



**Correção Geométrica de Imagens CBERS-4/PAN com Modelos Generalizados Usando como Referência Dados do Sistema Nacional de Gestão Fundiária**  
Geometrical Correction of CBERS-4/PAN Images with Generalized Models Using as Reference National System of Land Management Data

Thales Shoiti Akiyama<sup>1</sup>; José Marcato Junior<sup>2</sup> & Antonio Maria Garcia Tommaselli<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Cidade Universitária – Universitário, 79070-900 Campo Grande, MS, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Faculdade de Ciências e Tecnologias, Rua Roberto Simonsen, 305, Bairro Centro Educacional, 19060-1900 Presidente Prudente, SP, Brasil  
E-mails: akiyama.thales@gmail.com; jose.marcato@ufms.br; a.tommaselli@unesp.br

Recebido em: 14/05/2018 Aprovado em: 12/07/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_2\\_358\\_368](http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_358_368)

### Resumo

As imagens orbitais vêm sendo amplamente empregadas em diversas aplicações no contexto de observação da Terra, as quais exigem diferentes níveis de detalhamento e de acurácia posicional. O Programa CBERS (China–Brazil Earth Resources Satellite Program) originou-se de uma parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial. O satélite CBERS-4 é o quinto satélite do Programa CBERS e contém o sensor PAN, que coleta imagens pancromáticas com elemento de resolução espacial (GSD – Ground Sample Distance) de 5 m. Os estudos relacionados à análise da confiabilidade posicional e correção geométrica de imagens CBERS-4 ainda são limitados. Estudos prévios com imagens CBERS-4 PAN com diferentes níveis de processamento indicam deslocamentos posicionais significativos das imagens georreferenciadas, disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), incompatíveis com o seu GSD. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho consistiu em investigar a aplicação de modelos matemáticos generalizados na correção geométrica de imagens CBERS-4 PAN usando limites das propriedades rurais do INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) como pontos de controle. Destaca-se que esses limites estão disponíveis para propriedades de todo o Brasil, o que possibilita a replicação do trabalho em nível nacional. Foram consideradas imagens com diferentes níveis de correção prévia (níveis 1 e 2). As imagens de nível 1 são resultantes apenas da aplicação de procedimentos de calibração radiométrica, enquanto as de nível 2 são imagens de nível 1 corrigidas geometricamente a partir de informações de dados orbitais do satélite. Nos experimentos, considerou-se 3 (três) imagens no nível 1 e 1 (uma) imagem no nível 2. Adotaram-se os seguintes modelos generalizados: Polinomiais de ordem 1, 2 e 3; Projetiva e; Thin Plate Spline (TPS). Os modelos generalizados têm por vantagem não exigir o conhecimento dos parâmetros de aquisição do sistema, como a distância focal, o tamanho do sensor, dentre outras. Entretanto, exigem quantidade significativa de pontos de controle com distribuição uniforme ao longo da imagem. Para o processo de correção geométrica utilizou-se diferentes configurações de pontos de controle (30, 25, 20, 15 e 10) coincidentes com os limites das propriedades rurais georreferenciadas no Estado de Mato Grosso do Sul, que apresentam acurácia superior a 50 cm. A validação da correção geométrica foi realizada a partir do REQM (Raiz quadrado do Erro Quadrático Médio) nos pontos de verificação. A transformação Polinomial de ordem 1 apresentou valores elevados (maior que 10 GSD – 50 metros) quando comparado aos demais modelos matemáticos, mesmo considerando 30 pontos de controle. O modelo Polinomial de ordem 2 apresentou comportamento mais consistente se comparado aos demais modelos. Mesmo ao considerar apenas 10 GCP apresentou REQM entre 1 e 2 GSD. Nesse modelo não há melhora significativa nos resultados mesmo aumentando a quantidade de pontos de controle. Nos demais modelos (TPS, Projetiva e Polinomial de ordem 3), verificou-se um aumento significativo no REQM ao se reduzir a quantidade de pontos. As imagens utilizadas nesse trabalho recobrem parte do Estado de Mato Grosso do Sul, o qual engloba a maior parte do Pantanal, considerado patrimônio natural da humanidade. Essas imagens orbitais, portanto, podem contribuir para o mapeamento e monitoramento de seus recursos naturais e, consequentemente, na proteção desse patrimônio.

**Palavras-chave:** Sensoriamento Remoto; Cartografia; Preservação Ambiental

### Abstract

The orbital images have been widely used in several applications in the Earth observation context, which require different levels of detail and positional accuracy. The China-Brazil Earth Resources Satellite Program (CBERS) program was originated from a partnership between Brazil and China in the technical-scientific spatial sector. The CBERS-4 satellite is the fifth satellite of the CBERS Program and contains the PAN sensor, which collects panchromatic images with spatial resolution element (GSD - Ground Sample Distance) of 5 m. The researches related to the analysis of positional reliability and geometric correction of CBERS-4 images are still limited. Previous studies with CBERS-4 PAN images with different levels of processing indicate significant positional displacements of the georeferenced images, which are available by INPE (National Institute of Space Research). The positional displacements are incompatible with its GSD. The objective of this work was to investigate the application of generalized mathematical models in the geometric correction of CBERS-4 PAN images using rural properties limits of INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) as control points. These limits are available for properties all over Brazil, which makes it possible to replicate the work at the national level. Images with different levels of previous correction (levels 1 and 2) were considered. Level 1 images are derived only from the application of radiometric calibration procedures, while level 2 images are level 1 images geometrically corrected from satellite orbital data information. In the experiments were considered 3 (three) images at level 1 and 1 (one) image at level 2. The following generalized models were adopted: Polynomials of order 1, 2 and 3; Projective and; Thin-plate spline (TPS). Generalized models have the advantage of not requiring knowledge of the system acquisition parameters, such as focal length, sensor size, among others. However, the generalized models require a significant amount of control points with uniform distribution throughout the image. For the geometric correction process were used different configurations of control points (30, 25, 20, 15 and 10) coinciding with the georeferenced rural properties in the Mato Grosso do Sul state, which presents accuracy higher than 50 cm. The geometric correction validation was performed from the RMSE (Root Mean Square Error) at checkpoints. The polynomial transformation of order 1 presented high values (higher than 10 GSD - 50 meters) of RSME when compared to the other mathematical models, even considering 30 control points. The polynomial model of order 2 presented consistent behavior higher than the other models. Even when considering only 10 GCP presented RMSE between 1 and 2 GSD. In this model there is no significant improvement in the results, even increasing the number of control points. In the other models (TPS, Projection and Polynomial of order 3), there was a significant increase in RMSE when the number of points was reduced. The images used in this work cover part of the Mato Grosso do Sul state, which encompasses the most part of the Pantanal, considered a natural patrimony of humanity. Therefore, these orbital images contribute to the mapping and monitoring of their natural resources and, consequently, the protection of this patrimony.

