

## CORREÇÃO GEOMÉTRICA DIGITAL DE IMAGENS MSS-LANDSAT

Antonio José Ferreira M. e Silva  
Fernando Augusto Mitsuo Ii  
Gilberto Câmara Neto  
Paulo Roberto Martins Serra  
Ricardo Cartaxo Modesto de Souza

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq  
Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

### RESUMO

O trabalho descreve um sistema integrado de software para correção geométrica de imagens digitais MSS LANDSAT. O sistema inclui todas as fases de processamento, desde o recebimento da CCT "raw" (Fitas Compatíveis com Computador) até a geração da CCT corrigida (ou mosaico para base planimétrica de cartas na escala 1:250.000). É dada ênfase na descrição do modelo matemático de correção, o qual necessita de poucos pontos de controle, e na criação de uma biblioteca de pontos de controle para o Brasil.

### ABSTRACT

An integrated software system for geometric correction of LANDSAT imagery is described. This system includes all phases of processing, from receiving a raw CCT (computer compatible tape) to the generation of a corrected CCT (of UTM mosaic). Emphasis is placed on a model which needs few control points, and on the creation of a ground control point library for Brazil.

## 1. INTRODUÇÃO

Os satélites da série LANDSAT causaram grande impacto nas áreas de gerenciamento e monitoramento dos recursos naturais. Em um sem número de áreas, tais como Geologia, Agronomia, Hidrologia e Florestamento, as imagens LANDSAT mostraram sua utilidade em diversos tipos de análises. Em algumas aplicações entretanto (mapeamento, por exemplo), é necessário o uso de imagens corrigidas geometricamente.

*Outro uso importante é a integração de imagens LANDSAT com um sistema geográfico de informação.* A utilização de imagens LANDSAT em mapeamento é especialmente importante em países como o Brasil que contêm grande parte de seu território pobremente mapeado.

Este trabalho apresenta um sistema integrado de software projetado para produzir, de modo operacional, imagens MSS-LANDSAT corrigidas geometricamente. Os produtos gerados pelo sistema são CCTs corrigidas e mosaicos digitais na projeção UTM. Os mosaicos serão utilizados como base planimétrica em cartas 1:250.000, em todo o País, especialmente na região Amazônica, uma grande floresta tropical de difícil acesso, que cobre aproximadamente 40% do território nacional.

O desenvolvimento do sistema está sendo realizado de acordo com as mais modernas técnicas de engenharia de software, utilizadas por um grande número de instituições, com excelentes resultados (Beck and Parkins, 1983).

O sistema é dividido em oito módulos, cada um abrangendo uma tarefa específica, descritos a seguir:

- a) Módulo 0 - GERENCIAMENTO: responsável pela especificação e controle das tarefas a serem realizadas pelo sistema.
- b) Módulo 1 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORREÇÃO DE IMAGEM: abrange a obtenção dos dados de efemérides e atitude da plataforma, baseado apenas nos dados de telemetria do satélite.
- c) Módulo 2 - AQUISIÇÃO DE CCT: responsável pela obtenção e geração do arquivo de imagem a ser corrigido.
- d) Módulo 3 - BIBLIOTECA DE PONTO DE CONTROLE: responsável pela criação, gerenciamento, manutenção e visualização dos pontos de controle, bem como pela criação do arquivo destes pontos para a imagem a ser corrigida.
- e) Módulo 4 - EQUACIONAMENTO GEOMÉTRICO DA IMAGEM: responsável pela determinação da matriz de correção da imagem ("break points") a partir dos parâmetros da plataforma (efemérides e atitude), utilizando pontos de controle, caso existam, para refinar o modelo.
- f) Módulo 5 - REAMOSTRAGEM: obtenção da imagem LANDSAT corrigida digitalmente, a partir da matriz de correção derivada do modelo anterior e da imagem original.
- g) Módulo 6 - MOSAICO: realiza a união de cenas MSS corrigidas com a finalidade de se obter uma imagem combinada contendo a área de interesse na projeção UTM.

h) Módulo 7 - GERAÇÃO DE CCT DE SAÍDA: gera uma CCT corrigida em formato de superestrutura como recomendado pelo LTWG.

