

GERAÇÃO DE IMAGENS TM LANDSAT EM FITAS COMPATÍVEIS

COM COMPUTADOR GEOMETRICAMENTE CORRIGIDAS

Paulo Roberto Martins Serra

Engenheiro

Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE

Cachoeira Paulista - SP

Uma imagem digital geometricamente corrigida é uma matriz onde cada elemento está relacionado com um ponto da superfície terrestre imageada, de tal maneira que existe uma relação linear conhecida entre a posição do elemento na matriz (linha, coluna) e as coordenadas do ponto numa dada projeção cartográfica (x, y).

Esta relação é definida por uma translação, rotação e escala, por:

$$x = \cos\alpha \cdot \Delta p (j - j_0) + \sin\alpha \cdot \Delta p (i - i_0) + x_0$$

$$y = \sin\alpha \cdot \Delta p (j - j_0) - \cos\alpha \cdot \Delta p (i - i_0) + y_0$$

onde:

(x, y) = coordenadas de projeção do ponto imageado.

(i, j) = linha e coluna do elemento na matriz da imagem.

Δp = tamanho do elemento de área representado por um ponto da imagem.

(x₀, y₀) = coordenadas de projeção de um ponto.

(i₀, j₀) = localização na matriz da imagem do elemento correspondente ao ponto de coordenadas (x₀, y₀).

α = ângulo de orientação da imagem em relação ao sistema de coordenadas de projeção.

O elemento de tamanho de Δp , é representado na matriz por um número proporcional à radiância solar refletida pela área do quadrado de lado p, na superfície terrestre, na faixa de comprimentos de onda correspondente à banda espectral desejada.

O sensor TM adquire amostras de radiância refletida pela superfície terrestre em 7 bandas espectrais correspondentes às faixas de comprimento de onda:

Banda	Comprimentos de onda
1	0.45 a 0.52 μm
2	0.52 a 0.60 μm
3	0.63 a 0.69 μm
4	0.76 a 0.90 μm
5	1.55 a 1.75 μm
6	10.4 a 12.5 μm
7	2.08 a 2.35 μm

As amostras são adquiridas por 16 detetores para cada banda espectral (exceto a banda 6) através de um espelho oscilante que varre uma faixa de 185 km perpendicular à trajetória do satélite. Para cada varredura do espelho, os detetores recebem a radiância de 16 linhas paralelas no solo, cada uma com 30 m de largura e 185 km de comprimento. A saída dos detetores é amostrada, a uma frequência de amostragem constante, fornecendo uma série de 6300 valores de radiância por linha, correspondendo a pontos no solo espaçados de aproximadamente 30 m (Figura 1).

Os dados fornecidos pelo TM podem ser organizados como uma matriz de valores de radiância cobrindo uma faixa na superfície terrestre de 185 km de largura, em que cada 16 linhas são adquiridas por uma varredura do espelho. A posição dos elementos da matriz não está, no entanto, relacionado com os pontos correspondentes na superfície terrestre por uma equação linear da forma acima. A construção da matriz da imagem corrigida envolve, portanto, uma reamostragem utilizando como entrada os valores lidos pelos sensores e fornecendo os valores nas posições da matriz de saída corrigida. O processo de reamostragem exige, naturalmente, o conhecimento da posição dos valores de entrada na matriz de saída. Este cálculo é feito baseado nas informações de telemetria do satélite (posição, velocidade e atitude), do conhecimento das características do sistema TM e dos dados relativos à imagem de saída (parâmetros do elipsóide de referência e das equações da projeção utilizada).

