

Normalização radiométrica automatizada para geração de mosaicos de imagens RapidEye sobre paisagens amazônicas, através da transformação IR-MAD

Fátima L. Benítez Ramírez¹, Liana O. Anderson^{1,2,3}, Antônio R. Formaggio¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil, fatima@dsr.inpe.br, liana@dsr.inpe.br, formag@dsr.inpe.br

² Centro Nacional de Monitoramento de Desastres Naturais – CEMADEN, Parque Tecnológico de São José dos Campos, Estrada Doutor Altino Bondensan, 500, São José dos Campos, SP, 12247-016.

³ Environmental Change Institute, ECI, University of Oxford, South Parks Road, Oxford, OX1 3QY, UK

Abstract. Radiometric normalization for satellite images mosaics is very important for monitoring and quantifying large scale land cover changes. Thus, this paper aims to apply an automatic method for radiometric normalization of imagery based on the iterative re-weighted Multivariate Alternation Detection (IR-MAD) transformation. The procedure was applied in two study areas, each with different Amazonian landscape. With the purpose of using the image mosaic in future studies in the Ecuadorian Amazon, the high resolution images RapidEye were selected. The RapidEye satellites are distinguished from most other multispectral satellites by the presence of a RedEdge band, which is relevant for vegetation characterization. The results of this procedure for mosaicking RapidEye images over the Amazon showed that the 500 meters overlap between the adjacent images tiles were not large enough for the IR-MAD algorithm to detect an adequate amount of invariant pixels to perform a robust radiometric normalization. Moreover, the quantity and behavior of the surface features in the scene are important aspects that limit the identification of invariant pixels. Finally, to have a successful result, this procedure can be applied in RapidEye images subsets with a relatively small array dimensions, due to very large spatial subsets limit this procedure and does not allow to determinate a satisfactory regression for radiometric normalization.

Key words: Automatic radiometric normalization, image mosaic, IR-MAD, RapidEye, Amazon, Ecuador.

1. Introdução

A Amazônia apresenta uma paisagem heterogênea e complexa onde, na atualidade, uma grande variedade de formações vegetais encontra-se integrada com extensas áreas agrícolas. Conhecer sua estrutura, comportamento, interações e mudanças tem-se convertido em alvo de pesquisa nas últimas décadas, sendo que, o sensoriamento remoto tem mostrado um papel importante em atingir esses objetivos.

A Amazônia apresenta uma extensão de 7,8 milhões de km² e é compartilhada por nove países, entre eles, o Equador. As florestas tropicais úmidas da Amazônia abrangem aproximadamente 30% do território equatoriano.

Sua grande extensão e a frequente cobertura de nuvens na região são fatores limitantes em diferentes pesquisas e no próprio monitoramento da cobertura florestal para o Equador, utilizando-se imagens de alta ou média resolução espacial. Ante esta necessidade, surge o interesse de gerar mosaicos de imagens como ferramentas de extrema utilidade para estudos de planejamento ambiental, monitoramento, gestão territorial, entre outros.

Segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), o brilho de cada imagem é influenciado tanto pelas variações não lineares da sensibilidade dos detectores ao longo do tempo quanto das variações na geometria de iluminação que não são totalmente corrigidas durante os processos de correção geométrica e radiométrica. Estas influências podem ser minimizadas através de procedimentos de normalização radiométrica.

A normalização radiométrica de imagens satelitais é um pré-processamento importante, que tem como objetivo conseguir um comportamento uniforme no que diz respeito à resposta espectral de alvos considerados invariantes com o tempo (GÜRTLER et al., 2003), e deve ser

aplicada antes de continuar com aplicações que incluam a geração de mosaicos, monitoramento de índices de vegetação ao longo do tempo, entre outros (CANTY et al., 2004).

Neste contexto, com o intuito de gerar um mosaico de imagens RapidEye que cobre a Amazônia norte-equatorial, surge a necessidade de normalizar radiometricamente um conjunto de imagens em relação a uma imagem de referência. Assim, pretende-se obter um produto, onde, as imagens normalizadas tenham características radiométricas como se tivessem sido adquiridas pelo mesmo sensor e nas mesmas condições atmosféricas e de iluminação da imagem de referência.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade em termos de qualidade do produto final da normalização radiométrica automatizada através da transformação IR-MAD em duas áreas piloto na Amazônia norte equatorial com características de cobertura da terra distintas, objetivando-se a geração de mosaicos com imagens RapidEye.

