

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5378-TDI/473

SIMULAÇÃO DE IMAGENS DE SENSORES COM LARGO CAMPO DE
VISADA A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORES COM
MENOR CAMPO DE VISADA – O CASO SSR/TM

Ailton Cruz dos Santos

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Gerald Jean Francis Banon, aprovada em
fevereiro de 1992.

INPE
São José dos Campos
Março de 1992

528.711.7

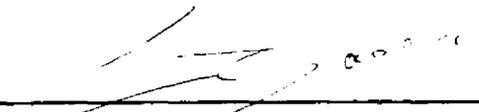
SANTOS, A.C. dos

Simulação de imagens de sensores com
largo campo de visada a partir de imagens
de sensores com menor campo de visada: o
caso SSR/TM. / A.C. dos Santos. -- São
José dos Campos: INPE, 1992. 142p. --
(INPE-5378-TDI/473)

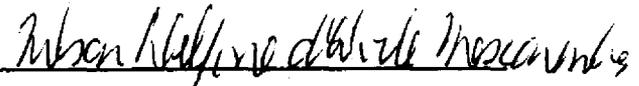
1. Sensor. 2. Processamento de imagens.
3. Algoritmo. 4. Título

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

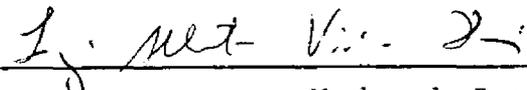
Dr. Gerald Jean Francis Banon


Orientador/Presidente

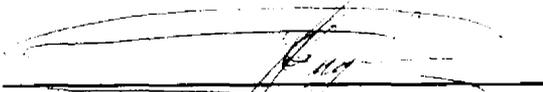
Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas


Membro da Banca

Dr. Luiz Alberto Vieira Dias


Membro da Banca

Dr. João Bosco Lugnani


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Ailton Cruz dos Santos

São José dos Campos, 03 de fevereiro de 1992

Aos meus pais
por toda realização,
consequência
de renúncia, doação, gratuidade,...
de Amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Gerald Jean Francis Banon pela orientação, atenção permanente e pelo exemplo diante de sua conduta como pesquisador.

Ao Dr. L. A. Vieira Dias pelo incentivo, pela sua luz como ponto de partida.

Ao Dr. Nelson D. A. Mascarenhas e ao Dr. João Bosco Lugnani por se disporem a participar da banca examinadora.

Ao Dr. A. R. Formaggio, a Júlio D'Alge, Valdemir Carrara e G. K. Rayalu, por fazerem valer seus conhecimentos e experiências com disposição, com presteza e desprendimento; e, a P. R. Bezerra, P. R. M. Serra, Sherry, Dr. Iosio e Dra. Evelyn Novo, pelas iluminadoras discussões sobre este trabalho.

A Adélio G. A., Márcia R. S., aos funcionários do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais (LTID) e às demais pessoas que trouxeram incentivo com sua colaboração.

Aos colegas do Departamento de Matemática Aplicada da Universidade Federal de Alagoas; em particular, a Washington G. Bonfim, pelo decisivo impulso e sua positividade, e a Jaime Evaristo, pela atenção e apoio oportunos.

RESUMO

Com este trabalho pretende-se a simulação da imagem bruta obtida por um sensor orbital com largo campo de visada sob um modelo aproximado para o Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR) da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB), a partir de um conjunto de imagens obtidas por um sensor com menor campo de visada. No caso, usou-se um conjunto de imagens obtidas pelo sensor TM/Landsat, construídas com controle geométrico em uma projeção cartográfica e corrigidas com pontos de controle. Utilizando-se de um modelo da superfície terrestre, são determinados os pontos na superfície correspondentes à projeção do centro de cada detetor (em coordenadas geodésicas - latitude e longitude). Os valores dos pixels da imagem com largo campo de visada são calculados a partir dos valores dos pixels da imagem TM vizinhos a estes pontos. Este cálculo é feito empregando-se um filtro de simulação adaptativo. Os resultados mostram-se satisfatórios considerando-se o aspecto geométrico sob o qual foi desenvolvido o presente trabalho.

IMAGES SIMULATION OF SENSORS WITH LARGE FIELD OF VIEW
FROM IMAGES OF SENSORS WITH LESS FIELD
OF VIEW - THE SSR/TM CASE

ABSTRACT

In this work, the simulation of the raw image obtained by an orbital sensor with large field of view, under an approximate model for the SSR (Remote Sensing Satellite) of MECB (Brazilian Complete Spatial Mission) from a set of images obtained by a sensor with smaller field of view is presented. Actually, a set of images obtained by the LANDSAT/TM (Thematic Mapper) constructed under geometric control in a cartographic projection and corrected by control points was used. Using an earth surface model, the points within the surface corresponding to each detector center projection (in geodetic coordinates - latitude and longitude) are determined. The values of the pixels of the image with large field of view are calculated from the pixels of the TM image in the neighbourhood of these points. This calculation is done using an adaptive simulation filter. The results appear to be satisfactory from the geometric point of view adopted in this work.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xvii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
<u>CAPÍTULO 2 - MODELO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE.....</u>	<u>5</u>
2.1 - A Superfície de Referência.....	5
2.2 - Coordenadas Geodésicas.....	7
2.3 - Projeção Cartográfica.....	9
<u>CAPÍTULO 3 - O SISTEMA INERCIAL.....</u>	<u>13</u>
<u>CAPÍTULO 4 - O MODELO DO SENSOR ORBITAL COM LARGO CAMPO</u> <u>DE VISADA.....</u>	<u>19</u>
4.1 - O satélite.....	19
4.1.1 - O posicionamento do satélite.....	20
4.1.1.1 - O Sistema S_{OR}	20
4.1.1.2 - Equação do movimento do satélite.....	23
4.2 - A câmera.....	25
4.2.1 - Orientação e geometria da câmera.....	25
4.2.1.1 - O Sistema S_{ST}	25
4.2.1.2 - O Vetor de Visada.....	29
4.2.2 - Comportamento espacial câmera.....	31
4.2.2.1 - Fundamentos.....	31
4.2.2.2 - Resolução espacial - Relação entre IFOV e EIFOV.....	35
4.2.3 - Característica espectral câmera.....	40
<u>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DA IMAGEM BRUTA ADQUIRIDA PELO</u> <u>SENSOR COM LARGO CAMPO DE VISADA.....</u>	<u>41</u>
5.1 - O Filtro de Simulação.....	41
5.1.1 - Fundamentos.....	41

5.1.2 - Síntese do Filtro de Simulação.....	44
5.2 - Modelo radiométrico da superfície imageada.....	53
5.3 - Aquisição da imagem bruta pelo sensor com largo campo de visada.....	58
<u>CAPÍTULO 6 - IMPLEMENTAÇÃO.....</u>	<u>65</u>
6.1 - Preparação das imagens de entrada e do arquivo de simulação.....	67
6.2 - Obtenção da imagem simulada.....	71
<u>CAPÍTULO 7 - EXPERIMENTAÇÃO, RESULTADOS E COMENTÁRIOS....</u>	<u>75</u>
7.1 - Simulação de uma porção fora do nadir da imagem SSR bruta.....	80
7.2 - Simulação de uma porção ao nadir da imagem SSR bruta.....	86
7.3 - Considerações de ordem geométrica e radiométrica sobre as imagens simuladas.....	87
7.4 - Características das imagens simuladas no contexto do Sensoriamento Remoto.....	90
<u>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</u>	<u>93</u>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97
APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA ALTITUDE DO SATÉLITE DADO O PONTO SUB-SATÉLITE.....	103
APÊNDICE B - RELAÇÃO DO VETOR k_{ST} COM A POSIÇÃO DO SATÉLITE E O PONTO SUB-SATÉLITE EM UM DETERMINADO INSTANTE.....	107
APÊNDICE C - DETERMINAÇÃO DO PAR ($IFOV_1, IFOV_2$) RELATIVO À PROJEÇÃO DO DETETOR C SOBRE A SUPERFÍCIE TERRESTRE.....	111
APÊNDICE D - O SISTEMA DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA UTM (UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR).....	115
APÊNDICE E - DIAGRAMAS DE FLUXO DE DADOS.....	119

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - O sistema S_{GG}	5
2.2 - Coordenadas geodésicas.....	7
2.3 - Relação entre P , X e $n(X)$	9
3.1 - Relação entre os sistemas S_{GG} e S_{IN}	14
4.1 - O sistema S_{OR}	21
4.2 - Movimento do satélite no plano de sua órbita.....	23
4.3 - Disposição do sensor em relação à superfície imageada.....	26
4.4 - O vetor de visada.....	30
5.1 - Gráfico de h_{w1}	45
5.2 - Gráfico de f_i	50
5.3 - Determinação do ponto $Q(1, c)$ no instante $t_{(1, c)}$	61
6.1 - Diagrama de fluxo de dados.....	66
6.2 - Orientação do sistema de coordenadas cartesianas ligado ao plano da imagem TM em relação ao Sistema UTM.....	69
6.3 - Preparação da imagem g_k	69
6.4 - Possíveis situações durante a aplicação da máscara $[h_f(1, c)]$ na vizinhança de (i, j)	73
7.1 - Esquema de obtenção dos trechos da imagem TM.....	78
7.2 - Localização da porção fora do nadir gerada, em relação à imagem SSR completa.....	80
7.3 - Imagem simulada sr1_1.....	82
7.4 - Imagem simulada sr1_2.....	83
7.5 - Imagem simulada sr1, composição colorida.....	84
7.6 - Imagem simulada sr2_2.....	85
7.7 - Localização da porção ao nadir gerada, em relação à imagem SSR completa.....	86
7.8 - Imagem simulada sr3_1.....	87
7.9 - Imagens sr1_1 e sr3_1 superpostas.....	89
A.1 - O plano $\pi(\lambda_{PIN})$ e o sistema S_π	103

A.2 - Representação de P e Q_s no sistema S_{π}	105
C.1 - Geometria de aquisição do pixel (l, c) da imagem g', em um determinado instante t.....	112
C.2 - Projeção do detetor c sobre o elipsóide de referência.....	112
D.1 - Uma zona de projeção UTM.....	115
D.2 - Zonas de projeção UTM no Brasil.....	116
D.3 - Zona de projeção UTM sobre uma quadricula.....	117
E.1 - DFD do módulo de preparação das imagens TM e do arquivo de simulação.....	120
E.2 - DFD do módulo de obtenção da imagem simulada.....	121
E.3 - DFD do módulo de abertura ou atualização dos arquivos X e Y.....	122
E.4 - DFD do módulo de atualização dos arquivos X e Y para cada linha da imagem de saída.....	123
E.5 - DFD do módulo de obtenção dos elementos dos arquivos X e Y para cada coluna, dada uma linha da imagem de saída.....	124
E.6 - DFD do módulo de determinação do ponto visado da superfície terrestre em dado instante.....	125

LISTA DE TABELAS

Pág.

7.1 - Trechos da imagem TM banda 3 e respectivas coordenadas (i_0, j_0)	78
7.2 - Trechos da imagem TM banda 4 e respectivas coordenadas (i_0, j_0)	79

CAPÍTULO 1INTRODUÇÃO

Em Sensoriamento Remoto, não raras vezes precisa-se da utilização de dados com resoluções espaciais diferentes das sob que foram originalmente adquiridos (onde, em primeira análise, a resolução espacial corresponde à área do elemento de cena associado a um dado elemento de imagem, que o representa). Isto acontece em função dos critérios para escolha de dados que sejam adequados a uma determinada atividade. Em muitos casos, surge a necessidade da degradação de uma resolução espacial mais fina (isto é, alta resolução) com a finalidade de simulação de uma resolução espacial mais grosseira (isto é, baixa resolução).

Sensores imageadores com altas resoluções e propósitos de observação da Terra foram desenvolvidos nas últimas décadas – cronologicamente, o MSS (Multispectral Scanner) e o TM (Thematic Mapper) do satélite da série Landsat e HRV (Haute Resolution Visible) do satélite SPOT, com resoluções respectivamente de 80m (MSS), 30m (TM) e, 20m e 10m (SPOT, respectivamente nos modos multiespectral e pancromático) – mas, recentemente, a aplicação de dados do sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) da NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), com resolução que varia entre 1,1Km e 4Km, para monitoramento de vegetação, tem dado uma indicação da utilidade e do conteúdo de informação que podem existir em dados de satélites com resoluções mais grosseiras (Justice *et al.*, 1989).

O Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR) da Missão Espacial Completa Brasileira (MECB) está projetado para atender necessidades brasileiras fornecendo informações sobre tipo, extensão e estado da atividade biológica

(Santana et al., 1988) a uma resolução espacial de 212 metros (Santana et al., 1989), atendendo a um requisito de repetitividade de observações de 4 dias, tendo como função primordial o monitoramento ecológico regional (Santana et al., 1988). É um sensor com largo campo de visada – com FOV (Field Of View) em torno de 60 graus – cobrindo uma faixa nominal de 732 Km da superfície da Terra (Galvão, 1990). Com o SSR, portanto, a proposta é dotar os usuários de dados de sensoriamento remoto de uma alternativa, relativamente à aquisição de imagens com resolução espacial intermediária e características que permitam o estudo de fenômenos dinâmicos em escala regional.

É justificado o interesse pelo largo campo de visada, pois as dimensões na superfície terrestre às quais correspondem os dados de sensoriamento remoto têm papel fundamental, ao ponto de ser desejável, em certas ocasiões, a execução de mosaicos digitais envolvendo imagens de sensores com pequeno campo de visada (Peterson e Running, 1989).

O presente trabalho envolve o caso de simulação de imagens produzidas por um sensor com largo campo de visada e baixa resolução partindo de imagens produzidas por um sensor com menor campo de visada e maior resolução. Para isso, serão utilizados um modelo aproximado do sensor com largo campo de visada e um modelo da superfície terrestre (conforme constam nos Capítulos de 2 a 4, fundamentação e descrição desses modelos).

É pretendida a simulação da imagem bruta obtida por um sensor orbital com largo campo de visada, sob um modelo baseado no SSR/MECB, a partir de um conjunto de imagens produzidas pelo sensor TM/Landsat construídas com controle geométrico através de dados do sistema imageador (Serra, 1987). Estas imagens devem ser ainda corrigidas com

pontos de controle a fim de minimizar o erro de posicionamento (D'Alge, 1987).

Uma aproximação cinemática é utilizada quanto ao posicionamento do satélite que comporta o sensor, para efeito de determinação de uma órbita circular e livre de perturbações na atitude. O modelo do sensor, dentre outras atribuições, permite uma modelagem da projeção de cada detetor sobre a superfície terrestre em função da sua posição relativamente ao nadir, constituindo-se numa ferramenta importante na simulação fora deste. Quanto ao comportamento espacial, é empregado um modelo indicado para representação da atual geração de imageadores orbitais, que é de um filtro linear com Função de Espalhamento Pontual (FEP) separável e gaussiana (Fonseca, 1988).

Considerando-se os modelos do sensor e da superfície terrestre, conforme consta no Capítulo 5, estes permitem associar a um pixel de coordenadas (l, c) da imagem bruta, g' , do sensor com largo campo de visada, o local imageado da superfície terrestre, $Q(\phi, \lambda)$, em coordenadas geodésicas. Desse modo, conhecendo-se $Q(\phi, \lambda)$, torna-se possível localizar o pixel de coordenadas (i, j) de uma imagem com menor campo de visada, g_k , construída com controle geométrico numa projeção cartográfica e corrigida com pontos de controle. Isto ocorre porque, correspondente a g_k , existe uma transformação $T_k = T_{k2} \circ T_{k1}$, onde $T_{k1}(\phi, \lambda) = (x_c, y_c)$ e $T_{k2}(x_c, y_c) = (i, j)$, sendo (x_c, y_c) o par de coordenadas na projeção cartográfica adotada para a construção de g_k , associado ao (ϕ, λ) que localiza o ponto visado da superfície terrestre.

Então, um filtro de simulação com FEP variável $h_f(l, c)$, com suporte finito, é gerado de tal forma a adaptar-se ao comportamento do sensor referente à posição do pixel de coordenadas (l, c) , de modo que cada pixel

$(\mathbf{x}_1, g'(\mathbf{x}_1))$, $\mathbf{x}_1 = (l, c)$, pode ser determinado através da vizinhança do pixel $(\mathbf{x}_2, g_k(\mathbf{x}_2))$, $\mathbf{x}_2 = (i, j)$, tal que $g'(\mathbf{x}_1) = (g_k)_f(\mathbf{x}_2)$, sendo $(g_k)_f(\mathbf{x}_2) = (h_F(\mathbf{x}_1) * g_k)(\mathbf{x}_2)$, onde $*$ é uma operação de convolução.

Sobre a determinação de $h_F(l, c)$, é considerada uma alternativa julgada ser apropriada para o problema acima exposto, onde é mais interessante a geração de filtros digitais cujo projeto facilite uma implementação automática. É empregada aqui, exeto pela generalização do filtro elementar para um tamanho N , a abordagem do trabalho de Banon (1990). Este utiliza o encadeamento de filtros lineares (chamados de filtros elementares), sustentando-se na hipótese de filtros separáveis e gaussianos, no "Teorema do Limite Central" (um resultado clássico em Probabilidade), reconhecido como uma propriedade assintótica do produto de convolução, e na propriedade de fechamento da convolução em relação às funções gaussianas.

No Capítulo 6, é discutida a implementação, apresentando-se o desenvolvimento lógico que foi aplicado aos programas. Trata-se da geração de imagens apenas como instrumentos de avaliação da simulação. Os resultados são descritos e comentados no Capítulo 7. Os comentários estendem-se sobre as características geométricas e circunstâncias do imageamento que envolvem também aspectos radiométricos. Estes últimos são inclusive motivos que permeiam o Capítulo 8 sobre as conclusões e recomendações para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

O MODELO DA SUPERFÍCIE TERRESTRE

2.1 - A SUPERFÍCIE DE REFERÊNCIA

Considere-se inicialmente o sistema de coordenadas cartesianas $S_{GG} = \{i_{GG}, j_{GG}, k_{GG}\}$, com origem no ponto O , ligado à superfície terrestre da seguinte maneira (Fig. 2.1):

- a) O ponto O coincide com o centro de massa da Terra;
- b) $i_{GG} = \frac{\vec{OG}}{\|\vec{OG}\|}$, sendo G o ponto de interseção do meridiano de Greenwich com o Equador;
- c) $k_{GG} = \frac{\vec{ON}}{\|\vec{ON}\|}$, sendo N o ponto de interseção do eixo de rotação da Terra com a sua superfície no polo norte;
- d) j_{GG} é o terceiro vetor tal que o sistema S_{GG} - que corresponde ao Sistema Geocêntrico de Greenwich médio (Pilchowski et al., 1981, Seção 8.2.1.2) - seja ortonormal, da mão direita.

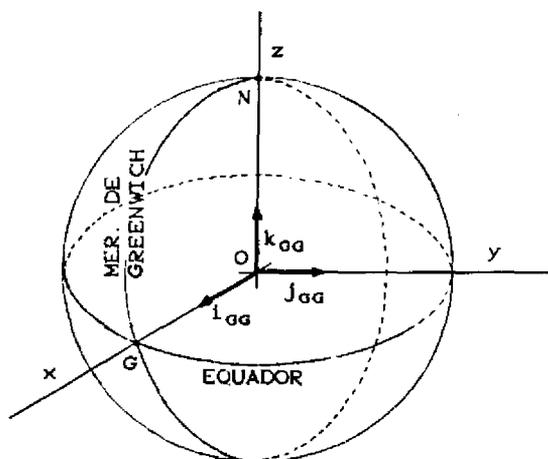


Fig. 2.1 - O sistema S_{GG} .

A um dado ponto M , ou vetor \mathbf{v} , em S_{GG} pode-se associar uma tripla $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$, de coordenadas cartesianas, de modo que $\mathbf{v} = \overrightarrow{OM} = xi_{GG} + yj_{GG} + zk_{GG}$. Toma-se então (x, y, z) como o vetor de coordenadas do ponto M , ou vetor \mathbf{v} , no sistema S_{GG} e representa-se por $M(x, y, z)$, ou $\mathbf{v}(x, y, z)$, em S_{GG} .

Seja a função $s: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, definida por:

$$(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \longmapsto s(x, y, z) = k \in \mathbb{R}; \quad (2.1)$$

$$k = (1 - e^2) [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] + (z - z_0)^2 + a^2(1 - e^2),$$

sendo $a, e \in \mathbb{R}$ e $(x_0, y_0, z_0) \in \mathbb{R}^3$.

A superfície terrestre, ou uma determinada região desta, pode ser modelada pela superfície formada por todos os pontos $X(x, y, z)$ em S_{GG} tais que

$$s(x, y, z) = 0.$$

É uma superfície elipsoidal com centro em (x_0, y_0, z_0) , cujo semi-eixo maior é a e a excentricidade é $e = [(a^2 - b^2)/a^2]^{1/2}$, onde b é o semi-eixo menor. É o modelo mais utilizado para representação da superfície terrestre, por ser mais próximo da forma real da Terra e tratável matematicamente. O elipsóide posicionado em relação à Terra, é referido como *datum* planimétrico, ou chamado de *Superfície de Referência*. E, como tal, existe um elipsóide que melhor se adapta a uma determinada região, variando-se os parâmetros a, e e (x_0, y_0, z_0) .

Observação:

. Neste trabalho será tomado $(x_0, y_0, z_0) = (0, 0, 0)$.