MÉTODO DE INTERPOLAÇÃO:

A maneira correta de interpolar dados de imagem é a convolução em duas dimensões, em particular, se o dado de entrada é limitado em banda, a função de interpolação (ou resposta ao impulso do filtro linear é):

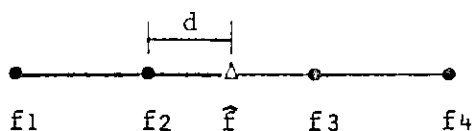
$$g(x_1, x_2) = \frac{\text{sen } \pi x_1}{\pi x_1} \cdot \frac{\text{sen } \pi x_2}{\pi x_2}$$

onde x_1 e x_2 são os eixos ortogonais ao longo dos quais o dado foi amostrado. Na prática, a aplicação da convolução em duas dimensões é muito custosa e lenta, devido ao grande volume de dados envolvido. O esforço computacional pode ser reduzido pela aplicação de duas interpolações, uma ao longo das linhas e outra ao longo das colunas (Friedman, 1981).

A função de interpolação a ser utilizada depende das características do sistema imageador. No caso do TM, o processo é praticamente unidimensional (movimento do espelho e amostragem ao longo das linhas). O dado dos detetores passa por um filtro passa-baixas antes da amostragem, portanto o dado é limitado em banda na direção da varredura.

A função de interpolação ótima, mostrada acima, seria adequada para uso ao longo das linhas. Na prática, no entanto, ela não é utilizada, pois exigiria um número infinito (ou muito grande) de amostras de entrada para o cálculo de cada ponto de saída. Ao invés disso, são usadas aproximações, que exigem um número menor de pontos de entrada.

A função utilizada para interpolação ao longo das linhas é a convolução cúbica usando 4 pontos de entrada, dada por:



● - posição dos dados de entrada

Δ - posição do ponto interpolado

f_i - valores de entrada

\hat{f} - valor calculado

$$\hat{f} = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 + w_4 f_4$$

$$w_1 = -d (1 - d)^2$$

$$w_2 = (1 - d) (1 + d - d^2)$$

$$w_3 = d (1 + d - d^2)$$

$$w_4 = -d^2 (1 - d)$$

Este método supõe que os pontos de entrada estão igualmente espaçados, o que é uma boa aproximação para os dados TM ao longo das linhas.

A interpolação ao longo das colunas é complicada pelo fato de as linhas não estarem regularmente espaçadas, devido à aquisição de 16 linhas por vez, e ao não paralelismo das varreduras. Considerando-se o maior efeito de uma convolução ao longo das colunas, o fato da resposta em frequência na vertical já estar prejudicada pelo processo de aquisição e o fato de maior parte das distorções estar orientada na direção das linhas, optou-se por um processo de reamostragem de vizinho mais próximo na direção das colunas.

ADELAMENTO DAS CORREÇÕES:

O cálculo da posição das amostras é efetuado para um conjunto de pontos regularmente distribuídos na matriz de entrada.

Para uma determinada cena TM, a matriz de entrada é composta de 176 linhas (386 varreduras) de 6320 elementos. Os pontos para os quais será calculada a posição correspondem às colunas:

-5, 367, 739, ... , 6319

na linha central (linha 8.5) de cada varredura.

Para cada ponto, temos:

- o tempo em que o ponto foi amostrado;
- posição do satélite num sistema referencial com origem no centro da terra;
- atitude do satélite em relação ao sistema inercial;
- posição do espelho;
- atitude do sensor TM em relação ao satélite.

Cada uma das 7 bandas é adquirida por um conjunto de 16 detetores (para a banda 6), de tal maneira que, num dado instante, cada banda está imageando um ponto diferente na superfície, para cada linha da varredura. O cálculo da posição do ponto é feito para o ponto central, entre os pontos imageados pelos detetores das diferentes bandas espectrais.

A posição do ponto na superfície terrestre associado ao ponto central, para o elemento i da varredura v é calculada como segue.

O tempo é conhecido para o instante do início de cada varredura. Como a frequência de amostragem é constante, o tempo para o elemento i é

calculado por:

$$t = t_{s1s} + \frac{i}{f}; f = 104.047 \times 10^3 \text{ elementos/seg.}$$

t_{s1s} = tempo no início da varredura

t = tempo de amostragem do elemento i

A partir do tempo t , a posição e atitude do satélite são calculadas por interpolação nos dados de telemetria.