O fluxo do processamento do sistema esta ilustrado na figura 1

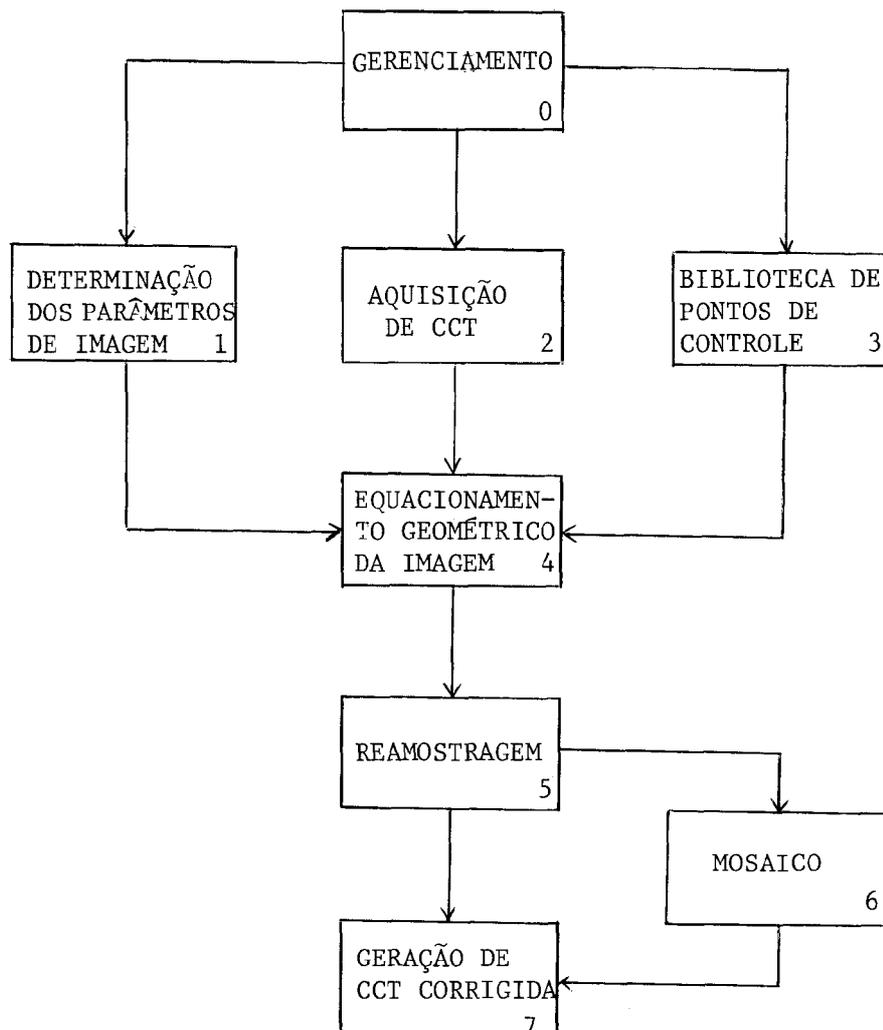


Fig. 1 - Fluxo do Processamento do Sistema

Seguem algumas considerações sobre os principais problemas de correção geométrica e uma descrição de cada um dos módulos que compõem o sistema.

## 2. PROBLEMAS DA CORREÇÃO GEOMÉTRICA

O sistema de imageamento é afetado por diversas fontes de erro, os quais introduzem distorções geométricas na imagem. Estes erros podem ser classificados em internos e externos. Os erros internos são aqueles causados por distorções inerentes ao sensor MSS e incluem a não linearidade da varredura do espelho e atraso na amostragem do detetor. Os erros externos são condicionados aos efeitos da plataforma e das condições de imageamento e compreendem: distorções panorâmicas e projetivas, rotação da Terra, e variações de atitude, altitude e velocidade do satélite (Bernstein, 1976).