**Keywords:** Remote Sensing; Cartography; Environmental Preservation



## 1 Introdução

As imagens orbitais vêm sendo amplamente empregadas em diversas aplicações, as quais exigem diferentes níveis de detalhamento e de acurácia posicional. O Programa CBERS (China–Brazil Earth Resources Satellite program) foi parte de uma parceria entre Brasil e China no setor técnico-científico espacial. Essa cooperação entre os dois países fez com que fosse possível obter uma poderosa ferramenta para monitorar seu imenso território com satélites próprios de sensoriamento remoto. Suas imagens são usadas em diversas aplicações no contexto de observações da Terra (Fonseca et al., 2014). Dentre essas aplicações, pode-se destacar: geração de mosaicos detalhados; atualização de cartas temáticas; controle do desmatamento e queimadas; monitoramento de recursos hídricos; imageamento de áreas de desastres; expansão agrícola; e em aplicações urbanas, como o desenvolvimento das cidades (INPE, 2017).

Inicialmente, o programa CBERS visava a elaboração de dois satélites (CBERS-1 e 2) de sensoriamento remoto que levassem a bordo câmaras imageadoras e um repetidor para o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais. Ambos os satélites são idênticos em sua constituição técnica, missão no espaço e em seus equipamentos que vão a bordo (câmaras, sensores, computadores e outros equipamentos para estudos científicos). Tais equipamentos tinham como objetivo atender as necessidades dos dois países, assim como a ingressão no mercado de satélites.

Os efeitos foram imediatos, assim ambos os governos decidiram expandir o acordo entre eles e incluir outros três satélites, os satélites CBERS-2B, CBERS-3 e CBERS-4. O que difere o satélite CBERS-2B em relação ao CBERS-1 e 2 é a câmara imageadora, que passou de um imageador infravermelho por varredura mecânica – IRMSS (Infrared Multispectral Scanner) para uma câmara imageadora de alta resolução pancromática – HRC (High Resolution Camera). Em 2002 foi assinado pelo Programa CBERS a construção dos satélites (CBERS-3 e 4), onde representaram uma evolução em relação aos satélites CBERS-1, 2 e

2B. O lançamento do satélite CBERS-3 ocorreu em dezembro de 2013, porém, devido a uma falha, o CBERS-3 não foi posicionado na órbita prevista resultando em sua reentrada na atmosfera da Terra.

O satélite CBERS-4, em operação, foi lançado em dezembro de 2014, porém as primeiras imagens começaram a ser disponibilizadas no final de 2015. Esse sistema é o quinto satélite do Programa CBERS e, assim como o CBERS-3, conta com quatro câmaras, duas brasileiras (Câmera Multiespectral Regular – MUX (*Multispectral Camera*) e Câmera de Campo Largo – WFI (*Wide-Field Imaging Camera*) e duas chinesas (Câmera Pancromática e Multiespectral – PAN (*Panchromatic and Multispectral Camera*) e Imageador Multiespectral e Termal – IRS (*Infrared Medium Resolution Scanner*) com desempenhos geométricos e radiométricos melhorados, comparados com os dos CBERS-1, 2 e 2B. Desta forma, o CBERS-4 contém sensores embarcados com diferentes resoluções espaciais: o sensor PAN possui uma faixa de imageamento de 60 km e essa câmara é a de melhor resolução espacial a bordo do CBERS-4, coletando imagens pancromáticas com elemento de resolução espacial (GSD – *Ground Sample Distance*) igual a 5 m e imagens multiespectrais com GSD de 10 m (INPE, 2017).

Segundo Thome *et al.* (1997), o sucesso de qualquer programa de sensoriamento remoto depende do conhecimento das propriedades radiométricas do sensor a partir do qual os dados estarão disponíveis. A calibração radiométrica possui como objetivo estabelecer uma relação entre os Números Digitais (ND) presentes nas imagens com os valores de radiância ou reflectância espectral efetivamente medido pelo sensor. No contexto de imagens CBERS-4, Pinto *et al.* (2016) estimaram os coeficientes de calibração radiométrica dos sensores WFI e MUX, aplicando-se duas técnicas para tal calibração: abordagem baseada em reflectância e método de calibração cruzada. O primeiro método utilizou medições de reflectância (proporção da quantidade total de radiação eletromagnética refletida por uma amostra da superfície) durante a passagem do sensor, enquanto o segundo consistiu em comparar a resposta entre sensores quando estão

expostos a um mesmo nível de radiação. Neste caso um dos sensores é adotado como referência. Os valores de GSD para os sensores WFI e MUX são de 64 m e 20 m, respectivamente.

Boggione (2014) conduziram uma análise espectral de imagens simuladas MUX, comparando os valores do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), estimados a partir das imagens simuladas, com os valores de NDVI de imagens TM do satélite Landsat 5. Contudo, os estudos referentes à análise da confiabilidade posicional de imagens CBERS-4 ainda são limitados. Statella (2016) analisou a acurácia posicional de imagens CBERS-4, sensor MUX (nível 2), verificando que tais imagens apresentam deslocamento posicional de aproximadamente 404 m.

Marcato Junior *et al.* (2017) realizaram um trabalho semelhante ao de Statella (2016), porém avaliando a acurácia posicional de 4 (quatro) imagens CBERS-4 do sensor PAN (nível 2). Com os resultados obtidos, verificou-se que a acurácia posicional dessas imagens é incompatível com o elemento de resolução espacial (5 metros). A REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio) da resultante planimétrica nos pontos de verificação foi em torno de 614 m, aproximadamente 123 (cento e vinte e três) vezes o valor do elemento de resolução espacial.

