

ESTUDO DA QUALIDADE GEOMÉTRICA DAS IMAGENS MSS-LANDSAT

Antonio José F. Machado e Silva
Instituto de Pesquisas Espaciais
CNPq

Caixa Postal 01, 12630 - Cachoeira Paulista, SP, Brasil

RESUMO

O objetivo do trabalho é apresentar, aos usuários em geral, o atual estágio das imagens MSS-LANDSAT. O trabalho é resultado de estudos realizados sobre diversas imagens dos satélites da série LANDSAT. Foram avaliadas tanto imagens "bulk" quanto as imagens "precision" e os erros médio-quadráticos obtidos foram de 120 ± 20 metros e 60 ± 15 metros respectivamente. Inicialmente são apresentadas as principais fontes de distorção geométrica, internas e externas, e um modelo simplificado para eliminá-las. Em seguida são apresentados os resultados obtidos das avaliações geométricas das imagens "bulk" e "precision". Na avaliação foram testados polinômios do primeiro ao quinto grau para definição de um polinômio ótimo para geração da imagem "precision".

ABSTRACT

The objective of the work is to discuss the present situation of LANDSAT MSS imagery. Evaluation was done on images from all satellites of the LANDSAT series, both bulk and precision images. Root-mean square errors obtained were 120 ± 20 meters for bulk images and 60 ± 15 meters for precision images. In the work, it is presented initially the cause of geometric distortions - both internal and external - and a simplified correction model. After that, the results of geometric evaluation for LANDSAT imagery are presented. In the evaluation, polynomial - from first to fifth degree - were tested in order to define the best one for precision image generation.

1. INTRODUÇÃO

Devido às particularidades do imageamento, as imagens MSS-LANDSAT não podem ter o mesmo tratamento matemático que as fotografias aéreas.

Durante a gravação de uma cena o satélite sofre alterações dinâmicas de atitude (roll, pitch e yaw), altitude e velocidade, com a consequente variação de posição. Estas variações dinâmicas, juntamente com a rotação e esfericidade da Terra, são responsáveis pelas distorções externas ao sistema de imageamento. Das distorções internas, as principais são:

- arrastamento da imagem durante uma varredura;
- não linearidade do movimento do espelho;
- variação do tempo útil de varredura, com a consequente variação no comprimento, em pixels, da varredura.

Estas são as principais fontes de distorções geométricas da imagem MSS-LANDSAT. Para eliminar os efeitos provocados por tais distorções, o Instituto de Pesquisas Espaciais adotou um modelo que analisa cada fonte de distorção separadamente, determinando a correção a ser aplicada a cada ponto da imagem. Este modelo não necessita de pontos de controle, e é baseado nos dados de efemérides e atitude do satélite, e no equacionamento geométrico do sistema de imageamento (principalmente a equação do perfil do espelho).

Na realidade as correções são determinadas para uma grade regular 9 x 9 de break points (Figura 1). As correções a serem aplicadas a um ponto, fora da grade são obtidas por interpolação bi-linear a partir dos dados da grade.

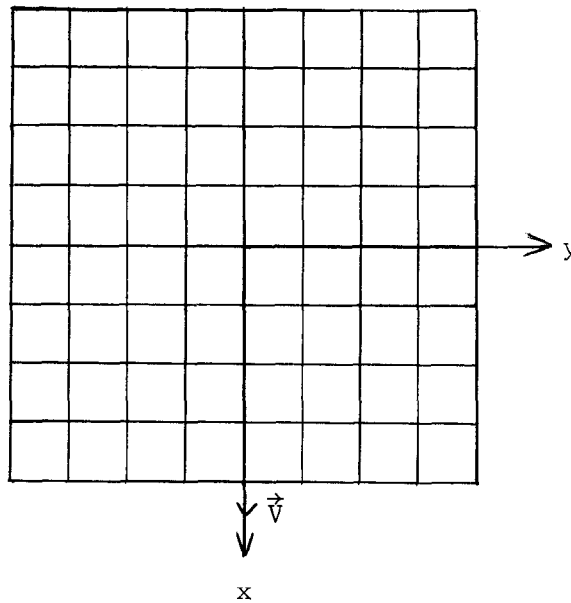


Fig. 1 - Grade regular 9 x 9 de break points

A imagem obtida após eliminadas tais distorções sistemáticas é usualmente denominada "Imagem Bulk".