O método mais comum de correção geométrica de imagens LANDSAT faz uso de pontos de controle e de um modelo polinomial que corrige globalmente a imagem. Este método, embora simples, necessita um grande número de pontos de controle bem localizados *para um bom desempenho* (Bahr, 1978); a alternativa é construir um modelo baseado nas equações de colinearidade que relaciona imagem e objeto através de suas respectivas coordenadas. Este modelo necessita poucos pontos de controle para obter a precisão desejada, especialmente importante para regiões de difícil acesso. O ponto crítico do modelo está nos dados de atitude e efemérides da plataforma, de boa qualidade para os LANDSAT 4 e 5 porém de má qualidade para os LANDSAT 1, 2 e 3. A principal função dos pontos de controle é o refinamento dos dados de atitude.

O método escolhido para o sistema desenvolvido pelo INPE foi o geométrico (equações de colinearidade), baseado nas facilidades oriundas do fato do Instituto ser uma estação de recepção e gravação de dados de imagens MSS-LANDSAT e no problema de localização de pontos de controle em diversas áreas do Brasil. Futuros aperfeiçoamentos incluirão o desenvolvimento de um modelo físico de atitude de acordo com a física da plataforma, semelhante ao desenvolvido pelo MDA (Friedman et Alli, 1983).

## 3. MÓDULO 0 - GERENCIAMENTO

O módulo Gerenciamento apresentará ao operador do sistema, a qualquer momento do processamento, uma completa descrição de todas as tarefas de um pedido de usuário. Isto só é possível graças a um arquivo especial: Arquivo de Status (STA). Este contém todos os pedidos feitos e que o sistema ainda não realizou completamente, e é chave de acesso para todos os outros arquivos. Para cada pedido o arquivo de status relata todos os processamentos necessários indicando aqueles que já foram completados. Estes arquivos contêm ainda informações auxiliares, como projeção cartográfica desejada, bandas a serem utilizadas, informações sobre o mosaico e se estão disponíveis pontos de controle para refinamento do modelo. Outros arquivos criados especialmente para o sistema são: arquivos de imagem, contendo imagem original, corrigida ou mosaicada; arquivo de parâmetros do satélite contendo os dados de efemérides e atitude (roll, pitch e yaw) do satélite, bem como os coeficientes do polinômio que descreve a variação temporal da atitude; arquivo de parâmetros de correção, o qual inclui dados específicos acerca do elipsóide de referência, perfil do espelho e do satélite; e o arquivo da matriz de "break points", com os desvios em relação a uma grade nominal para processo de reamostragem

## 4. MÓDULO 1 - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORREÇÃO DA IMAGEM

O objetivo deste módulo é a obtenção da posição do satélite e dos dados de atitude como função do tempo. O cálculo destes dados depende da ima

gem ter sido obtida a partir dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3 ou LANDSAT 4 e 5.

No caso dos LANDSAT 1, 2 e 3 um detetor de horizonte mede os dados de "roll" e "pitch" da plataforma. Este detetor é denominado "Attitude Measurement Sensor (AMS)". O AMS é um sensor estático que deteta a energia infravermelha vinda do horizonte, e o "roll" e "pitch" são baseados nas diferenças de medida ao longo e transversalmente à órbita. Estas diferenças expressas em *Contagens* são enviadas nos dados de telemetria do satélite, e então um padrão da energia infravermelho do horizonte é usado para calcular os valores de "roll" e "pitch". O "yaw" do satélite não é medido, mas é recomendada pela NASA a fórmula abaixo, para obtenção do valor do referido ângulo:

$$\text{Yaw} = 1.15 \times \text{Roll} \quad (1)$$

A precisão dos dados do AMS é de aproximadamente 1.0 miliradianos insuficiente para se obter imagem corrigida com precisão de 1 pixel. Entretanto, pesquisas realizadas (Tsuchia and Yamarra, 1981) demonstraram que uma fórmula linear semelhante a (1), não é suficiente para se obter dados de atitude com a precisão desejada.