O INPE, além de imagens no nível 2, disponibiliza imagens de nível 4 (ortorretificadas com pontos de controle) de processamento e ao analisar os resultados (disponibilizados em arquivo XML (*Extensible Markup Language*) com o modelo matemático aplicado (transformação afim) notam-se altos resíduos, com valores máximos superiores a 11 GSD (55 m).

Diante da importância das imagens CBERS-4 para o Brasil, e ao verificar a escassez de estudos nessa temática, e também por verificar a baixa confiabilidade posicional das imagens CBERS-4 (nível 4), objetiva-se nesse trabalho investigar o processo de correção geométrica das imagens CBERS-4/PAN. As imagens utilizadas nesse trabalho recobrem parte do Estado de Mato Grosso do Sul, o qual engloba a maior parte do Pantanal, considerado patrimônio natural da humanidade.

Essas imagens orbitais, portanto, podem contribuir para o mapeamento e monitoramento de seus recursos naturais e, conseqüentemente, na proteção desse patrimônio.

## 2 Materiais e Métodos

Os satélites de observação da Terra geralmente são equipados com Sistemas de Controle de Órbita e Atitude (SCOA) compostos por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e outros equipamentos (Marcato Junior *et al.*, 2011; Marcato Junior & Tommaselli, 2013). Entretanto, como os SCOA são afetados por vários erros, nem sempre as imagens corrigidas a partir de efemérides e atitude do satélite são adequadas para aplicações de alta acurácia métrica.

Como alternativa, podem ser utilizados pontos de controle para efetivar a orientação indireta dessas imagens, e assim, posteriormente, realizar o processo de correção geométrica. Para tal processo, é necessária a definição de modelos matemáticos relacionando o espaço objeto (sistema de referência terrestre) com o espaço imagem.

Os modelos rigorosos visam descrever fisicamente a geometria de aquisição da cena, levando em consideração tanto informações referentes ao modelo do sensor quanto o modelo da plataforma que descreve a trajetória e a orientação do sensor no intervalo de coleta. Em contrapartida, os modelos generalizados relacionam ambos os espaços através de parâmetros sem significado físico direto, ou seja, apresentam-se como alternativa quando não se conhecem informações referentes aos parâmetros de aquisição do sistema (Toutin, 2004). Neste contexto, empregaram-se os modelos generalizados nesse trabalho, que têm por vantagem não exigir o conhecimento dos parâmetros de aquisição do sistema, como a distância focal, o tamanho do sensor, dentre outros. Os modelos generalizados exigem quantidade significativa de pontos de controle com distribuição uniforme ao longo da imagem (Jacobsen *et al.*, 2005; Jacobsen, 2007). A proposta deste trabalho foi usar como referência os limites de propriedades rurais disponibilizados ao longo de todo o Brasil pelo INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária).

Foram utilizadas imagens do satélite CBERS-4/PAN que apresentam níveis 1 e 2 de processamento.

As imagens de nível 1 são resultantes apenas da aplicação de procedimentos de calibração radiométrica, enquanto as de nível 2 tratam-se das imagens de nível 1 corrigidas geometricamente a partir de informações de dados orbitais do SCOA do satélite. As imagens do nível 2 podem ser obtidas no catálogo CBERS-4 de imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), enquanto a de nível 1 foi solicitada junto ao INPE. A tabela 1 apresenta os níveis de processamento das imagens CBERS. As informações referentes às imagens utilizadas nesse trabalho são apresentadas na Tabela 2. A Figura 1 mostra a posição da imagem CBERS-4 no contexto de Mato Grosso do Sul. Três imagens englobam parte do Pantanal e uma imagem refere-se a área de Cerrado, que fica no entorno do Pantanal.

Para atingir o propósito deste trabalho, foi utilizado o *software* livre QGIS versão 2.18.10 (*QGIS Development Team, 2017*). As etapas consistiram em medir pontos de verificação e controle nas imagens CBERS-4 correspondentes aos limites das propriedades rurais georreferenciadas no estado do Mato Grosso do Sul, associadas às imagens do satélite RapidEye. As imagens deste satélite são

Níveis de Processamento	Descrição
Nível 0	Imagem recebida diretamente pela estação de recepção do INPE (Imagem em estado bruto).
Nível 1	Imagem do nível 0 com correção radiométrica (calibração e restauração do sinal transmitido).
Nível 2	Imagem do nível 1 com correção geométrica, aplicada com o uso de dados orbitais, de informações sobre a montagem do instrumento no satélite, da geometria de visada do instrumento e de um modelo representativo da superfície terrestre.
Nível 3	Imagem do nível 2 aplicados procedimentos adicionais de correção geométrica com o uso de pontos de controle.
Nível 4	Imagem do nível 2 ortoretilhada com o uso de um MDT (Modelo Digital de Terreno) ou um MNET (Modelo Numérico de Elevação do Terreno)

Tabela 1 Níveis de processamento das imagens CBERS.

Sensor	Órbita/Ponto	Resolução Espacial	Data da Coleta	Dimensão no Terreno
PAN/ Nível 1	163/122	5 m	24/04/2015	60 km x120 km
PAN/ Nível 2	163/122	5 m	24/04/2015	60 km x120 km
PAN/Nível 1	165/122	5 m	02/07/2017	60 km x120 km
PAN/ Nível 1	165/123	5 m	02/07/2017	60 km x120 km

Tabela 2 Informações das imagens CBERS-4/PAN.

