

Registro automático de imagens utilizando *pixels* de baixa frequência de ocorrência

Adriano Caliman Salvador¹
Julio Cesar de Oliveira¹
Márcio Pupin de Mello²

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV
Campus Universitário – 36570-000 - Viçosa - MG, Brasil
{adriano.salvador, oliveirajc}@ufv.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 – CEP 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
pupin@dsr.inpe.br

Abstract. The image registry is the process of linking geographic information of two or more images. It is a useful and important technique in several applications in remote sensing and photogrammetry. The advance of remote sensing technology, especially orbital sensors, had increased substantially the quantity and diversity of data. Thus techniques developments are needed to handle efficiently these data. One technique that allows an effective handling of data is the automatic registration of images derived from orbital remote sensing. Therefore this work aims to develop an algorithm that identifies corresponding features between two digital images for its use in registry procedure. The process of determining features uses a threshold to separate the pixels of low frequency of occurrence in both images. Then the coincidence of the features was determined by the standard correlation coefficient across a fixed size window that runs the entire image. Two sets of bands from Landsat7/ETM+ and CBERS2/CCD were used to test the procedure. For all the bands tested the results were satisfactory, achieving levels of overall RMS smaller than 0.5 pixel and usually 15 or more control points founded. It was noted also a great variability in the relationship between the size of window and correlation.

Palavras-chave: remote sensing, digital image processing, automatic registry, correlation, sensoriamento remoto, processamento digital de imagens, registro automático, correlação.

1. Introdução

Em várias aplicações que fazem uso de imagens orbitais de sensoriamento remoto é comum a necessidade de se atribuir coordenadas as mesmas, de modo que se inter-relacionem. Essa relação espacial pode ser entre bandas de uma mesma cena ou entre imagens do mesmo ponto da superfície terrestre adquiridas em datas diferentes (Jensen, 2005). Numa série temporal de imagens usadas para monitoramento do uso da terra, por exemplo, é fundamental que as imagens estejam corretamente registradas, ou seja, que cada *pixel* de uma imagem corresponda ao mesmo *pixel* nas outras imagens (Dai e Khorram, 1998; Foody, 2002). Esta técnica, denominada registro de imagens, pode ser dividida basicamente em quatro etapas: determinação de feições homólogas, casamento de feições, escolha da função de transformação geométrica e transformação geométrica (Fonseca, 1999). Quando tratamos de registro manual de imagens, as duas primeiras apresentam maior dificuldade de realização, pois no registro manual um operador humano é responsável por encontrar as feições coincidentes, geralmente pontuais, nas duas imagens. Isso torna o processo cansativo e passível de erros humanos, principalmente no caso de um grande volume de imagens (Buiten e Van Putten, 1997; Kennedy e Cohen, 2003).

Com o avanço da tecnologia, são lançados cada vez mais satélites artificiais, que servem de plataforma espacial aos sensores que monitoram a Terra. Assim, variados sensores, que captam dados em varias bandas espectrais, além de inúmeras resoluções, geram um volume muito grande de dados, exigindo desta maneira, métodos cada vez mais ágeis de processamento (Zitová e Flusser, 2003). Para acompanhar esse avanço foram desenvolvidas ferramentas para o registro automático de imagens, principalmente no que diz respeito às

etapas de determinação e “casamento” de feições (Fonseca e Costa, 1997), já que as transformações geométricas são, em geral, métodos matemáticos já implementados.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um método automático de determinação de feições pontuais homólogas através de análise de histograma para registro de imagens de sensoriamento remoto.

2. Material e Métodos

Para a execução do trabalho foram utilizadas quatro cenas, sendo: duas do sensor *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), a bordo da plataforma Landsat 7, que cobrem a região sul do estado do Espírito Santo na órbita/ponto 216/74 (sistema WRS - Landsat); e duas cenas do sensor CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução), a bordo da plataforma CBERS 2, que também cobrem a região sul do estado do Espírito Santo na órbita/ponto 149/122 (sistema WRS - CBERS). Foram escolhidas três bandas do Landsat7/ETM+ e duas bandas do CBERS2/CCD para a realização dos testes do algoritmo. Cada banda fazendo par com sua correspondente de uma data diferente, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Informações sobre os pares de recortes de imagens (bandas) utilizados para aplicação da metodologia proposta.