2.2 - COORDENADAS GEODÉSICAS

Sobre a superfície de referência, pode-se estabelecer um outro sistema de coordenadas, que faz associar a cada ponto X desta superfície, uma dupla $(\phi, \lambda) \in [-\pi/2, \pi/2] \times [-\pi, \pi]$ de *Coordenadas Geodésicas*, dado o sistema S_{GG} .

Seja R_c o raio de curvatura da seção meridiana da superfície de referência em X (Fig. 2.2), dado pelo segmento \overline{XD} . O ângulo ϕ , entre \overline{XD} e a projeção de \overline{XD} sobre o plano equatorial (o plano determinado pelos vetores i_{GG} e j_{GG}), é a *latitude* de X e o ângulo λ , entre a projeção de \overline{XD} sobre o plano xy e o eixo x (suporte de i_{GG}), é a *longitude* do ponto X .

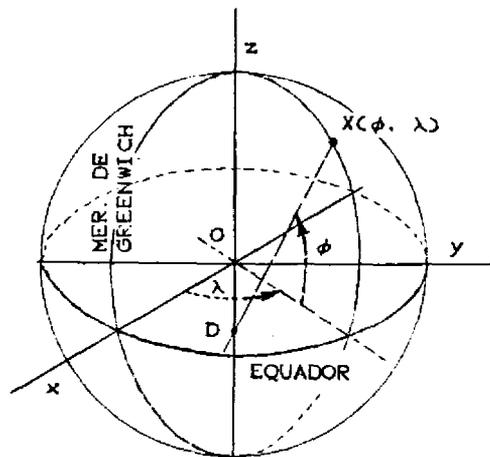


Fig. 2.2 - Coordenadas Geodésicas.

Finalmente, a relação

$$X(x, y, z) \text{ em } S_{GG} \longleftrightarrow X(\phi, \lambda) \text{ dado } S_{GG} \quad (2.2)$$

é representada pelas equações (Richardus e Adler, 1972):

$$\phi = \arctg[z/((x^2 - y^2)^{1/2}(1 - e^2))], \quad (2.3a)$$

$$\lambda = \arctg(y/x) \quad (2.3b)$$

e, inversamente,

$$x = (Rc) \cos\phi \cos\lambda, \quad (2.4a)$$

$$y = (Rc) \cos\phi \sin\lambda \quad (2.4b)$$

$$e \quad z = (Rc) (1 - e^2) \sin\phi, \quad (2.4c)$$

onde

$$Rc = a/(1 - e^2 \sin^2\phi)^{1/2}. \quad (2.4d)$$

Um ponto qualquer P em S_{CG} também pode ser representado em coordenadas geodésicas, considerando-se que todo ponto do espaço está a uma determinada altitude h em relação à superfície de referência. Isto é, existe um ponto X que é o pé da normal à superfície de referência que passa por P, onde

$$h = \|\overrightarrow{XP}\|. \quad (2.5)$$

Seja $n(X)$ o vetor unitário normal à superfície de referência no ponto X, determinado por:

$$n(X) = \frac{\overrightarrow{\nabla s(X)}}{\|\overrightarrow{\nabla s(X)}\|} \quad (2.6a)$$

onde $\overrightarrow{\nabla s(X)}$ é o vetor gradiente da superfície de referência em X. É um vetor normal a esta superfície definido por (Williamson et al., 1976):

$$\overrightarrow{\nabla s(X)} (\partial s/\partial x(X), \partial s/\partial y(X), \partial s/\partial z(X)) \text{ em } S_{CG}. \quad (2.6b)$$

Então, para todo ponto P em S do espaço (Fig. 2.3):

$$\overrightarrow{OP} = \overrightarrow{OX} + hn(X),$$

onde h verifica (2.5).

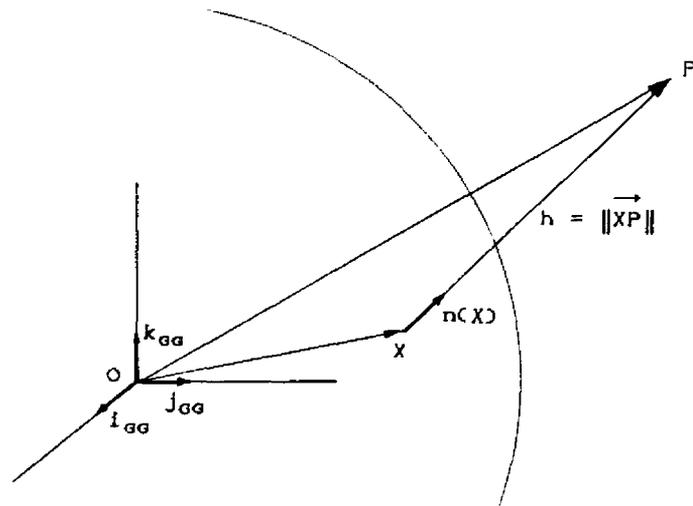


Fig. 2.3 - Relação entre P, X e $n(X)$.

Conseqüentemente, o ponto P pode ser representado por $P(\phi, \lambda, h)$, visto que está a uma distância h do ponto $X(\phi, \lambda)$ dado S_{GG} . Observa-se que $X(\phi, \lambda) = X(\phi, \lambda, 0)$, para todo ponto X da superfície de referência.

Em particular, conhecendo-se a distância de P à origem O do sistema S_{GG} , ou seja, se $\|\vec{OP}\| = R$, h pode ser determinada em função de ϕ , R e dos parâmetros da superfície de referência, a e e (conforme Apêndice A):

$$h = (R^2 - A^2)^{1/2} - B, \quad (2.7)$$

onde:

$$A = ae^2 \sin(2\phi) / 2(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \text{ e}$$

$$B = a(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}.$$

2.3 - PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA

A superfície terrestre também pode ser representada fazendo-se associar a cada ponto X da superfície de

referência uma dupla de coordenadas num sistema de coordenadas do plano, em uma *Projeção Cartográfica*.

A superfície da Terra é projetada em uma superfície G' desenvolvível (cilíndrica ou cônica), ou em um plano, chamada *superfície de projeção*, que pode estar tangente ou secante à superfície de referência e, em seguida, a superfície G' é planificada.

A determinação das projeções dos pontos da superfície terrestre sobre a superfície G' envolve uma transformação ξ , que representa as características de uma projeção cartográfica e não necessariamente tem cunho geométrico (Snider, 1984). De acordo com os critérios de equidistância, conformidade ou equivalência, ξ pode ser geométrica, ser determinada analiticamente ou através de um processo analítico-geométrico (Richardus e Addler, 1972), de modo a satisfazer o critério escolhido.

A transformação τ da superfície G' num plano E_c é uma transformação geométrica.

Então, aplicando-se a transformação $\sigma = \tau \circ \xi$ sobre a superfície de referência, obtém-se uma região no plano E_c .

Tomando-se em E_c um ponto origem O_{E_c} e dois vetores unitários i_{E_c} e j_{E_c} , determina-se o sistema $S_{E_c} = \{i_{E_c}, j_{E_c}\}$, de modo que este seja ortonormal e anti-horário. Dado um ponto $M \in E_c$, pode-se associar uma dupla $(x_c, y_c) \in \mathbb{R}^2$, de coordenadas cartesianas, tal que

$$\overrightarrow{O_{E_c} M} = x_c i_{E_c} + y_c j_{E_c}.$$

Devido à transformação σ , é promovida uma relação biunívoca (considerando σ invertível) entre os pontos do plano E_c e os pontos da superfície de referência,

modelo da superfície terrestre, isto é,

$$X(\phi, \lambda) \text{ dado } S_{CG} \longleftrightarrow M(x_c, y_c) \text{ em } S_{Ec} \quad (2.8)$$

Esta relação é conhecida através das equações

$$x_c = f_1(\phi, \lambda) \quad (2.9a)$$

e

$$y_c = f_2(\phi, \lambda), \quad (2.9b)$$

que descrevem a transformação σ e dependem da projeção cartográfica adotada, conforme constam em Snider (1984).

Observação:

- . O conjunto de regras atreladas ao uso de uma determinada projeção cartográfica é referido como *sistema de projeção cartográfica*. O sistema adotado pela Cartografia Sistemática Nacional (Lima, 1978) é o *Sistema UTM* que utiliza a projeção cartográfica UTM (Universal Transverse Mercator). Uma descrição dos princípios básicos desse sistema de aceitação universal, surgido em 1947 (Santos, 1989; Oliveira, 1988), é dada no Apêndice D.

CAPÍTULO 3O SISTEMA INERCIAL

A definição de um sistema inercial permitirá a modelagem do movimento de rotação da Terra e do movimento orbital do satélite em torno da Terra.

O sistema inercial comumente utilizado em Astronomia e Astrodinâmica (Escobal, 1965; Heffron e Watson, 1966) (e, conseqüentemente, em problemas ligados aos satélites artificiais) é um sistema de coordenadas cartesianas cuja origem coincide com o centro de massa da Terra, o eixo z coincide com o eixo de rotação terrestre e o eixo x é a reta determinada pela origem do sistema e o equinócio vernal, . O eixo y é o terceiro eixo de modo que o sistema seja orientado pela mão direita.

A utilização desse sistema, levando-se em conta a abordagem proposta neste trabalho, envolve considerações pouco práticas devido às equações relativas ao *Tempo Sideral* (Escobal, 1965; Roy, 1965; Heffron e Watson, 1966) de rotação do Sistema Geocêntrico de Greenwich em relação ao Sistema Inercial. Aqui, pretende-se uma imediata relação do sistema de coordenadas inercial com uma porção conhecida da superfície terrestre.

Conforme Escobal (1965), é permitida a escolha de um particular sistema de coordenadas, podendo muitas vezes significar economia de esforço na resolução de um determinado problema nesta área do conhecimento. No caso de um sistema inercial, é bastante a definição de um *plano fundamental* (o plano equatorial terrestre, por exemplo) e um *eixo principal* (o eixo de rotação da Terra, por exemplo).

Neste trabalho, o sistema inercial será definido, contando-se com um conveniente referencial para o tempo, da maneira seguinte.

Seja o evento: o imageamento de uma porção da superfície terrestre por um sensor orbital, onde, no instante $t = 0s$, é imageado um dado ponto Q_0 .

O sistema inercial aqui definido é o sistema ortonormal, da mão direita, $S_{IN} = \{i_{IN}, j_{IN}, k_{IN}\}$, cuja origem O coincide com o centro de massa da Terra, e os vetores i_{IN} , j_{IN} e k_{IN} , são tais que, no instante $t = 0s$, verificam-se: $i_{IN} = i_{GG}$, $j_{IN} = j_{GG}$ e $k_{IN} = k_{GG}$. O sistema S_{GG} desloca-se em relação a S_{IN} mantendo $k_{IN} = k_{GG}$, a uma velocidade angular ω_2 (rad/s). Portanto, há um ângulo de rotação $\theta_2 = \omega_2 t$, em torno do eixo z (reta suporte de $k_{IN} = k_{GG}$), do sistema S_{GG} em relação ao sistema S_{IN} (Fig. 3.1).

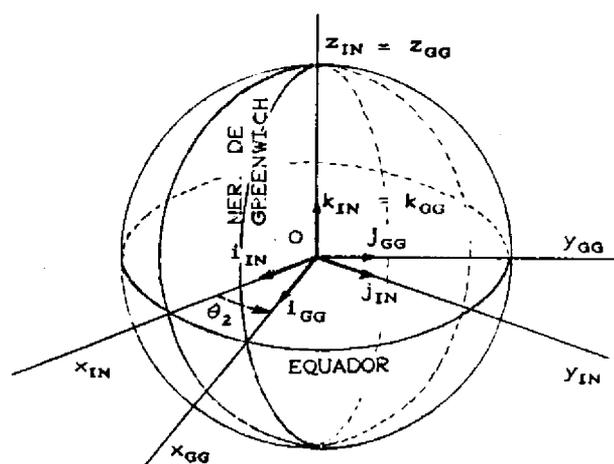


Fig. 3.1 - Relação entre os sistemas S_{GG} e S_{IN} .

Observação:

- Será adotada a seguinte representação matricial (fundamentada na representação adotada por Banon

(1989)). Seja $S = \{i, j, k\}$ um sistema ortonormal, da mão direita, de origem em um ponto O . A um dado ponto $M(x, y, z)$, ou vetor $v(x, y, z)$, em S , associa-se uma matriz coluna $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ (matriz de coordenadas) e denota-se por $\begin{bmatrix} M \end{bmatrix}_S$ ou $\begin{bmatrix} v \end{bmatrix}_S$.

A um sistema $S' = \{v_1, v_2, v_3\}$ com $v_1(x_1, y_1, z_1)$, $v_2(x_2, y_2, z_2)$ e $v_3(x_3, y_3, z_3)$ em S , associa-se a matriz 3×3 , $A_{S'}$, denotada por $\begin{bmatrix} v_1 & v_2 & v_3 \end{bmatrix}_S^T$ ou

$$A_{S'} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$$

($[\cdot]^T$ - matriz transposta) e serve de representação de S' em S .

Em particular, se o sistema S' for ortonormal, a matriz $A_{S'}$ é uma matriz ortogonal e possui a seguinte propriedade: Dado $M(x, y, z)$ em S , $M(x', y', z')$ em S' é determinado por:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A_{S'} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

ou, inversamente:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A_{S'}^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix},$$

verificando-se $A_{S'}^{-1} = A_{S'}^T$.

Pela relação existente entre os sistemas S_{GG} e S_{IN} (Fig. 3.1), os vetores do sistema S_{GG} podem ser expressos em coordenadas no sistema S_{IN} , como: $i_{GG}(\cos\theta_2, \sin\theta_2, 0)$, $j_{GG}(-\sin\theta_2, \cos\theta_2, 0)$ e $k_{GG}(0, 0, 1)$ em S_{IN} , e o sistema S_{GG} , representado em S_{IN} pela matriz A_{SGG} ,

$$A_{SGG} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

cuja inversa é

$$A_{SGG}^{-1} = A_{SGG}^T = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

onde $\theta_2 = \omega_2 t$.

A simetria da superfície de referência em relação ao eixo z , suporte de $k_{GG} (= k_{IN})$, considerando-se a definição do sistema S_{IN} , permite a redefinição desta superfície nesse sistema (e isto será bastante útil nos desenvolvimentos seguintes), ou seja, como o conjunto dos pontos $X(x_{IN}, y_{IN}, z_{IN})$ tais que

$$s(x_{IN}, y_{IN}, z_{IN}) = 0,$$

sendo s a função definida em (2.1). Desse modo, verificam-se em S_{IN} todas as considerações feitas na Seção 2.2 sobre coordenadas geodésicas dado o sistema S_{GG} . Ou seja, verifica-se a relação

$$X(x_{IN}, y_{IN}, z_{IN}) \text{ em } S_{IN} \longleftrightarrow X(\phi_{IN}, \lambda_{IN}) \text{ dado } S_{IN}$$

cujas equações (2.3) e (2.4) ainda são válidas para x_{IN} , y_{IN} , z_{IN} , ϕ_{IN} e λ_{IN} . O vetor unitário normal à superfície

de referência no ponto X , $n(X)$ em S_{IN} , segue a mesma definição dada na equação (2.6), isto é,

$$n(X) = \frac{\vec{\nabla}s(X)}{\|\vec{\nabla}s(X)\|} \quad (3.2a)$$

com

$$\vec{\nabla}s(X) = (\partial s/\partial x(X), \partial s/\partial y(X), \partial s/\partial z(X)) \text{ em } S_{IN}. \quad (3.2b)$$

Um determinado ponto $P(x_{PIN}, y_{PIN}, z_{PIN})$ em S_{IN} a uma altitude h do ponto $X(x_{IN}, y_{IN}, z_{IN})$ em S_{IN} , ou $X(\phi_{IN}, \lambda_{IN})$ dado S_{IN} , da superfície de referência definida em S_{IN} , pode ser representado por $P(\phi_{IN}, \lambda_{IN}, h_{IN})$, dado S_{IN} .

A seguinte propriedade é observada. Sejam o ponto $P(\phi, \lambda, h)$ dado S_{GG} , um ponto fixo em relação ao sistema S_{GG} num determinado instante t , e sua representação $P(\phi_{IN}, \lambda_{IN}, h_{IN})$ dado S_{IN} . Então,

$$\phi_{IN} = \phi, \quad (3.3a)$$

$$\lambda_{IN} = \lambda + \theta_2, \quad \theta_2 = \omega_2 t, \quad (3.3b)$$

$$h_{IN} = h \quad (3.3c)$$

(isto é, a latitude ϕ_{IN} e a altitude h_{IN} independem da rotação entre os sistemas S_{GG} e S_{IN}).

Observa-se que a equação (3.3a) torna válida a equação (2.7) para o cálculo da altitude h , independentemente do sistema em que esteja representada a superfície de referência.

Considerando-se que o valor da longitude é que faz a distinção entre as representações (dado S_{GG} ou dado S_{IN}), os pontos X e P dado S_{IN} serão então representados por $X(\phi, \lambda_{IN})$ e $P(\phi, \lambda_{IN}, h)$ dado S_{IN} respectivamente.

CAPÍTULO 4MODELO DO SENSOR ORBITAL COM LARGO CAMPO DE VISADA

O modelo descrito a seguir refere-se a uma aproximação baseada na concepção preliminar do SSR (Satélite de Sensoriamento Remoto) da MECB (Missão Espacial Completa Brasileira) em que, fisicamente, as demais forças que atuam sobre o satélite, exceto a gravitacional de corpo central da Terra, são desconsideradas.

Este capítulo consta de um estudo do posicionamento do satélite e uma caracterização da câmera a bordo deste, quanto a orientação e geometria, comportamento espacial e caracterização espectral.

4.1 - O SATÉLITE

É um satélite de observação da Terra de órbita baixa (Chen, 1985), circular, da qual são conhecidos os parâmetros I (ângulo de inclinação da órbita) e H (altitude média de passagem ao equador). O raio da órbita, R , é determinado por

$$R = a + H, \quad (4.1)$$

onde a é o semi-eixo maior do elipsóide de referência (ou o raio da Terra no caso do modelo da superfície terrestre ser uma esfera).

As equações relativas ao movimento de rotação do satélite no plano de sua órbita serão definidas a seguir, em função desses parâmetros, dada uma velocidade angular ω_1 .

4.1.1 - O POSICIONAMENTO DO SATÉLITE

Em princípio, dinamicamente, a determinação da órbita de um satélite corresponde a um problema conhecido como "Problema de Dois Corpos" (De Luca, 1982; McCuskey, 1963). Resume-se no fenômeno do movimento de um corpo em relação a outro corpo do espaço, submetidos apenas à atração mútua. São consideradas aproximações relativamente à exclusão de todas as forças capazes de perturbar esse movimento, como o arrasto atmosférico, por exemplo (no caso de um destes corpos ser a Terra), ou forças eletromagnéticas, e admitindo-se que os corpos envolvidos sejam pontos materiais (isto é, com a massa concentrada no centro de gravidade). Após estas considerações e dado um movimento de um corpo B em relação a um corpo A, a este problema está associada uma equação diferencial vetorial, fundamental, de 2^a. ordem (Escobal, 1965):

$$d^2(\mathbf{r})/dt^2 = (-\mu/r^3)\mathbf{r} \quad (4.2)$$

onde \mathbf{r} representa a posição de B em relação a A, $r = \|\mathbf{r}\|$ e $\mu = 398601 \text{ Km}^3/\text{s}^2$ (Duck e King, 1983) é a constante geogravitacional. Esta é a equação do movimento do corpo B em relação ao corpo A, num sistema de coordenadas inercial.

Todavia, o envolvimento com o problema exposto acima com mais profundidade, pode representar uma fuga do escopo do presente trabalho. De um modo particular, o problema do posicionamento será resolvido através de equações elementares da Cinemática relativas ao Movimento Circular Uniforme, como segue.

4.1.1.1 - O SISTEMA S_{OR}

O satélite terá uma órbita cujo plano será amarrado ao sistema S_{IN}, para o instante $t = 0\text{s}$ de image-

amento do ponto Q_0 . Como foi estabelecido anteriormente, nesse instante os sistemas S_{IN} e S_{CG} são coincidentes.

Define-se então o sistema ortonormal, da mão direita, $S_{OR} = \{i_{OR}, j_{OR}, k_{OR}\}$, cuja origem, O , coincide com o centro de massa da Terra, ligado ao plano da órbita (Fig. 4.1) da seguinte maneira.

Seja $P_0(x_{p_0}, y_{p_0}, z_{p_0})$ em S_{IN} , ou $P_0(\phi_{p_0}, \lambda_{p_0}, h_0)$ dado S_{IN} , a posição do sensor no instante de imageamento do ponto $Q_0(x_{q_0}, y_{q_0}, z_{q_0})$ em S_{IN} , ou $Q_0(\phi_{q_0}, \lambda_{q_0})$ dado S_{IN} , verificando $\phi_{p_0} = \phi_{q_0}$ e $\lambda_{p_0} = \lambda_{q_0}$.