2. DESCRIÇÃO DOS EFEITOS PROVOCADOS PELAS DISTORÇÕES SISTEMÁTICAS

Cada distorção será agora apresentada separadamente, com a respectiva análise dos seus efeitos e com a apresentação de um breve equacionamento geométrico para eliminar a distorção. O sistema de coordenadas aqui apresentado tem o eixo Y acompanhando a direção da varredura e o eixo X perpendicular a este e com o mesmo sentido que a velocidade do satélite (vide Figura 1).

2.1 - DISTORÇÕES SISTEMÁTICAS EXTERNAS

2.1.1 - Variação da atitude ao longo da cena

O ângulo roll é responsável por ligeira distorção na varredura, devido a não ortogonalidade da visada. Já a variação do roll ao longo da cena provoca o não alinhamento das varreduras consecutivas (Figura 2). Esta distorção afeta apenas a imagem no sentido da varredura (ao longo de Y).

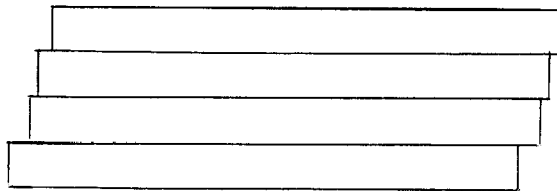


Fig. 2 - Efeito provocado pela variação do roll

Devido à altitude do satélite e à ordem de grandeza do roll (10^{-3} radianos) aproxima-se a correção devido à variação do roll, por: $\Delta y = H \cdot \text{roll}$

O ângulo pitch também é responsável por pequenas distorções na imagem, devido a não ortogonalidade da visada, enquanto que a variação do pitch ao longo da cena provoca superposições, positivas ou negativas, entre varreduras consecutivas (Figura 3). Esta distorção afeta a imagem apenas no sentido transversal à varredura.

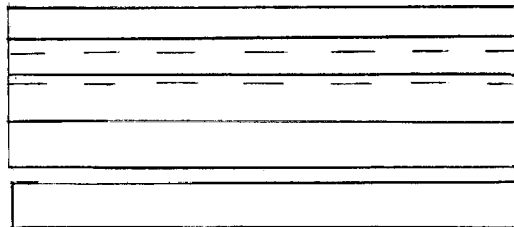


Fig. 3 - Efeito provocado pela variação do pitch

Pelo mesmo motivo do ângulo roll podemos aproximar a correção para eliminação da distorção por:

$$\Delta x = H * \text{pitch}$$

O yaw é responsável por um não alinhamento das varreduras devido à rotação sofrida por cada uma destas (Figura 4.A). A variação do yaw ao longo da cena pode provocar superposição positiva e negativa entre duas varreduras consecutivas, resultando um efeito semelhante a um leque (Figura 4.B).

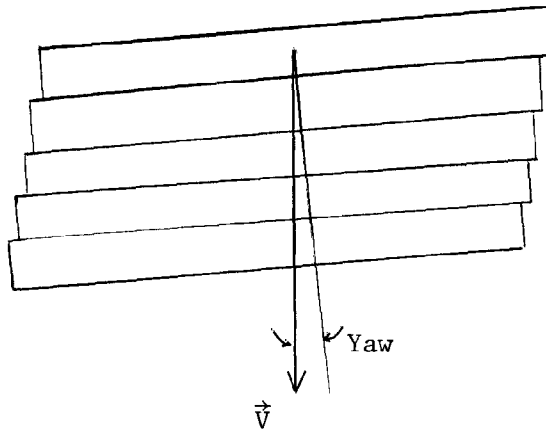


Fig. 4.A

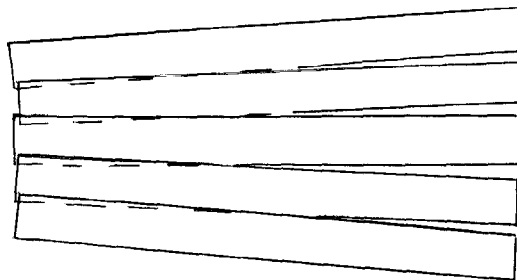


Fig. 4.B

Esta distorção afeta tanto a coordenada x quanto a coordenada y , e a correção a ser aplicada a tais coordenadas é:

$$x = x * (\cos(\text{yaw}) - 1) + y * \text{sen}(\text{yaw})$$

$$y = y * (\cos(\text{yaw}) - 1) - x * \text{sen}(\text{yaw})$$

2.1.2 - Variação da altitude ao longo da cena

A variação da altitude provoca um efeito de variação da escala, no sentido da varredura, ao longo da cena. Este efeito é eliminado levando-se em consideração a variação da altitude em relação a uma altitude nominal H_0 (Figura 5).

