



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

1. Introdução

O submódulo de Extração do MDE do projeto E-FOTO tem como por objetivo a reconstrução do espaço 3D a partir das imagens fotogramétricas cadastradas no projeto. Para a realização desta tarefa, são utilizadas técnicas de extração automática de pontos homólogos e de interpolação de imagens, que serão descritas a seguir.

2. Extração automática do MDE

A extração do MDE tem como por objetivo a reconstrução automática ou semi-automática do espaço-objeto através de um par estereoscópico de imagens. Este par caracteriza-se pela área de superposição entre duas imagens, sequenciais ou não. Este procedimento é realizado através da identificação automática de pontos homólogos no par, por meios de técnicas que serão descritas a seguir.

2.1. Correlação de Pearson (Cross-Correlation)

Em várias aplicações no âmbito da fotogrametria digital, faz-se necessária a localização do ponto em uma ou mais imagens, correspondente(s) a determinado ponto de outra imagem que tenha uma área de superposição com a imagem de referência. A superposição entre as imagens utilizadas em fotogrametria é um requisito técnico para o mapeamento fotogramétrico. Desse modo, o mesmo objeto (ou feição) deverá estar presente em duas ou mais imagens de um projeto fotogramétrico.

Uma acurada visualização estereoscópica do operador permite localizar tais pontos manualmente; porém, muito mais interessante é a ideia de haver uma estratégia para a localização automática dos mesmos.

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser entendido como uma medida do grau de relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias. Logo, o coeficiente de correlação tem ênfase na predição do grau de dependência entre essas duas variáveis [2]. O cálculo da correlação é realizado através da seguinte fórmula:



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (A - \mu_A)(B - \mu_B)}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A - \mu_A)^2}{n-1}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (B - \mu_B)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

onde a variável A é o recorte de uma área da imagem de referência e B o recorte de uma área da imagem de busca. A descrição detalhada desta fórmula poderá ser encontrada em [2].

O coeficiente de correlação ρ pode assumir valores entre -1 e 1. O sinal algébrico do coeficiente de Correlação de Pearson define a direção da relação entre as duas variáveis. Assim, uma correlação positiva indica que, à medida que os valores das componentes de uma variável aumentam, os valores das componentes da outra variável também aumentam. Para uma correlação negativa, ocorre o oposto: enquanto uns aumentam, os outros diminuem e vice-versa.

O valor 0 significa a independência linear entre as variáveis analisadas, enquanto que 1 é o maior grau de dependência linear, ou seja, há uma correlação perfeita entre as amostras analisadas.

Como já definido, o objetivo da correlação de imagens é determinar pontos homólogos em imagens digitais com uma área em comum. A partir de um ponto em uma imagem de referência, cria-se uma janela em torno deste ponto. Esta janela é chamada de "template". Como a localização do ponto (*pixel*) homólogo é desconhecida, cria-se uma janela de pesquisa, com dimensões consideravelmente maiores do que as do template, em torno da provável localização do ponto em questão na outra imagem, conforme ilustra a figura 1. Assim, com um recorte com o mesmo tamanho do template, a janela de correspondência é deslizada sobre a janela de pesquisa. Para cada iteração, um valor do coeficiente de Correlação de Pearson é associado ao *pixel* central do recorte na janela de pesquisa. Ao final, será considerado como candidato a *pixel* homólogo na imagem de pesquisa aquele que tiver o maior grau de correspondência em relação ao *pixel* de referência. Para ser validada a correspondência entre os dois pixels o valor da correspondência deverá estar acima de um determinado limiar [3]. Tal procedimento se justifica pela diferença de radiometria das duas imagens.

Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

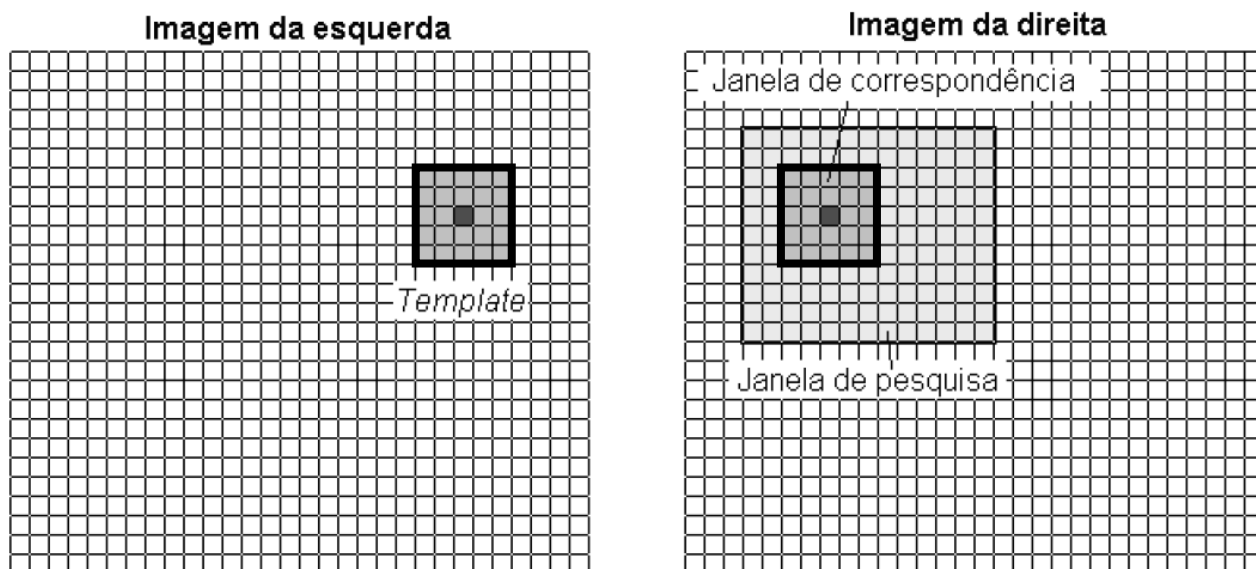


Figura 1: Mecanismo de busca por pontos homólogos através da Correlação de Pearson.

Retirado de [3].

Os seguintes parâmetros são utilizados no submódulo de extração automática do MDE do E-FOTO:

Template size – Largura em *pixels* do recorte de busca.

Search window size – Largura em *pixels* da janela de pesquisa do ponto homólogo.

Correlation threshold – Limiar de aceitação do coeficiente de Correlação de Pearson. Serão aceitos os valores de correspondência iguais o maiores que o valor fornecido.

Template min std – Desvio padrão mínimo do template. Caso o valor do desvio padrão dos níveis de cinza dos *pixels* do template seja menor que o valor fornecido, a largura do template é aumentada até que este critério seja satisfeito.

2.2. Correspondência por Mínimos Quadrados (Least-Squares Matching)

A Correlação de Pearson não leva em conta os efeitos de rotação e escala entre as imagens. De forma a minimizar este problema, Gruen [4] propôs um método em que tais deformações seriam aplicadas ao recorte de busca, de forma a minimizar o somatório dos quadrados das diferenças de níveis de cinza ocasionados por esses fatores. Este método é chamado de *Least-Squares Matching* (LSM).

Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Este método não utiliza uma janela de pesquisa em torno do ponto homólogo, como é feito na Correlação de Pearson, mas somente uma janela de correspondência. Devido a este fato, o ponto candidato a homólogo deverá estar dentro desta janela, situado muito próximo de sua verdadeira posição. A figura 2 ilustra as janelas do template e de correspondência.