# par	Satélite	Sensor	Banda	Resolução Espacial	Data	Orbita/Ponto
1	Landsat 7	ETM+	Pancromática	15 m	03/05/2001	216/74
	Landsat 7	ETM+	Pancromática	15 m	05/08/2002	216/74
2	Landsat 7	ETM+	3	30 m	03/05/2001	216/74
	Landsat 7	ETM+	3	30 m	05/08/2002	216/74
3	Landsat 7	ETM+	4	30 m	03/05/2001	216/74
	Landsat 7	ETM+	4	30 m	05/08/2002	216/74
4	CBERS 2	CCD	4	20 m	22/06/2008	149/122
	CBERS 2	CCD	4	20 m	24/07/2008	149/122
5	CBERS 2	CCD	Pancromática	20 m	22/06/2008	149/122
	CBERS 2	CCD	Pancromática	20 m	24/07/2008	149/122

Usando o *software* Idrisi Andes (Eastman, 2006) as imagens foram recortadas em sub-imagens de tamanho 1000 x 1000 (mil linhas por mil colunas). Estes recortes foram salvos em formato *.rst, que é o formato padrão de imagens (*raster*), genérico binário, que o Idrisi manipula.

A técnica automática de registro proposta neste trabalho consiste em encontrar os *pixels* de baixa frequência de ocorrência em duas imagens (imagem de referência e imagem de ajuste) com base em um pré-limiar e utilizá-los como no processo de registro das imagens. Foi desenvolvido um algoritmo em linguagem de programação C padrão, que recebe o par de imagens e retorna as coordenadas dos pontos homólogos. Esses pontos são conhecidos como Pontos de Controle (PCs). De maneira simplificada, o algoritmo utiliza os pontos identificados como de baixa frequência de ocorrência (extremos dos histogramas das imagens) e, para cada ponto identificado na imagem de referência, o algoritmo percorre os pontos selecionados da imagem de ajuste verificando em qual deles (utilizando uma janela de N linhas por N colunas) a correlação com o ponto da imagem de referência é maior. O ponto da imagem de ajuste que apresentar maior correlação com o respectivo ponto da imagem de referência é considerado como ponto homólogo, desde que essa correlação esteja acima de um valor mínimo informado pelo usuário e definido como coeficiente de correlação base. O algoritmo procede dos seguintes passos (Figura 1).