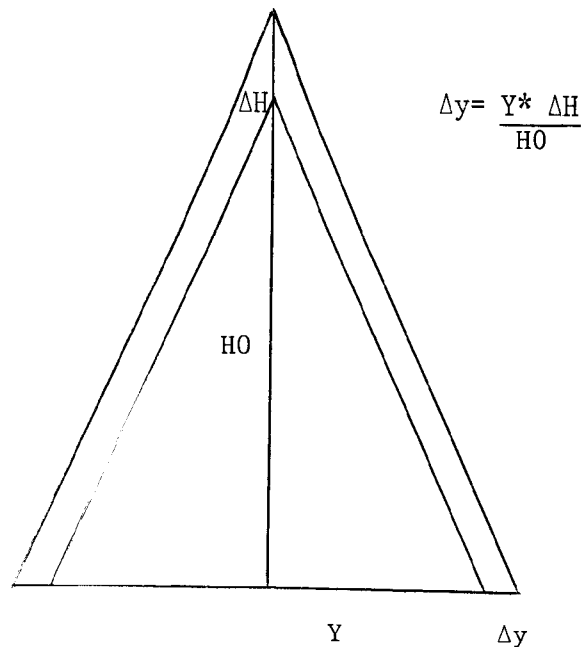


Fig. 5 - Efeito provocado pela variação de altitude

2.1.3 - Variação da velocidade do satélite ao longo da cena

A velocidade do satélite pode provocar superposição, negativa ou positiva, entre varreduras consecutivas, provocando uma variação na escala da imagem no sentido transversal à varredura. A correção desta distorção leva em conta um valor nominal para a velocidade do satélite, de tal forma que com esta velocidade nominal haja uma perfeita justaposição das varreduras. Esta velocidade é função da frequência de varredura do espelho, e da dimensão da varredura ao longo da órbita.

Se a velocidade do satélite for menor que a nominal haverá superposição positiva das varreduras, caso contrário haverá superposição negativa (Figura 6). A variação da velocidade provoca variações na escala ao longo da imagem. Pode-se eliminar tal distorção aplicando a seguinte correção:

$$\Delta y = (V_{\text{SAT TERRA}}^{\text{NOMINAL}} - V_{\text{SAT TERRA}}) * (T - \text{TIME CODE})$$

onde:

$V_{\text{SAT-TERRA}}$: velocidade do satélite projetada sobre a superfície da TERRA

TIME CODE: Instante relativo ao centro da imagem

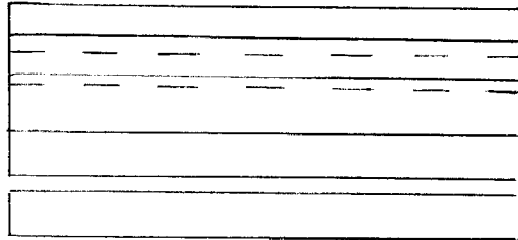


Fig. 6 - Efeito provocado pela variação de velocidade

2.1.4 - Rotação da Terra

O efeito provocado pela rotação da Terra deve-se ao movimento simultâneo entre satélite e Terra. Durante o movimento passivo do espelho, a Terra está no seu processo natural de rotação provocando o não alinhamento entre varreduras consecutivas (Figura 7).

