumétricas pode ser usada na monitorização costeira, tendo em conta que Portugal tem grande parte do seu território envolvido por um oceano, este facto é de relevante importância para o país. Neste contexto, e com esta metodologia, é possível a realização de nuvens de pontos com

fotografias, em formato digital, já existentes. Avaliando as mudanças temporais na costa é possível a definição de tendências tanto locais como nacionais dessa mesma costa e o seu comportamento. Recorrendo sempre a programas de código aberto e livres esta operação não seria dispendiosa, tendo em conta que os dados já existem.

IV.4 Conclusões

Ao longo do artigo foram abordados tanto metodologias para a obtenção de nuvens de pontos recorrendo a programas de código aberto como algumas aplicações dessas mesmas nuvens. Foram utilizadas tanto plataformas aéreas como plataformas terrestres para a obtenção destas nuvens. Relativamente às plataformas aéreas, o artigo demonstrou que o *MicMac* produz nuvens de pontos com qualidade posicional (ver tabela 4), podendo deste modo ser utilizadas com fiabilidade nos casos de estudo apresentados. Em cartografia, este tipo de ficheiros permite que a informação altimétrica esteja contida num ficheiro e não seja necessário o recurso a pares estéreo ou a estações fotogramétricas, sendo deste modo uma alternativa económica a essas plataformas tradicionais. Ao nível da detecção de alterações utilizando nuvens de pontos, esta abre uma nova possibilidade para a quantificação volumétrica das alterações. Esta metodologia poderia ser utilizada, por exemplo, num estudo de monitorização topográfica da costa portuguesa, onde se poderia realizar a detecção de alterações suas possíveis tendências a nível local ou até mesmo nacional.

O *VisualSfM* e como foi visto no caso de estudo IV.3.2, é uma ferramenta bastante útil, principalmente para utilizadores que apesar de necessitarem de representações tridimensionais, não tenham a formação necessária para o fazer, abrindo deste modo o leque de possíveis utilizadores deste tipo de informação. Permite igualmente a consideração

de dados que não estão organizados como é o caso do caso de estudo IV.3.3. Este caso de estudo demonstra que é possível a realização de modelos tridimensionais completos de área urbana e com o recurso a ferramentas fotogramétricas terrestres que não tiveram esse fim aquando do seu desenvolvimento. Esta metodologia é no entanto, morosa e requer grandes intervalos de tempo para o processamento dos seus vários segmentos (tabela 5), requer igualmente que grande parte do processo de escolha das imagens seja manual aumentando o tempo despendido. Ao nível da qualidade posicional deveria ser realizado um estudo mais aprofundado.

Em modo de conclusão pode-se referir que este tipo de produtos tridimensionais estão a ser progressivamente melhorados, recorrendo muitas vezes à visão computacional para resolver alguns problemas relativos às aproximações iniciais de um projecto fotogramétrico ou até mesmo de calibração da câmara. Estas melhorias vão permitindo, cada vez mais, a sua utilização tanto na esfera comercial como académica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à InfoPortugal S.A., pelos dados disponibilizados para a realização dos casos de estudo IV.3.1, IV.3.3, IV.3.4 e IV.3.5.

IV.5 Referências¹

Agone, V., Bhamare, S.M., 2012. Change detection of vegetation cover using remote sensing and GIS.