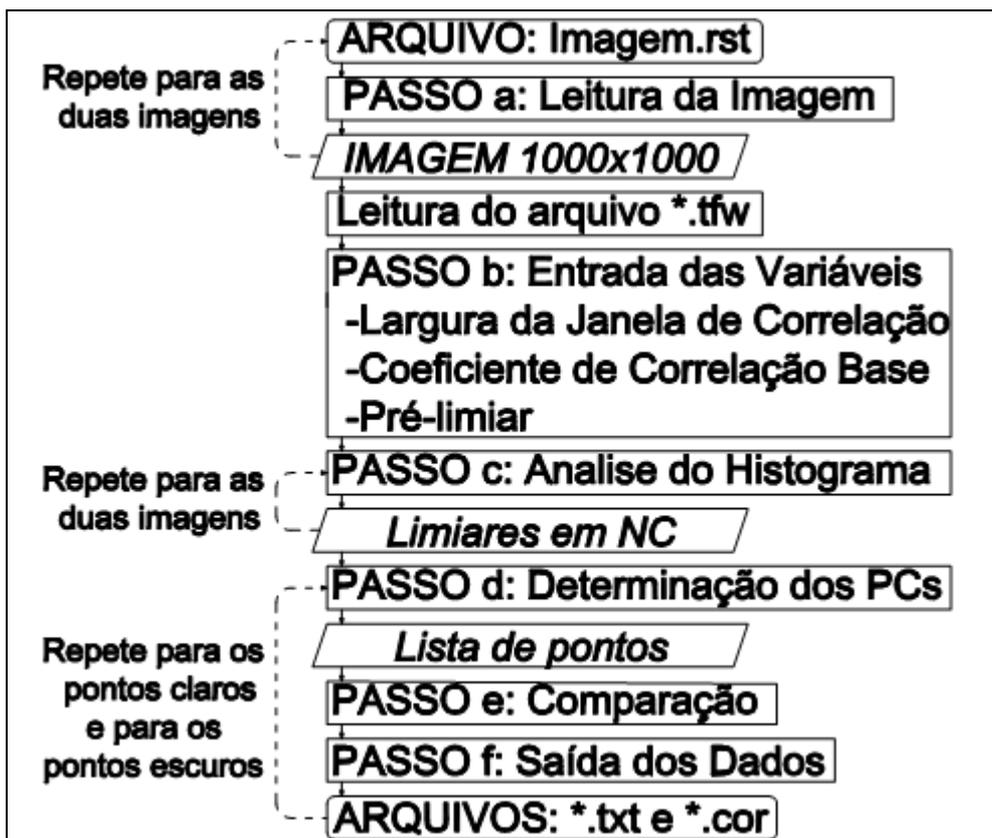


Figura 1. Fluxograma ilustrando as etapas do funcionamento geral do algoritmo desenvolvido.

Os passos são assim detalhados:

- (a) LEITURA DAS IMAGENS: as imagens são lidas e armazenadas na memória em forma de matrizes bidimensionais, assim como o arquivo **.tff* que contém as informações espaciais da imagem de referência;
- (b) ENTRADA DAS VARIÁVEIS: nesta fase o operador define três variáveis fundamentais para o registro:
 - b.1) Tamanho da janela de correlação: os pontos (*pixels*) de baixa frequência de ocorrência são comparados por janelas quadradas de $N \times N$ *pixels*;
 - b.2) Coeficiente de correlação base: sua entrada é feita em porcentagem. A similaridade dos pontos é assumida quando a correlação entre eles é maior ou igual a este valor base;
 - b.3) Pré-limiar: nesta fase o operador define a quantidade aproximada de *pixels* que será usada pelo algoritmo para determinação do limiar em nível de cinza (NC) nos dois extremos dos histogramas das duas imagens;
- (c) ANÁLISE DO HISTOGRAMA: depois de definido o pré-limiar, o algoritmo gera os histogramas e define os valores, em nível de cinza (NC), de dois limiares para cada imagem (extremos do histograma). A partir do zero o algoritmo percorre o histograma acumulando a quantidade de *pixels* em cada NC até o número de *pixels* acumulado ser igual ou superior ao pré-limiar, determinando assim um valor limite para os *pixels* de baixa intensidade em NC (limiar escuro). Para os *pixels* de alta intensidade o algoritmo parte do valor 255 e percorre o histograma em direção a valores menores de NC até encontrar a quantidade de *pixels* estabelecida no pré-limiar, definindo assim o limite para os pontos de alta intensidade (limiar claro). A Figura 2 ilustra um histograma e os limiares escuro e claro.

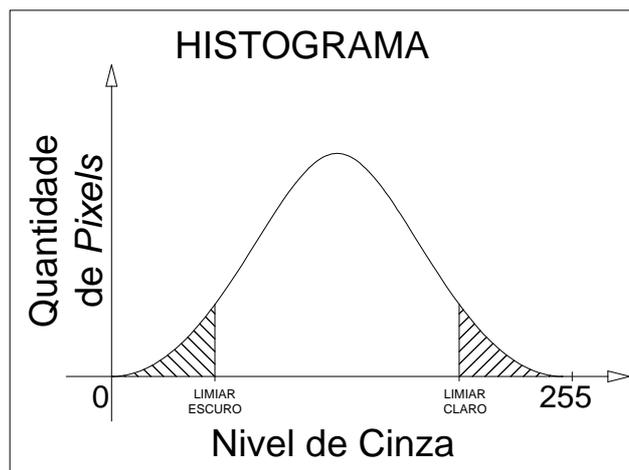


Figura 2. Histograma hipotético onde as partes hachuradas representam os *pixels* acumulados para alcançar o pré-limiar que estabelece os limiares escuro e claro.