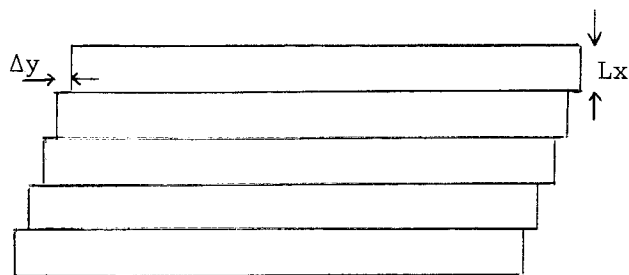
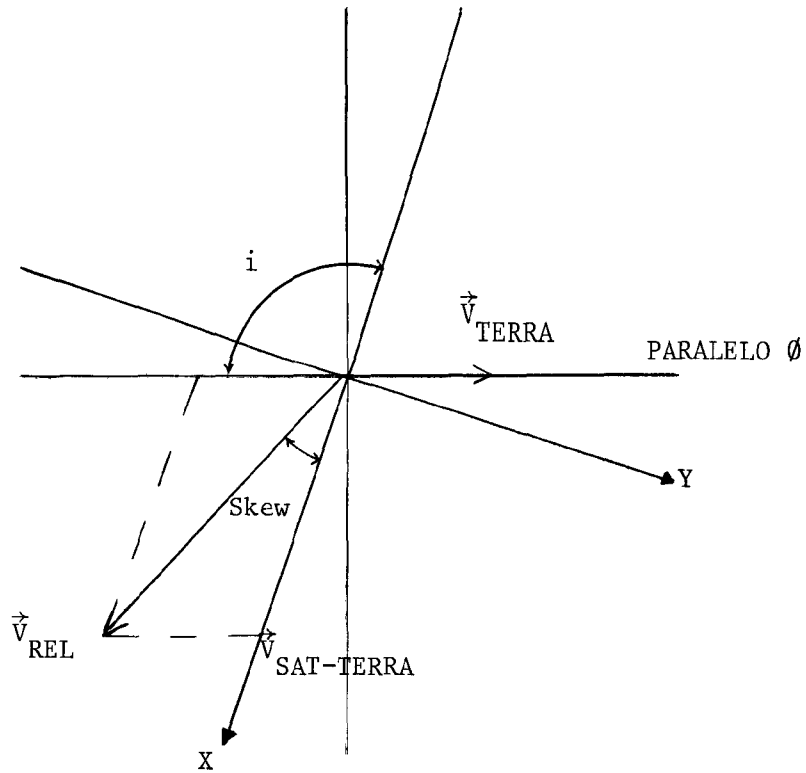


Fig. 7 - Efeito provocado pela rotação de Terra (Earth Skew)

Para eliminação deste efeito é necessário o conhecimento do ângulo entre a velocidade do satélite, projetada na superfície da Terra, e a velocidade relativa entre o satélite e a Terra (Figura 8).



$$\vec{V}_{rel} = \vec{V}_{SAT-TERRA} - \vec{V}_{TERRA}$$

$$\Delta y = Lx \cdot \text{tg} (\text{SKEW})$$

Fig. 8 - Determinação do ângulo de "SKEW"

2.1.5 - Esfericidade da Terra

Será analisada juntamente com a não linearidade do movimento do espelho.

2.2 - DISTORÇÕES INTERNAS

2.2.1 - Arrastamento da Imagem durante 1 varredura

Esta distorção deve-se ao movimento simultâneo do satélite e do espelho, e caracteriza-se por um arrastamento no sentido transversal à varredura (Figura 9).

A distorção varia linearmente ao longo da varredura e pode ser modelada pela seguinte equação:

$$\Delta x = \frac{2 * D * y}{L_y}$$

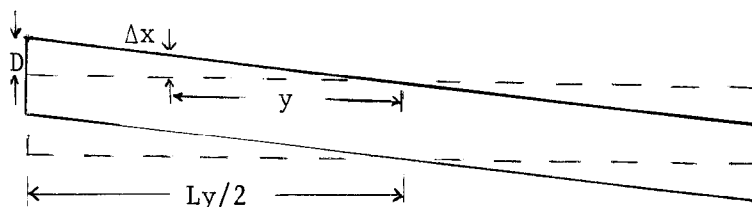


Fig. 9 - Arrastamento de 1 varredura

2.2.2 - Variação no tempo útil de varredura

A variação no tempo útil da varredura provoca uma variação no número de pixels registrados na varredura, pois o intervalo de amostragem de pixels é constante. A consequência é uma aparente variação no comprimento da varredura. O efeito é uma variação de escala ao longo de varredura. Para evitar este efeito aplica-se uma correção à coordenada y , de modo a trazer o comprimento da varredura para seu valor real.

$$\Delta y = y * \left(\frac{\text{TEMPO NOM}}{\text{TEMPO REAL}} - 1 \right)$$

2.3 - ESFERICIDADE DA TERRA E PERFIL DO ESPELHO

A esfericidade da Terra e a não linearidade do perfil do espelho são distorções intimamente ligadas e serão corrigidas simultaneamente.