A posição do espelho é calculada a partir do tempo desde o início da varredura, assumindo uma velocidade constante do espelho durante a varredura. A equação que descreve o movimento real do espelho é um polinômio do 5º grau, determinado a partir do tempo real de cada varredura. Como esta equação depende de cada varredura, seu efeito será incluído posteriormente para possibilitar a interpolação dos dados calculados neste passo entre varreduras.

Tomando-se como referência um sistema de coordenadas x_{TM}, y_{TM}, z_{TM} ligado ao sensor TM, a posição do espelho é descrita por dois ângulos:

δ = posição do espelho ao longo da varredura (rotação em torno do eixo x);

δc = posição do espelho perpendicular à varredura (rotação em torno do eixo y).

As coordenadas do ponto são:

$$x_{TM} = H * \text{sen } \delta c$$

$$y_{TM} = H * \text{cos } \delta c * \text{sen } \delta$$

$$z_{TM} = H * \text{cos } \delta c * \text{cos } \delta$$

H é a distância entre o sensor TM e o ponto na superfície da terra.

Conhecendo-se a atitude do sensor TM em relação ao satélite, constante e determinada no solo, antes do lançamento, temos a matriz $[B]$ de rotação entre o sistema do sensor (x_{TM}, y_{TM}, z_{TM}) e o sistema do satélite (x_S, y_S, z_S).

$$\begin{Bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} x_{TM} \\ y_{TM} \\ z_{TM} \end{Bmatrix}$$

A atitude do satélite em relação ao sistema inercial é dada pela atitude, expressa pelos parâmetros de Euler (q_0, q_1, q_2, q_3). A matriz de rotação do sistema do satélite para o sistema inercial é dada por:

$$[A] = \begin{bmatrix} (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_0q_3 + q_1q_2) & (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_3q_2 + q_1q_0) & (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \end{bmatrix}$$

E as coordenadas do ponto no sistema inercial são:

$$\begin{bmatrix} x_{eci} \\ y_{eci} \\ z_{eci} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \\ z_S \end{bmatrix}$$

A equação do elipsóide no sistema inercial é:

$$(x_{eci} - x_0)^2 + (y_{eci} - y_0)^2 + \frac{(z_{eci} - z_0)^2}{(1 - e)} = a^2$$

x_0, y_0, z_0 = coordenadas da origem do elipsóide,

a = semi-eixo maior do elipsóide,

e = excentricidade do elipsóide.

São definidos pelo datum de referência.

O sistema de equações definido acima fornece como solução as coordenadas do ponto no sistema inercial. A rotação do tempo sideral em torno do eixo z_{eci} fornece as coordenadas no sistema fixo à terra orientado na direção de Greenwich.

A posição (x, y, z) é convertida para latitude e longitude. Temos então, ao fim deste processo, as coordenadas de latitude e longitude para um conjunto de pontos distribuídos regularmente sobre a imagem de entrada, referenciado ao ponto central dos detetores. Este cálculo é efetuado para um conjunto de varreduras ao longo da cena.

A partir de latitude e longitude, são então calculadas as coordenadas retangulares (x, y) usando-se as equações da projeção cartográfica escolhida (SOM ou UTM).

As linhas da imagem de saída são orientadas na direção da varredura. A orientação da imagem de saída em relação ao sistema de coordenadas da projeção (x, y) depende da projeção utilizada. O ângulo entre a direção de varredura e o eixo x do sistema de coordenadas de projeção é:

$$\text{ALFA} = \text{TAN}^{-1} (S/J) \quad (\text{Snyder})$$

para projeção SOM e,

$$\text{ALFA} = \text{Heading} + \text{Convergência}$$

para projeção UTM, onde Heading é a direção da velocidade do satélite em relação ao norte, e convergência é a orientação do meridiano que passa pelo centro da cena.