- (d) LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS: para cada imagem são geradas duas tabelas onde são armazenados os valores das coordenadas (coluna e linha) de todos os pontos com NC abaixo do limite escuro e acima do limite claro. Estes pontos listados são comparados um a um como será explicado no próximo passo (e). Então são criadas listas com as coordenadas dos pontos de cada imagem e novamente os pontos são comparados.
- (e) COMPARAÇÃO: é feita através do valor do coeficiente de correlação normalizada (Equação 1) (Bagli, 2007), que utiliza janelas de comparação, cujo tamanho é definido anteriormente pelo operador. O valor do coeficiente de correlação é usado como tomada de decisão para aceitar ou não a similaridade entre pontos das duas imagens, a partir de um valor mínimo (coeficiente de correlação base) definido pelo operador.

$$C(i, j) = \frac{\sum_{l=0}^{k-1} \sum_{m=0}^{L-1} (W_z(l, m) - \mu_w)(S_{i,j}(l, m) - \mu_s)}{\sqrt{\sum_{l=0}^{k-1} \sum_{m=0}^{L-1} (W_z(l, m) - \mu_w)^2 \sum_{l=0}^{k-1} \sum_{m=0}^{L-1} (S_{i,j}(l, m) - \mu_s)^2}} \quad (1)$$

Em que:

- $C(i,j)$: coeficiente de correlação em escala absoluta [-1, 1];
 W_z : janela de referência; e μ_w : média da janela de referência;
 $S_{i,j}$: janela de ajuste; e μ_s : média da janela de ajuste;
 l e m : linha e coluna, respectivamente, do ponto de controle na imagem referência;
 k e L : número de linhas e colunas, respectivamente, da janela.

- (f) SAÍDA DOS DADOS: o algoritmo gera um arquivo com extensão **.txt* contendo as coordenadas (linha e coluna) para os pontos homólogos das duas imagens.

Após salvar os pontos homólogos escuros, o algoritmo é re-iterado a partir do passo (c) para processamento dos pontos claros, como demonstrado no fluxograma (Figura 1).

Além do arquivo **.txt* gerado, o algoritmo também gera um arquivo de extensão **.cor*, que é compatível ao arquivo de correspondência utilizada no aplicativo de correção geométrica/registo do *software* Idrisi. Este arquivo **.cor* é armazenado em código ASCII e tem uma estrutura bem simples: em sua primeira linha é informado o número de pontos de

correspondência; nas demais linhas são apresentados quatro valores: coordenadas LINHA e COLUNA da imagem de ajuste e coordenadas X e Y de referência. A geração desse arquivo de correção só é possível através da leitura do arquivo *.*tfw* de referência, de onde são extraídas as informações espaciais da imagem de referência.

De posse do arquivo de correspondência procede-se o registro da imagem utilizando a ferramenta *RESAMPLE*, localizada no menu *REFORMAT* do *software* Idrisi (Figura 3).

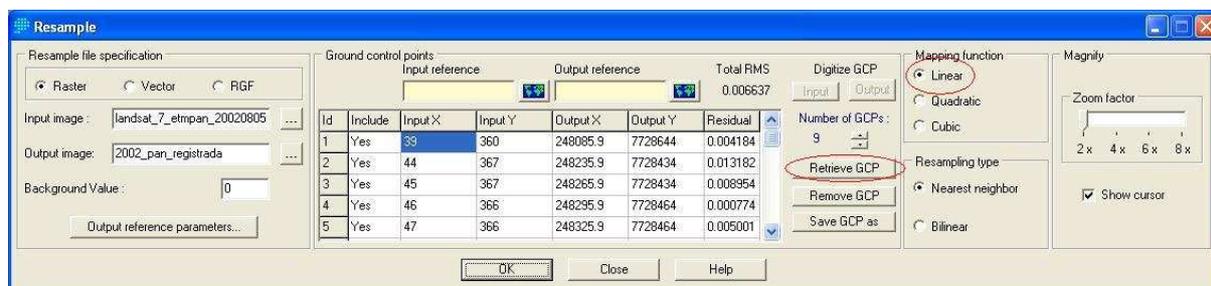


Figura 3. Esboço da ferramenta *Resample*, do *software* Idrisi Andes, utilizada para executar o registro das imagens.