Os dados de efemérides para os LANDSAT 1, 2 e 3 são interpolados baseados nos elementos orbitais fornecidos pela NASA.

No caso dos LANDSAT 4 e 5 é utilizado um sistema diferente para obtenção dos dados de atitude. Este consiste num conjunto de giroscópios e sensores estelares, e tem uma performance bem superior ao AMS utilizado nos satélites anteriores. Os dados de telemetria são compostos de: a) Parâmetros de Euler, que fornecem a atitude da plataforma relativa a um sistema de referência Geocêntrico e Inercial, obtidos a cada 4.096 segundos, b) Leituras de Giroscópio, obtidas a cada 0.512 segundos. Estes dados permitem a determinação da atitude para frações do segundo, c) Posição do Satélite em coordenadas cartesianas relativas a um sistema de referência geocêntrico e inercial.

Neste último caso, utilizando os parâmetros de Euler, as leituras do giroscópio e as coordenadas da plataforma, os erros de "roll", "pitch" e "yaw" são calculados, e obtêm-se as coordenadas do satélite num sistema de referência geocêntrico. Os resultados daí obtidos têm uma precisão uma ordem de grandeza maior que nos dados dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3.

O resultado final deste módulo é um arquivo contendo, a cada segundo, informações sobre a posição, velocidade e atitude do satélite. Para melhorar a performance dos dados de atitude obtidos a partir dos sensores de horizonte dos satélites LANDSAT 1, 2 e 3 é necessário um modelo que utilize pontos de controle para refinar tais dados. Este modelo será descrito no módulo de equacionamento da geometria da imagem.

## 5. MÓDULO 2 - AQUISIÇÃO DE CCT

O módulo é responsável pela transferência dos registros de imagem da CCT para o arquivo de imagem do sistema, residente em disco. Os dados auxiliares, contidos na CCT, são também copiados para serem incluídos na CCT de saída. Os procedimentos do módulo estão dirigidos para o pedido do usuá

rio, o qual pode constar de uma única cena corrigida (em 1 ou mais bandas) ou da geração de um mosaico. Neste último caso são necessárias duas cenas para gerar o produto padrão (1º x 1,5º na projeção UTM).

As fitas de entrada estão disponíveis no formato BIP2 (Bandas intercaladas por pares de pixel) e são geradas pela Estação de Processamento do INPE. As bandas desejadas são então copiadas no arquivo de imagens, em disco, no formato BSQ (Bandas Sequenciais): cada banda ocupa um arquivo de imagem. Após o processo de carga de imagem em disco, a imagem é corrigida das variações do comprimento da linha e das distorções radiométricas inerentes ao sensor. A correção do comprimento de linha (cada varredura tem um comprimento de linha em pixels) é basicamente uma interpolação unidimensional, fixando o comprimento da linha num determinado valor nominal.

Para os efeitos inerentes ao sensor, existem diferentes modelos que corrigem as diferenças radiométricas observadas nas imagens. O mais comum é a equalização linear: é definido um ganho e *um ajuste* a ser aplicado a cada varredura do sensor (Kumar and Cavalcanti, 1977). Métodos mais sofisticados utilizam aproximação probabilística (Barron, 1983).

#### 6. MÓDULO 3 - BIBLIOTECA DE PONTOS DE CONTROLE

Um ponto de controle é uma feição física detetável na cena, cuja localização é precisamente conhecida (Bernstein, 1976). Como exemplo de pontos de controle típicos temos: aeroportos, cruzamento de estradas, encontro terra-água e feições geológicas. O uso de pontos de controle é muito importante no processo de correção geométrica, pois são estes pontos que fornecem referências absolutas para o refinamento das equações que descrevem a geometria da imagem.