2. Materiais

2.1. Área de estudo

Para este estudo foram escolhidas duas áreas localizadas na Amazônia norte do Equador (Figura 1). A primeira área corresponde a uma região altamente antropizada; já a segunda área apresenta uma floresta nativa livre de perturbações antrópicas.



Figura 1. Localização geográfica das áreas de estudo e imagens RapidEye utilizadas neste estudo, composição colorida das imagens: R5G4B3.

2.2. Dados RapidEye

Dois *tiles* dos satélites RapidEye cobrem cada área de estudo e, em cada uma delas, foi selecionado um conjunto de três cenas detalhadas na Tabela 1, duas correspondem ao mesmo *tile* e uma outra corresponde ao *tile* adjacente (Figura 1). Assim, é possível aplicar a normalização radiométrica tanto em imagens vizinhas (adjacentes) quanto em imagens do mesmo *tile*. As imagens RapidEye foram adquiridas com um nível de processamento 3A, isto é são produtos com correções radiométricas (a nível de sensor) e geométricas, além de ser ortorretificadas, recobrando uma área de 25 km² e com sobreposição de 500 metros.

RapidEye é uma constelação de cinco micro-satélites idênticos posicionados na mesma órbita síncrona com o sol. As imagens RapidEye têm uma resolução espacial de 5 metros (imagens ortorretificadas) em todas suas cinco bandas espectrais que compreendem as regiões do azul – B1 (440-510 nm), verde – B2 (520-590 nm), vermelho – B3 (630-685), RedEdge – B4 (690-730 nm) e do infravermelho próximo (760-850 nm).

Tabela 1. Características das Imagens RapidEye utilizadas neste estudo.

Área	Imagem	ID Tile	No. de catálogo	Data	Satélite	Tipo
Área 1	1	1838806	n/a	11/08/2011	1	Referência
	2	1838806	n/a	25/08/2011	5	Target*
	3	1838805	n/a	11/08/2011	1	Target*
Área 2	4	1838812	n/a	01/01/2011	4	Referência
	5	n/a	4932176	07/12/2009	5	Target*
	6	1838712	n/a	18/08/2012	3	Target*

* Imagem a ser normalizada

2.3. Programa para processamento de imagens

O processamento das imagens foi efetuado no ambiente de trabalho do software ENVI 5.0 e foram utilizadas as extensões iMAD/radcal, escritas na linguagem IDL, para executar a transformação IR-MAD e a normalização radiométrica respectivamente (Canty, 2011). Este pacote de extensões e a documentação auxiliar podem ser baixadas de modo gratuito do seguinte endereço <<http://ms-image-analysis.appspot.com/static/homepage/software.html>>.

3. Metodologia

O procedimento adotado para atingir os objetivos deste trabalho consistiu em várias etapas que são detalhadas a seguir.

3.1. Pré-Processamento das Imagens

Antes de aplicar a normalização radiométrica é importante a conversão dos números digitais (ND) das imagens para valores de reflectância, possibilitando assim a comparação das diferentes bandas e a caracterização espectral dos objetos.

Assim, a primeira etapa foi a transformação para valores de Radiância absoluta (RAD) no topo da atmosfera (TOA) em $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, multiplicando-se o ND pelo fator de escala radiométrico para cada *i-ésima* banda. O valor do fator de escala radiométrico encontrado nos metadados de cada imagem é o mesmo para todas as bandas em todas as imagens utilizadas, sendo igual a 0,009999999776482582. Em seguida, os valores de Radiância foram transformados em valores de Reflectância; no entanto, antes de continuar com este processo, em cada área de análise, uma cena foi definida como referência e as outras duas foram normalizadas com relação àquela de referência (Tabela 1). Foram utilizados como critérios para a seleção das cenas de referência o ano de aquisição (a maioria das imagens do projeto foram adquiridas no ano 2011) e a menor porcentagem de cobertura de nuvens.

Em seguida, os valores de Radiância das imagens a serem normalizadas foram convertidos em valores de reflectância aparente, ou seja, reflectância no topo da atmosfera. Já a imagem de referência foi processada através da correção atmosférica para obter valores de reflectância de superfície. Assim, a interferência da atmosfera sobre os valores de reflectância foi minimizado. Para este procedimento foi utilizada a ferramenta *QUick Atmospheric Correction* (QUAC) implementada no software ENVI. Este módulo efetua a correção atmosférica a partir de modelos empíricos utilizando somente as informações contidas na cena, não necessitando de informação auxiliar (BERNSTEIN et al., 2012). QUAC melhora a correção atmosférica aproximadamente em torno de 15 % em relação aos métodos baseados em modelos físicos (BERNSTEIN et al., 2012).