Na varredura os pixels encontram-se igualmente espaçados (57 metros) o que significaria dizer que em intervalos de tempo iguais são varridas regiões de dimensões constantes na superfície da TERRA (lembrar que o intervalo de amostragem de pixel é constante).

Na realidade o ângulo de visada θ é uma função senoidal da coluna relativa ao ponto (pixel) (Figura 10).

$$\theta = g (\text{coluna})$$

Dado um ponto (pixel) na imagem através de suas coordenadas (linha, coluna) tem-se:

- a coordenada y do ponto na varredura sem correção é:

$$y_1 = 57 * (\text{coluna} - \text{coluna}_{\text{PIXEL CENTRAL}})$$

- a coordenada y do ponto na varredura corrigida está representada na Figura 10.

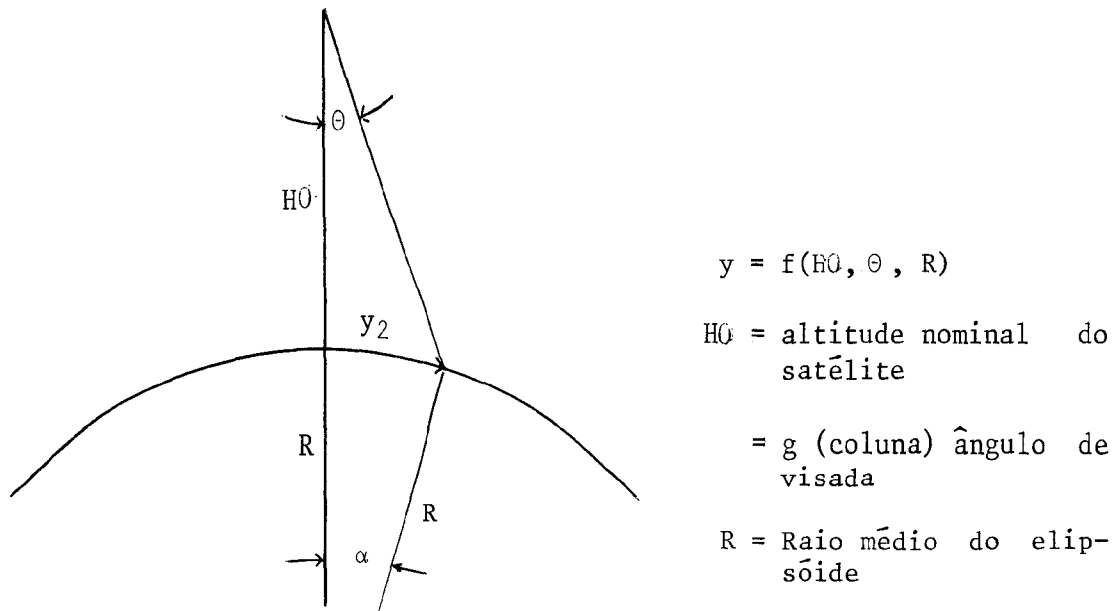


Fig. 10 - Efeito simultâneo da curvatura da Terra e do Perfil do Espelho

A correção a ser aplicada ao ponto pode ser expressa por:

$$\Delta y = y_2 - y_1$$

3. AValiação Geométrica da Imagem Bulk

Após eliminadas as distorções sistemáticas, inerentes ao sistema de imageamento, gera-se a imagem analógica denominada imagem "bulk".

O Instituto de Pesquisas Espaciais realiza constantemente avaliações geométricas da imagem bulk, para garantir um produto de qualidade ao usuário. Para esta avaliação são localizados diversos pontos de controle sobre a imagem. Estes pontos podem ser obtidos a partir de rastreamento por satélites, levantamento aerofotogramétricos, astronomia de precisão, ou simplesmente de cartas na escala 1:50.000. Atualmente a maior parte dos pontos está sendo obtido de cartas topográficas na escala 1:50.000.