¹ Por ordem alfabética

- Aher, S., Bairagi, S., Deshmukh, P., Gaikward, R., 2012. River change detection and bank erosion identification using topographical and remote sensing data.
- Akbarzadeh, A., Frahm, J.-M., Mordohai, P., Clipp, B., Engels, C., Gallup, D., Merrel, P., Phelps, M., Sinha, S., Talton, B., Wang, L., Yang, Q., Stewenius, H., Yang, R., Welch, G., Towles, H., Nistér, D., Pollefeys, M., 2006. Towards urban 3D reconstruction from video.
- Allen, P., Feiner, S., Troccoli, A., Benko, H., Ishak, E., Smith, B., 2004. Seeing into the Past: Creating a 3D Modeling Pipeline for Archaeological Visualization.
- Duarte, D., Gonçalves, G., 2014. Produção automática de ortofotos em áreas urbanas utilizando veículos aéreos não tripulados e software de código aberto.
- Furukawa, Y., Ponce, J., 2010. Accurate, Dense , and Robust Multiview Stereopsis.
- Georgantas, A., Brédif, M., Pierrot-Desseilligny, M., 2012. An accuracy assessment of automated photogrammetric techniques for 3D modeling of complex interiors.
- Girardeau-Montaut, D., n.d. CloudCompare - Open Source project . URL <http://www.danielgm.net/cc/> (acedido 3.2.14).
- Gonçalves, G., 2013. Conceitos introdutórios - Fotogrametria Digital.
- Harwin, Lucieer, 2012. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle imagery.
- James, M., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application.
- Kazhdan, M., Bolitho, M., Hoppe, H., 2006. Poisson Surface Reconstruction.
- Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., Wichert, A., 2010. Point Clouds : Lidar versus 3D Vision.
- Longuet-Higgins, H.C., 1981. A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections.

- Lowe, D., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, International journal of computer vision.
- Pierrot-Deseilligny, M., 2014. MicMac, Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!
- Pierrot-Deseilligny, M., Clery, I., 2012. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of a ser of images.
- Snavely, N., 2008. Scene reconstruction and visualization from internet photo collections.
- Steinle, E., Vögtle, T., 2000. 3D Modelling of builds using laser scanning and spectral information.
- Takagi, M., Kojima, M., Ishida, K., 2011. Land disaster monitoring by using multi temporal ALOS/PRISM stereo imagery.
- Torres, C., Arroyo, G., Romo, C., De Haro, J., 2012. 3D Digitization using Structure from Motion.
- WebGL - OpenGL ES 2.0 for the Web , n.d. URL <http://www.khronos.org/webgl/> (acedido 8.1.14).
- Wenzel, K., Abdel-Wahab, M., Cefalu, A., Fritsch, D., 2012. High-resolution surface reconstruction from imagery for close range cultural heritage applications.
- Wu, C., n.d. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System . URL <http://ccwu.me/vsfm/> (acedido 4.1.14).
- Wu, C., 2007. Sift GPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform.
- Wu, C., 2011. Multicore Bundle Adjustment.
- Wulff, R., 2010. Image Based Documentation in Archaeology.
- Xu, S., Vosselman, G., Elbering, S., 2013. Detection and classification of changes in buildings from airborne laser scanning data.

V Conclusões

Ao longo desta dissertação foram desenvolvidas metodologias para a geração de informação espacial, nomeadamente, ortofotos, MDS e nuvens de pontos recorrendo exclusivamente a programas de código aberto e a fotografias. Relativamente à geração de ortofotos e MDS, os capítulos III e IV mostram que o recurso a pacotes de programas de código aberto pode ser uma alternativa credível, tendo em conta, principalmente, os resultados posicionais obtidos, tanto no caso dos VANT como no caso da utilização de câmaras fotogramétricas de pequeno formato. A utilização de VANT e como visto no capítulo III, tem o potencial para ser uma ferramenta muito útil ao nível da informação espacial. A legislação em vigor ainda não permite de forma inequívoca a utilização destes veículos aéreos em Portugal, no entanto, as leis necessárias têm vindo a ser implementadas em alguns países europeus, nomeadamente em Espanha (El País, 2014).

Ao nível da utilização de informação geoespacial tridimensional, o capítulo IV demonstrou que com as capacidades computacionais que vão surgindo, é agora possível a utilização de ficheiros maiores e conseqüentemente mais pesados que podem albergar as 3 dimensões espaciais e não apenas 2. Demonstrou também e uma vez mais a possibilidade real da utilização dos programas de código aberto neste tipo de projectos. Contrariando a tendência deste tipo de programas que geralmente é de difícil manipulação, o *VisualSfm* contém um interface onde é possível a obtenção de resultados sem efectuar nenhum tipo de parametrização. É no entanto, necessária especial

atenção ao estudo da sua qualidade posicional que não sendo abordada neste trabalho mereceria futura atenção.