Embora os produtos 3A das imagens RapidEye possuam correções geométricas, radiométricas e estejam ortoretificados, é importante verificar se as duas imagens que vão ser utilizadas no processo de normalização estão co-registradas. Se não for o caso, as imagens devem passar por um processo de co-registro antes de aplicar a normalização radiométrica automática, pelo fato de ser um algoritmo orientado ao pixel. Neste estudo, a imagem 2 foi

registrada em relação à imagem 1 e a imagem 5 em relação à imagem 4 (Tabela 1) para a área de estudo 1 e 2 respectivamente.

3.2. A transformação IR-MAD

A transformação multivariada de detecção de alterações (MAD) é um método de detecção de mudanças proposto por Nielsen et al. (1998), e está baseado na análise de correlação linear entre duas imagens. É um procedimento rápido e simples em comparação com as técnicas manuais (CANTY et al., 2004; SCHROEDER et al., 2006).

Neste estudo foi utilizada a transformação IR-MAD (Iteratively re-weighted MAD), que é um procedimento melhorado da transformação MAD e trabalha dentro de um esquema iterativo onde, a cada interação, as observações são ponderadas de acordo à probabilidade de identificar uma não-mudança na interação anterior. Este procedimento permite identificar mudanças especialmente em área onde o pixel de não-mudança é relativamente pequeno (CANTY e NIELSEN, 2008).

3.3. Normalização Radiométrica Automatizada

O processo de normalização radiométrica inicia com a aquisição de um conjunto de dados de controle composto por valores de reflectância invariantes ao longo do tempo. A partir deste conjunto de dados são calculadas funções de transformação linear que, posteriormente, são utilizadas na geração de uma nova imagem que apresenta compatibilidade espectral com aquela que foi definida como de referência (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

O crítico neste procedimento é encontrar alvos invariantes ao longo do tempo que sejam base da normalização, além de simplificar o processo manual e a demanda de tempo. Neste contexto, o algoritmo IR-MAD se mostra como uma solução prática e inovadora a este problema, permitindo selecionar automaticamente um conjunto de pixels de não-mudança entre duas imagens.

Finalmente, o algoritmo *radcal* executa uma regressão ortogonal nesse conjunto de pixels, que permite determinar os coeficientes de normalização radiométrica. A qualidade da normalização é avaliada através do teste *t* e teste *F* com objetivo de comparar a média e a variância respectivamente (CANTY e NIELSEN, 2008).

3.4. Áreas de Avaliação

Para avaliar o desempenho desta metodologia, a normalização radiométrica automatizada foi aplicada tanto em imagens vizinhas, quanto em imagens que ocupam o mesmo *tile*. Nas imagens vizinhas o procedimento foi aplicado em toda a extensão e na área de sobreposição entre elas (Figura 2a). Já, nas imagens localizadas no mesmo *tile*, o procedimento foi aplicado em toda a extensão e em um *subset* (recorte: 1000 x 1000 pixels) da cena (Figura 2b). Isto foi aplicado nas duas áreas de estudo.

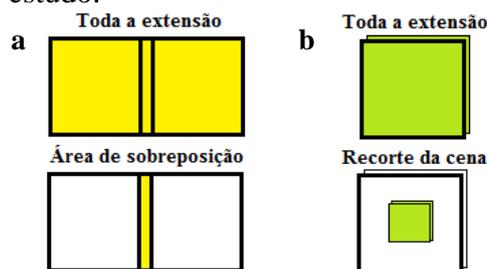


Figura 2. Áreas de avaliação: a) imagens adjacentes e, b) imagens que ocupam o mesmo *tile*.

4. Resultados e Discussão

Os resultados da normalização radiométrica automatizada são apresentados para as duas áreas de estudo, as quais apresentam diferentes paisagens amazônicas. Os coeficientes de

correlação (r) e o erro médio quadrático (RMSE) foram utilizados para comparar o desempenho da metodologia nas diferentes áreas de avaliação.