No sistema de coordenadas da imagem, orientado na direção da varredura, as coordenadas dos pontos de referência são:

$$x_{im} = (x - x_0) \cos(\text{ALFA}) - (y - y_0) \sin(\text{ALFA})$$

$$y_{im} = (x - x_0) \sin(\text{ALFA}) + (y - y_0) \cos(\text{ALFA})$$

x, y = coordenadas de projeção;

ALFA = ângulo de orientação da imagem, calculado acima;

x₀, y₀ = coordenadas de projeção do centro da cena.

Todo o cálculo descrito acima é efetuado para 18 pontos por varredura, para um número de varreduras que depende do nível geométrico selecionado. Os níveis geométricos disponíveis são:

G = 0 - imagem sem correção;

G = 1 - é usado para o caso em que os dados de atitude não estão disponíveis, por falha da transmissão dos dados. Neste caso, é suposta uma atitude nominal;

G = 2 - os cálculos são efetuados para 50 varreduras da cena, os dados de latitude e longitude são modelados por polinômios do 5º grau. Os polinômios são usados para recuperar os dados durante a geração da imagem;

G = 3 - os dados são calculados para 50 varreduras e utilizados na geração da imagem;

G = 4 - os cálculos são efetuados para as 386 varreduras que compõem a cena.

Nos casos em que os dados não foram calculados para todas as varreduras ($G < 4$) é feita uma interpolação ao longo das colunas, para calcular as coordenadas de imagem para todas as varreduras.

Depois dos cálculos descritos são adicionadas as correções de perfil do movimento do espelho e deslocamento entre bandas. Para cada varredura é calculado o movimento do espelho baseado no tempo real de cada varredura, e a diferença entre a posição real e a posição calculada, assumindo uma velocidade constante, é adicionada nas coordenadas de imagem. O deslocamento angular entre a posição do detetor da banda e o centro, tomado como referência, é transformada para deslocamento na imagem e adicionada às coordenadas de imagem.

Temos, finalmente, as coordenadas de imagem para 18 pontos em cada varredura da cena.

PROCEDIMENTOS PARA REAMOSTRAGEM

A matriz de imagem de entrada, composta de 6176 linhas de 6320 elementos, cobre uma área no solo de aproximadamente 185 km x 185 km na superfície terrestre e é armazenada num arquivo em disco, onde cada registro contém uma linha. A matriz da imagem de saída, devido ao efeito de escorregamento pela rotação da terra e eventuais diferenças de escala, demanda um espaço maior no disco. Devido a não disponibilidade de espaço suficiente, a imagem de saída será processada por quadrantes de aproximadamente 92 x 92 km e será armazenada numa matriz de 3200 linhas de 3500 elementos, num arquivo organizado por linhas.

A organização do arquivo de imagem de entrada por linhas possibilita o acesso para o primeiro passo da reamostragem, ao longo das linhas. No segundo passo, ao longo das colunas, é necessário acessar as colunas da imagem intermediária, resultante do primeiro passo. Esta imagem intermediária será armazenada em disco organizada de tal maneira que facilite o acesso por linhas (para escrita no primeiro passo) e por colunas (para leitura no segundo passo).

O quadrante de entrada compõe-se de 3088 linhas de 3160 elementos. Após a reamostragem das linhas, a imagem intermediária será composta de 3088 linhas de 3500 elementos. O formato da imagem intermediária pode ser enxergado como uma matriz de 49 linhas por 55 elementos onde cada elemento é uma

sub-matriz de 64 por 64 elementos, onde cada sub-matriz está transposta em relação à matriz de imagem intermediária. Isto é feito pela leitura de 64 linhas por vez da matriz de entrada e armazenamento dos resultados nas posições correspondentes nas sub-matrizes transpostas e escrita posterior de 64 linhas no arquivo intermediário. O elemento (i, j) da matriz intermediária é escrito na posição:

$$\left(\lfloor i/64 \rfloor * 64 + j \bmod 64, \lfloor j/64 \rfloor * 64 + i \bmod 64 \right)$$

$\lfloor x \rfloor$ = maior inteiro menor ou igual a x;

$x \bmod 64$ = resto da divisão de x por 64.