A inclusão do arquivo de correção é feita através do botão *Retrieve GCP*. O modelo de transformação utilizado foi o linear, com reamostragem pelo vizinho mais próximo, que já são implementados na própria ferramenta do Idrisi. A qualidade do arquivo de correspondência é avaliada através do resíduo médio quadrático (RMS: *Root Mean Square*) total e o resíduo do ponto mais discrepante intitulado de resíduo máximo.

3. Resultados e Discussão

Os resultados foram avaliados em duas perspectivas: uma visual, com análise qualitativa; e outra quantitativa.

3.1 Resultados visuais

Para uma avaliação previa e visual da espacialização dos pontos homólogos encontrados as imagens foram dispostas de forma que a imagem de referência ficasse ao lado esquerdo da imagem de ajuste. Então, partindo-se de cada ponto de controle da imagem de referência foi traçada uma linha até o seu homólogo na imagem de ajuste. Essa linha foi intitulada vetor de similaridade. As Figuras 4 e 5 mostram resultados encontrados para o par de imagens 1.

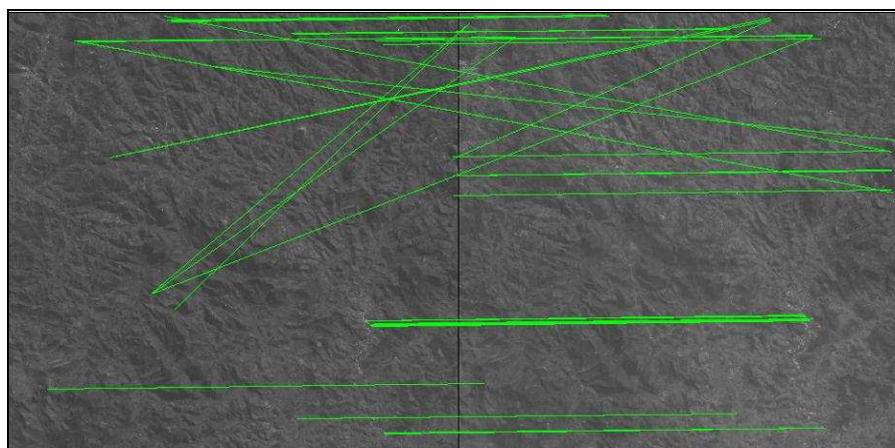


Figura 4. Esboço dos vetores de similaridade para o par de imagens ETM+/Landsat7 usando a banda pancromática (banda de referência à esquerda e banda ajustada à direita), com pré-limiar igual a 100 e correlação 90% para a janela 14x14 *pixels*.

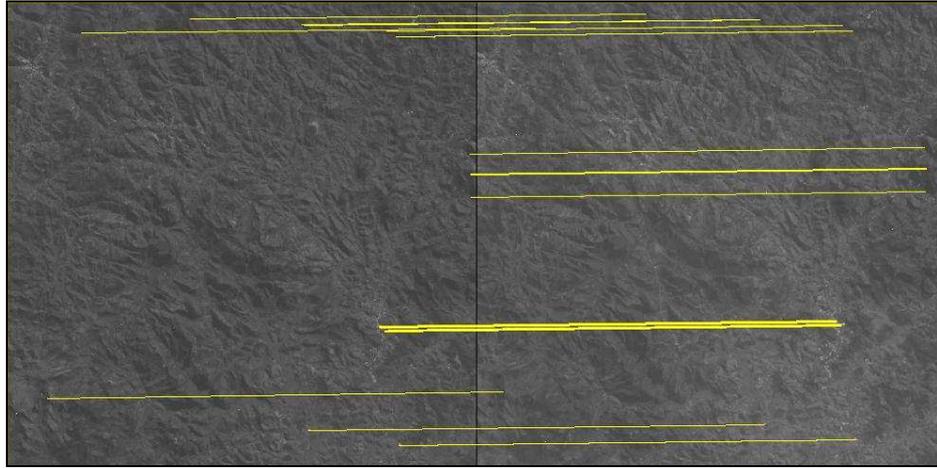


Figura 5. Esboço dos vetores de similaridade para o par de imagens ETM+/Landsat7 usando a banda pancromática (banda de referência à esquerda e banda ajustada à direita), com pré-limiar igual a 100 e correlação 90% para a janela de 20x20 *pixels*.