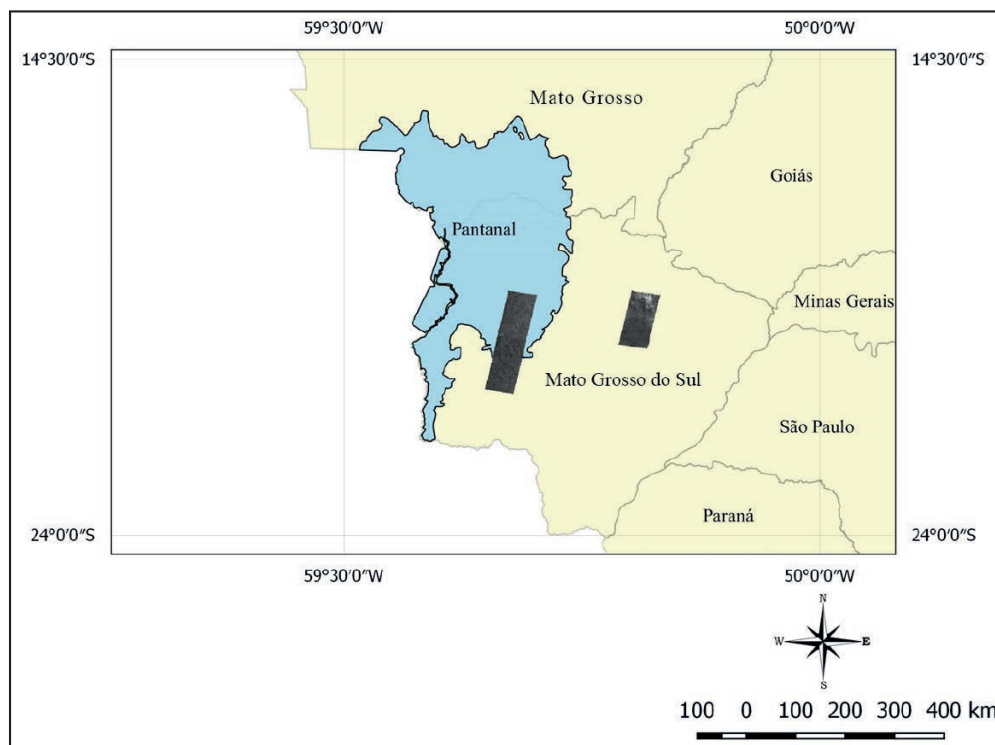


Figura 1 Imagens CBERS-4 no contexto de Mato Grosso do Sul e Pantanal.



distribuídas no GeoCatálogo do MMA (Ministério do Meio Ambiente), enquanto os arquivos dos limites das propriedades rurais são encontrados no Acervo Fundiário do INCRA. A Figura 2 representa a medição dos pontos equivalentes aos limites das propriedades rurais georreferenciadas.

Marcató Junior *et al.* (2015) analisaram a qualidade geométrica das imagens ortoretificadas RapidEye e verificaram que o REQM da resultante planimétrica nos pontos de verificação foi em torno de 1 GSD (6,5 m) para todos os casos, concluindo que as imagens RapidEye avaliadas apresentam alta acurácia posicional. Portanto essas cenas associadas aos limites das propriedades rurais (acurácia

posicional superior a 50 centímetros) foram utilizadas como referência na correção geométrica.

A correção geométrica das imagens de nível 1 e 2 do sensor CBERS-4/PAN foi conduzida com diferentes quantidades de pontos de controle. Iniciou-se com 30 (trinta) pontos de controle e 11 (onze) pontos de verificação. Cabe lembrar que tais pontos foram bem distribuídos nas imagens e coincidiram com os limites das propriedades rurais georreferenciadas no Estado do Mato Grosso do Sul. Com o intuito de obter análises mais aprofundadas, foram examinadas diferentes situações, nas quais se variaram os números de pontos de apoio, além de que, para maior confiabilidade, terem sido calculados

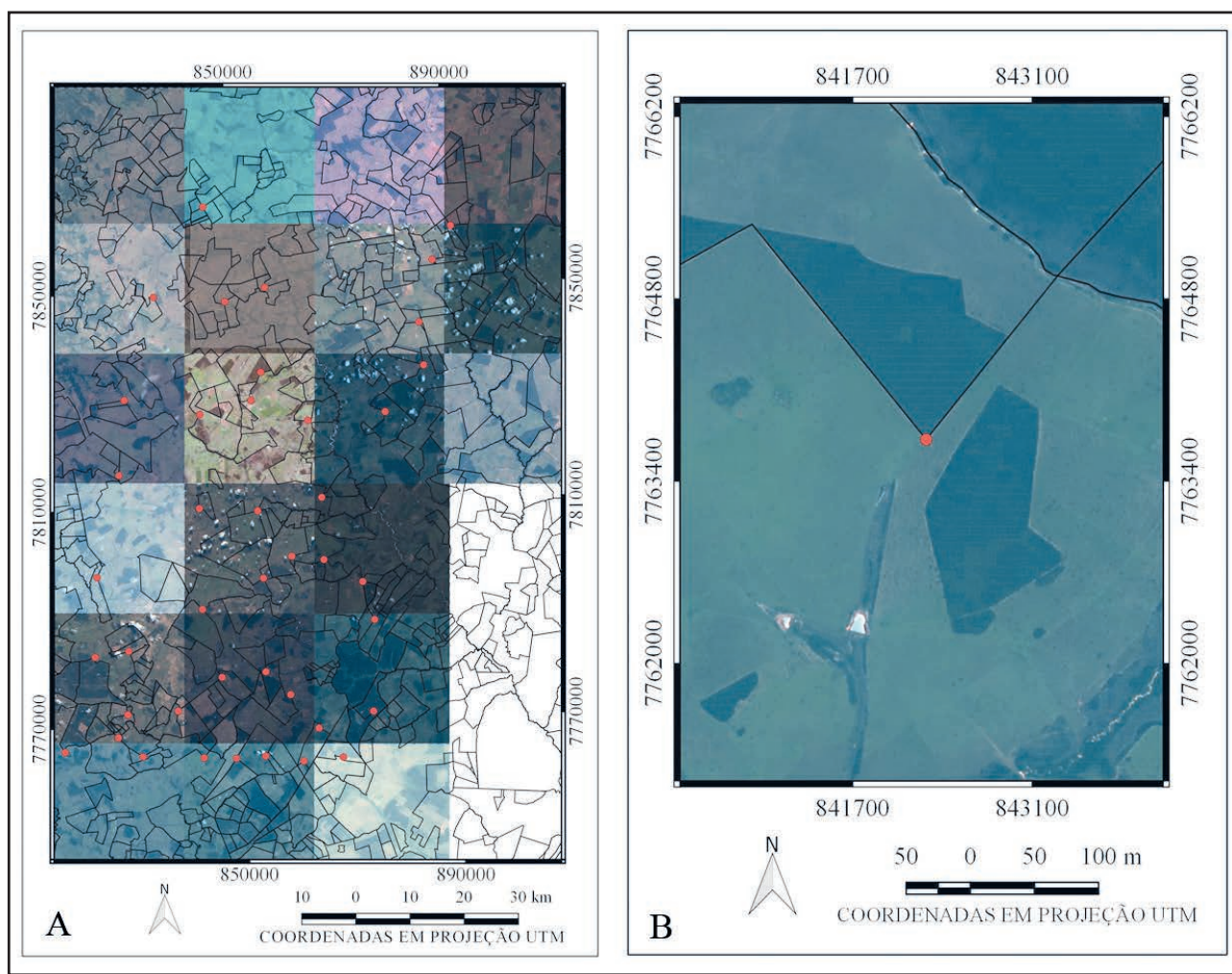


Figura 2 Medição dos pontos de controle correspondentes aos limites das propriedades rurais georreferenciadas associadas as imagens do satélite RapidEye. (A) Todas as imagens utilizadas; (B) Ampliação de uma parte para melhor visualização.

o REQM para os pontos de verificação em quatro imagens distintas.