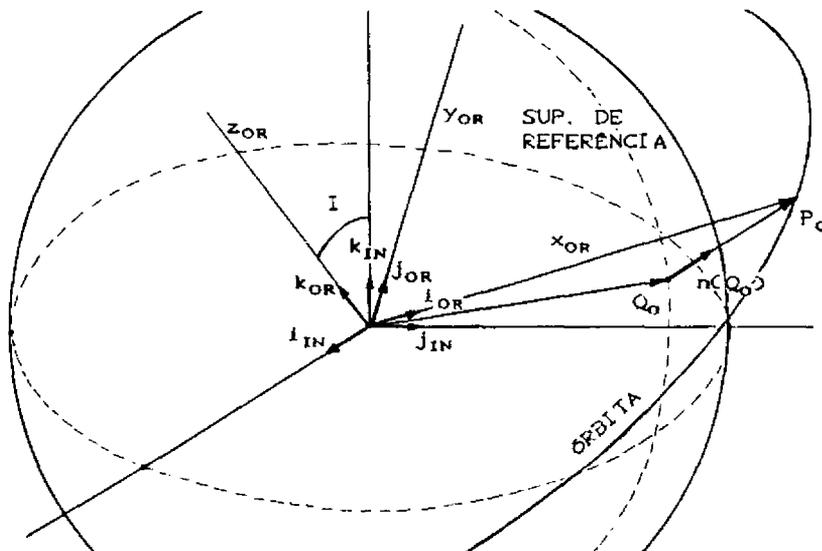


Fig. 4.1 - O sistema S_{OR}

O vetor i_{OR} é o vetor unitário na direção
 $\vec{OP_0}$, isto é,

$$i_{OR} = \frac{\vec{OP_0}}{\|OP_0\|}, \quad (4.3)$$

sendo P_0 , o ponto tal que

$$\vec{OP}_0 = OQ_0 + h_0 n(Q_0) \quad (4.4)$$

onde h_0 e $n(Q_0)$ são determinados respectivamente pelas equações (2.7) e (3.2) (ou (2.6)), correspondentes ao ponto sub-satélite Q_0 .

Então, o vetor $i_{OR}(i_{OR1}, i_{OR2}, i_{OR3})$ em S_{IN} é encontrado, sendo $i_{OR1} = x_{p_0}/R$, $i_{OR2} = y_{p_0}/R$ e $i_{OR3} = z_{p_0}/R$, devido à equação (4.3), desde que $\|OP_0\| = R$.

O vetor k_{OR} , é o vetor que satisfaz as condições:

- a) $\langle k_{OR}, k_{IN} \rangle = \cos(I)$;
- b) $\langle k_{OR}, i_{OR} \rangle = 0$; e
- c) $\|k_{OR}\| = 1$.

Tomando-se $i_{OR}(i_{OR1}, i_{OR2}, i_{OR3})$, $k_{OR}(k_{OR1}, k_{OR2}, k_{OR3})$ e $k_{IN}(0, 0, 1)$ em S_{IN} , e $\|k_{OR}\| = (k_{OR1}^2 + k_{OR2}^2 + k_{OR3}^2)^{1/2}$, as três condições acima reduzem-se a um sistema de equações a três incógnitas (k_{OR1} , k_{OR2} e k_{OR3}), de onde se chega aos resultados:

$$k_{OR1} = (x_{p_0}^2 + y_{p_0}^2)^{-1} [y_{p_0} (R^2 \sin^2(I) + z_{p_0}^2)^{1/2} - x_{p_0} z_{p_0} \cos(I)]; \quad (4.5a)$$

$$k_{OR2} = (x_{p_0}^2 + y_{p_0}^2)^{-1} [x_{p_0} (R^2 \sin^2(I) + z_{p_0}^2)^{1/2} - y_{p_0} z_{p_0} \cos(I)]; \quad (4.5b)$$

$$k_{OR3} = \cos(I). \quad (4.5c)$$

O vetor $j_{OR}(j_{OR1}, j_{OR2}, j_{OR3})$ em S_{IN} é o terceiro vetor, tal que

$$j_{OR} = k_{OR} \times i_{OR}. \quad (4.6)$$

O sistema S_{OR} pode então ser representado em S_{IN} pela matriz A_{SOR} ,

$$A_{SOR} = \begin{bmatrix} i_{OR1} & i_{OR2} & i_{OR3} \\ j_{OR1} & j_{OR2} & j_{OR3} \\ k_{OR1} & k_{OR2} & k_{OR3} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

4.1.1.2 - EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DO SATÉLITE

O satélite movimenta-se no plano (determinado por i_{OR} e j_{OR}) de sua órbita (Fig. 4.2) em torno de k_{OR} , a uma velocidade angular constante ω_1 (rad/s).

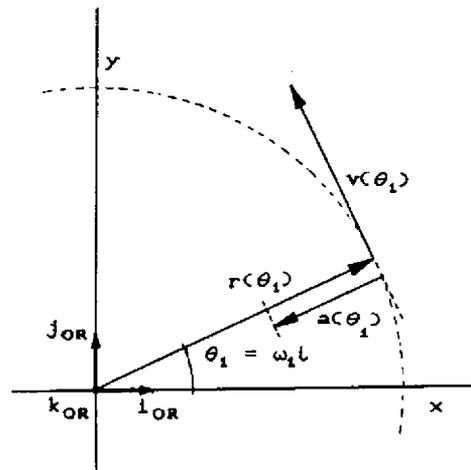


Fig. 4.2 - Movimento do satélite no plano de sua órbita.

O vetor posição, $r(\theta_1)$, o vetor velocidade, $v(\theta_1) = dr(\theta_1)/dt$, e o vetor aceleração do satélite, $a(\theta_1) = d^2r(\theta_1)/dt^2$, no sistema S_{OR} , são dados por:

$$\mathbf{r}(\theta_1) = R(\cos\theta_1, \sin\theta_1, 0) \quad (4.8)$$

$$\mathbf{v}(\theta_1) = R\omega_1(-\sin\theta_1, \cos\theta_1, 0) \quad (4.9)$$

$$\mathbf{a}(\theta_1) = -R\omega_1^2(\cos\theta_1, \sin\theta_1, 0) \quad (4.10)$$

onde $\theta_1 = \omega_1 t$.

A aceleração gravitacional, $\mathbf{a}_g(\theta_1)$, correspondente à posição do satélite em um dado instante t , com módulo igual a μ/R^2 (Duck e King, 1983), tem a direção de $\mathbf{r}(\theta_1)$ (da equação (4.8)), mas sentido contrário ao deste vetor. Isto é,

$$\mathbf{a}_g(\theta_1) = (-\mu/R^2)(\cos\theta_1, \sin\theta_1, 0).$$

Então, numa condição de equilíbrio, verifica-se que

$$\mathbf{a}(\theta_1) = \mathbf{a}_g(\theta_1),$$

sendo $\mathbf{a}(\theta_1)$ a aceleração centrípeta do satélite dada pela equação (4.10)), de onde obtém-se

$$R\omega_1^2 = \mu/R^2,$$

permitindo-se determinar ω_1 por:

$$\omega_1 = (\mu/R^3)^{1/2}. \quad (4.11)$$

As coordenadas dos vetores $\mathbf{r}(\theta_1)$ e $\mathbf{v}(\theta_1)$ em S_{IN} , são determinadas a partir de (4.8) e (4.9) respectivamente, e utilizando-se a matriz A_{SOR} (da equação (4.7)) de modo que:

$$\left[\mathbf{r}(\theta_1) \right]_{S_{IN}} = A_{SOR}^{-1} \left[\mathbf{r}(\theta_1) \right]_{S_{OR}} \quad (4.12a)$$

$$\left[\mathbf{v}(\theta_1) \right]_{S_{IN}} = A_{SOR}^{-1} \left[\mathbf{v}(\theta_1) \right]_{S_{OR}} \quad (4.12b)$$

4.2 - A CÂMERA

A câmera a bordo do satélite é do tipo de varredura eletrônica (pushbroom). É uma câmera que possui uma linha de ndt detetores em seu plano focal e efetua uma varredura (correspondente a uma linha de imagem) a cada pvr (período de varredura) segundos, com um FOV (Field Of View) de θ_{FOV} graus e campo de visada instantânea de IFOVrad (Instantaneous Field Of View) radianos.

4.2.1 - ORIENTAÇÃO E GEOMETRIA DA CÂMERA

Será estabelecida nesta seção a orientação do sensor em relação à superfície imageada e especificada a geometria responsável pela equação de visada e pelas equações que permitirão verificar a disposição e dimensões das amostras durante o imageamento.

4.2.1.1 - O SISTEMA S_{ST}

A Figura 4.3 mostra esquematicamente a disposição do sensor em relação à superfície imageada. Ao sensor está ligado um sistema de coordenadas cartesianas ortonormal, da mão direita, $S_{ST} = \{i_{ST}, j_{ST}, k_{ST}\}$, cuja origem O_{ST} coincide com o centro de massa do satélite. É importante observar que é razoável admitir que a câmera está localizada no centro de massa do satélite, porque os satélites artificiais em geral possuem dimensões muito pequenas em relação ao centro de forças que agem sobre esses (Fonseca e Lourenção, 1985).

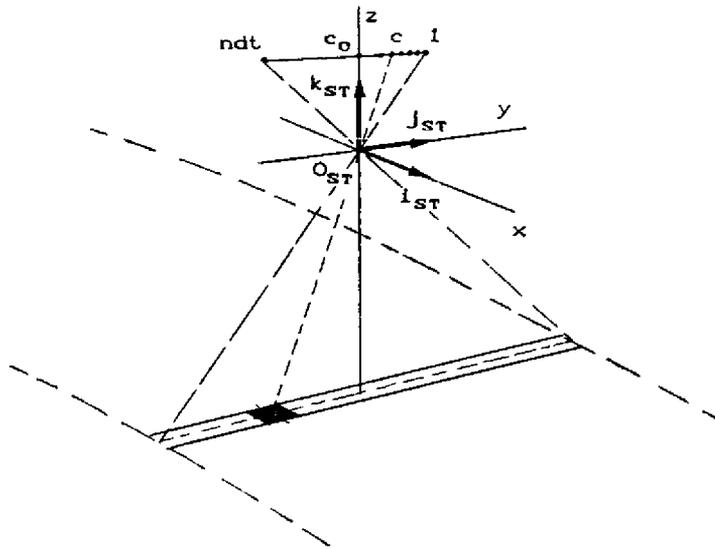


Fig. 4.3 - Disposição do sensor em relação à superfície imageada.

Num dado instante t segundos, verifica-se \rightarrow
 $\vec{OO}_{ST} = r(\theta_1)$, $\theta_1 = \omega_1 t$, e determinam-se as coordenadas dos vetores i_{ST} , j_{ST} e k_{ST} em S_{IN} seguintes: k_{ST} um vetor unitário normal à superfície de referência; i_{ST} um vetor unitário na direção e sentido de

$$\mathbf{v}_{i_{ST}} = \mathbf{v}(\theta_1) - \langle \mathbf{v}(\theta_1), \mathbf{k}_{ST} \rangle \mathbf{k}_{ST},$$

onde as coordenadas de $\mathbf{v}(\theta_1)$ em S_{IN} são determinadas pela equação (4.12b). Isto é,

$$\mathbf{i}_{ST} = \|\mathbf{v}_{i_{ST}}\|^{-1} \mathbf{v}_{i_{ST}}$$

e \mathbf{j}_{ST} é o terceiro vetor tal que

$$\mathbf{j}_{ST} = \mathbf{k}_{ST} \times \mathbf{i}_{ST}.$$

Vê-se que a determinação de \mathbf{i}_{ST} e \mathbf{j}_{ST} depende da determinação de \mathbf{k}_{ST} .

Sejam a superfície de referência definida em S_{IN} e as coordenadas do vetor $n(Q_s(t))$ em S_{IN} conforme definido na equação (3.2). Então, o vetor k_{ST} é o vetor determinado por

$$k_{ST} = n(Q_s(t)) \quad (4.13)$$

onde $Q_s(t)(x_{qIN}, y_{qIN}, z_{qIN})$ em S_{IN} (ou, $Q_s(t)(\phi_q, \lambda_{qIN})$ dado S_{IN}) é o ponto sub-satélite quando a posição do satélite é $P(t)(x_{pIN}, y_{pIN}, z_{pIN})$ em S_{IN} (ou, $P(t)(\phi_p, \lambda_{pIN}, h)$ dado S_{IN}), verificando-se $\overrightarrow{OP}(t) = \overrightarrow{OQ_s}(t) + \overrightarrow{OQ_{ST}}$, $\phi_p = \phi_q$ e $\lambda_{pIN} = \lambda_{qIN}$.

Ocorre ainda que $Q_s(t)(x_{qIN}, y_{qIN}, z_{qIN})$ em S_{IN} satisfaz às condições:

$$s(x_{qIN}, y_{qIN}, z_{qIN}) = 0 \quad (4.14)$$

$$e \quad \overrightarrow{OP}(t) = \overrightarrow{OQ_s}(t) + hn(Q_s(t)) \quad (4.15)$$

onde h é a altitude do satélite no instante de imageamento do ponto $Q_s(t)$.

As condições (4.14) e (4.15) resultam em um sistema de equações a quatro incógnitas ($x_{qIN}, y_{qIN}, z_{qIN}$ e h) que permite calcular as coordenadas de $Q_s(t)$ em S_{IN} e, aplicando-se a equação (4.13) acima, chega-se à determinação de k_{ST} . No entanto, a ordem deste cálculo é inversa à pretendida, além de (pode-se mostrar) envolver a resolução de uma equação de 4º grau, computacionalmente desinteressante nesta oportunidade.

Dadas as considerações acima, pode-se extrair também a seguinte relação entre as coordenadas dos pontos

$P(t)$ e $Q_s(t)$ em S_{IN} e o vetor $k_{ST}(k_{ST1}, k_{ST2}, k_{ST3})$ em S_{IN} :

$$k_{ST1} = (1 - e^2 \Delta_e) x_{PIN} / D, \quad (4.16a)$$

$$k_{ST2} = (1 - e^2 \Delta_e) y_{PIN} / D, \quad (4.16b)$$

$$e \quad k_{ST3} = z_{PIN} / D \quad (4.16c)$$

sendo $D = [(1 - e^2 \Delta_e)^2 (x_{PIN}^2 + y_{PIN}^2) + z_{PIN}^2]^{1/2}$ e

$$\Delta_e = 1 - h \cos \phi_p / R \cos \delta_p, \quad (4.16d)$$

onde δ_p é a *declinação geocêntrica* do satélite no ponto $P(t)$ (como consta no Apêndice B). δ_p é o ângulo que o vetor $\rightarrow OP(t)$ forma com sua projeção sobre o plano equatorial da Terra.

A equação (4.16d), relativa ao elemento Δ_e , pode ser preparada de tal forma a permitir a escolha da equação (4.16) como uma solução suficientemente aproximada para o problema, simplificando-o sensivelmente, do modo seguinte.

Não foi determinado o ponto $Q_s(t)$, portanto, não se conhece ϕ_p . Mas, a diferença $\phi_p - \delta_p$ é função da excentricidade do elipsóide de referência e , para uma pequena excentricidade, ϕ_p é muito próximo de δ_p . Quantitativamente, esta relação foi analisada por Heffron e Watson (1966), atribuindo os valores dos parâmetros do elipsóide de referência, a e e , e para diversas altitudes e valores de latitudes do satélite. Um exame dos seus resultados (isto é, observando-se os valores extremos de $\cos \phi_p / \cos \delta_p$) e das relações com as quantidades envolvidas (isto é, Δ_e é o coeficiente de e^2 , um número pequeno) permite a seguinte aproximação:

$$\cos \phi_p / \cos \delta_p \cong 1 \quad (4.17)$$

A altitude h tem uma variação muito pequena para os pontos da superfície de referência relativamente próximos de $Q_s(t)$ (considerando-se a porção imageada). Portanto, é uma boa aproximação calcular h pela equação (2.7) para o ponto Q_0 , ou tomar uma certa constante fazendo-se

$$h = H, \quad (4.18)$$

que será a opção adotada, de modo que, substituindo-se as equações (4.17) e (4.18) na equação (4.16d) obtém-se:

$$\Delta e = 1 - H/R = a/R.$$

O sistema $S_{ST} = \{i_{ST}, j_{ST}, k_{ST}\}$ com $i_{ST} \{i_{ST1}, i_{ST2}, i_{ST3}\}$, $j_{ST} \{j_{ST1}, j_{ST2}, j_{ST3}\}$ e $k_{ST} \{k_{ST1}, k_{ST2}, k_{ST3}\}$ em S_{IN} , pode ser representado em S_{IN} pela matriz A_{SST} ,

$$A_{SST} = \begin{bmatrix} i_{ST1} & i_{ST2} & i_{ST3} \\ j_{ST1} & j_{ST2} & j_{ST3} \\ k_{ST1} & k_{ST2} & k_{ST3} \end{bmatrix}. \quad (4.19)$$

4.2.1.2 - O VETOR DE VISADA

A Figura 4.4 refere-se ao plano yz , determinado pelos vetores j_{ST} e k_{ST} . A cada detetor c associa-se um vetor unitário u , chamado *vetor de visada*, e representa a visada do sensor durante a aquisição de uma amostra. É o vetor

$$u(0, \text{sen}\theta, \text{cos}\theta) \text{ em } S_{ST}, \quad (4.20a)$$

$$\theta = \text{arctg}[(\text{IFOVrad})(c - c_0)] \quad (4.20b)$$

onde c_0 é o detetor escolhido como referência no arranjo do

plano focal, correspondente ao ponto da superfície terrestre imageado ao nadir.

Observação:

- . Neste trabalho, o IFOVrad está relacionado com ndt e θ_{FOV} da seguinte maneira. A razão entre o tamanho do detetor (d) e a distância focal (f) segundo a geometria da câmera (Fig. 4.4), pode ser determinada por

$$d/f = (2/ndt) \operatorname{tg}(\theta_{FOV}/2)$$

e, sendo d/f um número suficientemente pequeno,

$\text{IFOVrad} \cong d/f$.

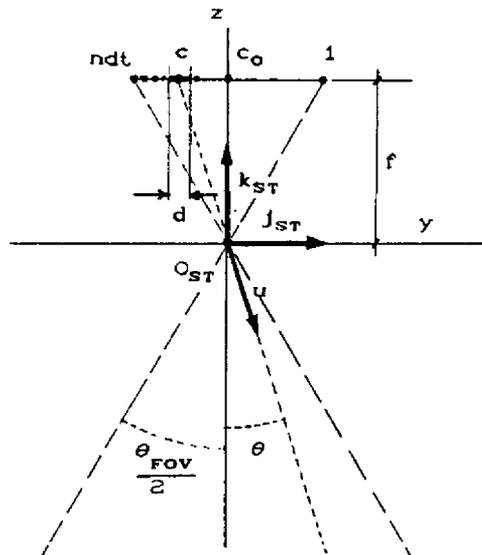


Fig. 4.4 - O vetor de visada.

As coordenadas do vetor de visada u no sistema S_{IN} são determinadas por:

$$\begin{bmatrix} u \end{bmatrix}_{S_{IN}} = A_{SST}^{-1} \begin{bmatrix} u \end{bmatrix}_{S_{ST}} \quad (4.21)$$

onde $A_{S_{ST}}$ é a matriz da equação (4.19) e as coordenadas de u em S_{ST} são dadas pela equação (4.20).

4.2.2 - COMPORTAMENTO ESPACIAL DA CÂMERA

4.2.2.1 - FUNDAMENTOS

São revistas a seguir algumas definições relativas a sistemas lineares e ao fato da representação de sistemas imageadores por filtros lineares.

a) Sistemas Lineares

Um sistema físico, no sentido geral, é um dispositivo que, dada uma função de entrada (excitação), exhibe uma função de saída (resposta). Matematicamente, um sistema pode ser modelado através de um *operador* (Gaskill, 1978), ou seja, através da representação do mecanismo que mapeia o espaço das funções de entrada, no espaço das funções de saída do sistema.

Sejam \mathcal{F} um sistema, f , f_1 e f_2 funções de entrada, e g , g_1 e g_2 funções de saída tais que $\mathcal{F}(f) = g$, $\mathcal{F}(f_1) = g_1$ e $\mathcal{F}(f_2) = g_2$. \mathcal{F} é dito *linear* se,

$$\mathcal{F}(af_1 + bf_2) = ag_1 + bg_2. \quad (4.22)$$

O sistema \mathcal{F} é dito *invariante a deslocamento* se,

$$\mathcal{F}(f(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)) = g(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0),$$

para \mathbf{x} , $\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^2$, sendo \mathbf{x}_0 um vetor constante (isto é, a natureza da saída não se altera quando a entrada é deslocada).

Considere-se um sistema sensor eletro-ótico. A formação da imagem em um sistema desse tipo obedece ao

princípio da superposição (Gaskill, 1978; Goodman, 1968), representado pela equação (4.22). Este resultado permite a aplicação da teoria dos sistemas lineares aos Sistemas Imageadores (Moik, 1980).

Um modelo adequado para uma entrada num sistema imageador é a função f de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} ,

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2} f(\mathbf{u}) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{u}) d(\mathbf{u}) \quad (\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2), \quad (4.23)$$

onde δ é a função Delta de Dirac (Moik, 1980) e \mathbf{u} pertence ao plano do objeto. Isto é, a função f é a cena imageada representada como um somatório de fontes pontuais no plano do objeto.

Sejam \mathcal{L} , um sistema linear e invariante a deslocamento, f de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} , dada pela equação (4.23), e g de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} tal que $\mathcal{L}(f) = g$, então

$$g(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{u} \in \mathbb{R}^2} f(\mathbf{u}) h(\mathbf{x} - \mathbf{u}) d\mathbf{u} \quad (\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2), \quad (4.24)$$

sendo h de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} , que verifica $\mathcal{L}(\delta(\mathbf{x} - \mathbf{u})) = h(\mathbf{x} - \mathbf{u})$ (Gaskill, 1978), a *resposta a impulso* do sistema \mathcal{L} . Isto é, a resposta g de \mathcal{L} é obtida pela *convolução* de f por h , denotada por:

$$g = f * h. \quad (4.25)$$

Portanto, um sistema linear e invariante a deslocamento é descrito de maneira única pela sua resposta a impulso, h , que é chamada, no contexto dos sistemas óticos, de *Função de Espalhamento Pontual* (FEP).