Para tornar o processo de correção de imagem mais organizado e eficiente, é necessário que os pontos de controle de determinada imagem sejam fácil e rapidamente obtidos. Com esta finalidade, contrói-se uma biblioteca que contém pontos de controle armazenados *como* registros. Cada registro contém informações sobre o ponto, bem como uma janela de imagem em torno do ponto ("chip"). As informações consistem da identificação do ponto, latitude, longitude e altitude, origem e tipo, e o mérito do ponto para avaliação de seu desempenho. A janela de imagem é uma matriz de 32 linhas por 32 colunas contendo o ponto (Niblack, 1981).

O módulo abrange um conjunto de procedimentos que permite a criação, gerenciamento, manutenção e visualização, divididos em 4 submódulos: a) entrada e atualização, b) recuperação do ponto, c) exclusão, d) listagem.

O submódulo de entrada e atualização permite a identificação e inserção de pontos de controle para uma determinada região da biblioteca, e atualiza os possíveis pontos existentes.

Inicialmente identificam-se diversos possíveis pontos de controle, por meio de cartas e transparências; em seguida estes pontos são localizados numa imagem de referência, utilizando-se um modelo geométrico aproximado (baseado apenas nos dados intrínsecos ao satélite). Isto fornece uma localização precisa numa unidade visualizadora. A partir de um modelo refinado de correção geométrica, baseado nos dados de satélite e nos pontos de controle localizados, são determinados, e então deletados os pontos mal identificados. Os pontos remanescentes serão checados e selecionados aque

les que são facilmente distinguíveis do fundo, para permitir localização automática do ponto tão precisamente quanto possível. Finalmente os pontos selecionados são inseridos na biblioteca, juntamente com as informações relativas ao ponto. O submódulo de entrada e atualização é responsável ainda por geração de pontos de controle suplementares. Tais pontos são obtidos diretamente da imagem digital, visando uma melhor distribuição de pontos sobre a cena LANDSAT.

O submódulo de recuperação de pontos de controle é utilizado quando a imagem a ser corrigida *dá entrada* no sistema e os pontos de controle existentes sobre a cena têm de ser recuperados a fim de se determinar as correções a serem aplicadas à imagem original. São utilizados métodos de correlação automática, a fim de se obter o par linha-pixel, na imagem a ser corrigida, da de determinado ponto da biblioteca.

O submódulo de exclusão é responsável pela deleção de um ou mais pontos de controle. O critério de exclusão é baseado no mérito acumulado do ponto, o qual mede o desempenho deste ponto.

O submódulo listagem é utilizado quando se deseja um relatório sobre determinado conjunto de ponto de controle.

#### 7. MÓDULO 4 - EQUACIONAMENTO GEOMÉTRICO DA IMAGEM

O objetivo do módulo é a construção de equações que relacionem o ponto na imagem com seu correspondente na Terra, a partir de parâmetros que tenham significado físico real. Estes parâmetros são : posição do satélite (dados de efemérides), atitude da plataforma ("roll", "pitch" e "yaw"), e o elipsóide de referência e o modelo gerado é denominado de paramétrico. O modelo matemático relaciona a linha de visada do satélite (relativa a um sistema de referência centrada no satélite e obtida a partir do par linha - pixel) com a correspondente visada num sistema de referência inercial (equações de colinearidade). Uma completa discussão do problema pode ser obtida em Mikhail e Paderes (1983).

O módulo opera em três fases: na primeira parametriza-se os dados de atitude em função do tempo e obtém-se um modelo de correção aproximado; na segunda, pontos de controle são utilizados para refinar o modelo e gerar um *modelo que melhor se aproxime da situação física real*; na terceira constrói-se a matriz de correção contendo os desvios a serem aplicados aos pontos de uma grade regular na imagem ("break-points").