O processo de avaliação geométrica da imagem consiste no levantamento das coordenadas de imagens, obtidas sobre uma imagem na escala 1:1.000.000, em um coordenatôgrafo de resolução igual a 0.001" (um milésimo de polegada) e na obtenção dos parâmetros da transformação de similaridade que minimize os resíduos entre as coordenadas de imagem e as coordenadas obtidas por levantamento.

Transformação de similaridade

$$X_{\text{LEVANTAMENTO}} = A_0 + A_1 * X_{\text{IMAG}} + A_2 * Y_{\text{IMAG}}$$

$$Y_{\text{LEVANTAMENTO}} = B_0 - A_2 * X_{\text{IMAG}} + A_1 * Y_{\text{IMAG}}$$

$$\text{ESCALA} = A1^2 + A2^2$$

$$\text{ALFA} = \text{arc tan } (A2/A1)$$

Este tipo de transformação é aplicado a diversas imagens, ao longo do Brasil, e o erro médio quadrático da imagem MSS-LANDSAT apresenta-se próximo a 1,5 pixel (120 ± 20 metros).

A variação da escala em relação ao valor esperado não ultrapassa a marca de 0.1% (999000 < N° ESCALA < 1001000). Estes resultados comprovam a boa qualidade da imagem MSS-LANDSAT "bulk".

A escolha da imagem bulk na escala 1:1.000.000 é imposta pois o software de correção de imagens leva em consideração as distorções inerentes ao ampliador que gera tal imagem.

A Tabela 1 apresenta alguns exemplos para os LANDSATs 2 e 4, onde constam ainda o número de pontos de controle localizados na imagem, e o número destes selecionados para determinação dos parâmetros da transformação de similaridade.

	LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM	PONTOS DE CONTROLE		ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (METROS)			VARIACÃO DE ESCALA (%)
		TOTAL	UTILIZADOS	X	Y	TOTAL	
L A N D S A T 4	FLORIANÓPOLIS (SC)	52	17	89	91	127	0.01
	ARAÇATUBA (SP)	41	18	84	81	117	0.08
	ELISEU MARTINS (PI)	28	12	93	87	127	0.05
L A N D S A T 2	SÃO PAULO (SP)	35	16	63	84	105	0.04
	PORTO NACIONAL (GO)	48	16	112	87	141	0.09

Tabela 1 - Avaliação geométrica da imagem "bulk"

A escolha das imagens foi feita com o intuito de se ter, pelo menos, uma imagem para cada região brasileira, com exceção da região Norte.

4. IMAGEM PRECISION

Os resultados obtidos com as imagens "bulk" não indicam sua utilização como base planimétrica de cartas topográficas na escala 1:250.000. Com o intuito de melhorar a qualidade geométrica das imagens MSS-LANDSAT utiliza-se pontos de controle para refinar as correções relativas à grade 9 x 9 de "break-points". Este refinamento é baseado num modelo polinomial.

O polinômio não deve apresentar muitos coeficientes pela dificuldade de obtenção de pontos de controle, principalmente nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste do Brasil. O ideal é a utilização de no mínimo 2 pontos de controle para cada coeficiente a ser determinado, com os pontos distribuídos por toda a imagem. Deve-se observar um mínimo de 13 pontos de controle distribuídos de forma semelhante a indicada na figura 11.

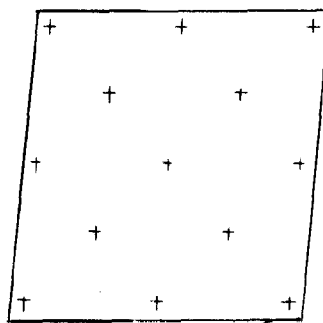


Fig. 11 - Distribuição ideal de pontos de controle

Outro fator limitante na escolha do polinômio é a interpolação bilinear para pontos fora da grade. Quanto maior o grau do polinômio, maior será a perda da correção durante a interpolação. Estes motivos, aliados ao desempenho de polinômios de graus mais elevados, levaram o INPE a adotar um polinômio de segundo grau, do tipo:

$$X_{LEVANT} = A0 + A1 * X_{IMAG} + A2 * Y_{IMAG} + A3 * X_{IMAG} * Y_{IMAG} + A4 * X_{IMAG}^2$$

$$Y_{LEVANT} = B0 + B1 * X_{IMAG} + B2 * Y_{IMAG} + B3 * X_{IMAG} * Y_{IMAG} + B4 * Y_{IMAG}^2$$

Os termos em Y^2 na transformação de X e X^2 na de Y não têm um desempenho que imponha a sua presença na transformação (Ver Tabelas 3 e 4). O modelo acima tem-se mostrado satisfatório, só não atendendo com perfeição a Região Norte.