Nota-se que, quando a janela de correlação é pequena, alguns pontos de controle assumem correspondência errônea (vetores mais inclinados na Figura 4). Entretanto, quando a janela de correlação foi aumentada para 20x20 *pixels*, todos os vetores de similaridade se dispõem quase paralelamente e com comprimentos semelhantes (Figura 5). Através dos vetores podemos observar também a espacialização dos PCs. Na Figura 5, por exemplo, os pontos estão razoavelmente espalhados na imagem. O ideal seria que eles estivessem distribuídos por todas as partes da imagem.

3.2 Resultados quantitativos

Nessa seção serão exibidos os resultados dos registros realizados com todos os pares de imagens da Tabela 1. Os resultados estão apresentados, para cada par de imagem, nos três níveis de correlação em que foram obtidos os melhores resultados.

3.2.1 Par de imagens 1 – Landsat7/ETM+, banda pancromática

Para o par de imagens número 1 os resultados (Tabela 2) começam a melhorar a partir do tamanho de janela de 20x20 *pixels*, sendo que para uma janela de 28x28 e correlação de 90% alcançou-se um RMS total de 0,48 *pixel*.

Tabela 2. Relaciona o tamanho da janela de correlação com o RMS total, resíduo máximo e o número de PC obtidos com pré-limiar igual a 100 para o par de imagens 1.

Janela	Correlação 90%			Correlação 91%			Correlação 92%		
	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs
14	294,69	508,61	52	262,38	598,80	36	3,35	5,76	10
20	0,73	20,77	31	0,94	2,06	14	0,59	1,03	7
22	0,69	1,84	30	0,64	1,80	20	0,03	0,05	5
24	0,54	1,84	29	0,38	1,18	16	0,60	0,97	4
28	0,48	1,81	29	0,57	1,18	8			
30	0,52	1,81	25	0,21	0,38	8			
34	0,17	0,40	15	0,15	0,36	8			

É possível observar que, para a janela de 14x14 *pixels*, que é o menor valor testado, obteve-se um RMS altíssimo. Este resultado está coerente com a baixa qualidade dos vetores de similaridade observados neste par de imagens, como apresentado na Figura 4.

3.2.2 Par de imagens 2 – Landsat7/ETM+, banda 3

Em geral, janelas menores que 20x20 apresentam resultados ruins (Tabela 3).

Tabela 3. Relaciona o tamanho da janela de correlação com o RMS total, resíduo máximo e o número de PC obtidos com pré-limiar igual a 100 para o par de imagens 2.

Janela	Correlação 90%			Correlação 91%			Correlação 92%		
	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs
14	330,54	627,04	21	254,01	555,25	11	312,46	437,46	8
18	143,40	414,97	12	0,18	0,28	4			
20	0,26	0,59	11	0,16	0,28	5			
22	0,11	0,34	12	0,12	0,35	9			

3.2.3 Par de imagens 3 – Landsat7/ETM+, banda 4

A precisão na transformação geométrica, em termos de RMS, só foi menor que 0,5 *pixel* com o aumento do coeficiente de correlação base para 95% (Tabela 4).

Tabela 4. Relaciona o tamanho da janela de correlação com o RMS total, resíduo máximo e o número de PC obtidos com pré-limiar igual a 100 para o par de imagens 3.

Janela	Correlação 90%			Correlação 91%			Correlação 95%		
	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs
14	258,32	619,33	49	335,71	615,23	43	78,80	122,50	14
18	211,00	565,40	41	290,65	638,32	36	0,46	1,05	15
20	157,97	615,52	35	280,18	641,53	31	0,36	1,22	15
30	0,67	0,75	30	243,42	451,61	25	0,27	1,30	26
40	0,55	1,12	29	248,55	364,52	23	0,006	0,013	9

3.2.4 Par de imagens 4 – CBERS/CCD, banda 4

Os resultados obtidos para uma janela menor também se mostraram bons (Tabela 5).