A correção geométrica das imagens CBERS-4/PAN foi efetuada utilizando coordenadas planimétricas, em projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*) (E(East),N(North)) de um conjunto de pontos de controle e verificação. A

Figura 3 ilustra os pontos de controle, em vermelho, e verificação, em amarelo utilizados nas quatro imagens. Foram adotados pontos de modo a manter uma distribuição uniforme ao longo das imagens.

Após a etapa de medição dos pontos de controle e verificação, realizou-se a correção geométrica das imagens com os modelos matemáticos generalizados.

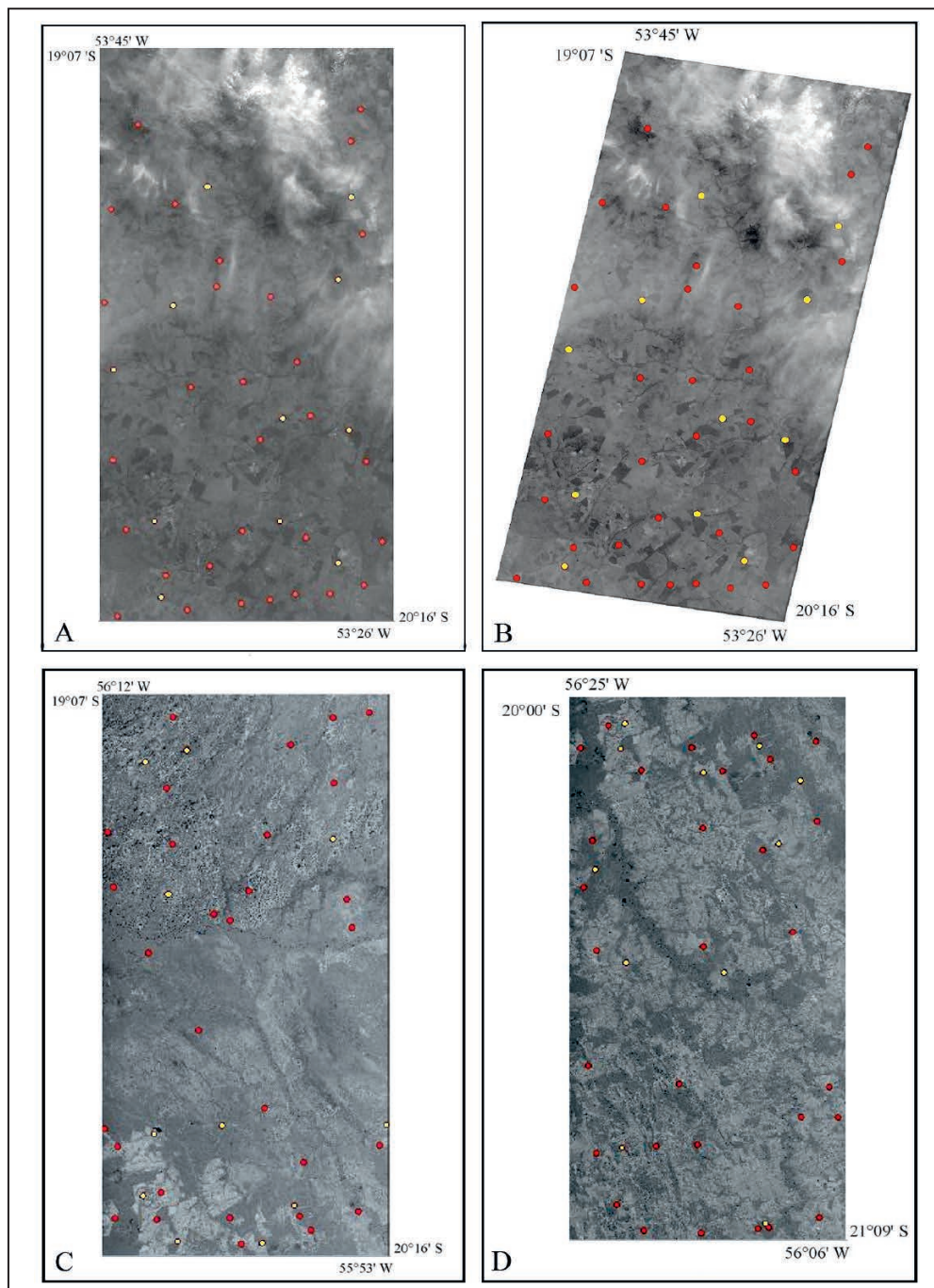


Figura 3 Distribuição dos pontos de apoio (vermelho) e verificação (amarelo) nas imagens CBERS-4/PAN. (A) PAN-163\_122/Nível 1; (B) PAN-163\_122/Nível 2; (C) PAN-165\_122/Nível 1; (D) PAN-165\_123/Nível 1.

Os tipos de transformação utilizados foram os modelos Polinomiais de ordens 1, 2 e 3, Projetiva e *Thin Plate Spline* (TPS), descritos a seguir. O método de reamostragem empregado foi o cúbico.

## 2.1 Modelos Matemáticos Generalizados

Os modelos generalizados são utilizados quando os parâmetros de aquisição do sistema não estão disponíveis. Estes modelos generalizados são baseados em diferentes funções matemáticas. Os modelos utilizados nesse trabalho estão descritos a seguir.