Através da aplicação da Análise de Fourier (Goodman, 1968), o processo da convolução na formação da imagem pode ser simplificado. Sejam \mathcal{F} a Transformada de Fourier, $G = \mathcal{F}(g)$, $F = \mathcal{F}(f)$ e $H = \mathcal{F}(h)$. Então, a equação (4.25) pode ser escrita no domínio da frequência como:

$$G = FH.$$

H é chamada de *Função de Transferência Ótica* (FTO) do sistema imageador linear e invariante a deslocamento.

A FTO é uma função geralmente complexa, cujo módulo é a *Função de Transferência de Modulação* (FTM) que caracteriza a resposta em frequência do sistema, constituindo-se em um indicador do seu desempenho.

b) Sistemas Lineares como Filtros

Um sistema imageador pode ser representado por um filtro linear e, reciprocamente, um filtro linear comporta-se como um sistema linear e invariante a deslocamento (Moik, 1980). O imageamento, então, pode ser representado por uma convolução da cena f por um filtro de resposta a impulso, ou equivalentemente, Função de Espalhamento Pontual, h (que descreve o imageador), como na equação (4.24). Um sistema imageador comporta-se como um filtro passa-baixas (Schowengerdt, 1983) e a saída g , por conseguinte, pode ser entendida como a versão borrada da cena f vista pelo imageador.

Uma das classes de filtros, a de filtros lineares separáveis, é particularmente importante para a representação da atual geração dos imageadores orbitais (Fonseca, 1988). Um filtro linear com FEP h de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} é dito separável se existem duas funções h_1 e h_2 de \mathbb{R} em \mathbb{R}

tais que

$$h(\mathbf{x}) = h_1(x_1)h_2(x_2), \quad \mathbf{x} = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2.$$

h_1 e h_2 podem ser interpretadas como FEPs de filtros que atuam respectivamente segundo duas direções ortogonais. De um modo simplificado, pode-se escrever $h = (h_1, h_2)$.

Um caso especial de filtros lineares separáveis é o de filtros com FEPs gaussianas. A FEP de um filtro linear separável e gaussiano é tal que os h_i , $i = 1, 2$, são dados por

$$h_i(x_i) = (1/2\pi\sigma_i^2)^{1/2} \exp[(-1/2)(x_i/\sigma_i)^2]. \quad (4.26)$$

Seja um filtro com FEP h de A em \mathbb{R} onde $A = \mathbb{R}^2$ (ou $A = \mathbb{R}$, se em uma das direções ortogonais de um filtro separável). Sejam as funções f e g de A em \mathbb{R} tais que

$$g(\mathbf{x}) = (f * h)(\mathbf{x}) = \int_{\mathbf{u} \in A} f(\mathbf{u})h(\mathbf{x} - \mathbf{u})d\mathbf{u} \quad (\mathbf{x} \in A).$$

Quando f for a aplicação constante, deve ser garantido que $g(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})$, e, portanto, h de A em \mathbb{R} deve verificar

$$\int_{\mathbf{u} \in A} h(\mathbf{u})d\mathbf{u} = 1. \quad (4.27)$$

(f é a aplicação constante se $f(\mathbf{x}) = k$, $k \in \mathbb{R}$, para todo $\mathbf{x} \in A$).

A propriedade da FEP h expressa pela equação (4.27) permite sua identificação com uma densidade de probabilidade de uma variável aleatória real contínua (no caso $A = \mathbb{R}$) – ou um par de variáveis aleatórias reais contínuas (no caso $A = \mathbb{R}^2$). A importância deste resultado

reflete-se no aproveitamento da teoria de probabilidades na área de filtragem linear (Banon, 1990).

Seja um filtro cuja FEP h de A em \mathbb{R} , $A = \mathbb{R}^2$ (ou $A = \mathbb{R}$) obedece à condição (4.27) acima.

A média do filtro é o elemento m de A tal que

$$m = \int_{\mathbf{x} \in A} \mathbf{x}h(\mathbf{x}) d\mathbf{x}.$$

No caso $A = \mathbb{R}$, chama-se de *variância* do filtro o elemento σ^2 de \mathbb{R} , tal que

$$\sigma^2 = \int_{x \in \mathbb{R}} (x - m)^2 h(x) dx$$

No caso $A = \mathbb{R}^2$, define-se a *matriz de covariância* do filtro, $\Sigma_{2 \times 2} = [a_{ij}]$, por:

$$a_{ij} = \int_{u_1 \in \mathbb{R}} \int_{u_2 \in \mathbb{R}} (u_i - m_i)(u_j - m_j) h(u_1, u_2) du_1 du_2$$

para $i, j = 1, 2$.

4.2.2.2 - RESOLUÇÃO ESPACIAL - RELAÇÃO ENTRE IFOV E EIFOV

Dados $\delta_1, \delta_2 \in \mathbb{R}$, seja o conjunto B tal que

$$B = \mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2,$$

com

$$\mathcal{C}_i = \{x \in \mathbb{R}: x = \delta_i k, k \in \mathbb{Z}\}, i = 1, 2.$$

Então, B é uma *malha retangular* – ou uma *malha quadrada*, se $\delta_1 = \delta_2$ – onde (δ_1, δ_2) é o par de distâncias entre os nós da malha.

Seja a função g de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} da equação (4.24). Na verdade, g não é acessível pois a imagem produzida pelo imageador só é disponível em sua forma digitalizada. Seja g/B a restrição de g ao conjunto B . Então, a saída do sistema imageador é uma *imagem digital* \bar{g} de B em \mathbb{R} onde

$$\bar{g} = \delta_1 \delta_2 g/B.$$

Ou seja, os imageadores assim referidos produzem elementos de imagem dispostos segundo uma malha retangular. Ao nadir, os elementos de imagem representam porções quadradas da cena, por conta da projeção dos detetores quadrados na superfície de referência. À medida em que se afastam do nadir, devido à esfericidade da Terra (Machado e Silva, 1989), os elementos deformam-se, aproximando-se de uma forma trapezoidal, fazendo-se tender para uma *malha irregular* de amostragem.

O sensor imageador aqui considerado possui IFOV (Instantaneous Field Of View) dado pelo par $(IFOV_1, IFOV_2)$, que se fará coincidir com o par (δ_1, δ_2) , isto é,

$$(IFOV_1, IFOV_2) = (\delta_1, \delta_2). \quad (4.28)$$

Ignorando-se imperfeições da ótica e difração, o par $(IFOV_1, IFOV_2)$, de dimensões da projeção do detetor sobre a superfície imageada, é nominalmente a resolução espacial do sensor (representada somente a pela taxa de amostragem espacial), ou uma primeira estimativa desta.

Considerem-se as descrições do modelo do sensor da Seção 4.2.1. Em um determinado instante t , sejam $P(t)(\phi_p, \lambda_p, h)$ dado S_{CG} a posição do satélite, $Q_s(t)(\phi_s, \lambda_s)$ dado S_{CG} o ponto sub-satélite (com $\phi_p = \phi_s$ e $\lambda_p = \lambda_s$), Rc_{Q_s} o raio de curvatura da seção meridiana da superfície de referência no ponto $Q_s(t)$ e $h_{Q_s} = h$ a altitude do satélite dado $Q_s(t)$. Rc_{Q_s} e h_{Q_s} são calculados respectivamente pelas equações (2.4d) e (2.7).

Nesse instante, a cada detetor c associa-se a tomada de uma amostra dimensionada pelo par $(IFOV_1, IFOV_2)$, onde, dado o ângulo θ de visada (da eq.(4.20b)) correspondente ao detetor c (ver Apêndice C),

$$IFOV_2 = (r)(IFOV_{rad}) \quad (4.29a)$$

$$IFOV_1 = IFOV_2 \cos(|\theta|) / \cos(|\theta| + \theta_c) \quad (4.29b)$$

sendo

$$r = (Rc_{Q_s} + h_{Q_s}) \cos(|\theta|) + \\ - [Rc_{Q_s}^2 - (Rc_{Q_s} + h_{Q_s})^2 \text{sen}^2(|\theta|)]^{1/2}$$

$$\theta_c = \arcsen[r \text{sen}(|\theta|) / Rc_{Q_s}].$$

$IFOV_1$ representa a dimensão ao longo da linha de varredura e $IFOV_2$ representa a dimensão transversal a esta. Observa-se pela equação (4.29) acima que, ao nadir (isto é, quando $|\theta| = 0$),

$$IFOV_1 = IFOV_2 = h_{Q_s} (IFOV_{rad})$$

e o par $(IFOV_1, IFOV_2)$ representa um elemento de cena quadrado.

Observação:

- . Seja a resolução espacial do sensor com largo campo de visada, ao nadir e ao equador, verificando

$$\text{IFOV}_1 = \text{IFOV}_2 = (H) (\text{IFOVrad}). \quad (4.30)$$

O período de varredura, pvr, tratado na Seção 4.2, será determinado por:

$$\text{pvr} = (H) (\text{IFOVrad}) / (\omega_1 a), \quad (4.31)$$

onde ω_1 é a velocidade angular do satélite (da equação (4.11)) e a é o semi-eixo maior do elipsóide de referência.

Como já mencionado, o par $(\text{IFOV}_1, \text{IFOV}_2)$ não leva em conta fatores importantes quanto à ótica do sensor durante a tomada de uma cena, constituindo-se apenas em uma primeira estimativa de sua resolução espacial.

Embora existam vários critérios e que têm sido desenvolvidos a fim de estabelecer uma medida do desempenho de um sistema sensor, em termos de sua resolução espacial, o critério mais aceito é através de seu EIFOV (Effective Instantaneous Field Of View) que, por sua vez, é definido a partir da Função de Transferência de Modulação do sistema.

Seja h_i de \mathbb{R} em \mathbb{R} a FEP na direção $i (= 1, 2)$ de um filtro separável representando o comportamento espacial do sensor imageador.

Sejam \mathcal{F} a transformada de Fourier e $H_i = \mathcal{F}(h_i)$.

O EIFOV_i é definido como inverso do dobro da frequência espacial ν_i para a qual a FTM do sensor é igual a 1/2, isto é,

$$\text{EIFOV}_i = 1/(2\nu_i), \quad (4.32a)$$

sendo ν_i tal que

$$|H_i(\nu_i)| = 1/2. \quad (4.32b)$$

O EIFOV traz consigo os efeitos da atenuação implementada pelo sensor durante a aquisição de cada elemento de imagem, sendo geralmente maior do que o IFOV.

Portanto, o desempenho do sensor (entendido como seu poder de resolução), pode ser avaliado através da característica de atenuação de sua FTM, e seja γ_i a característica de atenuação da Função de Transferência de Modulação na metade da frequência de amostragem ν_i , na direção i . γ_i é dada por:

$$\gamma_i = |H_i(\nu_i/2)|, \quad i = 1, 2. \quad 4.33a)$$

$$\text{sendo } \nu_i = 1/\delta_i. \quad 4.33b)$$

Aqui será aproveitado um resultado obtido por Banon (1990) que, sob a hipótese de filtros separáveis e, em particular, gaussianos, para a representação dos imageadores atuais, estabelece uma relação de proporcionalidade entre o par de EIFOVs, $(\text{EIFOV}_1, \text{EIFOV}_2)$, e o par (δ_1, δ_2) que, neste trabalho, satisfaz à equação (4.28).

Seja $h = (h_1, h_2)$ a FEP do filtro separável e gaussiano (isto é, com h_i ($i = 1, 2$) dada pela equação (4.26)) sendo (σ_1^2, σ_2^2) seu par de variâncias.

Aplicando-se as definições de EIFOV (conforme (4.32)) e γ (conforme 4.33)) chega-se aos seguintes resultados (Banon, 1990, Capítulo 3).

O desvio padrão σ_i , na direção i do filtro representando o imageador, está relacionado com o EIFOV _{i} por

$$\sigma_i = (1/\pi) (2 \log 2)^{1/2} \text{EIFOV}_i \quad (4.34)$$

onde o EIFOV _{i} , por sua vez, está relacionado com δ_i pela equação

$$\text{EIFOV}_i = k_i \delta_i, \quad (4.35a)$$

$$k_i = [\log(1/\gamma_i) / \log 2]^{1/2}. \quad (4.35b)$$

Reunindo-se as equações (4.34) e (4.35) e verificando-se a igualdade da equação (4.28), obtém-se a expressão:

$$\sigma_i = (1/\pi) (2 \log 2)^{1/2} k_i \text{IFOV}_i. \quad (4.36)$$

4.2.3 - CARACTERÍSTICA ESPECTRAL DA CÂMERA

A caracterização espectral da câmera será feita considerando-a idêntica quanto aos requisitos atribuídos ao SSR/MECB. Isto é, a câmera estará operando em duas bandas do espectro eletromagnético - uma no visível (de 0,63 a 0,69 μm) e outra no infravermelho próximo (de 0,76 a 0,90 μm) - localizadas exatamente nas mesmas posições e larguras das bandas 3 e 4 do TM/Landsat, respectivamente (Galvão, 1990).

CAPÍTULO 5SIMULAÇÃO DA IMAGEM BRUTA ADQUIRIDA PELO SENSOR COM
LARGO CAMPO DE VISADA

Neste capítulo, é apresentado o algoritmo para simulação da imagem bruta do sensor com largo campo de visada. O comportamento espacial local deste último é representado por um filtro de simulação, sob a hipótese de filtros separáveis e, em particular, gaussianos (Seção 4.2.2) para representação dos atuais sensores imageadores. A superfície a ser imageada pelo sensor acima citado é modelada radiometricamente através de imagens obtidas por um sensor com menor campo de visada.

5.1 - O FILTRO DE SIMULAÇÃO5.1.1 - FUNDAMENTOS

A seguir, são mencionadas algumas definições relativas à operação de filtragem linear discreta e à característica do filtro de simulação.

a) Filtragem Linear

Sejam $B = \mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$ uma malha retangular e g de B em \mathbb{R} uma imagem digital. Uma das operações básicas que podem ser efetuadas com imagens digitais é a filtragem linear, através da qual são feitas transformações do espectro de Fourier da imagem.

A operação de filtragem linear discreta de g por um filtro com FEP h de B em \mathbb{R} , é dada por

$$g_f(\mathbf{x}) = (g * h)(\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{u} \in B} g(\mathbf{u})h(\mathbf{x} - \mathbf{u}) \quad (\mathbf{x} \in B),$$

onde g_r é a imagem filtrada, verificando-se

$$(g * h)(\mathbf{x}) = (h * g)(\mathbf{x})$$

(pela comutatividade da convolução).

A partir daí, mantém-se para o caso discreto todas as propriedades atribuídas no caso contínuo, isto é, deve-se verificar

$$\sum_{\mathbf{u} \in \mathbb{B}} h(\mathbf{u}) = 1, \quad (5.1)$$

a média m do filtro é dada por

$$m = \sum_{\mathbf{u} \in \mathbb{B}} \mathbf{u}h(\mathbf{u}),$$

a variância σ_i^2 do filtro com h separável (isto é, no caso unidimensional, numa dada direção da malha \mathbb{B}) é

$$\sigma_i^2 = \sum_{u_i \in \mathcal{C}_i} (u_i - m_i)^2 h_i(u_i), \quad i = 1, 2 \quad (5.2)$$

e a matriz de covariância $\Sigma_{2 \times 2} = [a_{ij}]$ é definida por

$$a_{ij} = \sum_{(u_1, u_2) \in \mathbb{B}} (u_i - m_i)(u_j - m_j)h(u_1, u_2)$$

para $i, j = 1, 2$.

b) Característica do filtro de simulação

Sejam dois imageadores representáveis pelos filtros com FEPs h_u e h_v de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} que verificam (5.1). Estes dois imageadores produzem respectivamente as imagens digitais $\overline{g_u}$ e $\overline{g_v}$ de \mathbb{B} em \mathbb{R} , $\mathbb{B} = \mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$, de uma cena f de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} correspondente a uma determinada região da superfície terrestre.

É possível estimar \overline{g}_v de \mathbb{B} em \mathbb{R} a partir de \overline{g}_u de \mathbb{B} em \mathbb{R} . Para isso, é bastante encontrar o filtro com FEP \overline{h}_F de \mathbb{B} em \mathbb{R} que permita a seguinte aproximação:

$$\overline{g}_v \cong (\overline{g}_u)_f \quad (5.3a)$$

$$\text{onde } (\overline{g}_u)_f = \overline{h}_F * \overline{g}_u. \quad (5.3b)$$

\overline{h}_F de \mathbb{B} em \mathbb{R} é o resultado da digitalização de h_F de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} que verifica

$$h_v = h_F * h_u \quad (5.4)$$

(diz-se que $h_F * h_u$ simula h_v). A expressão (5.3a) é uma aproximação pois a versão digitalizada da convolução de duas funções, \overline{g}_v , não é, geralmente, igual à convolução de duas versões digitalizadas, $(\overline{g}_u)_f$. Apesar disto, esta aproximação é razoável e sustentará os desenvolvimentos seguintes.

Sejam as FEPs h_u e h_v de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} separáveis e gaussianas. Conseqüentemente h_F da equação (5.4) deve ser também separável e gaussiana.

Às FEPs h_u , h_v e h_F estão associados seus respectivos pares de variâncias $(\sigma_{u1}^2, \sigma_{u2}^2)$, $(\sigma_{v1}^2, \sigma_{v2}^2)$ e $(\sigma_{F1}^2, \sigma_{F2}^2)$, onde (Banon, 1990):

$$\sigma_{Fi}^2 = \sigma_{vi}^2 - \sigma_{ui}^2, \quad i = 1, 2. \quad (5.5)$$

Ao filtro \overline{h}_F de \mathbb{B} em \mathbb{R} está associado o par de variâncias $(\overline{\sigma}_1^2, \overline{\sigma}_2^2)$ e será considerada a seguinte aproximação

$$\overline{\sigma}_i^2 \cong \sigma_{Fi}^2, \quad i = 1, 2.$$

5.1.2 - SÍNTESE DO FILTRO DE SIMULAÇÃO

Seja o filtro com FEP h_i de \mathcal{E}_i em \mathbb{R} , na direção i ($= 1, 2$) definida por

$$h_i(x_i) = a_{0i} \exp(-C_i x_i^2) \quad (x_i \in \mathcal{E}_i),$$

onde $a_{0i}, C_i \in \mathbb{R}^+$.

Dado $N = 2j + 1$, $j \in \mathbb{N}$, sejam os conjuntos \mathcal{K}_N e \mathcal{K}_N^+ respectivamente definidos por

$$\mathcal{K}_N = \{k \in \mathbb{Z} : |k| \leq (N - 1)/2\}$$

e

$$\mathcal{K}_N^+ = \{k \in \mathcal{K}_N : k > 0\}.$$

Se

$$x_i = \delta_i k, \quad k \in \mathcal{K}_N,$$

então, por uma propriedade da exponencial (potência de potência),

$$h_i(\delta_i k) = a_{0i} [\exp(-C_i \delta_i^2)]^{k^2}.$$

Portanto, define-se h_{wi} de \mathcal{K}_N em \mathbb{R} (Fig. 5.1) por

$$h_{wi}(k) = h_i(\delta_i k). \quad (5.6)$$

Ou seja,

$$h_{wi}(k) = a_{ki}, \quad (5.7a)$$

com

$$a_{ki} = a_{0i} w_i^{k^2} \quad (5.7b)$$

onde

$$w_i = \exp(-C_i \delta_i^2). \quad (5.7c)$$

h_{w_i} de K_N em \mathbb{R} é uma FEP cujo domínio é K_N , de tamanho N , representável pela matriz $[h_{w_i}]$ linha (no caso $i = 1$) ou coluna (no caso $i = 2$).

Observa-se que (pela equação (5.7c))

$$0 < w_i < 1. \quad (5.8)$$

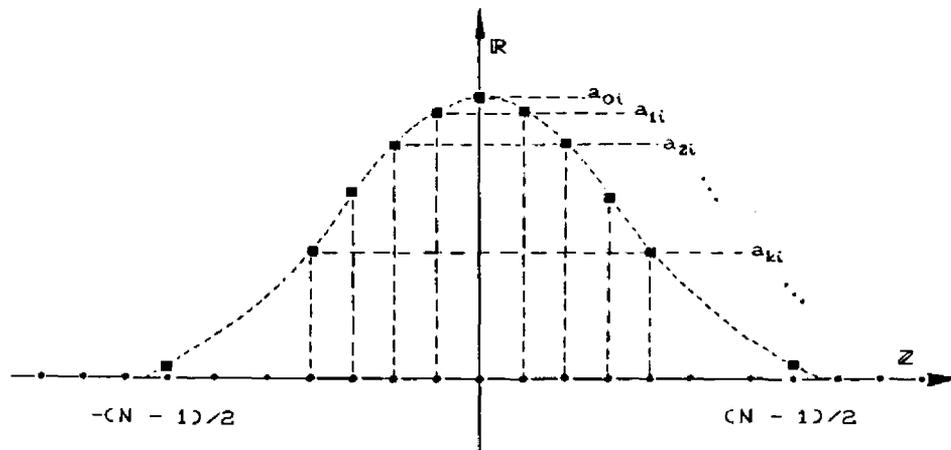


Fig. 5.1 - Gráfico de h_{w_i} .