A imagem resultante do refinamento polinomial da imagem "bulk" é denominada imagem "Precision".

Esta imagem tem qualidade geométrica compatível para trabalhos cartográficos nas escalas 1:250.000 e menores, e vem sendo utilizada com sucesso como base planimétrica de cartas topográficas, para determinação de áreas, perímetros e tarefas afim.

As avaliações geométricas realizadas sobre as imagens "Precision" indicam que o erro médio quadrático é cerca de duas vezes menor que nas imagens "bulk", estando próximo a 3/4 pixel (60m + 15m). No Nordeste encontramos resultados um pouco piores (cerca de 1 pixel) devido às dificuldades de obtenção de pontos de controle com boa qualidade (Tabela 2).

Atualmente a imagem "Precision" é utilizada como base planimétrica em cartas topográficas na escala 1:250.000, através de um convênio entre o INPE e a Diretoria do Serviço Geográfico (DSG).

	LOCALIZAÇÃO DA IMAGEM	PONTOS DE CONTROLE		ERRO MÉDIO QUADRÁTICO (METROS)			VARIÇÃO DE ESCALA (%)
		TOTAL	UTILIZADOS	X	Y	TOTAL	
L A N D S A T	FLORIANÓPOLIS (SC)	52	17	48	40	62	0.01
	ARAÇATUBA (SP)	41	18	52	46	69	0.04
	4 ELISEU MARTINS(PI)	28	12	69	49	85	0.02
L A N D S A T	SÃO PAULO (SP)	35	16	48	38	61	0.02
	2 PORTO NACIONAL(GO)	48	16	44	34	56	0.05

Tabela 2 - Avaliação geométrica da Imagem "Precision"

Para avaliar com maior precisão a qualidade da imagem aplicou-se ao conjunto de coordenadas medidas das diversas imagens "bulk", transformações polinomiais do 1º grau completo (transformação afim), do 2º, 3º, 4º e 5º graus completos, bem como transformações do tipo:

$$X_{\text{LEVANTAMENTO}} = A_0 + A_1 * X_{\text{IMAG}} + A_2 * Y_{\text{IMAG}} + A_3 * X_{\text{IMAG}}^N * Y_{\text{IMAG}}^M$$

$$Y_{\text{LEVANTAMENTO}} = B_0 + B_1 * X_{\text{IMAG}} + B_2 * Y_{\text{IMAG}} + B_3 * X_{\text{IMAG}}^N * Y_{\text{IMAG}}^M$$

onde: $1 < N+M < 5$

Estas transformações serviram para demonstrar o acerto da escolha do polinômio do 2º grau para refinamento da imagem bulk. Em geral os polinômios que melhor mapearam os dois conjuntos de coordenadas (medidas e levantadas) foram os de 2º grau (Tabelas 3 e 4).

Os polinômios de grau superior a 2 foram prejudicados pela difícil

dade de obtenção de um grande número de pontos de controle confiáveis, principalmente na imagem Eliseu Martins (PI), onde só foram localizados 28 pontos de controle. Na maioria das situações não se trabalhou com dois pontos de controle para cada coeficiente a ser determinado, prejudicando a realidade dos resultados alcançados.

MODELO POLINOMIAL																São Paulo			Porto Nacional									
I	x	y	x ²	xy	y ²	x ³	x ² y	xy ²	y ³	x ⁴	x ³ y	x ² y ²	xy ³	y ⁴	x ⁵	x ⁴ y	x ³ y ²	x ² y ³	xy ⁴	y ⁵	X	Y	PC	X	Y	PC		
*	*	*																				52	73	16	107	79	16	
*	*	*	*																				50	68	16	55	78	16
*	*	*		*																			52	62	16	107	42	16
*	*	*			*																		47	50	16	105	76	16
*	*	*				*																	49	73	16	105	79	16
*	*	*					*																50	61	16	106	70	16
*	*	*						*															47	73	16	101	74	16
*	*	*							*														51	69	16	105	79	16
*	*	*								*													51	60	16	70	76	16
*	*	*									*												50	67	16	104	59	16
*	*	*									*												44	73	16	86	79	16
*	*	*										*											49	64	16	107	60	16
*	*	*											*										48	56	16	107	75	16
*	*	*												*									51	73	16	103	78	16
*	*	*													*								49	64	16	106	71	16
*	*	*											*										44	73	16	98	73	16
*	*	*														*							47	68	16	106	69	16
*	*	*															*						46	73	16	104	72	16
*	*	*																*					50	70	16	104	79	16
*	*	*		*	*																*		41	39	16	46	34	16
*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	50	43	25	42	67	24
*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	51	51	27	42	55	33
*	*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	45	63	29	58	60	38