### 2.1.1 Polinomial

Uma transformação geométrica é usada para relacionar as coordenadas de imagem corrigidas pelo sistema com suas coordenadas georreferenciadas. A transformação geométrica geralmente é a Polinomial, e a escolha da ordem do polinômio depende dos tipos de distorções a serem corrigidas (quanto maior a ordem do polinômio, presumidamente, mais significativa é a distorção). De acordo com Toutin (2004), a Função Polinomial de primeira ordem é a afim, que preserva a colinearidade entre pontos e permite a correção em translação e escala em ambos os eixos, rotação e cisalhamento. A função Polinomial de segunda ordem permite a correção como a Polinomial de primeira ordem, acrescentada de torção e convexidade em ambos os eixos. A função Polinomial de terceira ordem corrige as mesmas distorções da função Polinomial de segunda ordem, não correspondendo necessariamente a qualquer realidade física do sistema de aquisição de imagem.

Os modelos Polinomiais 2D de acordo com Toutin (2004) são dados por:

$$E_n = \sum_{i=0}^{m1} \sum_{j=0}^{m2} a_j c_n^i l_n^j \quad (1)$$

$$N_n = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{n2} b_j c_n^i l_n^j \quad (2)$$

Em que:

$c_n, l_n$  - coordenadas coluna e linha normalizadas de um determinado ponto;

$E_n, N_n$  - coordenadas 2D normalizadas do mesmo ponto no espaço objeto;

$a_j$  e  $b_j$  - Parâmetros de transformação.

Para imagens do nível 2 (imagens de nível 1 aplicadas de procedimentos de correção geométrica a partir de informações de dados orbitais), ao invés das coordenadas  $c$  e  $l$ , adotaram-se as coordenadas  $E$  e  $N$  das imagens de nível 2. Isso foi adotado para todos os modelos.

### 2.1.2 Afim

Uma das transformações mais utilizadas para a correção geométrica dos dados de Sensoriamento Remoto é a função Polinomial de primeira ordem (ou transformação afim). A transformação afim 2D é derivada do modelo das funções Polinomiais, considerando apenas os elementos de 1ª ordem (Toutin, 2004). Esta transformação possui 6 (seis) parâmetros, portanto, requer pelo menos 3 pontos de controle.

$$E_n = a_1 + a_2 l_n + a_3 c_n \quad (3)$$

$$N_n = b_1 + b_2 l_n + b_3 c_n \quad (4)$$

Em que:

$a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$  e  $b_3$  são os parâmetros da transformação.

### 2.1.3 Suavizador Em Lâminas (*Thin Plate Spline*)

O algoritmo Suavizador em lâminas é um dos mais modernos métodos de georreferenciamento, que permite a introdução de deformações locais nos



dados. É uma técnica utilizada para a interpolação de superfícies sobre dados irregularmente espaçados, e sua formulação proporciona a utilização em diversas aplicações e independe de um arranjo regular dos dados. Um exemplo de aplicação TPS é a produção de mapas  $R^2$  para  $R^2$ , onde a partir de um conjunto de dois pontos homólogos geram-se funções de mapeamento que associam pontos de um conjunto para o outro.

A formulação matemática para determinar uma função de mapeamento que relacione dois conjuntos de pontos homólogos com coordenadas bidimensionais é mencionada por (Bookstein, 1989):

$$U(r) = r^2 \log r^2 \quad (5)$$

$$f(E, N) = a_1 + a_x c_n + a_y l_n + \sum_{i=1}^n w_i U(P_i - P) \quad (6)$$

Em que:

U - função de base radial;

r - distância euclidiana do ponto (c,l) ao i-ésimo ponto de controle;

$w_1, w_2, \dots, w_n, a_1, a_x, a_y$  - coeficientes calculados em função de pontos de controle homólogos;

n - número de pontos de controle;

$P_i$  - i-ésimo ponto de controle;

P - ponto em que se deseja calcular a f(E,N).

### 2.1.4 Projetiva

Queiroz (2003) menciona que a escolha das equações projetivas tem implicações fundamentais em aspecto de precisão, em problemas de mal condicionamento de sistemas, na eficiência numérica e na exatidão dos resultados obtidos. Segundo Xavier *et al.* (2007), as equações de transformação projetiva plana permitem que se calculem analiticamente as coordenadas E e N depois que elas são projetadas em um plano oriundas de outro plano não-paralelo, e as equações dessa transformação são comumente utilizadas em retificação analítica de imagens e são representadas matematicamente por:

$$E_n = \frac{b_1 \cdot c_n + b_2 \cdot l_n + b_3}{b_3 \cdot c_n + b_2 \cdot l_n + 1} \quad (7)$$

$$N_n = \frac{b_1 \cdot c_n + b_2 \cdot l_n + b_3}{b_3 \cdot c_n + b_2 \cdot l_n + 1} \quad (8)$$

Em que  $b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}$  são os parâmetros de transformação a serem determinados;  $c, l$  são os valores medidos no sistema de referência da imagem e E, N são os valores calculados para o sistema de ajuste. As equações (7) e (8) podem ser deduzidas diretamente das equações de colinearidade, relação fundamental na fotogrametria analítica. A seguir, apresenta-se o procedimento para realizar a avaliação da correção geométrica aplicada com os diferentes modelos matemáticos usados.

### 2.2 Avaliação da Correção Geométrica

Para a avaliação da correção geométrica, comparou-se as coordenadas corrigidas usando os modelos matemáticos com as coordenadas dos pontos de verificação, que no caso foram os pontos medidos nos limites das propriedades rurais. Para cada ponto, os deslocamentos E e N podem ser calculados por:

$$\Delta E = E_{ajustado} - E_{referência} \quad (9)$$

$$\Delta N = N_{ajustado} - N_{referência} \quad (10)$$

Em que ( $E_{ajustado}, N_{ajustado}$ ) são as coordenadas de imagem corrigidas com os modelos matemáticos e ( $E_{referência}, N_{referência}$ ) são as coordenadas dos pontos de verificação. Os deslocamentos resultantes nas coordenadas E e N para um conjunto de n pontos são dados por:

$$\Delta \bar{E} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i^2} \quad (11)$$

$$\Delta \bar{N} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i^2} \quad (12)$$



Assim, o REMQ planimétrico, que está relacionado com a acurácia de posicionamento, é calculado por:

$$REMQ = (\overline{\Delta E^2} + \overline{\Delta N^2})^{1/2} \quad (13)$$

### 3 Resultados e Discussão

Para a análise da acurácia posicional das imagens corrigidas usando os diferentes modelos generalizados, estimou-se o REMQ nos pontos de verificação. A Figura 4 apresenta os resultados com o modelo Polinomial de ordem 1, que apresentou valores maiores de REMQ. As Figuras 5, 6 e 7 ilustram os resultados obtidos, considerando diferentes números e distribuição de pontos de controle e verificação para as imagens no nível 1. E a Figura 8 apresenta os resultados para a imagem referente ao nível 2 de processamento.