De um modo geral, os resultados obtidos nesta dissertação juntamente com o factor económico e pedagógico intrínseco aos programas de código aberto, tornam estes numa possibilidade a ter em conta aquando da realização de trabalhos fotogramétricos, principalmente em círculos académicos. Na esfera comercial o seu uso tem ainda de ser ponderado, visto que a sua utilização requer conhecimentos que extravasam os potenciais utilizadores e tendo em conta que os seus objectivos podem, nem sempre, ir de acordo com as exigências impostas pelo mercado . Tem, deste modo, de haver um equilíbrio entre a gratuitidade dos programas, a exigência do mercado e as capacidades do utilizador comum face à sua utilização.

Bibliografia

- Birchfield, S., 1998. Essential and fundamental matrices. URL <http://robotics.stanford.edu/~birch/projective/node20.html> (acedido em 5.5.14)
- cloudtweaks, 2012. Advantages And Disadvantages Of Open Source - CloudTweaks.com. URL <http://cloudtweaks.com/2012/08/advantages-and-disadvantages-of-open-source/> (acedido 4.7.14).
- CNES, n.d. Monteverdi 1&2. URL <http://www.orfeo-toolbox.org/otb/monteverdi.html>
- Evenden, G., n.d. PROJ.4. URL <http://trac.osgeo.org/proj/>
- Fisher, B., 1997. The Essential Matrix. URL http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/EPSRC_SS_AZ/node21.html (acedido 3.5.14).
- Girardeau-Montaut, D., n.d. CloudCompare - Open Source project. URL <http://www.danielgm.net/cc/> (acedido 3.2.14).
- Gonçalves, G., 2005. Elementos de fotogrametria analítica.
- Gonçalves, J.A., 2009. Conversões de sistemas de coordenadas nacionais para ETRS89 utilizando grelhas.
- Hartley, R., Zisserman, A., 2004. Epipolar geometry and the fundamental matrix.
- Harvey, P., n.d. ExifTool. URL <http://www.sno.phy.queensu.ca/~phil/exiftool/> (acedido 6.4.14)
- Helmert, F., 1884. Die mathematischen und physikalischen Theorieen der höheren Geodäsie.

- Homogeneous Coordinates, n.d. URL
<http://www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs3621/NOTES/geometry/homo-coor.html> (acedido 7.31.14).
- Huggel, A., n.d. Exiv2 - Image metadata library and tools. URL
<http://www.exiv2.org/makernote.html> (acedido 6.6.14)
- James, M., Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application.
- Leberl, F., Irschara, A., Pock, T., Meixner, P., Gruber, M., Scholz, S., Wichert, A., 2010. Point Clouds : Lidar versus 3D Vision.
- Mansurov, N., 2010. Equivalent Focal Length and Field of View. URL
<http://photographylife.com/equivalent-focal-length-and-field-of-view> (acedido 7.11.14).
- Mundy, L., 1993. The relationship between photogrammetry and computer vision.
- Noyes, K., 2010. 10 Reasons Open Source Is Good for Business | PCWorld. URL
http://www.pcworld.com/article/209891/10_reasons_open_source_is_good_for_business.html (acedido 4.7.14).
- Pierrot-Deseilligny, M., 2014. MicMac, Apero, Pastis and Other Beverages in a Nutshell!
- Pierrot-Deseilligny, M., Clery, I., 2012. Apero, an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of a ser of images.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D., 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling - current status and future perspectives.
- Tachibanaya, T., 1999. Description of Exif file format.
- Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon, A., 1999. Bundle Adjustment - A modern synthesis.
- Wu, C., n.d. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. URL
<http://ccwu.me/vsfm/> (acedido 4.1.14).

Zhang, C., Wanqiang, Y., 2008. The comparisons of 3D analysis between photogrammetry and computer vision.

El País, E., 2014. Los drones, a la conquista del cielo español . EL PAÍS. URL http://economia.elpais.com/economia/2014/07/18/actualidad/1405692946_421101.html (accedido 7.20.14).