4.1. Área de estudo 1

A baixa correlação entre as duas imagens adjacentes (Figura 3a e Tabela 2) confirma que o IR-MAD não atinge a identificação de suficientes elementos de não-mudança para ter um resultado adequado.

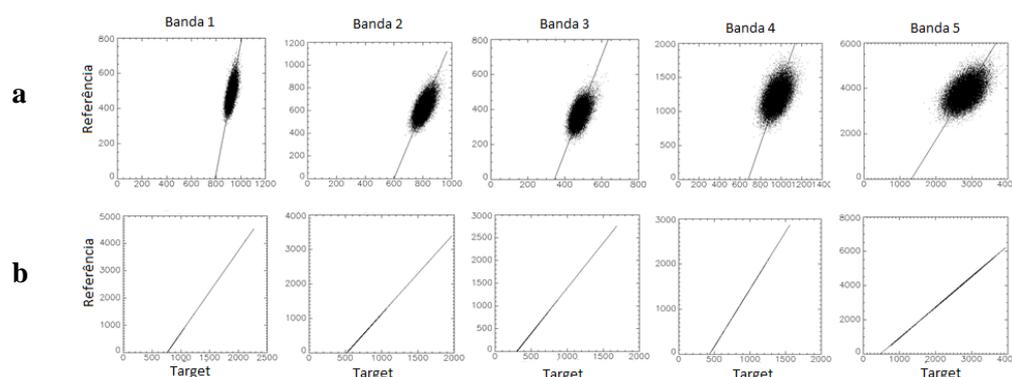


Figura 3. Área de estudo 1: Imagens adjacentes. Resultado da Normalização radiométrica automatizada para a) toda a extensão e, para b) a área de sobreposição.

Assim, a imagem resultante não se aproxima, em relação ao comportamento espectral de seus elementos, à imagem de referência (Figura 4ai e 4aiii). Porém, aplicando o procedimento apenas na área de sobreposição entre as cenas, a correlação melhora significativamente (Figura 3b e Tabela 2), fornecendo uma imagem com um comportamento espectral semelhante àquela da imagem de referência (Figura 4aii).

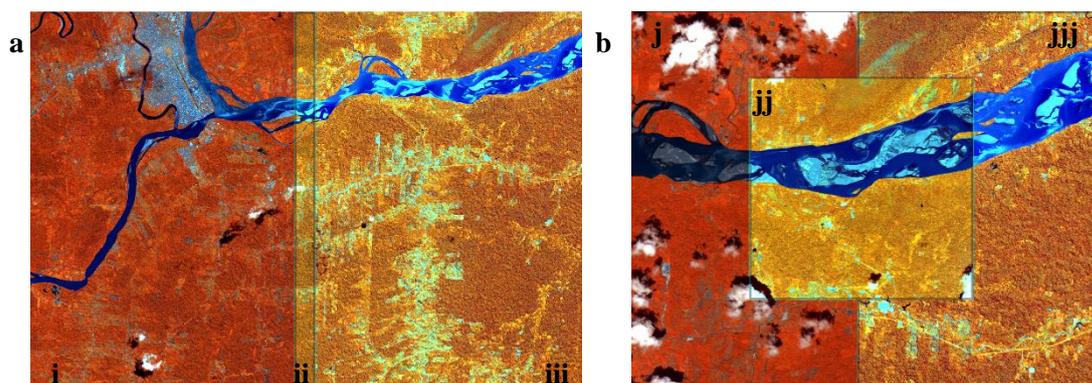


Figura 4. Área de estudo 1: Imagens Normalizadas com base na imagem de referência. a) Duas imagens adjacentes: i) imagem normalizada em toda sua extensão, ii) imagem normalizada apenas na área de sobreposição e, iii) imagem de referência. b) Duas imagens no mesmo *tile*: j) imagem normalizada em toda sua extensão, jj) imagem normalizada para um recorte da cena, e jjj) imagem de referência.

Já, aplicando o mesmo procedimento em duas imagens localizadas no mesmo *tile*, os resultados da correlação entre elas melhora significativamente em relação às imagens adjacentes (Figura 5a e Tabela 2). No entanto, assim como nas imagens adjacentes, a imagem resultante da normalização para este caso não conseguiu aproximar-se com a imagem de referência (Figura 4bj e 4bjjj). Os resultados estatísticos desta normalização não foram significativos na hipótese de que a variância da imagem a ser normalizada seja igual à variância da imagem de referência.