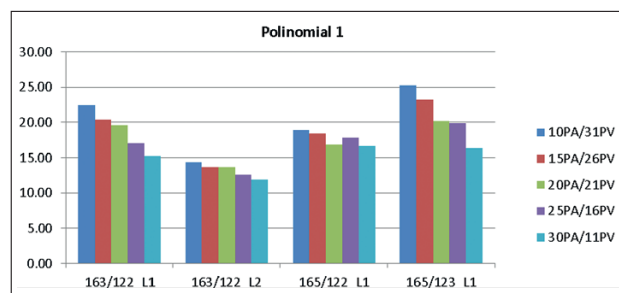


Figura 4 Valores de REMQ para a transformação Polinomial 1.

Ao analisar a Figura 4, nota-se valores de REMQ elevados (maiores que 10 GSD) ao considerar o modelo Polinomial 1. Destaca-se que esse é o modelo adotado pelo INPE na geração de imagens com nível 4 de processamento, as quais são disponibilizadas para os usuários.

Ao analisar as Figuras 5, 6 e 7, em que se consideram imagens de nível 1, verifica-se que a transformação projetiva apresentou, em geral, REMQ maiores que 3 GSD (15 metros). O RMSE para esse modelo foi menor que 3 GSD apenas ao utilizar 30 pontos de controle nas imagens 165/122 e 163/122. Os modelos Polinomiais de ordem 2 e 3 e o TPS apresentaram resultados mais acurados, principalmente na imagem 163/122, onde os valores

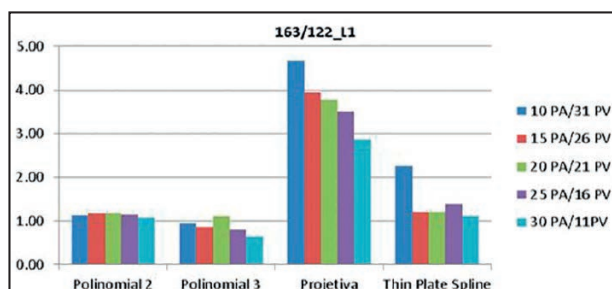


Figura 5 Valores de REMQ para a Imagem 163/122 de Nível 1.

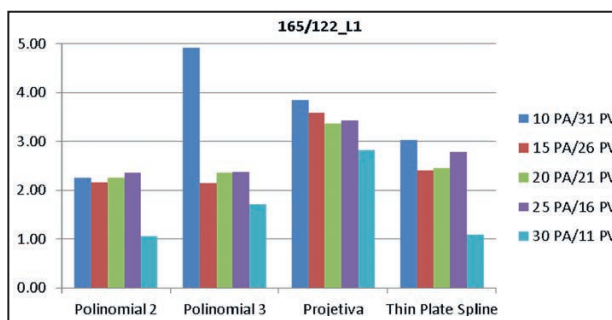


Figura 6 Valores de REMQ para a Imagem 165/122 de Nível 1.

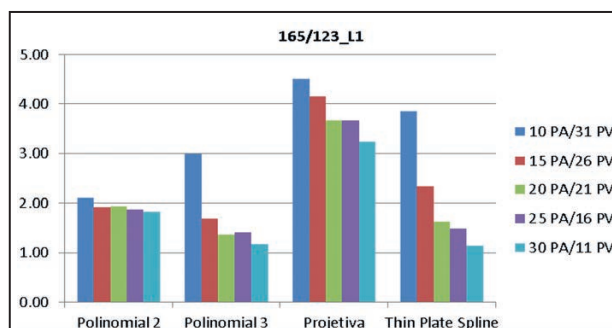


Figura 7 Valores de REMQ para a Imagem 165/123 de Nível 1.

do REMQ variaram em torno de 1 GSD (5 metros), resultado considerado de alta acurácia posicional.

Observa-se, por meio dos experimentos, a importância da análise da acurácia em mais de uma imagem, pois todas elas, mesmo apresentando números iguais de pontos de controle, apresentaram diferentes valores de REMQ. Além disso, percebe-se que os resultados mudam quando altera-se a quantidade de pontos apoio utilizados, podendo-se notar, em geral, melhores resultados com maior quantidade de pontos de controle (30), e, à medida que diminui-se a quantidade de pontos, os valores de REMQ aumentam, piorando os resultados. O modelo Polinomial de ordem 2 apresentou comportamento mais consistente se comparado aos demais modelos,

não apresentando melhora significativa ao ampliar a quantidade de pontos de controle. O modelo *TPS* apresentou resultados mais acurados apenas com uma maior quantidade de pontos. O modelo Polinomial 3 apresentou os resultados mais acurados para a imagem 163/122. No entanto, isso não foi observado nas demais imagens.

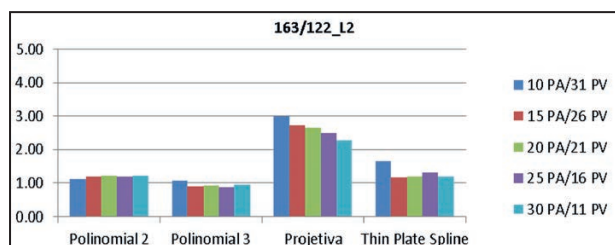


Figura 8 Valores de REMQ para a Imagem 163/122 de Nível 2.

Observando o gráfico dos valores de REMQ para a imagem de nível 2 na Figura 8, percebe-se uma alta acurácia posicional da imagem georreferenciada, pois os REQM das transformações Polinomial 2, Polinomial 3 e *TPS* estão em torno de 1 pixel (5 m), mesmo variando-se a quantidade de pontos de apoio e verificação. Os resultados apresentados para a imagem de nível 2 são similares aos da imagem de nível 1 (Figura 5).