O acesso às colunas no segundo passo da reamostragem é feito pela leitura de 49 linhas da matriz intermediária, espaçadas de 64 linhas e montagem de 55 colunas pela movimentação de 49 trechos de 64 elementos.

São lidas as linhas:

$$i * 64 + k ; \text{ para } i = 0, 48$$

Para montagem da coluna ($k * 64 + \ell$), ($0 \leq \ell \leq 54$), tomamos 64 elementos de cada linha lida, começando no elemento ($\ell * 64$). Isto é repetido para k variando de 0 a 63. Em cada passo são montadas 55 colunas da matriz intermediária, é feita a reamostragem nas colunas, e são escritas 50 linhas de 3520 ($64 * 55$) elementos, montando uma segunda matriz intermediária, com organização análoga à anterior, contendo os dados já reamostrados nas duas direções.

Finalmente a matriz é novamente lida, 64 linhas de cada vez e cada sub-matriz $64 * 64$ é transposta, resultando na matriz de saída, com a imagem final organizada por linhas.

CÁLCULO DAS CORREÇÕES PARA REAMOSTRAGEM

Para a reamostragem ao longo das linhas, é utilizado o mapeamento inverso calculado para 56 pontos, espaçados de 64, para cada varredura, calculados por interpolação nas coordenadas de imagem, convertidas para elementos de imagem. O resultado é a posição entre os elementos da matriz de entrada, dos elementos de saída.

Para a reamostragem nas colunas, usa-se o mapeamento direto. Calcula-se, para os 56 pontos ao longo da varredura, a posição na matriz de saída

de cada varredura de entrada. Durante o processo de reamostragem, os 16 elementos da varredura são copiados na imagem de saída. Os elementos faltantes, devido ao espaçamento entre varreduras ser eventualmente maior que Δx , são repetidos do último da varredura anterior, ou primeiro da varredura seguinte, o que estiver mais próximo.

IMPLEMENTAÇÃO E RESTRIÇÕES

O procedimento descrito está implementado no Laboratório de Processamento Eletrônico do Departamento de Geração de Imagens de Satélite do INPE utilizando o computador VAX/780 e um disco de 256 Mb de capacidade de armazenamento das imagens. O disco tem capacidade para armazenar uma imagem completa, com as 7 bandas espectrais do TM. O programa pode utilizar todo esse espaço em disco para as matrizes intermediárias e o produto final. Contém no início a imagem original, exceto pela banda 6, em que a imagem original ocupa menos espaço que a imagem corrigida. É portanto possível gerar as 6 bandas de alta resolução e gerar como saída um quadrante da imagem em 6 bandas. Normalmente, os arquivos de entrada são preservados para a geração de mais de um quadrante e, neste caso, só é possível processar as bandas por vez.

Como o processamento utiliza a CPU do VAX, não havendo nenhum tipo de processador auxiliar, o produto ainda é custoso em tempo de processamento, tomando da ordem de meia hora por banda processada.

A avaliação geométrica do produto gerado está em curso, e resultados preliminares indicam um desvio interno inferior a 30 m (um elemento de imagem), e o posicionamento absoluto com um desvio da ordem de 1 km.

BIBLIOGRAFIA

- BRANN, D.E. Two-Dimensional Resampling of Line Scan Imagery by One-Dimensional Processing. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, Nº 10. October 1981, pp. 1459-1467.
- CHANG, J.O. A Fast Computer Method for Matrix Transposing. IEEE Transactions Comput., vol. C-21, pp. 801-803, July 1972.
- CHANG, J.P. The Space Oblique Mercator Projection. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 44, Nº 5, May 1978, pp. 585-596.