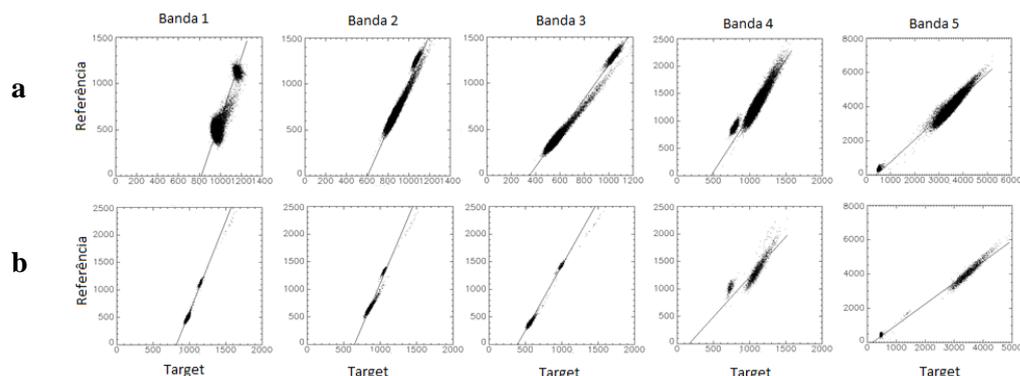


Figura 5. Área de estudo 1: Imagens no mesmo *tile*. Resultado da Normalização radiométrica automatizada para a) toda a extensão e, para b) um recorte da cena.

Tabela 2. Comparação da correlação (r) e RMSE para a regressão ortogonal dos pixels identificados como não-mudança na área de estudo 1.

Dimensão Banda	<i>Duas Imagens Adjacentes</i>				<i>Duas Imagens no mesmo tile</i>			
	Mosaico 5000 x 5000		Área de sobreposição 200 x 5000		Cena completa 5000 x 5000		Recorte da cena 1000 x 1000	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
1	0,61	14,48	0,99	0,39	0,86	25,18	0,98	12,92
2	0,62	23,74	1	0,24	0,97	15,08	0,97	18,66
3	0,51	20,10	1	0,40	0,99	14,38	0,99	16,84
4	0,46	53,59	1	0,22	0,91	37,87	0,85	66,41
5	0,49	205,51	0,99	4,71	0,98	114,03	0,99	98,40

Finalmente, os resultados deste procedimento em uma área menor dentro da mesma cena, são apresentados na Figura 5b e na Tabela 2. A correlação entre as duas imagens foi altamente significativa, fornecendo uma imagem normalizada com resultados estatísticos significativos e um comportamento espectral dos seus elementos semelhante aos da imagem de referência (Figura 4bjj e 4bjjj).

4.2. Área de estudo 2

Os resultados nesta área de estudo, utilizando duas imagens adjacentes, são apresentados na Figura 6a e Tabela 3, onde se observa uma baixa correlação especialmente na banda 2 e 4.

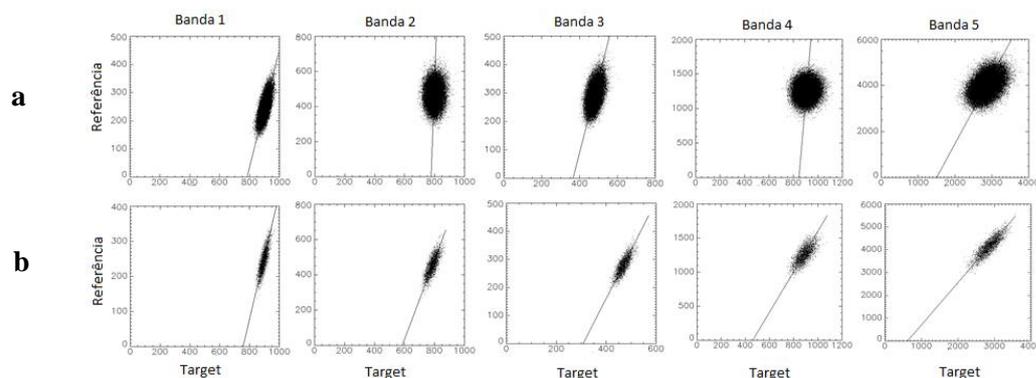


Figura 6. Área de estudo 2: Imagens adjacentes. Resultado da Normalização radiométrica automatizada para a) toda a extensão e, para b) a área de sobreposição.