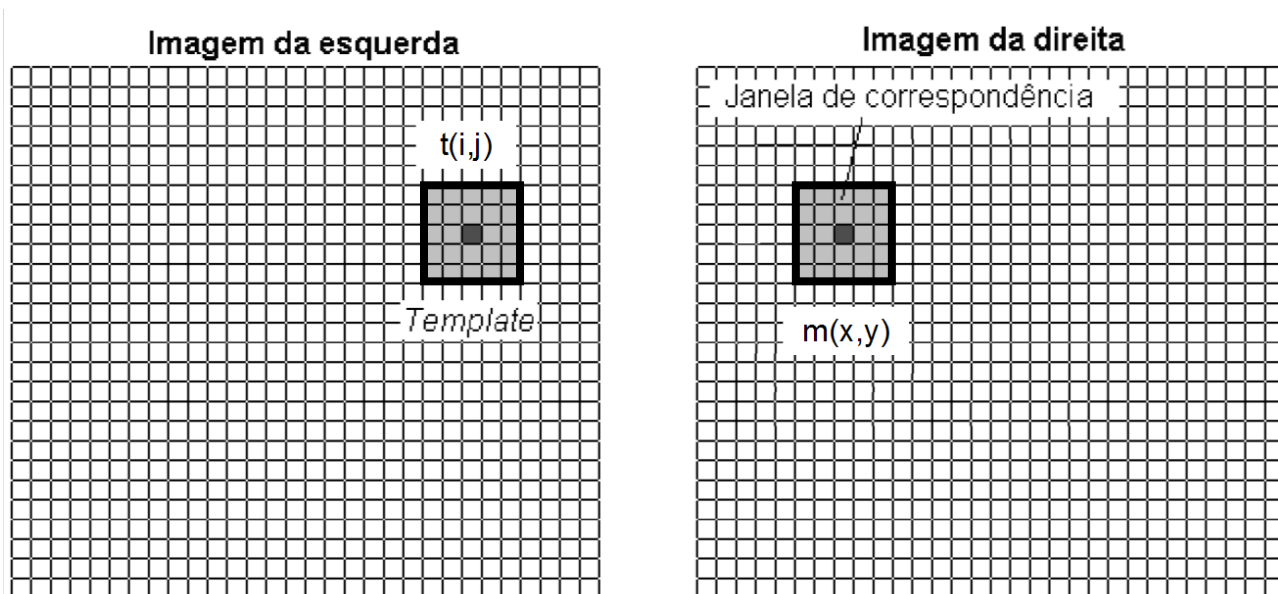


Figura 2: Determinação do ponto homólogo através do método de Least-Squares Matching.

Segundo Schenk [5], deve-se utilizar a equação de transformação afim (equação 2) de forma a ajustar os parâmetros de rotação, translação e escala da janela de correspondência em relação ao template.

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1.i + a_2.j \\ y = b_0 + b_1.i + b_2.j \end{cases} \quad (2)$$

Este processo é feito iterativamente, onde em cada iteração calcula-se o valor da variação dos parâmetros (a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2) em relação à iteração anterior. Este processo é interrompido, quando um determinado critério de convergência é alcançado.

A figura 3 apresenta um exemplo de correlação através de LSM. A cruz da imagem de referência na figura 3(a) é deslocada e levemente rotacionada na imagem de busca. A título de

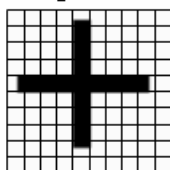
Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

exemplo, na sequência apresentada nas figuras 3(b) a 3(g), observa-se que, após 6 iterações, a cruz é deslocada e rotacionada para a posição verdadeira.

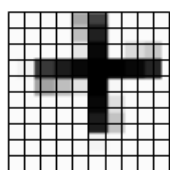
Imagem de referência



Template

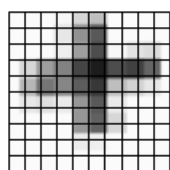
(a)

Imagem de busca



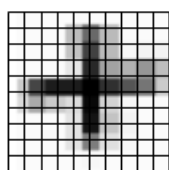
1a. iteração

(b)



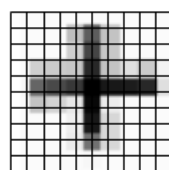
2a. iteração

(c)



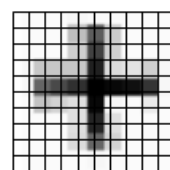
3a. iteração

(d)



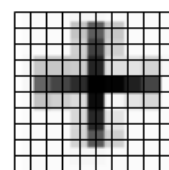
4a. iteração

(e)



5a. iteração

(f)



6a. iteração

(g)

Figura 3: Exemplo de ajuste fino (busca por pontos homólogos) por LSM.

Parâmetros utilizados no submódulo:

Template size – Largura em *pixels* da janela de template e da janela de correspondência.

Max no iterations – Numero máximo de iterações.

Correlation threshold – Limiar de aceitação da correspondência. Serão aceitos os valores de correspondência igual ou maior que o valor fornecido.

Template min std – Desvio padrão mínimo do template. Caso o valor do desvio padrão do template seja menor que o valor fornecido, a largura do template é aumentada até que este critério seja satisfeito.