Tabela 5. Relaciona o tamanho da janela de correlação com o RMS total, resíduo máximo e o número de PC obtidos com pré-limiar igual a 100 para o par de imagens 4.

Janela	Correlação 90%			Correlação 95%			Correlação 97%		
	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs
20	62,07	425,63	152	62,25	409,05	97	0,42	1,49	71
50	0,92	2,7	174	0,64	2,69	108	0,49	1,34	98
100				0,73	1,46	143	0,47	1,21	90

3.2.5 Par de imagens 5 –CBERS/CCD, banda pancromática

O par de imagens 5 obteve bom resultado com uma janela de 50 x 50 e correlação de 97%, onde apresentou RMS total de 0,15 *pixel* e 25 PCs ajustados (Tabela 6).

Tabela 6. Relaciona o tamanho da janela de correlação com o RMS total, resíduo máximo e o número de PC obtidos com pré-limiar igual a 100 para o par de imagens 5

Janela	Correlação 90%			Correlação 95%			Correlação 97%		
	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs	RMS total	Resíduo máximo	Número de PCs
20	1,37	3,55	117	1,09	2,96	67	0,60	3,25	46
50	1,22	3,57	167	0,60	1,25	96	0,15	0,63	25
100	1,10	2,41	166	0,43	1,13	90	0,0089	0,16	8

4. Conclusões

Para todas as imagens testadas os resultados obtidos foram satisfatórios, conseguindo-se valores de RMS total menores que 0,5 *pixel*, além de quantidades significativas de PC (normalmente acima de 15 pontos) para sub-imagens de 1000x1000 *pixels* avaliadas.

Notou-se também uma relação bastante variável entre coeficiente de correlação base e tamanho da janela de correlação, para obtenção de bons resultados. Pode-se dizer que os valores variam de 90 a 97% para a correlação e de 20 a 100 *pixels* para o tamanho da janela de correlação. Entretanto, percebeu-se que, em alguns casos, apesar do RMS total ser baixo, o resíduo máximo é alto, indicando que o ajuste não foi bom em, pelo menos, um ponto em especial. Nesses casos, quando o número de pontos for abundante, recomenda-se a eliminação dos maiores valores de resíduo, visando diminuir o RMS total (procedimento este que não foi realizado neste trabalho).

Recomenda-se, em trabalhos futuros, estudar problemas relacionados com nuvens nas imagens. Elas interferem nos *pixels* claros, pela própria propriedade da nuvem em refletir bastante, especialmente nos comprimentos de ondas do visível; e também interferem nos *pixels* escuros, uma vez que as sombras das nuvens possuem, em geral, resposta espectral muito baixa. Outra recomendação é o aperfeiçoamento do algoritmo de modo que os PCs fiquem mais bem distribuídos espacialmente pela imagem, permitindo um registro mais acurado.

Referências Bibliográficas

- Bagli, V. V. **Mosaico de imagens baseado em múltiplas resoluções**. 2007. 112 p. (INPE-14807-TDI/1250). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 2007.
- Buiten, H. J.; Van Putten, B. Quality assessment of remote sensing image registration - analysis and testing of control point residuals. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 57-73, 1997.
- Dai, X.; Khorram, S. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 1566-1577, 1998.
- Fonseca, L. M. G. **Registro automático de imagens de sensoriamento remoto**. 1999. 219 p. (INPE - 7502-TDI/717). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos-SP, 1999.
- Fonseca, L. M. G.; Costa, M. H. M. Automatic registration of satellite images. In: Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing, 10., 1997, Campos do Jordão, SP. **Proceedings...** São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 1997. p. 219-226.
- Foody, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.
- Jensen, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3 ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Prentice Hall, 2005. 526 p.
- Kennedy, R. E.; Cohen, W. B. Automated designation of tie-points for image-to-image coregistration. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 17, p. 3467-3490, 2003.
- Zitová, B.; Flusser, J. Image registration methods: a survey. **Image and Vision Computing**, v. 21, n. 11, p. 977-1000, 2003.