Assim, do mesmo modo que na área de estudo 1, a correlação entre as duas imagens foi não-significativa, fornecendo uma imagem normalizada (Figura 7ai) sem resultados adequados para gerar um mosaico a partir da imagem de referência (Figura 7aiii). No entanto, quando se

aplicou a técnica apenas na área de sobreposição, a correlação entre as duas imagens não foi significativa como foi na área de estudo 1 (Figura 6b e Tabela 3). O comportamento espectral dos elementos da imagem resultante desta normalização não conseguiu aproximar-se o suficiente para aquele da imagem de referência (Figura 7a_{ii} e 7a_{iii}).

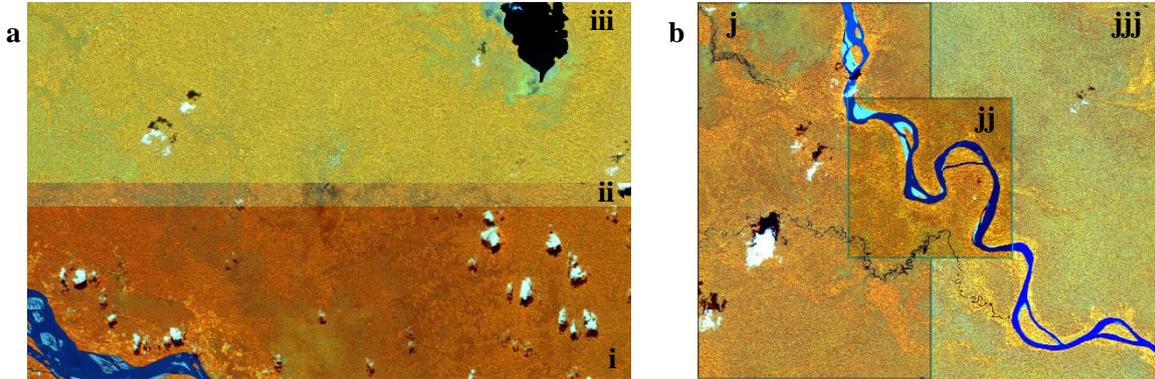


Figura 7. Área de estudo 2: Imagens Normalizadas com base na imagem de referência. a) Duas imagens adjacentes: i) imagem normalizada em toda sua extensão, ii) imagem normalizada apenas na área de sobreposição e, iii) imagem de referência. b) Duas imagens no mesmo *tile*, j) imagem normalizada em toda sua extensão, jj) imagem normalizada para um recorte da cena, e jjj) imagem de referência.

Tabela 3. Comparação da correlação (r) e RMSE para a regressão ortogonal dos pixels identificados como não-mudança na área de estudo 2.

Dimensão Banda	Duas Imagens Adjacentes				Duas Imagens da mesma cena			
	Mosaico 5000 x 5000		Área de sobreposição 200 x 5000		Cena completa 5000 x 5000		Recorte da cena 1000 x 1000	
	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE	r	RMSE
1	0,65	13,51	0,79	10,34	0,59	20,53	0,98	9,8
2	0,05	28,49	0,77	15,34	0,94	21,51	0,90	20,76
3	0,45	17,43	0,80	9,55	0,98	11,04	0,99	11,35
4	0,07	49,46	0,71	33,54	0,99	23,37	0,99	22,13
5	0,42	193,18	0,86	100,05	0,99	93,26	0,99	40,87

Os resultados da normalização radiométrica em duas imagens no mesmo *tile* são apresentados na Figura 8a e Tabela 3. Como na área de estudo 1, a correlação entre as imagens melhora em relação às duas adjacentes, no entanto, para este caso, a correlação na banda 1 diminui significativamente (Tabela 3). Além disso, pode-se observar nos gráficos de correlação, que existe uma maior dificuldade para identificar os pixels invariantes (Figura 8a).