Max distance – Máxima distância em *pixels* do deslocamento da janela de correspondência em relação à posição inicial.



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Convergence shift – Valor mínimo de aceitação da variação dos parâmetros a_0 e b_0 entre duas iterações.

Convergence scale – Valor mínimo de aceitação da variação dos parâmetros a_2 e b_1 entre duas iterações.

Convergence shear – Valor mínimo de aceitação da variação dos parâmetros a_1 e b_2 entre duas iterações.

Accept over max – Aceita estouro de máximo número de iterações, caso o parâmetro de “convergence shift” na última iteração seja menor ou igual a um determinado valor.

2.3. Crescimento de Região (Region Growing)

O método conhecido por crescimento de região [6] foi concebido para gerar um mapa denso de pontos homólogos em um par de imagens fotogramétricas, que possuam pequenas diferenças em termos de escala e rotação, caso típico dos projetos de cobertura aerofotogramétrica para mapeamento.

O procedimento parte de um par de pontos homólogos, chamados sementes, que são normalmente identificados por um operador humano. Um método de correspondência automática é então aplicado para determinar com maior exatidão a posição do ponto homólogo na segunda imagem. Se o valor da correlação for igual ou superior a um limiar pré-definido, o par de pontos encontrado é validado; caso contrário é descartado. Uma vez que a posição exata do ponto homólogo tinha sido determinada, quatro novos pares de pontos são gerados, localizados a uma distância de d pixels acima, abaixo, à esquerda e à direita, relativamente ao último ponto localizado. Esses pares de pontos tornam-se novas sementes, cujas posições são igualmente refinadas por um método de pesquisa de pares de pontos homólogos. O procedimento é repetido recursivamente, espalhando novas sementes em ambas as imagens, fornecendo, assim, um conjunto denso de pontos homólogos [1]. A figura 4 ilustra o processo de Crescimento de Região. Uma semente inicial é lançada. Em seguida, aplica-se um algoritmo de correlação. Caso o valor da correlação esteja abaixo de um determinado limiar, descarta-se o par de pontos. Caso contrário, o par de pontos homólogos é aceito e são lançadas novas sementes. No caso da figura 4, a distância d é de 3 pixels.

Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

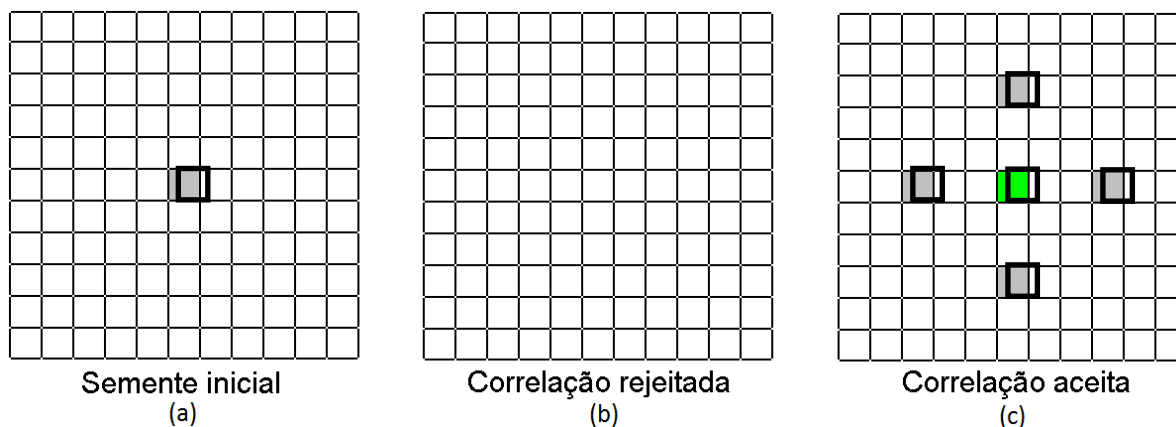


Figura 4: Ilustração do processo de Crescimento de Região.

Parâmetro utilizado no submódulo:

Region growing step – Define a distância d em *pixels* no processo de inserção de novas sementes.

2.4. Correção radiométrica das imagens

O par de imagens fotogramétricas utilizado na extração automática do MDE poderá apresentar erros na radiometria das imagens ou, até mesmo, uma diferença radiométrica significativa entre as mesmas. De forma a minimizar esses problemas, são aplicadas algumas técnicas de processamento de imagens, descritas a seguir.