Na primeira fase os parâmetros que definem a atitude são descritos como uma função temporal, geralmente um polinômio do terceiro grau. A partir do conjunto inicial de 12 parâmetros, obtém-se a primeira versão do modelo como descrito. Determina-se a orientação entre o sistema centrado no satélite e um sistema de referência inercial (equações de colinearidade); calcula-se as coordenadas do ponto de interseção da visada com o elipsóide, no sistema de referência inercial; transformam-se as coordenadas do sistema inercial para o sistema geocêntrico de Greenwich; e finalmente determinam-se as coordenadas geodésicas do ponto (latitude e longitude) e transformam-se tais coordenadas em plano-retangular na projeção desejada.

Para refinar o modelo, utilizam-se pontos de controle existentes sobre a cena para estimar os parâmetros de atitude com maior precisão. Os dois

métodos mais comuns de determinação destes parâmetros são o método dos mínimos quadrados e o de filtragem estocástica. No caso dos mínimos quadrados, um polinômio é ajustado para um conjunto de pontos de controle, e o resíduo obtido para cada um destes pontos é utilizado para determinar os mal localizados. Num segundo passo os pontos "ruins" são omitidos. Este é um procedimento simples, mas só se consegue um bom resultado quando se dispõe de um grande número de pontos de controle. No caso da filtragem estocástica (Caron and Simon, 1975), um filtro de Kalman é utilizado para atualizar a estimativa inicial dos parâmetros de atitude. Os componentes do vetor de estado são os 12 coeficientes do polinômio de 3º grau descrito anteriormente. O estimador sequencial necessita de menos pontos de controle que o de mínimos quadrados (Rifman et Alli, 1979).

Após o processo de refinamento, cria-se a matriz de correção que cobre toda a imagem de saída. Para cada elemento são calculados desvios, que dependem da projeção, escala e tamanho do pixel da imagem de saída. A matriz de correção é utilizada no próximo módulo: reamostragem.

### 8 - MÓDULO 5 - REAMOSTRAGEM

O procedimento de reamostragem impõe as correções da matriz para todos os pixels da imagem de saída.

Os elementos do espaço de saída são mapeados no espaço de entrada, e os níveis de cinza são calculados por meio de interpolação. Este processo consome bastante tempo, e sua implementação é otimizada em função do hardware disponível.

O mapeamento de um ponto é realizado a partir da grade regular de pontos derivada do módulo geometria da imagem: Um ponto no espaço-saída é localizado por interpolação bilinear dos desvios dos 4 pontos mais próximos da grade regular.

Existem diversos métodos disponíveis para o processo de interpolação, como vizinho mais próximo e convolução cúbica. Vizinho mais próximo é uma função que simplesmente localiza na imagem de entrada o ponto mais próximo da correspondente na imagem de saída e assinala neste o mesmo nível de cinza do primeiro.

Na convolução cúbica os 16 vizinhos mais próximos são utilizados para determinação dos níveis de cinza dos pixels de saída. A imagem de entrada tem um tamanho padrão de 3240 pixels por 2352 linhas, e a imagem de saída terá um tamanho de 4096 pixels por 4096 linhas, contendo a imagem de entrada com uma orientação fixa de 90° em relação ao Norte Geográfico. Devido às restrições de memória, a imagem de saída é processada em faixas de 512 pixels.

### 9 - MÓDULO 6 - MOSAICO

Este módulo é responsável pela combinação de duas imagens corrigidas na grade padrão UTM, cobrindo 1.5 x 1.0 graus. Como o INPE é o instituto brasileiro que recebe os dados referentes ao sistema LANDSAT, os centros das cenas podem ser ajustados de modo a se utilizar apenas 2 cenas para a confecção do mosaico UTM. Inicialmente aplica-se uma equalização de histograma para correção das cenas.