Sobre h_{w_i} , a condição da equação (5.1) deve ser efetivada, isto é,

$$\sum_{k \in K_N} h_{w_i}(k) = 1,$$

o que permite determinar a_{0i} por:

$$a_{0i} = \left[1 + 2 \left(\sum_{k \in K_N^+} w_i^{k^2} \right) \right]^{-1}. \quad (5.9)$$

A variância do filtro, σ_i^2 , é calculada pela equação (5.2)

(com $m_i = 0$), isto é,

$$\sigma_i^2 = 2 \sum_{k \in \mathcal{K}_N^+} (\delta_i k)^2 h_{wi}(k)$$

(tendo-se em vista (5.6)), de onde, substituindo-se as equações (5.7) e (5.9), chega-se a

$$\sigma_i^2 = \frac{2\delta_i^2 \left(\sum k^2 w_i^{k^2} \right)}{1 + 2 \left(\sum w_i^k \right)}, \quad (k \in \mathcal{K}_N^+). \quad (5.10)$$

Seja o filtro com FEP $h_{wi}^{(n)}$ definida como o resultado de n aplicações da FEP h_{wi} ,

$$[h_{wi}^{(n)}] = [h_{wi}^{(1)}] * [h_{wi}^{(2)}] * \dots * [h_{wi}^{(n-1)}]$$

ou, equivalentemente, como o resultado de $n - 1$ convoluções utilizando h_{wi} .

O resultado de repetidas convoluções, onde as funções envolvidas satisfazem determinadas condições, segundo Papoulis (1962) e como aplicado por Banon (1990), tende a ser uma função mais próxima possível de uma função gaussiana, quando se aumenta o número de convoluções. Isto encontra respaldo em um resultado conhecido em Teoria das Probabilidades como "Teorema do Limite Central".

A variância σ_{ni}^2 do filtro com FEP $h_{wi}^{(n)}$ é dada por

$$\sigma_{ni}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_i^{(1)2} + \sigma_i^{(2)2} + \dots + \sigma_i^{(n-1)2} = n\sigma_i^2. \quad (5.11)$$

A equação (5.11) é a igualdade de Bienaymé (conforme consta em Banon (1990)).

Então, sendo σ_i^2 dado pela equação (5.10), a variância σ_{ni}^2 do filtro com FEP $h_{wi}^{(n)}$ é dada por:

$$\sigma_{ni}^2 = \frac{2n\delta_i^2 \left(\sum k^2 w_i^{k^2} \right)}{1 + 2 \left(\sum w_i^k \right)}, \quad (k \in \mathcal{K}_N^+). \quad (5.12)$$

Dados σ_{ni} , δ_i , N e n , desenvolvendo-se a expressão (5.12) chega-se à seguinte equação polinomial em w_i (de grau $((N-1)/2)^2$)

$$\sum_{k \in \mathcal{K}_N^+} (\sigma_{ni}^2 - n\delta_i^2 k^2) w_i^{k^2} + \sigma_{ni}^2 / 2 = 0 \quad (5.13)$$

A resolução de (5.13) é suficiente para a determinação de h_{wi} , desde que w_i satisfaça (5.8). É relevante observar para $N = 3$, $\mathcal{K}_3^+ = \{1\}$, que a equação (5.13) é do primeiro grau e, portanto, recai no caso apresentado por Banon (1990).

Seja o polinômio f_i ($i = 1, 2$) definido por:

$$f_i(w_i) = c_0 + \sum_{k \in \mathcal{K}_N^+} c_k w_i^{k^2} \quad (5.14a)$$

com

$$c_0 = -\sigma_{ni}^2 / 2 \quad (5.14b)$$

$$e \quad c_k = n\delta_i^2 k^2 - \sigma_{ni}^2. \quad (5.14c)$$

A igualdade representada pela equação (5.13) ter-se-á verificado quando

$$f_i(w_i) = 0. \quad (5.15)$$

A equação polinomial (5.15) acima possui $((N - 1)/2)^2$ raízes. A Regra de Descartes permite inferir a cerca de quantas dessas raízes são reais e positivas (Marins, 1985): "O número de raízes reais positivas de uma equação polinomial com coeficientes reais, nunca é maior do que o número de trocas de sinal, na sequência de seus coeficientes não nulos, e se é menor, então é sempre, por um número par". Portanto, a equação $f_i(w_i) = 0$ possui apenas uma raiz real positiva, visto que, observando-se (5.14), c_0 é negativo e $c_1, c_2, \dots, c_{(N-1)/2}$ é uma seqüência crescente de números reais, de modo que, se existe troca de sinal, então esta é única.

A função polinomial f_i é contínua no intervalo $[0, 1]$ e

$$f_i(0) = c_0$$

($c_0 < 0$). Então, aplicando-se o Teorema de Bolzano (Cláudio e Marins, 1988), para que f_i possua pelo menos uma raiz neste intervalo, é suficiente que

$$f_i(1) > 0. \tag{5.16}$$

Se, pela Regra de Descartes, é certa a existência de uma única raiz real positiva para $f_i(w_i) = 0$, e, se há pelo menos uma raiz no intervalo $[0, 1]$, dado que $f_i(1) > 0$ (e $f_i(0) < 0$), pelo teorema de Bolzano, então existe uma e somente uma raiz neste intervalo (e esta é diferente de 0 e 1). Logo, se $f_i(1) > 0$ então $f_i(w_i) = 0$ tem uma única raiz tal que $0 < w_i < 1$.

O resultado acima revela uma propriedade fundamental, caracterizando-se o filtro relativamente a σ_{ni}, δ_i, N e n , a partir da desigualdade (5.16), como será visto mais adiante.

Para a solução da equação (5.15) foi escolhido o método de Newton-Raphson (McCracken e Dorn, 1964; Cláudio e Marins, 1988), desenvolvido da seguinte maneira.

Seja a função f_i' ($i = 1, 2$), a derivada de f_i , dada por:

$$f_i'(w_i) = \sum_{k \in K_N^+} k^2 c_k w_i^{(k^2 - 1)},$$

onde c_k é dado pela equação (5.14c).

Um zero de f_i é buscado recursivamente através da equação

$$w_{i(j+1)} = w_{i(j)} - f_i(w_{i(j)})/f_i'(w_{i(j)}), \quad (5.17)$$

inicializada com w_{0i} . A solução é w_{ri} ,

$$w_{ri} = w_{i(j+1)},$$

tal que

$$w_{i(j+1)} - w_{i(j)} < \varepsilon$$

onde ε é um número pequeno representando a precisão desejada.

Uma escolha adequada de w_{0i} permite a convergência de (5.17) para a raiz de (5.15) no intervalo de interesse dado em (5.8). A Figura 5.2 mostra o gráfico de f_i (determinado a partir de valores típicos de σ_{ni} , δ_i , N e n) verificando (5.16). Observa-se para $w_{ri} < w_i < 1$ que $f_i'(w_i)$ e $f_i(w_i)$ são positivos. Foi observado numericamente também que a derivada assume valores elevados em relação a

própria função, pelo menos nesse intervalo, permitindo uma rápida convergência (tendo-se em vista (5.17)). Escolhendo-se então

$$w_{0i} = 1, \quad i = 1, 2,$$

w_{ri} será imediatamente menor que 1 e não há necessidade de monitoramento da convergência, facilitando-se a implementação automática.

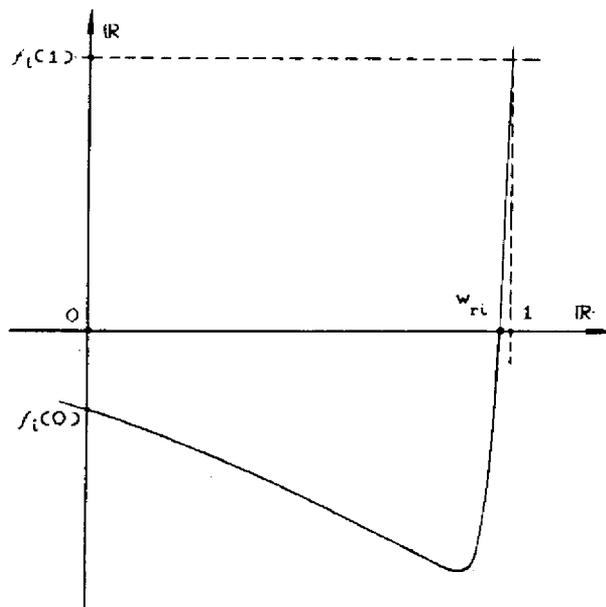


Fig. 5.2 - Gráfico de f_i .

Retomando-se a desigualdade (5.16), deduz-se que os parâmetros σ_{ni} , δ_i , N e n do filtro com FEP $h_{w1}^{(n)}$, devem verificar

$$\sigma_{ni}/\delta_i < k(N, n). \quad (5.18)$$

onde o limiar $k(N, n)$ é dado por

$$k(N, n) = \left[(2n/N) \left(\sum_{k \in K_N^+} k^2 \right) \right]^{1/2}. \quad (5.19)$$

$k(N, n)$ passa a ser uma característica do filtro com FEP $h_{w_i}^{(n)}$, restringindo sua utilização desde que (5.18) seja obedecida.

Considere-se o seguinte exemplo. Para se atingir um desvio padrão σ_n com um passo de digitalização δ , utilizando-se um filtro com FEP de tamanho $N = 3$ a ser aplicado $n = 20$ vezes, deve-se verificar $\sigma_n/\delta < k(3, 20)$, $k(3, 20) = 3,67$. O limiar $k(3, 20)$ pode ser comparado com os limiares $k(5, 7) = 3,73$ e $k(13, 1) = 3,74$, por exemplo (isto é, se $\sigma_n/\delta < k(3, 20)$ então $\sigma_n/\delta < k(5, 7)$ e $\sigma_n/\delta < k(13, 1)$), de onde se conclui que as três opções são aceitáveis, ficando por isso adaptável a uma determinada situação que gerará o critério de escolha.

Seja

$$k(N) = k(N, 1). \quad (5.20)$$

Considerando-se a equação (5.20), $k(N, n)$ de (5.19) pode ser reescrito como

$$k(N, n) = k(N) (n^{1/2}).$$

Portanto, sejam o filtro com FEP h_s de \mathbb{B} em \mathbb{R} , $\mathbb{B} = \mathcal{C}_1 \times \mathcal{C}_2$, $[h_{w_1}^{(n)}]$ e $[h_{w_2}^{(n)}]$ as FEPs de filtros que atuam em duas direções ortogonais, como matrizes linha e coluna, respectivamente. h_s é a FEP de um filtro 2D tal que

$$[h_s] = [h_{w_1}^{(n)}] * [h_{w_2}^{(n)}],$$

ou,

$$[h_s] = ([h_{w_1}] * [h_{w_2}])^{(n)}$$

(pela associatividade da convolução). Observa-se que h_s é

separável e com par de variâncias $(\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2)$, sendo $\sigma_{n_i}^2$ ($i = 1, 2$) dada pela equação (5.12).

h_s é tomada como a FEP do filtro de simulação buscado, admitindo-se que seja próxima de h_F , verificando-se que

$$(\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2) \cong (\sigma_{F_1}^2, \sigma_{F_2}^2), \quad (5.21)$$

por hipótese. Para obtenção de h_s é resolvida a equação (5.15) para cada direção, dados σ_{n_i} , δ_i , N e n (considerando-se $[h_s]$ com suporte $N \times N$), devendo-se verificar (pela condição (5.18))

$$\sigma_{n_1}/\delta_1 < k(N, n)$$

e

$$\sigma_{n_2}/\delta_2 < k(N, n)$$

onde, tendo-se em vista (5.21), σ_{n_i} ($i = 1, 2$) é determinado a partir da equação (5.5). Ou seja, deve-se optar pelo par (N, n) (que pode ser escolhido de acordo com critérios de eficiência e custo computacional) tal que

$$k(N, n) > \max(\sigma_{n_1}/\delta_1, \sigma_{n_2}/\delta_2),$$

ou, se $\delta_1 = \delta_2 = \delta$,

$$k(N, n) > (1/\delta) \max(\sigma_{n_1}, \sigma_{n_2}).$$

De maneira equivalente (combinando-se com (5.19)), pode-se escolher o n mínimo dado N , através de

$$n > \frac{N}{2\delta^2 \left(\sum_{k \in K_N^+} k^2 \right)} \max(\sigma_{n_1}^2, \sigma_{n_2}^2)$$

5.2 - MODELO RADIOMÉTRICO DA SUPERFÍCIE IMAGEADA

Seja G uma porção da superfície de referência formada pelos pontos imageados pelo sensor com largo campo de visada.

A superfície G será modelada radiometricamente por um conjunto de imagens produzidas pelo sensor com menor campo de visada *construídas com controle geométrico* numa projeção cartográfica.

a) Imagens construídas com controle geométrico

Uma imagem construída com controle geométrico é a função $g: E \rightarrow K$, $M \in E \mapsto g(M) \in K$, onde E é um plano paralelo ao plano E_c , representando a superfície G imageada (conforme Seção 2.3).

Em E está montado um sistema $S_E = \{i_E, j_E\}$, de origem O_E , ortonormal e anti-horário, de modo que, a um ponto $M \in E$, associa-se uma dupla $(x, y) \in B = \mathbb{C}_1 \times \mathbb{C}_2$ de coordenadas cartesianas, tal que $\vec{O_E M} = xi_E + yj_E$. Ou seja, tomam-se as coordenadas cartesianas no sistema S_E sob uma malha retangular no plano E , onde $M(x, y)$ em S_E verifica

$$(x, y) = (\delta_1 i, \delta_2 j), \quad (5.22)$$

onde $i, j \in \mathbb{Z}$.

A cada ponto $M(x, y) (= M(\delta_1 i, \delta_2 j))$ em S_E , associa-se um ponto $M(x_c, y_c)$ em S_{E_c} , através da seguinte transformação (Serra, 1987):

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (j - j_0)\delta_2 \\ (i_0 - i)\delta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

ou, inversamente,

$$\begin{bmatrix} \delta_1 i \\ \delta_2 j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{c0} - y_c \\ x_c - x_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 i_0 \\ \delta_2 j_0 \end{bmatrix} ,$$

onde são conhecidos o ângulo α de rotação entre os sistemas S_E e S_{Ec} , e o ponto M_0 , de coordenadas $M_0(x_{c0}, y_{c0})$ em S_{Ec} e $M_0(\delta_1 i_0, \delta_2 j_0)$ em S_E .

Uma imagem assim construída é produzida a partir da imagem bruta e de um modelo geométrico de sua aquisição, que utiliza dados de sistema transmitidos pelo satélite (Atitude, efemérides e condições eletromecânicas) (Serra, 1987). Este modelo, no entanto, envolve as imperfeições dos dados que utiliza, levando a erros.

A qualidade geométrica (ou, mais diretamente, a exatidão geodésica) das imagens é aqui de fundamental importância tendo-se em vista as características atribuídas à superfície G (isto é, tomada como modelo de uma porção real da superfície terrestre). É adequada, por esse motivo, a utilização de imagens cujo modelo geométrico utilizado para sua construção tenha sido corrigido utilizando-se pontos de controle. A correção é efetuada a partir de um registro da imagem com dados conhecidos da superfície terrestre (com mapa, por exemplo, na projeção cartográfica à qual também está submetida a imagem), através de coordenadas de feições homólogas (Mather, 1987; Jensen, 1986).

De modo particular, a correção das imagens será realizada de forma tal que satisfaça as condições de exatidão suficientes para o propósito do presente trabalho. A suficiência é relativa à comparação entre as dimensões do pixel dos sensores com menor e com maior campo de visada,

como será visto a seguir. A correção terá um caráter de ajuste e não propriamente de um refinamento (Machado e Silva, 1989) do modelo geométrico associado à imagem construída.

Considere-se que, após o registro, os parâmetros, ou elementos ligados aos parâmetros da transformação afim (da equação (5.23)), α e M_0 , são alterados para α' e, $M_0'(x_{c0}', y_{c0}')$ em S_{Ec} e $M_0'(\delta_1' i_0, \delta_2' j_0)$ em S_E . Sejam g_k , uma imagem construída com controle geométrico e corrigida com pontos de controle, e um ponto M do qual se conheçam suas coordenadas numa projeção cartográfica, $M(x_c, y_c)$ em S_{Ec} . Através da transformação T_{k2} de \mathbb{R}^2 em \mathbb{Z}^2 definida por

$$T_{k2} = T_{k2}'' \circ T_{k2}' \quad (5.24)$$

onde

$$T_{k2}' \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha' & \text{sen}\alpha' \\ -\text{sen}\alpha' & \cos\alpha' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{c0}' - y_c \\ x_c - x_{c0}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1' i_0 \\ \delta_2' j_0 \end{bmatrix}$$

e

$$T_{k2}'' \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{int}[x/\delta_1' + 0,5] \\ \text{int}[y/\delta_2' + 0,5] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix}$$

($\text{int}[\cdot]$ - parte inteira de), determina-se, com a exatidão conhecida, as coordenadas de imagem, linha i e coluna j , do ponto $M(x, y)$ do plano da imagem g_k , tal que (x, y) verifica (5.22).

Seja um ponto $X(\phi, \lambda)$ da superfície G , ao qual se pode associar um ponto $M(x_c, y_c)$ em S_{Ec} , conforme a relação (2.8). Seja a transformação T_{k1} de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R}^2 representando esta relação,

$$T_{k1}(\phi, \lambda) = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix}, \quad (5.25)$$

onde x_c e y_c são dados pela equação (2.9). Então, de uma forma mais abrangente, a transformação T_k ,

$$T_k = T_{k2} \circ T_{k1}, \quad (5.26)$$

permite, dado um ponto $X(\phi, \lambda)$ da superfície G , identificá-lo, com exatidão conhecida, como o ponto de coordenadas (i, j) (linha i e coluna j) do plano da imagem g_k . Isto é, g_k pode ser considerada como o modelo de uma porção da superfície G cujos pontos estão associados aos pontos da respectiva porção de E .

b) O caso das imagens TM/Landsat

Seja a imagem g_k , uma imagem obtida pelo sensor TM/Landsat. Considerando-se no caso das imagens TM

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta, \quad (5.27a)$$

para um dado ponto $M(x, y)$ em S_E , a equação (5.22) torna-se

$$(x, y) = \delta(i, j), \quad (5.27b)$$

com $(i, j) \in \mathbb{Z}^2$.

Quanto à exatidão geodésica, as imagens TM têm sido avaliadas em termos de *erro interno* (erro relativo - entre pixels de uma mesma imagem) tendo-se encontrado valores da ordem de 1,5 pixel (45m aprox.). Para *erro de posicionamento* (erro absoluto - deslocamento da imagem em relação à superfície terrestre), no entanto, chega-se a valores da ordem de 1 Km, conforme resultados obtidos por D'Alge (1987) para as imagens produzidas pelo INPE, mas não

diferindo significativamente de outros resultados encontrados na literatura.

Estas características serão aqui exploradas por permitirem a correção das imagens com um esforço menor. Tal fato acontece porque é suficiente a correção do erro de posicionamento, o que restaria um erro interno perfeitamente aceitável diante dos propósitos deste trabalho. E assim, examinando-se os resultados obtidos por D'Alge (1987), é observável que, para se chegar a um registro razoável, é bastante corrigir as coordenadas do ponto M_0 (isto é, a translação de (5.23)). Tomando-se como constantes o ângulo α , e o fator de escala δ , a alteração necessária resume-se em encontrar $M_0'(x_{c0}', y_{c0}')$ em S_{Ec} . Isto pode ser realizado mesmo utilizando-se apenas um ponto de controle.

Sejam as coordenadas $X(i_1, j_1)$ de um pixel $(X, g_k(X))$ da imagem g_k (pois, (i_1, j_1) é suficiente para identificar o ponto $X(\delta i_1, \delta j_1)$ do plano E) correspondentes às coordenadas $X(x_{c1}, y_{c1})$ em S_{Ec} conhecidas. Seja X um ponto de controle.

A um ponto $M(i_1, j_1)$, que localiza o pixel $(X, g_k(X))$, associa-se seu correspondente $M(x_{c2}, y_{c2})$ em S_{Ec} através da equação (5.23).

Então, o vetor $\Delta d = \overrightarrow{XM}$ é particularmente representativo do deslocamento da imagem TM em relação à superfície terrestre e pode ser utilizado para o ajuste das coordenadas do ponto M_0 . Ou seja, sendo $\Delta d(d_1, d_2)$ em S_{Ec} ,

$$(d_1, d_2) = (x_{c2} - x_{c1}, y_{c2} - y_{c1}),$$

$$(x_{c0}', y_{c0}') = (x_{c0} - d_1, y_{c0} - d_2).$$

Havendo a disponibilidade de n pares de pontos de controle, basta considerar o vetor Δd como uma média aritmética, isto é, $\Delta d(\bar{d}_1, \bar{d}_2)$ em S_{E_c} , com

$$\bar{d}_i = (1/n) \left(\sum_{j=1}^n d_{ij} \right), \quad i = 1, 2.$$

Desse modo, a transformação T_{k_2} de \mathbb{R}^2 em \mathbb{Z}^2 de (5.24) pode ser reescrita para o caso das imagens TM como $T_{k_2}(\text{TM})$,

$$T_{k_2}(\text{TM}) \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{int}(i_0 + A/\delta + 0,5) \\ \text{int}(j_0 + B/\delta + 0,5) \end{bmatrix}, \quad (5.28)$$

onde

$$\begin{aligned} A &= (\cos\alpha)(y_{c_0}' - y_c) + (\sin\alpha)(x_c - x_{c_0}') \\ B &= (\sin\alpha)(y_c - y_{c_0}') + (\cos\alpha)(x_c - x_{c_0}'). \end{aligned}$$

5.3 - AQUISIÇÃO DA IMAGEM BRUTA PELO SENSOR COM LARGO CAMPO DE VISADA

A *imagem bruta* é a função $g': D \rightarrow K$, $(l, c) \in D \rightarrow g'(l, c) \in K$, sendo $D = \{1, \dots, nvr\} \times \{1, \dots, ndt\}$, onde nvr é o número de varreduras, ndt é o número de elementos de imagem (pixels) por varredura e K é o conjunto que representa os níveis de radiâncias espectrais. Isto é, a *imagem bruta* é um conjunto de amostras da superfície G organizadas em uma matriz de dimensões $nvr \times ndt$ com valores em K .