2.4.1 Equalização de histograma

O propósito da equalização do histograma de uma imagem digital é utilizar conceitos de estatística, de modo a melhorar a distribuição dos níveis de cinza.

Seja a seguinte função de realce das imagens:

$$S = T(r) \quad (3)$$

Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

onde S é imagem transformada, T a imagem original e r o nível de cinza. Na forma discreta, tem-se:

$$S_k = T(r_k) \quad (4)$$

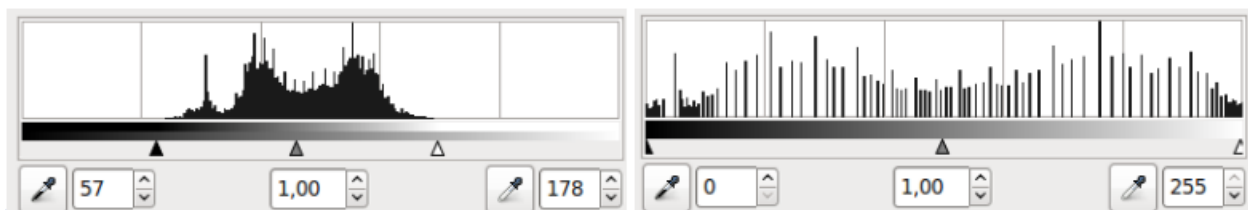
onde k é o nível de cinza discretizado. Em imagens de 8 bits, k varia de 0 a 255.

A função de realce de imagens aplicada na equalização de histogramas é a seguinte:

$$S_k = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \quad (5)$$

onde n_k é o número de ocorrências para um determinado nível de cinza k e n o número total de *pixels*.

A figura 5 mostra graficamente a operação de equalização de histograma.



Histograma original

Histograma equalizado

Figura 5: Equalização de histograma.

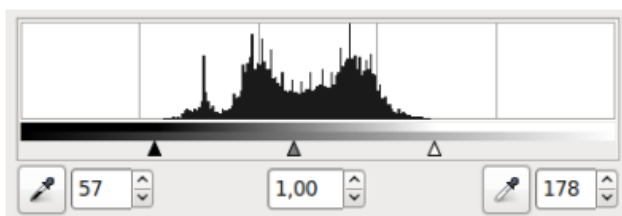
2.4.2 Correspondência de histogramas (Histogram Matching)

Como o objetivo da correlação é identificar regiões com níveis de cinza semelhantes, esta técnica é a mais adequada. O objetivo desta técnica é realizar uma transformação radiométrica em uma imagem, com base no histograma de outra imagem. A figura 6 ilustra este procedimento.

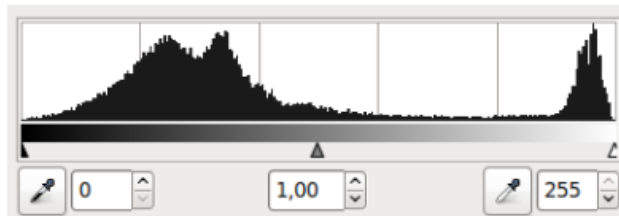
Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

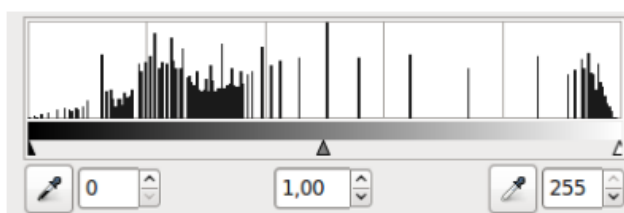
Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito



Histograma a ser modificado



Histograma de referência



Histograma modificado

Figura 6: Correspondência de histogramas.

Parâmetros utilizados no submódulo:

No corrections – Nenhuma correção radiométrica é realizada.

Histogram Equalization – Utiliza o método de equalização de histograma em cada imagem.

Histogram Matching – Utiliza o método de Correspondência de Histogramas.

3. Geração de grade através de interpolação

O resultado da extração automática de pontos homólogos é uma nuvem de pontos 3D, calculados a partir dos pontos homólogos encontrados. Esses pontos não apresentam qualquer uniformidade de espaçamentos no plano XY.