#### 4 Conclusões

A utilização de imagens orbitais vem sendo muito importante em diversos contextos e aplicações, e por este motivo este trabalho investigou a correção geométrica de imagens CBERS-4 do sensor PAN com modelos generalizados e pontos de controle oriundos do Sistema de Gestão Fundiária do INCRA, em áreas do Mato Grosso do Sul e Pantanal.

Os resultados apresentados mostraram que, dependendo do tipo de transformação utilizada, a acurácia posicional encontrada é considerada alta, sendo, assim, compatível com o GSD, que é de 5 m. O modelo Polinomial de ordem 2 apresentou resultados mais consistentes quando comparado aos demais modelos, mesmo considerando uma quantidade menor de pontos de controle.

Uma contribuição original que esse trabalho apresenta está no uso dos limites das propriedades

rurais do INCRA no georreferenciamento de imagens orbitais CBERS-4/PAN. Esses limites estão disponíveis para propriedades de todo o Brasil, e com o seu uso é possível desenvolver métodos para a automação do processo de correção geométrica para imagens orbitais usando modelos matemáticos baseados em pontos ou retas de apoio.

Nota-se a importância de estudos mais aprofundados nessa temática, sendo importante a investigação em mais imagens para a realização de mais trabalhos, e assim posteriormente, melhores avaliações em tal cenário. Além disso, em trabalhos futuros, destaca-se a relevância em realizar a comparação de modelos rigorosos e generalizados na correção geométrica de imagens orbitais.

Com o desenvolvimento do presente trabalho, serão geradas imagens CBERS-4 com alta acurácia posicional, as quais podem ser utilizadas em diversas aplicações que exigem alto grau de confiabilidade, sem necessidade de levantamentos de campo. No cenário de Mato Grosso do Sul, essas imagens podem ser utilizadas para um aprofundamento em estudos visando o mapeamento e monitoramento dos seus recursos naturais do Pantanal.

#### 5 Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNDECT (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento dos projetos (p. 456149/2014-7; p. 59/300.066/2015); e ao CNPq pela bolsa ao autor Thales Shoiti Akiyama.

#### 6 Referências

- Bookstein, L.F. 1989. Principal Warps: Thin-Plate Spline and the Decomposition of Deformations. *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(6): 567-585.
- Boggione, G.A. 2014. *Avaliação da Resolução Espacial de Sensores Ópticos Orbitais*. São José dos Campos, SP. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Tese de doutorado em sensoriamento remoto, São José dos Campos, 131p.
- Fonseca, L.M.G.; Epiphanyo, J.C.N.; Valeriano, D.M.; Soares,

- J.V.; D'alge, J.C.L. & Santos, M.A. 2014. Earth Observation Applications in Brazil with Focus on the CBERS Program. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 2(2): 53-55.
- INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. 2017. *Acervo Fundiário*. Disponível em: <<http://acervofundiario.incra.gov.br/i3geo/interface/incra.htm>>. Acesso em 30 Out. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. *Sobre o CBERS*. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/index.php>>. Acesso em 17 Out. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. *História*. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/historia.php>>. Acesso em 17 Out. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. *CBERS-1,2 e 2B*. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cbbers1-2-2b.php>>. Acesso em 17 Out. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. *CBERS-3 e 4*. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cbbers3-4.php>>. Acesso em 17 Out. 2017.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2017. *Catálogo de imagens*. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>>. Acesso em 17 Out. 2017.
- Jacobsen, K.; Buyuksalih, G. & Topan, H. 2005. Geometric models for the orientation of high resolution optical satellite sensors. *ISPRS Hannover: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, p.1-6
- Jacobsen, K. 2007. Orientation of high resolution optical space images. *ASPRS 2007 Annual Conference*, p.1-9.
- Marcato Junior, J.; Tommaselli, A.M.G. & Hasegawa, J.K. 2011. Análise comparativa entre modelos rigorosos e empíricos na orientação de imagens orbitais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15 - *SBSR, Anais*, p.2360-2367.
- Marcato Junior, J. & Tommaselli, A.M.G. 2013. Exterior orientation of CBERS-2B imagery using multi-feature control and orbital data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 79(2013): 219-225.
- Marcato Junior, J.; Martins, E.F.O.; Marcato, D.; Marini, L.B. & Paranhos Filho, A.C. 2015. Avaliação da qualidade geométrica de ortoimagens RapidEye disponibilizadas pelo GeoCatálogo do MMA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17 - *SBSR, Anais*, p.5321-5325.
- Marcato Junior, J.; Coenio, D.F.; Godoi, D.F.; Tommaselli, A.M.G. & Ramos, A.P.M. 2017. Avaliação da acurácia posicional de imagens CBERS-4/PAN. *Anais XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, p.5356-5361.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2017. *GeoCatálogo de Imagens*. Disponível em: <<http://geocatalogo.mma.gov.br/>>. Acesso em 20 Out. 2017.
- Pinto, C.; Ponzoni, F.; Castro, R.; Leigh, L.; Mishra, N.; Aaron, D. & Helder, D. 2016. First in-Flight Radiometric Calibration of MUX and WFI on-Board CBERS-4. *Remote Sensing*, 8(5): 405.
- QGIS Development Team. 2017. *QGIS Documentation*. Disponível em: <<https://www.qgis.org/en/docs/index.html>>. Acesso em 15 Nov. 2017.
- Queiroz, J.Q. 2013. *Análise de transformações geométricas para o georreferenciamento de imagens do satélite CBERS-1*. Porto Alegre, RS. Centro de Pesquisa em Sensoriamento Remoto - Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, 79p.
- Statella, T. 2016. Geometric Quality Assessment of CBERS-4 MUXCAM Image. *Revista Brasileira de Geomática*, 4(2): 116-121.
- Thome, K.; Markham, B.; Barker, J.; P. Slater. & Biggar, S. 1997. Radiometric Calibration of Landsat. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(7): 853-858.
- Toutin, T. 2004. Review Article: Geometric Processing Of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924.
- Xavier, E.M.A.; Fonseca, L.M.G.; D'alge, J.C.L. & Castejon, E. 2007. Implementação da transformação projetiva na TerraLib: uma análise comparativa com a transformação afim. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, p.6283-6290.