Adquirir a *imagem bruta* é detectar na superfície terrestre a localização geodésica correspondente a cada elemento de coordenadas $(l, c) \in D$ e atribuir-lhe um nível de radiância espectral, a partir dos modelos do sensor e da superfície terrestre.

Ao ponto Q_0 escolhido, da forma já mencionada anteriormente, está associado o pixel imageado no instante $t = 0s$. Por conveniência, este pixel é o pixel de coordenadas (l_0, c_0) da imagem bruta, onde

$$l_0 = \text{int}(\text{nvr}/2 + 0,5) \quad (5.29a)$$

$$e \quad c_0 = \text{int}(\text{ndt}/2 + 0,5). \quad (5.29b)$$

Cada pixel de coordenadas (l, c) é adquirido em um instante $t_{(l, c)}$ através de uma visada do sensor, representada pelo vetor de visada $\mathbf{u}_{(l, c)}$ determinado por:

$$\left[\mathbf{u}_{(l, c)} \right]_{S_{GG}} = A_{SGG} \left[\mathbf{u}_{(l, c)} \right]_{S'_{IN}}$$

onde A_{SGG} é dada pela equação (3.1) e as coordenadas de $\mathbf{u}_{(l, c)}$ em S'_{IN} , dadas pela equação (4.21).

O instante $t_{(l, c)}$ é o instante da aquisição simultânea dos ndt pixels da linha l , dado pela equação:

$$t_{(l, c)} = (\text{pvr})(l - l_0). \quad (5.30)$$

Vê-se que $t_{(l, c)}$ pode assumir valores negativos no caso das linhas imageadas antes da linha l_0 .

No instante $t_{(l, c)}$ a posição do satélite é $\vec{P}(t_{(l, c)})$, onde $\vec{OP}(t_{(l, c)}) = \mathbf{r}(\theta_1)$, $\theta_1 = \omega_1 t_{(l, c)}$, sendo

$$\left[\mathbf{r}(\theta_1) \right]_{S_{GG}} = A_{SGG} \left[\mathbf{r}(\theta_1) \right]_{S'_{IN}}$$

onde as coordenadas de $\mathbf{r}(\theta_1)$ em S'_{IN} são dadas pela equação (4.12a).

A projeção do centro do detetor sobre o elipsóide de referência, correspondente ao pixel $(1, c)$ da imagem bruta, é o ponto $Q_{(1, c)}$ tal que:

$$\vec{OQ}_{(1, c)} = \vec{OP}(t_{(1, c)}) + \rho \mathbf{u}_{(1, c)} \quad (5.31)$$

onde ρ é a distância do ponto $P(t_{(1, c)})$ ao ponto visado $Q_{(1, c)}$, nesse instante (Fig. 5.3). ρ pode ser determinado, considerando-se $Q_{(1, c)}(x_q, y_q, z_q)$, $\mathbf{u}_{(1, c)}(x_u, y_u, z_u)$ e $P(t_{(1, c)})(x_p, y_p, z_p)$ em S_{GG} , através da mínima raiz positiva da seguinte equação (Machado e Silva, 1989):

$$A\rho^2 + B\rho + C = 0,$$

onde

$$A = (1 - e^2)(x_u^2 + y_u^2) + z_u^2,$$

$$B = 2[(1 - e^2)(x_u x_p + y_u y_p) + z_u z_p],$$

$$e \quad C = (1 - e^2)(x_p^2 + y_p^2 + a^2) + z_p^2.$$

A partir da relação (2.2), verifica-se que as coordenadas de $Q_{(1, c)}(\phi_q, \lambda_q)$ dado S_{GG} podem ser determinadas utilizando-se a equação (2.3), a partir das coordenadas de $Q_{(1, c)}(x_q, y_q, z_q)$ em S_{GG} .

Sejam uma imagem g_k e a correspondente transformação T_k como definida em (5.26). Através de T_k determina-se o representante de $Q_{(1, c)}(\phi_q, \lambda_q)$ no plano E da imagem g_k , $Q_{(1, c)}(i, j)$, de modo que

$$T_k(\phi_q, \lambda_q) = (i, j).$$

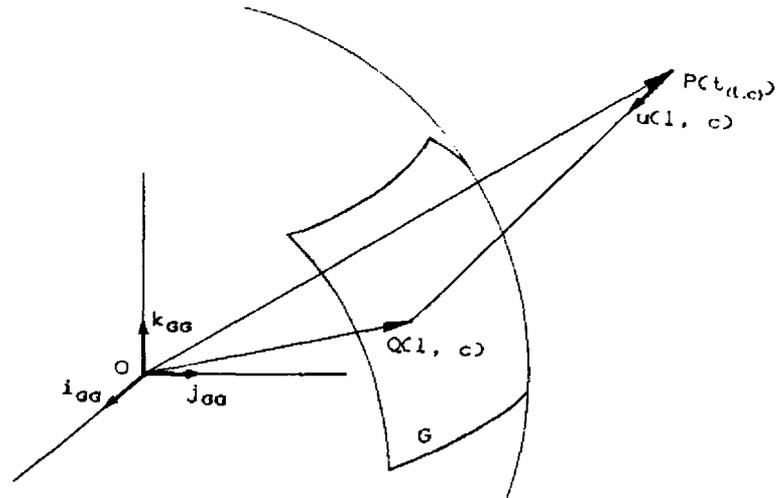


Fig. 5.3 - Determinação do ponto $Q(1, c)$ no inst. $t_{(1, c)}$.

Considere-se que g_k é uma imagem produzida por um sensor com pequeno campo de visada representável por um filtro com FEP h_u de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} , separável e gaussiana com par de variâncias $(\sigma_{u_1}^2, \sigma_{u_2}^2)$. E, g' é a imagem produzida pelo sensor com largo campo de visada (conforme modelo descrito no Capítulo 4) representável por um filtro com FEP h_v de \mathbb{R}^2 em \mathbb{R} separável e gaussiana com par de variâncias $(\sigma_{v_1}^2, \sigma_{v_2}^2)$.

Seja a FEP $h_F(1, c)$ de um filtro 2D de simulação dado por h_s , com par de variâncias $(\sigma_{F_1}^2, \sigma_{F_2}^2)$ cuja variância $\sigma_{F_i}^2$ ($i = 1, 2$) satisfaz (5.5).

As variâncias $\sigma_{u_i}^2$ e $\sigma_{v_i}^2$ são determinadas a partir da equação (4.36), isto é,

$$\sigma_{v_i} = (1/\pi)(2 \log 2)^{1/2} k_{v_i} \text{IFOV}_{v_i} \quad (5.32)$$

dados k_{v_i} (da equação (4.35)) e IFOV_{v_i} (da equação (4.29)), conhecidos $(1, c)$ e $P(t_{(1, c)})$, e a variância $\sigma_{u_i}^2$ é determinada a partir de

$$\sigma_{U_i} = (1/\pi)(2\log 2)^{1/2} k_{U_i} \delta_{U_i},$$

sendo que aqui será considerado o caso em que $k_i = k$, $\delta_{U_i} = \delta$ e conseqüentemente $\sigma_{U_i} = \sigma_U$, para $i = 1, 2$. No caso TM, por exemplo, $\sigma_U = 17m$ (Banon, 1990) (tomando-se o máximo valor das duas direções). O desvio padrão do filtro de simulação, σ_{F_i} ($i = 1, 2$), é então determinado por

$$\sigma_{F_i} = (\sigma_{V_i}^2 - \sigma_U^2)^{1/2}.$$

Assim, dados σ_{F_i} e o passo de digitalização δ_i de g_k , considerando-se uma máscara quadrada $N \times N$ com N tão grande que se chegue $n = 1$, desde que $\sigma_{F_i}/\delta_i < k(N)$ (conforme (5.20)), determina-se a FEP $h_F(l, c)$ a partir da matriz $[h_F(l, c)]$, resolvendo-se a equação (5.15). Observa-se que $h_F(l, c)$ depende da posição correspondente ao pixel de coordenadas (l, c) da imagem bruta g' , visto que é conhecida a variação de σ_{V_i} (da equação (5.32)) decorrente da variação do IFOV V_i .

Finalmente, é procedida uma reamostragem na vizinhança de $Q_{(l, c)}(i, j)$ de acordo com as características do imageamento pelo sensor com largo campo de visada, modelada pelo filtro de simulação $h_F(l, c)$. Isto é, ao pixel de coordenadas (l, c) da imagem bruta g' deste sensor, será atribuído o valor numérico

$$g'(l, c) = (g_k)_f(i, j)$$

onde

$$\begin{aligned} (g_k)_f(i, j) &= (h_F(l, c) * g_k)(i, j) = \\ &= \sum_{m \in K_N} \sum_{n \in K_N} h_F(l, c)(m, n) g_k(i - m, j - n) \end{aligned}$$

Observação:

- . No processo de obtenção da imagem g' acima apresentado, admite-se que sejam aproximadamente paralelas a direção das linhas da imagem g_k e a direção das varreduras efetuadas pelo sensor modelado (onde a direção das linhas de uma imagem é determinada em função do ângulo que estas formam com a direção Norte-Sul geográfica). A diferença entre as inclinações das órbitas dos satélites que comportam sensores com largo campo de visada e com menor campo de visada é uma boa estimativa da diferença entre direções de varreduras. Considerando-se os sensores SSR e TM, há uma proximidade de valores de inclinações ($I_{SSR} = 82,0^\circ$ (Santana et al., 1988) e $I_{TM} = 81,8^\circ$ (Mather, 1987), onde I é o ângulo definido na (Fig. 4.1), permitindo a aplicação do que foi desenvolvido nesta seção, como será verificado no Cap. 7.

CAPÍTULO 6IMPLEMENTAÇÃO

Nesta implementação não há preocupação em deter-se no que exigiria o empenho de técnicas mais apuradas de engenharia de "software", visto que não se pretende tornar operacional a geração de um produto de uso imediato pelos usuários de dados de Sensoriamento Remoto. A análise dos resultados deverá encaminhar o tema desta dissertação no sentido de uma inspiração para futuros trabalhos de objetivos mais amplos.

O processo para obtenção da imagem bruta do sensor com largo campo de visada conta com determinadas particularidades advindas de simplificações de ordem técnica, conforme será comentado no Capítulo 7. Dentre estas, que se permita uma flexibilização de acordo com a disponibilidade das imagens TM.

Foram elaborados programas na linguagem C executáveis em microcomputador, estruturados conforme diagrama de fluxo de dados (DFD) (Apêndice E) mostrado na Fig. 6.1. Abrange dois módulos: o primeiro, envolve a preparação das imagens TM e de um arquivo com os dados utilizados na obtenção da imagem simulada; o segundo, trata da simulação da imagem com largo campo de visada propriamente. Os DFDs referentes a estes processos constam no Apêndice E.

Arquivos intermediários são utilizados com frequência para facilitar a repetição dos experimentos e recuperação de dados.

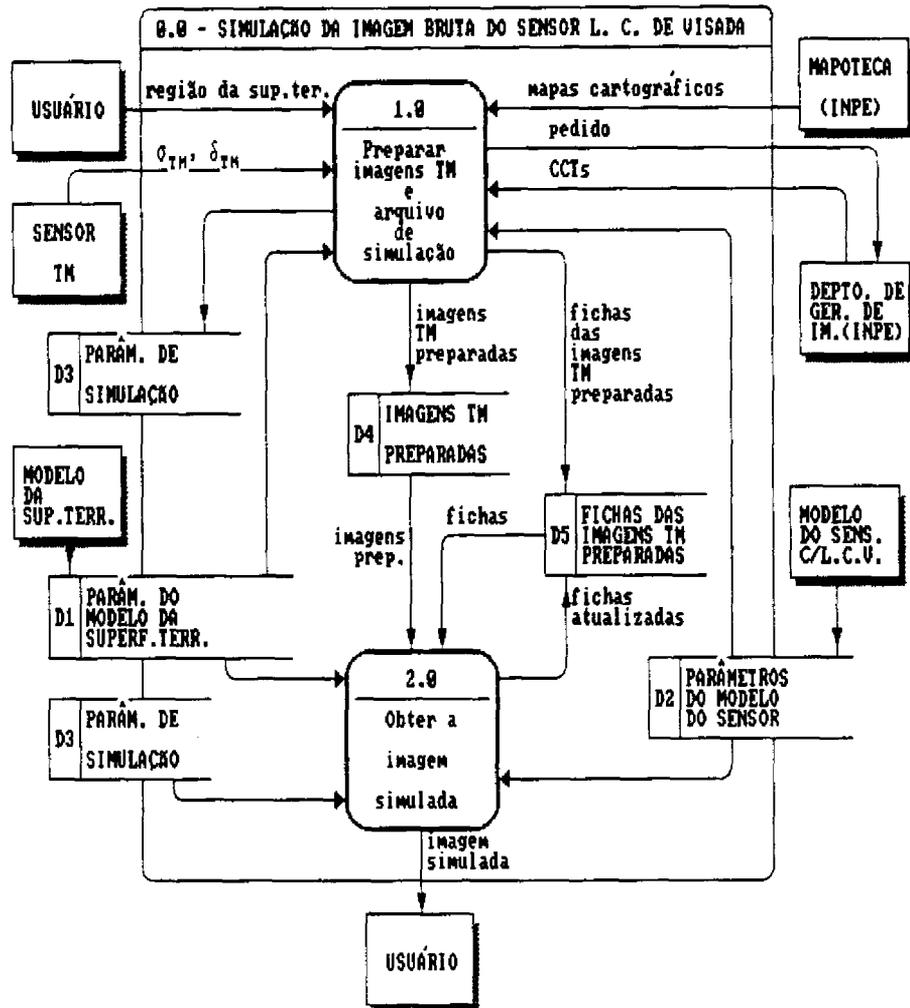


Fig. 6.1 - Diagrama de fluxo de dados.

A entrada de dados sobre os modelos envolvidos é organizada em arquivos distintos. Os valores dos parâmetros do modelo do sensor preenchem um arquivo cujo conteúdo é carregado na memória sob uma estrutura de dados com os seguintes campos:

- Altitude do satélite (H) e
- Inclinação da órbita (I) (Seção 4.1);
- Campo de visada instantâneo (IFOVrad) (Seção 4.2);
- Característica de atenuação da FTM ($\gamma_i = \gamma$, $i = 1, 2$) (Seção 4.2.2.2);

- e) Número de detetores do plano focal (ndt) (Seção 4.1);
- f) Número de varreduras consideradas (nvr) (Seção 5.3) (aqui, tomado como igual ao número de detetores do plano focal);

O outro arquivo é preenchido com os valores dos parâmetros do modelo da superfície terrestre, carregado na memória do microcomputador sob uma estrutura de dados contendo:

- a) Semi-eixo maior (a) e
- b) Excentricidade (e) (Seção 2.1);
- c) Velocidade angular em relação ao sistema inercial (ω_2) (Cap. 3);
- d) Constante geogravitacional da Terra (μ) (Seção 4.1.1).

6.1 - PREPARAÇÃO DAS IMAGENS DE ENTRADA E DO ARQUIVO DE SIMULAÇÃO

Definida inicialmente uma região de interesse da superfície da Terra, esta é localizada geodesicamente através da faixa de latitude e longitude onde se encontra: $((\phi_1, \lambda_1), (\phi_2, \lambda_2))$. Orientando-se por estas coordenadas, são selecionadas imagens TM, selecionados mapas cartográficos para identificação de pontos de controle e é arbitrado o ponto $Q_0(\phi_0, \lambda_0)$ (Seção 4.1.1.1) (tal que, $\phi_1 < \phi_0 < \phi_2, \lambda_1 < \lambda_0 < \lambda_2$). O ponto Q_0 e o conjunto de todos os dados necessários para simulação é reunido em um arquivo de simulação que será descrito a seguir.

As imagens com menor campo de visada, do sensor TM/Landsat, destinadas a compor a imagem bruta do sensor com largo campo de visada, são dadas através de CCT's (Compatible Computer Tape) produzidas pelo INPE, corrigidas (Serra, 1987) (construídas sob controle geomé-

trico com dados do sistema Landsat na projeção cartográfica UTM). As CCT's podem conter dados relativos a uma cena completa (da ordem de 6200 x 6200 pixels, cobrindo uma área de 185 x 185 km²) ou por quadrantes (com 3500 x 3200 pixels). Apresenta uma estrutura de arquivo com um cabeçalho (ou "Header"), contendo todas as informações concernentes à geração de cada imagem, conforme consta em Souza (1985).

Feita a leitura do cabeçalho da CCT para uma determinada imagem digital TM, os seguintes dados são extraídos. Do registro de dados da cena, são obtidas as coordenadas do centro (convencionado) da imagem ((L₀, C₀)) e obtidos o número de linhas (NL) e o número de colunas (NC). Do registro de dados da projeção UTM, são extraídas as coordenadas de projeção cartográfica correspondentes ao centro da imagem ((E₀, N₀)) e obtidos o ângulo de orientação das linhas da imagem em relação à quadricula UTM (θ_{UTM}) (Fig. 6.2); o passo de digitalização (Δp) e o número da zona de projeção (nz) a que pertence o centro da imagem.

As imagens TM lidas das CCT's precisam ser preparadas no sentido de que cada imagem g_k (Seção 5.2) seja representada por qualquer porção retangular de uma dada imagem TM lida de uma CCT, limitada por (L₁, C₁) e (L₂, C₂) (Fig. 6.3) e tomada tal como na Seção 5.2.B. Os parâmetros da transformação T_k são tais que:

- . $x_{c_0} = E_0$;
- . $y_{c_0} = N_0$;
- . $i_0 = L_0 - L_1$;
- . $j_0 = C_0 - C_1$;
- . $\alpha = \theta_{UTM}$;
- . $\delta = \Delta p$.

Como se trata da projeção UTM, é considerada ainda a longitude do meridiano central, dada em função do número da zona, pela equação (ver Apêndice D)

$$\lambda_{MC} = 6(nz) - 183 \text{ (graus)}. \quad (D.1)$$

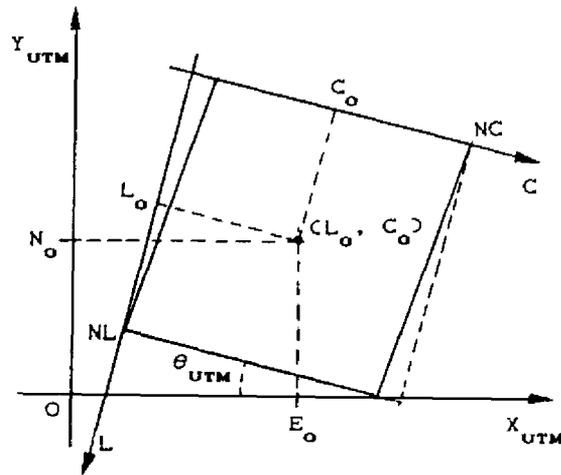


Fig. 6.2 - Orientação do sistema de coordenadas cartesianas ligado ao plano da imagem TM em relação ao Sistema UTM.

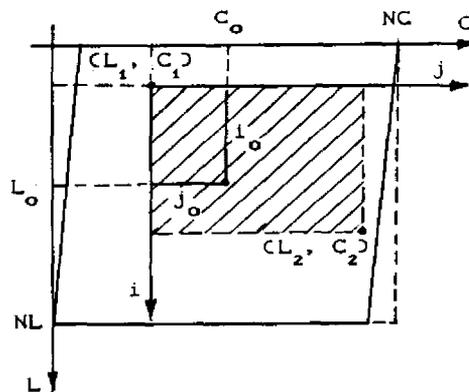


Fig. 6.3 - Preparação da imagem g_k

É útil ressaltar que as porções retangulares da imagem TM podem ser tão estreitas quanto se queira. Não devem conter pixels estranhos - acrescentados durante a geração dessas imagens, devido à compensação do efeito de

rotação da Terra (Serra, 1984) – e, pixels que sejam eventualmente descartados, devem estar na região de superposição entre imagens. Também, não há restrições quanto às superposições entre os trechos escolhidos.

Seguindo-se à preparação de cada imagem TM g_k é obtida a sua respectiva *ficha*. Uma *ficha* é uma estrutura de dados contendo:

- a) Nome da imagem TM preparada;
- b) Parâmetros da transformação T_k a ela referente (respectivamente, x_{c0} , y_{c0} , i_0 , j_0 , α , δ , λ_{MC});
- c) Estado da sua inclusão (se já incluída na imagem de saída ou não).

Ao final, tem-se um total de nim fichas reunidas em um vetor com dados relativos a igual número de imagens envolvidas no processamento (estes dados são também armazenados em disco).

Portanto, é livre a escolha do conjunto de imagens TM destinadas a compor a imagem simulada independentemente do número, do tamanho de cada trecho escolhido e da ordem em que forem incluídos no processamento.

Com o objetivo de organizar a entrada para a geração da imagem de saída, é montado um arquivo de simulação. Seu conteúdo é posteriormente mantido na memória do computador sob uma estrutura de dados contendo:

- a) Nome da imagem de saída;
- b) Total de imagens TM preparadas;
- c) Ponto $Q_0(\phi_0, \lambda_0)$;
- d) Trecho da imagem com largo campo de visada a ser produzido, em função da disponibilidade das imagens TM (definido através do número da coluna inicial

- (ci) e número de colunas (nc), número da linha inicial (li) e número de linhas (nl));
- e) Desvio padrão característico do sensor TM (σ_{TM}) (Banon, 1990);
- f) Passo de digitalização do TM (δ_{TM}) (Banon, 1990);
- g) Tamanho adequado do filtro de simulação (N) (Seção 5.1.2).