Aplicam-se então técnicas de registro para determinação da região de superposição entre as duas imagens *que fornece referência para o processo de edição. Este processo consiste na determinação de pontos de corte que indicam onde a linha de uma imagem começa e a outra termina.*

Estes pontos são escolhidos de modo a minimizar as diferenças radiométricas entre as imagens (Milgram, 1975).

#### 10. MÓDULO 7 - GERAÇÃO DE CCT DE SAÍDA

O objetivo deste módulo consiste na geração da fita compatível com computador (CCT). O formato da CCT segue as recomendações do LANDSAT Technical Working Group (LTWG) de tal forma que a fita de saída está no formato de superestrutura. Este formato permite a geração de imagens nos formatos de banda sequencial (BSQ) ou de bandas intercaladas por linhas (BIL).

A CCT conterá um cabeçalho com todas as informações necessárias para extração dos dados.

#### 11. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema está sendo desenvolvido em FORTRAN 77, num computador VAX 11/780, o qual trabalha sob o sistema operacional VMS. Os periféricos consistem de um sistema de "display" de imagem COMTAL VISION ONE/20 e 4 discos magnéticos totalizando 168 Mbytes de memória. Alguns códigos da reamostragem estão sendo escritos em linguagem MACRO Assembler para melhor performance do sistema. Um processador de matrizes (Array Processor) está sendo esperado para o início do próximo ano, para ser integrado ao sistema.

Os autores gostariam de agradecer ao Dr. Nelson D. A. Mascarenhas pela assessoria e orientação sobre os problemas de correção geométrica. Somos gratos, ainda, aos Srs. Sérgio de Paula Pereira e José Luiz de Barros Aguiar pelas proveitosas sugestões e discussões, e ao Sr. Guaraci J. Erthal, pela sua experiência em localização automática de pontos de controle.

#### 12. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANON, G. Correction of striping in LANDSAT images. In 6º Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, São José dos Campos, SPaulo, 1983.

BECK, L.; PERKINS, T. A survey of software engineering practice: tools, methods and results. IEEE Transactions on Software Engineering. 9(5): 541-561, Sept. 1983.

BERNSTEIN, R. Digital image processing of the earth observation sensor data. IBM Journal of Research and Development, 20(1): 40-57, Jan. 1976.

CARON, R.; SIMON, K. Attitude time-series estimator for rectification of spaceborne imagery. Journal of Spacecraft, 12(1): 27-32, Jan. 1975.

FRIEDMAN, D.; FRIEDEL, J.P.; MAGNUSSEN, K.L.; KWOK, R.; RICHARDSON, J. Multiple scene precision rectification of spaceborne imagery with very few ground control points. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 49(12): 1657-1667, Oct. 1983.

- KUMAR, R.; CAVALCANTI, L.A. Radiometric correction of LANDSAT data. INPE, São José dos Campos, 1977. (INPE-1149/PRE-107).
- MIKHAIL, E.; PADERES, F. Simulation aspects in the study of rectification of satellite scanner data. In: NASA Symposium on Mathematical Pattern Recognition and Image Analysis, Houston, 1983. Proceedings. Houston, NASA, Johnson Space Centre, 1983, p. 415-83.
- MILGRAM, D.L. Computer methods for creating photomosaics. IEEE Transaction on Computers 24(11): 1113-1119, Nov. 1983.
- NIBLACK, W. The control point library building system. Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 47(12): 1709-1715, Dec. 1981.
- RIFMAN, R.; MONUKI, A.; SHORTWELL, C. Multi-sensor LANDSAT MSS registration In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 13 Ann Arbor, MI, ERIM, 1979, p. 245-258.
- TSUCHIYA, K.; YAMARRA, Y. Investigation attitude determination program for LANDSAT image processing. In: Canadian Symposium on Remote Sensing 7, Winnipeg, 1981. Proceedings. Ottawa, CCRS, 1981.