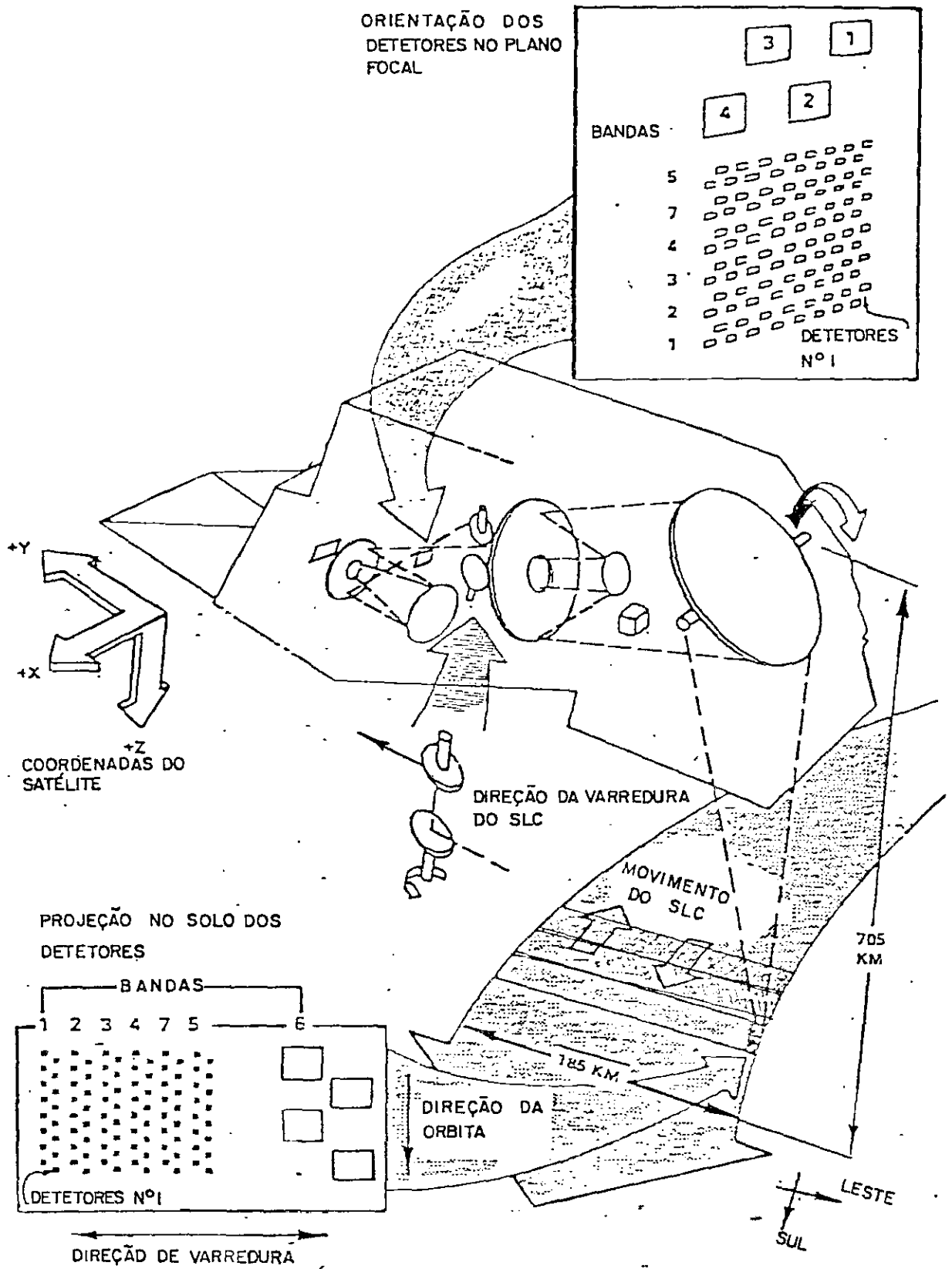


Fig. 1 - Projeção no solo dos detetores das 7 bandas do TM.