Observação:

- . Todas as imagens referidas no presente trabalho são representadas fisicamente com o mesmo formato implementado no SITIM (Sistema de Tratamento de Imagens) pelo INPE. É utilizado o conceito de *entidade imagem* (INPE, 1988), estabelecido da seguinte forma. Uma imagem é identificada por um nome (*nome_imagem*) e compõe-se de um arquivo *descritor* e de bandas espectrais que armazenam os valores dos pixels da imagem. O descritor informa o local de armazenamento da imagem (disco ou tela), resolução espacial (horizontal e vertical), nome de cada banda (*nome_banda*), número de linhas e pontos por linha, etc. No caso da imagem estar localizada em disco, o descritor é armazenado neste e com o nome *<nome_imagem>.d*. É armazenado com o nome *tela.d* na memória do computador, se a imagem estiver na unidade de visualização de imagens. Cada banda da imagem é um arquivo identificado por *<nome_imagem>_<nome_banda>.i*.

6.2 - OBTENÇÃO DA IMAGEM SIMULADA

O processo de obtenção da imagem simulada está implementado conforme o que é exposto na Seção 5.3, observando-se o seguinte.

Apenas uma imagem TM preparada (g_k) é introduzida no processamento a cada vez, anotando-se em sua ficha a sua inclusão (ver Figuras E.2 e E.3).

A obtenção de cada pixel de coordenadas (l, c) da imagem com largo campo de visada (g') é efetuada em duas etapas, envolvendo-se a geração de dois arquivos intermediários, X e Y, cujos elementos estão em correspondência biunívoca com os pixels da imagem a ser produzida. A FEP do filtro de simulação é dada pela matriz $[h_F(l, c)] = [b_{mn}]$, $m, n = 1, 2, \dots, N$, e uma matriz auxiliar $A(l, c) = [a_{mn}]$ (também $N \times N$) é reservada para leitura e processamento da vizinhança do pixel de coordenadas (i, j) da imagem g_k . Este é o pixel localizado através da visada do sensor modelado correspondente ao pixel de coordenadas (l, c) de g' . Os arquivos X e Y são inicializados com zeros. O arquivo Y tem seu dado y_k correspondente a (l, c) calculado por

$$y_k = y_{k-1} + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_{mn} b_{mn}. \quad (6.1)$$

O outro arquivo, X, tem seu dado x_k correspondente a (l, c) determinado por

$$x_k = x_{k-1} + \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N b_{mn}. \quad (6.2)$$

Isto se repete para cada imagem g_k . Após a inclusão de todas as imagens preparadas, cada pixel de valor z e de coordenadas (l, c) da imagem g' , $((l, c), z)$, é determinado a partir dos dados $((l, c), x)$ e $((l, c), y)$, por

$$z = \text{int}[y/x + 0,5]. \quad (6.3)$$

O objetivo do procedimento acima exposto é tornar a simulação independente da ordem em que sejam inse-

ridas as imagens de entrada, ou de qualquer superposição entre elas (os pixels localizados nas interseções de imagens adjacentes são calculados pela média). É importante observar que cada pixel de coordenadas (i, j) detectado, correspondente a cada (l, c) , pode ou não pertencer ao plano da imagem TM que está sendo processada. É possível, portanto, ocorrer as situações conforme a Fig. 6.4 abaixo. Nesta Figura, a leitura da imagem é feita envolvendo somente os pixels da parte hachurada.

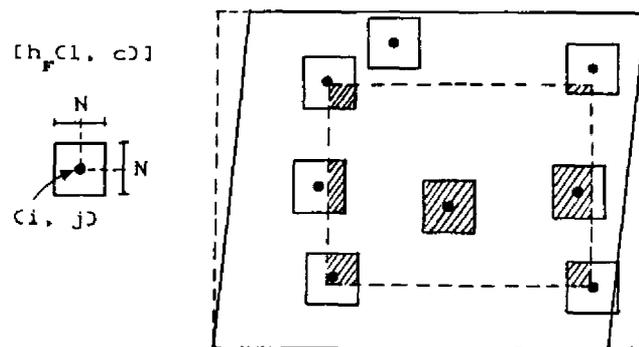


Fig. 6.4 - Possíveis situações durante a aplicação da máscara $[h_f(l, c)]$ na vizinhança de (i, j) .

CAPÍTULO 7EXPERIMENTAÇÃO, RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Este capítulo visa relacionar os experimentos, mencionando os resultados adquiridos por meio da implementação descrita no Capítulo 6, seguidos de comentários pertinentes, tendo como objetivo geral a demonstração da exequibilidade do que é proposto nesta dissertação.

Detalhes de implementação estão de acordo com uma versatilidade, onde se pode, por exemplo, gerar apenas trechos da imagem inteira que seria adquirida pelo sensor modelado numa determinada passagem. Os trechos da imagem bruta do sensor com largo campo de visada então produzidos, são convenientemente correspondentes em área a um quadrante de uma imagem TM. Assim, a experimentação foi realizada com um mesmo quadrante, simulando-se com este várias situações possíveis, equivalentemente ao caso de um conjunto qualquer de imagens TM. Esta e demais simplificações são introduzidas sem que haja prejuízo sobre o objetivo acima exposto.

Foi escolhida a imagem TM5 17662 da órbita 222, ponto 75, quadrante B, de 27 de junho de 1987, corrigida, nas bandas 3 e 4. Refere-se a uma região de relevo ameno, onde é visível a represa de Buritama (SP) e as cidades de Araçatuba, Birigui e Penápolis. Representa basicamente uma área agrícola. Após a leitura do cabeçalho da CCT, obtiveram-se os seguintes dados:

- . $E_0 = 574666,28459$ metros ;
- . $N_0 = 7639306,50061$ metros;
- . $L_0 = 1600$;
- . $C_0 = 1750$;
- . $\theta_{UTM} = 8,956688$ graus;

- . $\Delta p = 30,0$ metros;
- . $n_z = 22$;
- . $NL = 3200$ linhas;
- . $NC = 3500$ colunas.

Como mencionado no texto (Seção 5.2.B), (E_0, N_0) embute um erro devido ao posicionamento do satélite, devendo ser corrigido com pontos de controle. Tendo-se em vista que os experimentos são realizados com um mesmo quadrante, essas coordenadas são aqui admitidas como corretas, restando apenas o erro interno. Um erro dessa ordem terá seu efeito avaliado na Seção 7.1.

Sobre o modelo da superfície terrestre, foi preenchido o arquivo de parâmetros da seguinte maneira:

- . $a = 6378,388$ Km;
- . $e = 0,08199189$;
- . $\omega_2 = \pi/43200$ rad/s;
- . $\mu = 398601$ Km³/s².

Os parâmetros a e e estão de acordo com o elipsóide Hayford (Bakker, 1965).

O modelo do sensor está submetido aos valores de parâmetros atribuídos conforme os requisitos de projeto do SSR/MECB como consta em Santana *et al.* (1988) e Santana *et al.* (1989). Com estes é preenchido o arquivo de parâmetros do modelo da seguinte maneira:

- . $H = 639,73$ Km;
- . $I = 82,00^\circ$;
- . $IFOV_{rad} = 3,314 \times 10^{-4}$;
- . $\gamma = 0,35$;
- . $ndt = 3456$ detetores;
- . $nvr = 3456$ varreduras.

Com esses requisitos, o sensor deverá imagear uma faixa de 732 km da superfície terrestre. Para envolver tal área ($732 \times 732 \text{ Km}^2$), para simular uma imagem com 3456×3456 pixels, seriam necessárias em torno de 25 imagens TM. As imagens produzidas nesta experimentação atingem uma área menor que a abrangida por $1/(8 \times 8)$ (cf. Fig. 7.2 e Fig. 7.7) da imagem bruta do sensor modelado. Ainda assim, as operações realizadas a esta dimensão podem ser repetidas para uma área maior, com um conjunto qualquer de imagens TM.

Então, a imagem TM lida da CCT foi dividida em sub-imagens de banda única, conforme Fig. 7.1. Observe-se a desuniformidade das dimensões dos trechos, a existência ou não de superposições entre eles e que a subdivisão é diferente para cada banda, aproveitando que o processamento pode ser efetuado para uma banda de cada vez. Esta diversidade foi aplicada no sentido de avaliar seus efeitos sobre a imagem de saída, pois, como foi proposto, deve-se independer as dimensões e o número de trechos das imagens a serem inseridos no processamento. Apenas, neste caso, pertencem a um mesmo quadrante.

Cada uma das sub-imagens foi preparada (no sentido exposto na Seção 6.2) e suas fichas produzidas a partir dos dados relacionados abaixo. Nas Tabelas 1 e 2 estão relacionados os trechos da imagem TM determinados a partir respectivamente das bandas 3 e 4 com respectivas coordenadas (i_0, j_0) .

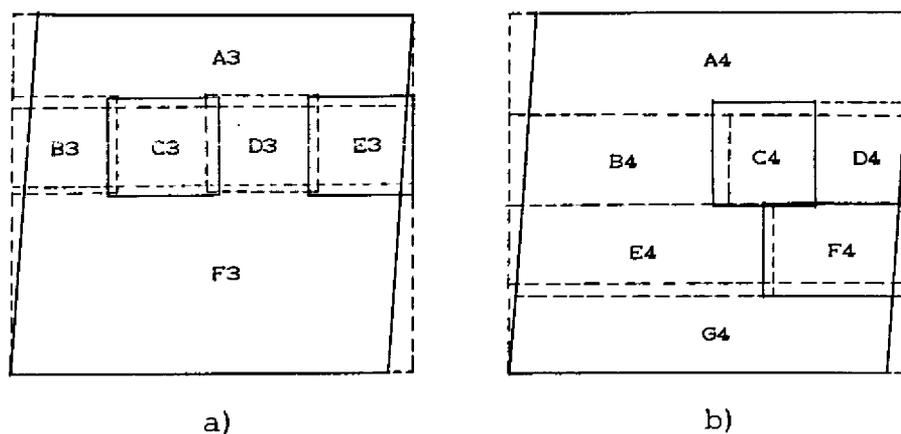


Fig. 7.1 - Esquema de obtenção dos trechos da imagem TM:
a) para a Banda 3 e b) para a Banda 4.

TABELA 7.1 - TRECHOS DA IMAGEM TM BANDA 3 E RESPECTIVAS
COORDENADAS (i_0, j_0) .

nome Im.	trecho $((L_1, C_1), (L_2, C_2))$	(i_0, j_0)
A3	$((0, 0), (849, 3499))$	$(1600, 1750)$
B3	$((750, 0), (1599, 924))$	$(850, 1750)$
C3	$((750, 825), (1599, 1799))$	$(850, 925)$
D3	$((750, 1700), (1599, 2674))$	$(850, 50)$
E3	$((750, 2575), (1599, 3499))$	$(850, - 825)$
F3	$((1550, 0), (3199, 3499))$	$(50, 1750)$

TABELA 7.2 - TRECHOS DA IMAGEM TM BANDA 4 E RESPECTIVAS
COORDENADAS (i_0, j_0) .

nome Im.	trecho $((L_1, C_1), (L_2, C_2))$	(i_0, j_0)
A4	$((0, 0), (899, 3499))$	$(1600, 1750)$
B4	$((900, 0), (1699, 1899))$	$(700, 1750)$
C4	$((800, 1750), (1699, 2629))$	$(800, 0)$
D4	$((800, 2625), (1699, 3499))$	$(800, - 875)$
E4	$((1700, 0), (2499, 2299))$	$(- 100, 1750)$
F4	$((1700, 2200), (2499, 3499))$	$(- 100, - 450)$
G4	$((2400, 0), (3199, 3499))$	$(- 800, 1750)$

Para todas essas sub-imagens:

- . $x_{c_0} = 574666,28459$ metros;
- . $y_{c_0} = 7639306,50061$ metros;
- . $i_0 = 1600 - L_1$;
- . $j_0 = 1750 - C_1$;
- . $\alpha = 8,956688$ graus;
- . $\delta = 30,0$ metros;
- . $\lambda_{MC} = - 51$ graus calculado através da equação (D.1),
 dado $nz = 22$.

Algumas situações são consideradas a seguir, para cada uma destas, montado um arquivo de dados de simulação e um arquivo de fichas das imagens a serem incluídas. As imagens geradas são portanto porções das imagens brutas simuladas do sensor SSR/MECB.

7.1 - SIMULAÇÃO DE UMA PORÇÃO FORA DO NADIR DA IMAGEM SSR BRUTA

A fim de avaliar os efeitos da geometria do sensor em situação oblíqua, foi escolhida uma órbita (arbitrando-se o ponto Q_0) de maneira que os dados TM ficassem no canto superior esquerdo da área imageada pelo sensor modelado (parte hachurada da Fig. 7.2). É nesta área que ocorre maior distorção geométrica devido à visada lateral, dada a esfericidade terrestre. Este procedimento usufrui da flexibilidade na determinação da órbita do sensor modelado. A órbita pode ser determinada tão próxima possível da órbita real do satélite SSR/MECB conhecendo-se as coordenadas de um ponto Q_0 , a partir das especificações de projeto.

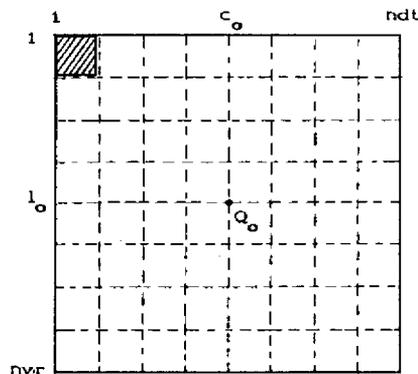
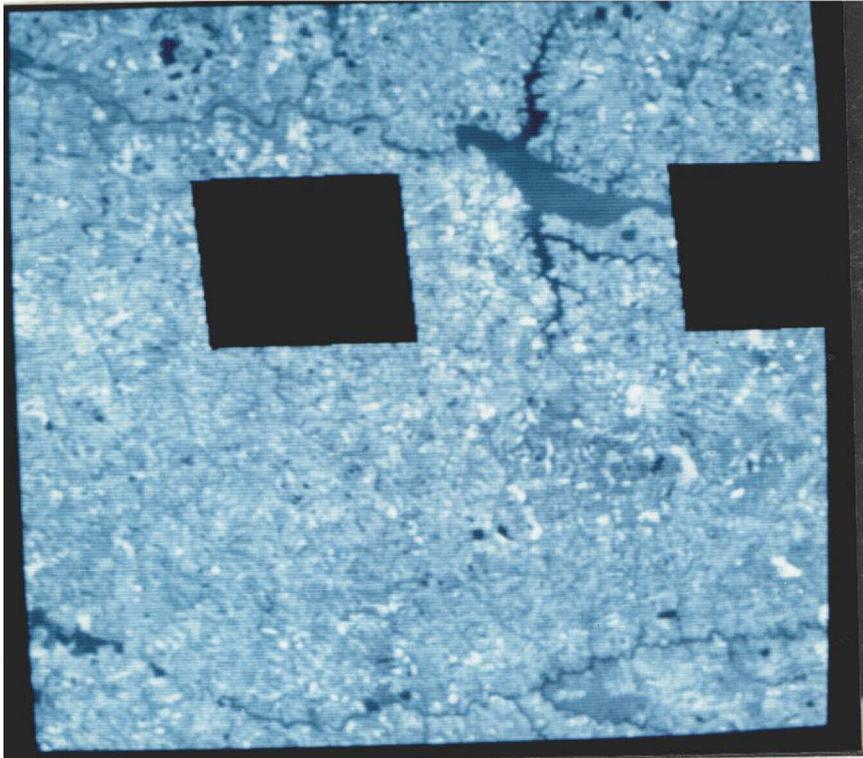


Fig. 7.2 - Localização da porção fora do nadir gerada, em relação à imagem SSR completa.

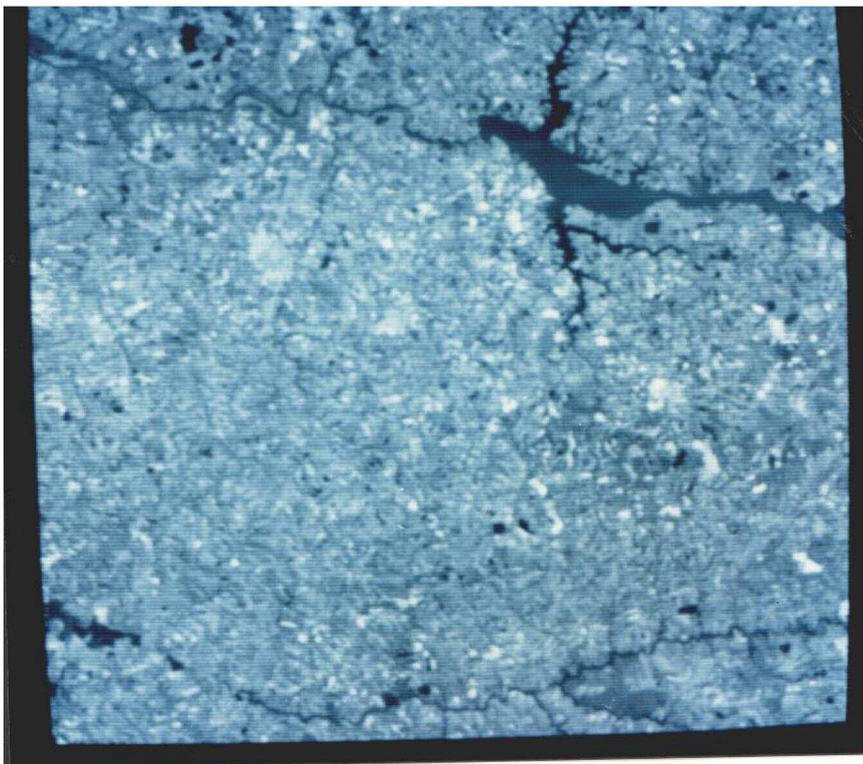
Para a geração da banda 1 da imagem com largo campo de visada (identificada por $sr1_1$) foram tomados os trechos da imagem referente à banda 3 do TM, como na Fig. 7.1a. O arquivo com os dados para simulação foi então preenchido de modo que: $nim = 6$ imagens, $\phi_0 = -24,69^\circ$, $\lambda_0 = -47,88^\circ$, $ci = 30$, $nc = 400$ colunas, $li = 0$, $nl = 420$ linhas, $\sigma_{TM} = 17$ metros, $\delta_{TM} = 30$ metros, $N = 15$.

A Fig. 7.3a mostra um resultado parcial, quando as imagens C3 e E3 ainda não tinham sido incluídas, e a Fig. 7.3b, a imagem sr1_1 concluída. Percebe-se que, geometricamente, a conexão entre trechos não apresenta falhas, lembrando-se que não se está analisando ainda sob aspecto radiométrico, em se tratando de imagens obtidas sob iguais condições de imageamento (com mesmo ângulo de elevação solar, mesmas condições atmosféricas, etc.), pois são trechos de um mesmo quadrante.

Na obtenção da banda 2 (identificada por sr1_2), foram tomadas as sub-imagens relativas à banda 4 do TM, como na Fig. 7.1b. O arquivo de dados para simulação foi preenchido com os dados para a banda 1, exceto pelo número de $nim = 7$ imagens envolvidas. O resultado é mostrado na Fig. 7.4: na Fig. 7.4a, com os vazios deixados pelas imagens C4, D4 e F4 durante o processamento e na Fig. 7.4b com conclusão da imagem sr1_2.



a)

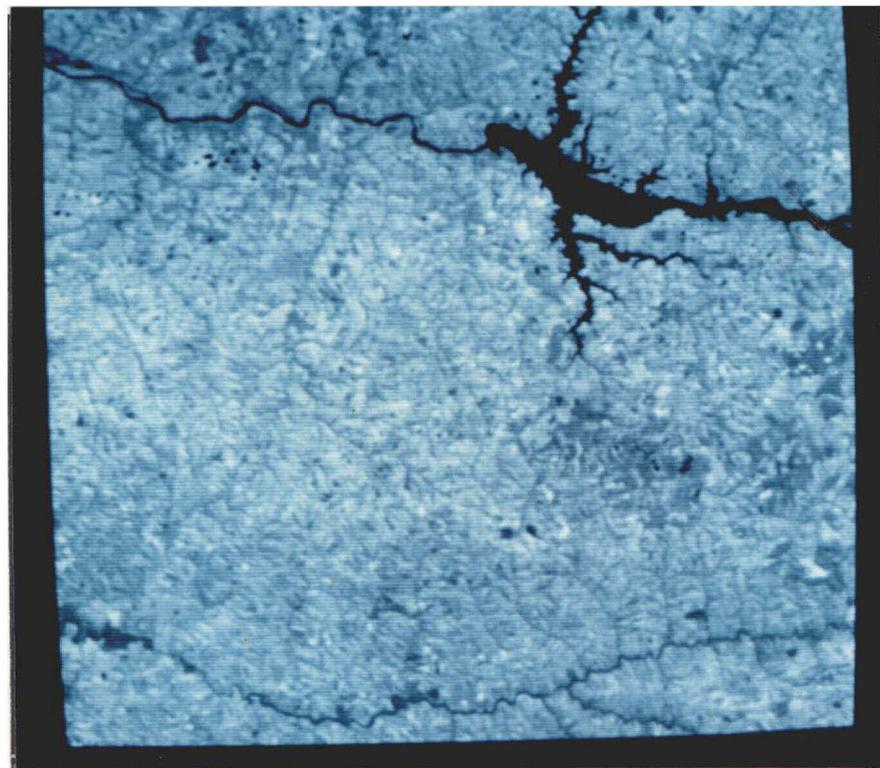


b)

Fig. 7.3 - Imagem simulada srl_1: a) em construção,
b) concluída.



a)



b)

Fig. 7.4 - Imagem simulada srl_2: a) em construção,
b) concluída.