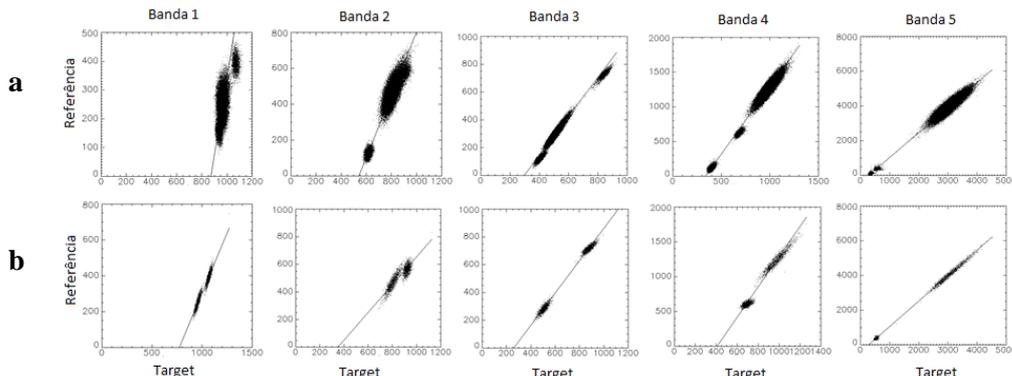


Figura 8. Área de estudo 2: Imagens no mesmo *tile*. Resultado da Normalização radiométrica automatizada para a) toda a extensão e, para b) um recorte da cena.

A dificuldade de identificar os pixels invariantes também pode ser observada quando aplicamos a técnica em uma área menor (Figura 8b), embora os resultados da correlação (Tabela 3) sejam significativos. Assim, as imagens normalizadas, tanto em toda a cena (Figura 7bj) quanto em um recorte da mesma (Figura 7bjj), não conseguiram aproximar-se espectralmente com a imagem de referência (Figura 7bjjj).

5. Conclusões

A normalização radiométrica automatizada através da transformada IR-MAD não mostrou resultados adequados em cenas completas do sensor RapidEye, o que permita gerar um mosaico de imagens que recubra a região amazônica.

Com uma sobreposição de aproximadamente 500 metros entre imagens, o algoritmo IR-MAD não identificou o suficiente número de pixels invariantes entre as duas cenas para que o algoritmo *radcal* gere coeficientes de correlação adequados para normalizar a cena completa.

Finalmente, foram identificados três aspectos importantes que influenciam na normalização radiométrica automatizada de imagens RapidEye. O primeiro está relacionado com as dimensões da cena, enquanto a área de aplicação fosse mais pequena (e.g. 1000 x 1000 pixels) os resultados melhoram notavelmente. O segundo refere-se aos elementos que conformam a cena, assim, em paisagens amazônicas naturais, onde, os elementos encontrados são grandes extensões de floresta e corpos de água com um comportamento heterogêneo, a dificuldade do algoritmo IR-MAD para identificar pixels invariantes é maior. No entanto, em paisagens amazônicas que apresentam intervenção antrópica, a quantidade de elementos dentro da cena é maior. Isto faz que a correlação entre as duas imagens seja significativa e seja possível obter uma imagem normalizada que permita gerar mosaicos ou cobrir gaps. Por último, o terceiro aspecto está relacionado com as mudanças bruscas entre as duas imagens (e.g. nuvens), eliminando estes elementos do análise, os resultados do IR-MAD melhoram notavelmente.

6. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado graças ao apoio do Instituto Nacional de Pesquisas – INPE, ao CNPq e ao Ministério do Meio Ambiente do Equador – MAE, que forneceu as imagens RapidEye para pesquisas na Amazônia equatoriana. L.O.A. agradece ao projeto Amazônica (<http://www.geog.leeds.ac.uk/projects/amazonica> NERC- UK NE/F005806/1) e CNPq processo 458022/2013-6.

7. Referência Bibliográficas

Bernstein L.S.; Jin X.; B.; Gregor Adler-Golden S.M. The Quick Atmospheric Correction (QUAC) Code: Algorithm Description and Recent Upgrades. **SPIE Optical Engineering**, v. 51, n. 11, 2012.

Canty, M. J.; Nielsen, A.; Schmidt, M. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 91, n. 3-4, p. 441–451, 2004.

Canty, M. J.; Nielsen, A. Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery with the iteratively re-weighted MAD transformation. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 3, p. 1025–1036, 2008.

Gürtler, S.; Luiz, A. J. B.; Epiphanyo, J. C. N. Uniformização de imagens Landsat para previsão de safras agrícolas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2003. p. 109-116. 1 CD-ROM.

Nielsen A.; Conradsen K.; Simpson J. Multivariate alteration detection (MAD) and MAF post-processing in multispectral, bitemporal image data: New approaches to change detection studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 64, n. 1, p. 1-19, 1998.

Schroeder, T. A.; Cohen, W. B.; Song, C.; Canty, M. J.; Yang, Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, n. 1, p. 16-26, 2006.