De forma a criar uma grade, onde o espaçamento das células no plano XY é regular, utilizam-se algumas técnicas de interpolação de pontos 3D, descritas a seguir:



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

3.1 Ponto Mais Próximo (Nearest Point)

Esta técnica procura na listagem de pontos 3D qual o ponto mais próximo de uma dada coordenada (X, Y) , assumindo o valor da coordenada Z do ponto encontrado na listagem para esta coordenada.

3.2 Média Móvel (Moving Average)

Determina o valor de Z para uma dada coordenada (X, Y) , através da média ponderada de um conjunto de pontos que estejam a uma distância D_0 de (X, Y) .

Passo 1: Calcular a função de balanceamento ou ponderação, escolhendo entre duas possíveis:

Inverso da distância (inverse distance): $w = \frac{1}{d^n} - 1$ (6)

Decréscimo linear (linear decrease): $w = 1 - d^n$ (7)

onde:

D = Distância Euclidiana de (X, Y) para a coordenada (X_p, Y_p) do ponto em análise;

D_0 = Distância limite; e

n = Expoente do peso. Geralmente o valor utilizado é 0,5.

$d = D/D_0$;

w = Peso;

Passo 2: Calcular o valor de Z para a coordenada (X, Y) da grade, utilizando-se os j pontos dentro do limite D_0 , por meio da seguinte equação:

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^j w_i \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^j w_i} \quad (8)$$

onde:

w_i = Peso de casa ponto englobado pela distância limite; e

Z_i = Valor de Z correspondente a cada ponto situado dentro do limite.

3.3 Superfície de Tendência (Trend Surface)

Determina-se uma superfície polinomial, através do cálculo parâmetros de transformação de um dado polinômio, utilizando-se todos os pontos da listagem. Desta forma, pode-se determinar o valor de Z de qualquer posição (X , Y) da grade, por meio desse polinômio. A tabela 1 apresenta os polinômios utilizados no submódulo do E-FOTO.

Polinômio	Fórmula	Mínimo de pontos
Plano	$z = a + bx + cy$	3
Linear de 2° grau	$z = a + bx + cy + dxy$	4
2° grau parabolico	$z = a + bx + cy + ex^2 + fy^2$	5
2° grau	$z = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2$	6
3° grau	$z = a + \dots + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3$	10

Tabela 1: Polinômio utilizados.

3.4 Superfície Móvel (Moving Surface)

É uma combinação dos métodos de Média Móvel e Superfície de Tendência.

Mais detalhes sobre a interpolação de pontos poderão ser encontrados em [7].

4. Formatos de arquivos

Os arquivos utilizados no submódulo de Extração do DEM do E-FOTO são descritos a seguir. Todos os arquivos estão gravados em formato texto. Há, contudo, variações da estrutura dos mesmos, a saber:



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

4.1 ASCII FULL (2D + 3D)

Cabeçalho:

Pair M_ID L_ID R_ID L_x L_y R_x R_y X Y Z Acc

Em cada linha, são descritos os seguintes parâmetros:

Pair – Numero seqüencial do par estereoscópico de onde o ponto foi extraído ou medido;

M_ID – Identificação do par;

L_ID – Identificação da imagem da esquerda;

R_ID – Identificação da imagem da direita;

L_x – Coordenada x da imagem da esquerda;

L_y – Coordenada y da imagem da esquerda;

R_x – Coordenada x da imagem da direita;

R_y – Coordenada y da imagem da direita;

X – Coordenada X do ponto no espaço-objeto;

Y – Coordenada Y do ponto no espaço-objeto;

Z – Coordenada Z do ponto no espaço-objeto; e

Acc – Valor numérico do coeficiente de Correlação do Pearson da correlação dos pontos homólogos.

Rodapé:

Nenhum

4.2 ASCII 2D points

Sem cabeçalho ou rodapé.

Em cada linha, são descritos os seguintes parâmetros:

L_x – Coordenada x da imagem da esquerda;

L_y – Coordenada y da imagem da esquerda;



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

R_x – Coordenada x da imagem da direita; e

R_y – Coordenada y da imagem da direita.

4.3 ASCII 2D points (BLUH)

Este formato é compatível com o formato de pontos utilizado pela estação fotogramétrica System BLUH, da Universidade de Hannover [8].