Tabela 3 - Teste do polinômio ótimo para o LANDSAT-2

MODELO POLINOMIAL																	Florianópolis			Araçatuba			E. Martins											
l	X	Y	X ²	XY	Y ²	X ³	X ² XY	X ² Y ²	Y ³	X ³ Y	X ² Y ²	XY ³	Y ⁴	X ⁴	X ³ Y ²	X ² Y ³	XY ⁴	X ⁵	X ⁴ Y	X ³ Y ²	X ² Y ³	XY ⁴	Y ⁵	X	Y	PC	X	Y	PC	X	Y	PC		
*	*	*	*																						83	82	17	72	74	18	72	77	12	
*	*	*	*																							50	82	17	57	73	18	72	69	12
*	*	*	*	*																						83	45	17	72	74	18	71	64	12
*	*	*	*		*																					81	78	17	71	59	18	72	58	12
*	*	*	*			*																				80	75	17	62	71	18	69	64	12
*	*	*	*				*																			82	68	17	67	74	18	70	63	12
*	*	*	*					*																		83	82	17	71	74	18	69	68	12
*	*	*	*						*																	77	80	17	71	74	18	72	48	12
*	*	*	*							*																60	82	17	55	73	18	71	65	12
*	*	*	*								*															83	50	17	71	74	18	72	63	12
*	*	*	*																							78	74	17	72	70	18	72	57	12
*	*	*	*								*															83	63	17	72	74	18	71	62	12
*	*	*	*									*														81	81	17	72	66	18	72	56	12
*	*	*	*																*							79	78	17	60	70	18	70	63	12
*	*	*	*															*								83	65	17	68	74	18	70	59	12
*	*	*	*									*														81	80	17	72	73	18	71	62	12
*	*	*	*														*									83	76	17	72	73	18	72	56	12
*	*	*	*															*								83	82	17	72	74	18	70	63	12
*	*	*	*																					*		79	80	17	72	74	18	72	52	12
*	*	*	*																							48	35	17	52	43	18	71	45	12
*	*	*	*																							53	66	24	54	45	25	67	61	18
*	*	*	*																							69	67	32	50	48	30	62	32	24
*	*	*	*																*							77	75	38	62	52	34	64	21	26

Tabela 4 - Teste de Polinômio Ótimo para o LANDSAT-4

5. CONCLUSÃO

As constantes avaliações geométricas das imagens MSS-LANDSAT, realizadas pelo INPE, garantem ao usuário uma imagem de boa qualidade. Atualmente, o erro médio quadrático da imagem "bulk" está próximo a 1,5 pixel (120 + 20 metros), enquanto que na imagem "Precision" encontra-se um erro de 60 + 15 metros. Ficou demonstrada das avaliações realizadas que, após eliminadas as distorções sistemáticas, o polinômio do 2º grau é o que melhor se aplica ao refinamento da imagem "bulk".

O atual estágio das imagens "precision" permite sua utilização como base planimétrica em cartas nas escalas 1:250.000 e menores. É necessário que o usuário tome consciência da eficiência e economia da cartografia apoiada em dados orbitais, e procure, como uma nova alternativa, as imagens MSS-LANDSAT.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MEIRA FILHO, L.G. Projeções Espaciais, Imagens LANDSAT

MIKHAIL, E.M.; BAKER, J.R. Geometric Analysis and Restitution of Digital Multispectral Scanner Data Arrays. Purdue University, Indiana, 1975.

Nota do autor:

O autor se baseou em trabalhos não publicados realizados pelos Engenheiros: José Luiz de Barros Aguirre, Paulo Roberto Martins Serra e Sérgio de Paula Pereira, todos do Instituto de Pesquisas Espaciais.