Cabeçalho:

10002 0.0 0.0 0.0 0.0

Rodapé:

-99 0.0 0.0 0.0 0.0

Em cada linha, são descritos os seguintes parâmetros:

Pair – Numero seqüencial do par;

L_x – Coordenada x da imagem da esquerda;

L_y – Coordenada y da imagem da esquerda;

R_x – Coordenada x da imagem da direita; e

R_y – Coordenada y da imagem da direita.

4.4 ASCII 3D points (sem indexação)

Sem cabeçalho ou rodapé.

Em cada linha, são descritos os seguintes parâmetros:

X – Coordenada X do ponto no espaço-objeto;

Y – Coordenada Y do ponto no espaço-objeto; e

Z – Coordenada Z do ponto no espaço-objeto.



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

4.5 ASCII 3D points (sem indexação)

Sem cabeçalho ou rodapé.

Em cada linha, são descritos os seguintes parâmetros:

Pair – Numero seqüencial do par;

X – Coordenada X do ponto no espaço-objeto;

Y – Coordenada Y do ponto no espaço-objeto; e

Z – Coordenada Z do ponto no espaço-objeto.

4.6 MDE em formato de grade

O MDE interpolado poderá ser salvo em dois formatos: binário ou ASCII.

4.6.1 Formato binário:

O arquivo é composto por um cabeçalho (header), seguido dos dados do MDE propriamente dito, conforme a figura 7.

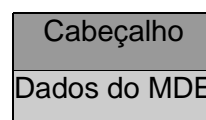


Figura 7.

O cabeçalho é descrito na figura 8.



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Cabeçalho - Tamanho: 8 x 8 = 64 bytes		
Byte offset	Tipo	Descrição
00	double	X_i
08	double	Y_i
16	double	X_f
24	double	Y_f
32	double	Resolução X da grade
40	double	Resolução Y da grade
48	double	Largura da grade
56	double	Altura da grade

Figura 8: Estrutura de um arquivo de grade em formato binário.

Os dados do MDE são os respectivos valores de coordenada Z para cada célula da grade. Esses valores iniciam-se em X_i , Y_i , seguindo-se $X_i + res_x$, Y_i , e assim por diante.

4.6.2 Formato ASCII

No formato ASCII, o header descrito na figura 8 é apresentado inicialmente. Em seguida, cada linha apresenta as coordenadas X , Y , Z da grade, conforme explicado no item anterior.



Extração do MDE

Autores: Lia de Souza e Simões Figueiredo, Rodrigo Dacome Lima, e Letícia de Assis Gomes da Silva

Revisão: Jorge Luís Nunes e Silva Brito

Referências bibliográficas

- [1] – Silveira, M.T.; Feitosa, R.Q., Brito, J.L.N.S.; Jacobsen, K. **Correspondência Eficiente de Descritores SIFT Para Construção de Mapas Densos de Pontos Homólogos em Imagens de Sensoriamento Remoto.** *Boletim de Ciências Geodésicas*, v.17, p. 130-160, 2011.
- [2] – Coelho Filho, L.C.T; Brito, J.L.N.S. **Fotogrametria Digital.** *Ed Uerj*, 196 p., 2007.
- [3] – Silveira, M.T. **Detecção e Extração 3D de Edificações em Áreas de Assentamentos Informais.** Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.
- [4] - Gruen, A. **Least square matching: a fundamental measurement algorithm.** *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*. Bristol: Whittle Publishing, Cap. 8, p. 217-255, 1996.
- [5] – Schenk, T. **Digital Photogrammetry.** Terra Science, v1, 428 p., 1999.
- [6] – Otto, G.P.; Chau, T.K.W. **Region-growing algorithm for matching of terrain images.** *Image and Vision Computing*, v.7, n.2, p. 83-94, 1989.
- [7] – Manual do módulo de DEM 2.5 do E-FOTO, Disponível em <<http://www.ele.puc-rio.br/~marts/research/dem/interpolation.html>>. Acesso em: Dez. 2011.
- [8] - BundLe Block Adjustment Universtiy of Hannover (System BLUH), Disponível em <<http://www.ipi.uni-hannover.de/260.html?&L=1>>. Acesso em: 18 Jan. 2012.

< FIM DO TUTORIAL >