A Fig. 7.5 mostra a imagem simulada numa composição colorida, dadas as imagens srl_1 e srl_2.



Fig. 7.5 - Imagem simulada srl, composição colorida
(R - Imagem srl_1 e G - Imagem srl_2).

Em situação real, em um conjunto qualquer de imagens TM, pode haver variações de contraste e brilho (devidas a variação de ângulo solar e condições atmosféricas), e deslocamentos devidos a inevitáveis resíduos de erros durante a preparação das imagens (na correção do erro de posicionamento). Tais erros devem ser da ordem do erro interno (cerca de 45 metros) (ver Seção 5.2.B). Aqui, pelos motivos já citados, a experimentação foi simplificada utilizando-se sub-imagens de um mesmo quadrante, e, para simular a situação acima foi tomada a imagem srl_2 incompleta (Fig. 7.4), e inseridas as imagens C4, D4, e F4 alteradas, para gerar a imagem sr2_2. A imagem F4 (Fig. 7.1b) foi incluída com sua ficha propositalmente alterada no

campo relativo às coordenadas de projeção cartográfica, correspondendo a um deslocamento ao longo das colunas de 45 metros e as imagens C4 e D4 receberam aumento de contraste, aplicando-se ganhos (ENGESPAÇO, 1988) de 1,6 e 1,2 respectivamente. A imagem sr2_2 é mostrada na Fig. 7.6.

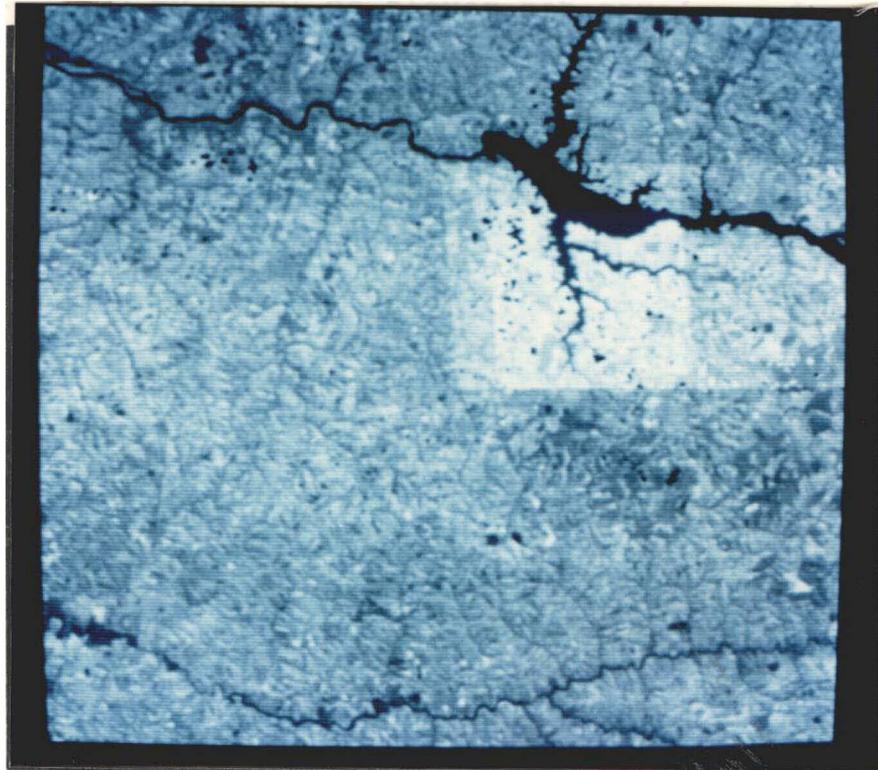


Fig. 7.6 - Imagem simulada sr2_2.

Observe-se que o efeito do deslocamento aplicado a F4 é praticamente imperceptível. Isto mostra que um erro de 45 metros, da ordem do erro interno, é absorvido durante a degradação da resolução espacial de 30 para cerca de 212 metros. O erro é de aproximadamente $1/5$ pixel da imagem que está sendo gerada. Quanto as imagens C4 e D4, é visível a transição entre estas, onde um brilho intermediário aparece na interseção, pois o cálculo de cada valor de pixel é feito pela média (Seção 6.3). É inevitável que isto ocorra. Imagens TM quaisquer, então, devem ter seus histogramas equalizados (Rosenfeld e Kak, 1976) para se dar

início à construção da imagem de saída, embora ainda não se evite por completo a ocorrência dessas variações radiométricas. Algumas soluções para esse problema podem ser implementadas, como a utilizada por Serra e Machado e Silva (1987) que faz uso de um processo de suavização linear dos valores dos pixels ao longo de cada linha.

7.2 - SIMULAÇÃO DE UMA PORÇÃO AO NADIR DA IMAGEM SSR BRUTA

Buscando-se uma verificação do comportamento do sensor no imageamento ao nadir, fazendo-se uso mais uma vez da versatilidade do modelo do sensor, foi escolhida uma órbita independente da utilizada para a geração da imagem srl: o ponto Q_0 foi tomado de modo que se ocorra tal como na Fig. 7.7.

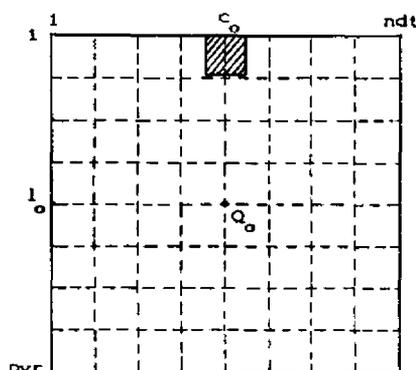


Fig. 7.7 - Localização da porção ao nadir gerada, em relação à imagem SSR completa.

Para se atingir objetivo acima, foi considerado suficiente tomar-se apenas uma banda da imagem SSR. A partir da imagem TM utilizada nesta experimentação, na banda 3, foi gerada a imagem *sr3_1*, admitindo-se o mesmo seccionamento mostrado na Fig. 7.1a. O arquivo de dados para simulação foi preenchido de modo que: $\phi_0 = -24,21^\circ$, $\lambda_0 = -50,94^\circ$, $ci = 1512$, $nc = 430$ colunas, $li = 0$, $nl = 430$ linhas, $N = 13$, e o resultado é mostrado na Fig. 7.8.

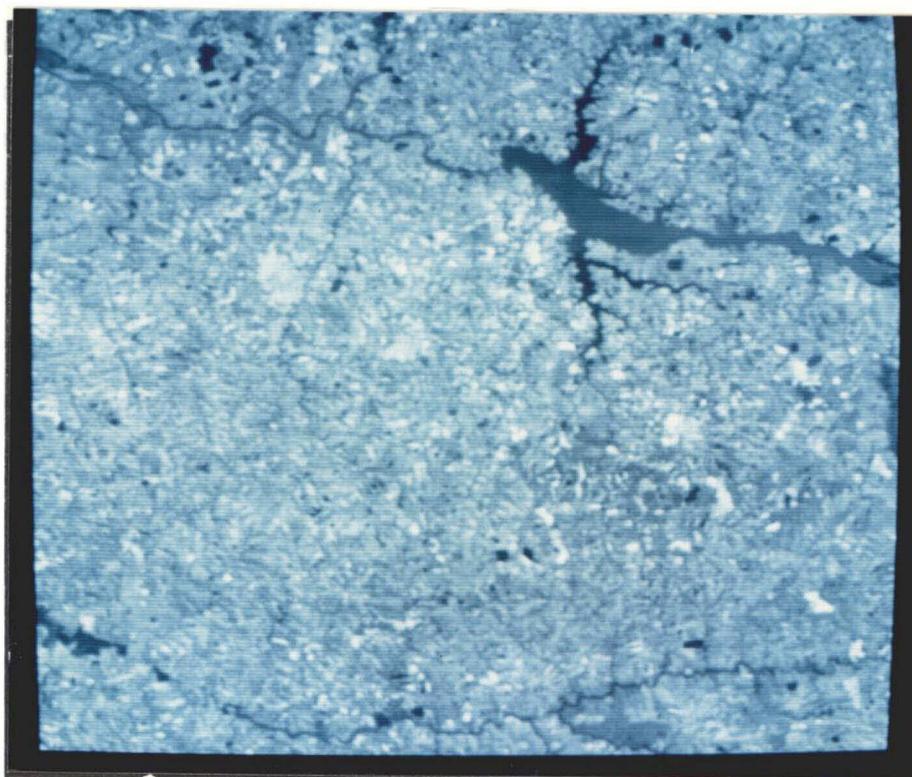


Fig. 7.8 - Imagem simulada sr3_1.

7.3 - CONSIDERAÇÕES DE ORDEM GEOMÉTRICA E RADIOMÉTRICA SOBRE AS IMAGENS SIMULADAS

As imagens simuladas são imagens brutas e, por conseguinte, são tratadas como conjuntos de amostras da superfície terrestre, obtidas através dos dados das imagens TM. Mas, a cada pixel pode ser associado um par de coordenadas numa projeção cartográfica qualquer, pois conhece-se sua posição (ϕ , λ). A imagem bruta não está ainda, portanto, segundo uma malha regular, nem está incluída a correção do efeito de rotação da Terra.

Decorrente do que foi exposto acima, é o formato retangular da disposição dos pixels. Este formato também reflete que é praticamente imperceptível a diferença entre as direções das varreduras do sensor modelado e das

linhas da imagem TM. Isto mostra a aplicabilidade do que foi desenvolvido na Seção 5.3. Observe-se também os formatos (de paralelogramos) dos vazios deixados pelas imagens ainda não incluídas, nas Figuras 7.3a e 7.4a. Estes revelam a inclinação em situação inversa à que seria devida à rotação da Terra e, mais uma vez, verificando a coerência do que foi exposto acima.

Quanto a escala, há variações nas duas direções: das linhas e das colunas. Ao longo das colunas a variação acontece em decorrência da variação de altitude do satélite, em função da trajetória circular, dado que a superfície terrestre é elipsoidal (afastando-se da linha do Equador os pixels representam áreas maiores). Na direção das linhas, em função do largo campo de visada, a variação é mais acentuada onde os pixels apresentam áreas maiores aproximando-se das extremidades de cada linha imageada. Ao nadir essas distorções são menos intensas.

Comparando-se as geometrias das imagens obtidas ao nadir e fora deste, o fato acima exposto deve ser constatado. Para tanto, um ponto comum foi identificado visualmente na imagem sr1_1 (na linha 186 e coluna 257) e na imagem sr3_1 (na linha 196 e coluna 268), fazendo-se coincidir em seguida, utilizando-se recursos implementados no SITIM (ENGESPAÇO, 1988). A imagem sr1_1 foi carregada no canal do verde e a imagem sr3_1, no canal do vermelho. O resultado desta operação é mostrado na Fig. 7.9, onde observa-se que na vizinhança do ponto escolhido há quase uma também coincidência de feições, constituindo-se uma região de forma alongada aproximando-se da direção das colunas. Isto decorre do fato que a variação de escala é relativamente pequena ao longo das colunas.

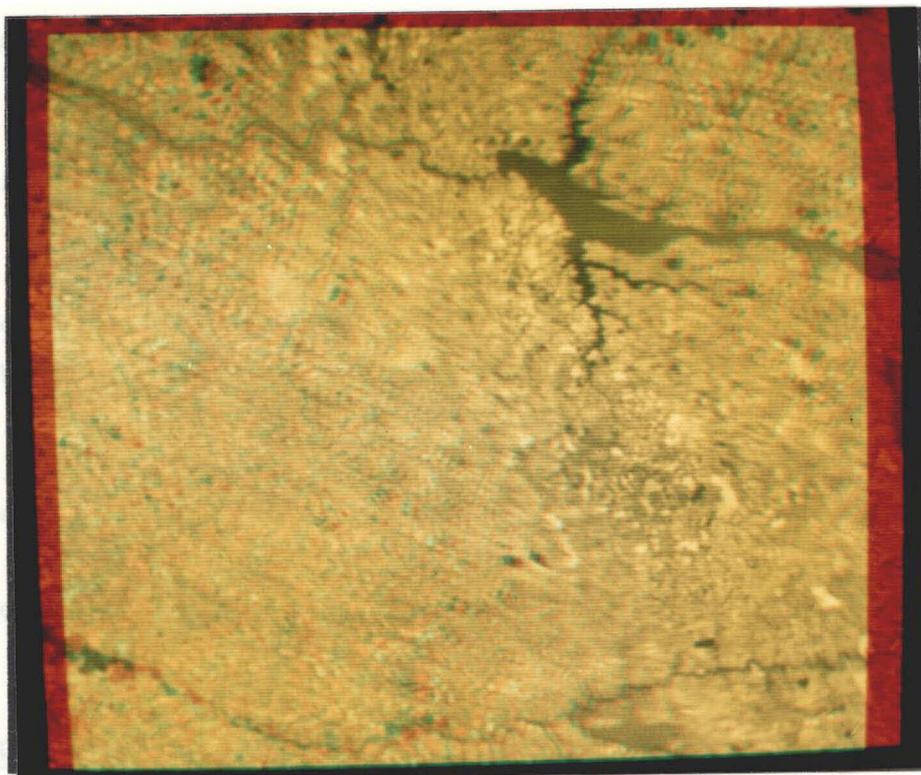


Fig. 7.9 - Imagens sr1_1 e sr3_1 superpostas
(R - sr3_1 e G - sr1_1).

É evidente o caráter geométrico dessa simulação, embora uma questão também de ordem geométrica - uma modelagem da variação de atitude do sensor com largo campo de visada - tenha sido evitada, dada a restrição dos objetivos deste trabalho. Os valores dos pixels estariam sujeitos a outros fatores, de ordem radiométrica, como os relacionados a seguir, além do comportamento espacial do sensor modelado.

Apesar de já conter efeitos atmosféricos nos pixels colhidos das imagens TM, é importante levar-se em conta a porção atmosférica consideravelmente acrescida devido ao largo campo de visada, à medida em que o ponto imageado se afasta do nadir. Nas simulações, afastando-se do nadir, as imagens deveriam apresentar menos contraste.

O relevo é outro fator não menos importante. Está intimamente ligado à aquisição de cada pixel de uma imagem, pois a topografia correlaciona-se com a resposta espectral dos alvos terrestres (mesmo considerando-os lambertianos) (Holben e Justice, 1979), por conta do ângulo de elevação solar dada a relação sol-alvo-sensor. O efeito do relevo seria mais intenso aproximando-se das extremidades das linhas, revelando que a modelagem deste processo seria bastante complexa, por envolver de certa forma características particulares dos alvos (incluindo efeitos de sombreamento, porcentagem de solo exposto, etc). Quanto a esse caso, a simulação fora do nadir não tem prejuízos profundos pela amenidade do relevo da região que a imagem TM escolhida representa.

7.4 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS SIMULADAS NO CONTEXTO DO SENSORIAMENTO REMOTO

Dadas as simplificações na implementação, é possível haver uma tendência a superestimação dos resultados da simulação como imagens do futuro sensor SSR/MECB. Porém, é concreto que se conserva o compromisso com a aparência futura (como a melhor possível sob as condições aqui apresentadas) e sobre esta base, pode-se estimar a utilidade destas imagens, comparadamente ao que está previsto nos relatórios dos grupos de estudos sobre o assunto dentro da MECB.

Partindo-se dos propósitos da missão em relação ao SSR, a este foram atribuídas características especialmente projetadas para atender necessidades brasileiras (Santana et al., 1988). Quanto às bandas espectrais 1 e 2, dentre outras peculiaridades, por coincidirem em posições e larguras com as bandas 3 e 4 do sensor TM, espera-se que a experiência adquirida com utilização destas últimas estenda-se ao uso dos dados SSR. Quanto ao ciclo de

cobertura global de 4 dias, este deverá atender a estudos de fenômenos dinâmicos que requerem alta repetitividade na aquisição dos dados.

Uma discussão poderia ser desencadeada, no âmbito da atividade de interpretação de imagens de satélite ou classificação automática (Andrade, 1989), levando-se em conta os efeitos ou adequabilidade da resolução espacial em determinadas áreas de aplicação. Neste caso do SSR, uma das potencialidades tende a residir na característica da *resolução temporal* (período de retorno ao imageamento de uma mesma região da superfície terrestre) de 4 dias e, ao analisar-se as imagens simuladas, isto deve ser lembrado.

Pela situação intermediária em que está colocado, o SSR, mesmo a baixa resolução espacial, deverá apresentar condições de interpretabilidade bastante razoáveis, conforme pode-se inferir observando-se as imagens simuladas. Por exemplo, permite a visualização da rede de drenagem e discernimento do relevo regional (Fig. 7.5) que poderia ser utilizado em áreas como a Pedologia, que se baseiam em aspectos de fisiografia (Formaggio, 1991).

CAPÍTULO 8CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Sob um caráter geométrico, foi feita a imulação de imagens com largo campo de visada, tratando-se do caso de um satélite com as características do SSR/MECB. Dos estudos preliminares, conhecidas as especificações, foram introduzidos os valores dos parâmetros no modelo do sensor e assim apresentadas as imagens com sua aparência futura. É assim como são admitidas, podendo serem instrumentos de averiguação do papel da resolução espacial intermediária diante da disponibilidade atual de sensores orbitais. Isto prevalece mesmo precisando-se, neste sentido, do auxílio de trabalhos posteriores que empreendam maior realismo aos resultados do presente trabalho. Algumas medidas a serem tomadas são então sugeridas mais adiante.

Não há pretensão de se questionar valores de parâmetros ou que sejam adequados determinados detalhes de projeto. Tenta-se fornecer subsídios ou apresentar uma abordagem sobre a visão antecipada de imagens mesmo que, pelas simplificações adotadas, tenha-se constituído um núcleo de objetivos. Estes podem-se expandir através de um aprimoramento com a inserção de novos modelos ou escolha de uma abordagem mais eficiente, incrementando-se de forma gradativa.

Dois modelos são fundamentais no desenvolvimento deste trabalho: o modelo do sensor com largo campo de visada e o modelo da superfície terrestre (o elipsóide de referência). O último é um modelo já amplamente utilizado em Geodésia e ciências afins. O mesmo acontece com o sistema de coordenadas geocêntrico de Greenwich (aqui representado pelo sistema S_{GG}) e a representação de um ponto da superfície terrestre em coordenadas geodésicas.

Cabe uma observação a respeito da representação de um ponto em S_{IN} em coordenadas (ϕ, λ, h) dado S_{IN} , relacionadas com as coordenadas geodésicas dado S_{GG} através da equação 12. Esta notação foi introduzida no Capítulo 3 com a pretensão de disciplinar a terminologia, tendo em vista a abrangência de conceitos presente neste trabalho, como também de facilitar o desenvolvimento das equações.

Dos modelos que poderiam ser acrescentados, constariam os seguintes. Um modelo para variação de atitude onde números aleatórios, conhecidos média e variância, constituiriam os coeficientes de uma matriz de atitude (Radix, 1980). Outros modelos incrementariam a parte radiométrica, como um modelo para influência atmosférica e um modelo para a influência da topografia. Estes passariam a ser indispensáveis como forma de aproximar a imagem simulada da imagem real e avaliar o grau de influência das simplificações aqui adotadas.

As imagens simuladas possuem características de interpretabilidade a escala regional mostrando detalhes com razoável nitidez. São imagens brutas mas permitem para cada imagem, mantidos os arquivos de parâmetros (da simulação, do modelo do sensor e da superfície terrestre) que se reconheça a localização geodésica de cada um de seus pixels. Numa fase seguinte, cada pixel da imagem bruta seria mapeado em uma nova malha, determinada de acordo com uma projeção cartográfica adequada.

Algumas limitações decorrem do fato de não se constituir objetivos desta dissertação, a busca da ótima eficiência computacional para os algoritmos ou adequação do "hardware" utilizados na simulação. São sugestões a esse respeito, otimizar, por exemplo, a operação de filtragem (ao nadir, a variação do tamanho do pixel é pequena, tornando suficiente a designação de uma única máscara para

a filtragem ao nadir), ou, de um modo geral, reduzir ou eliminar o acesso a disco durante o cálculo dos valores dos pixels. Permitir que os dados permaneçam na memória do micro computador, ou, utilizar outro "hardware" que reúna condições para solucionar problemas de espaço disponível para os dados e rapidez no processamento.

Detalhes da implementação poderiam ainda serem melhorados. Operações manuais como a seleção dos trechos das imagens TM onde são tomadas as porções úteis, poderiam ser automatizadas. O próprio programa poderia detectar os pontos sem significado.

Sanados ou amenizados estes problemas reduzir-se-iam os custos para a construção de uma imagem completa aplicando-se recursos para uniformização das interseções das imagens incluídas.

Uma repetição dos experimentos de simulação utilizando-se outras áreas da superfície terrestre (de diferentes tipos de cobertura e relevo) seria conveniente, onde se promoveria uma avaliação da importância dessas imagens simuladas nas diferentes áreas de aplicação do Sensoriamento Remoto (como no trabalho de Chaves *et al.* (1990) para a área de Florestas). Com o mesmo objetivo seria efetuada uma classificação e feita uma comparação com imagens classificadas com alta resolução (a do TM, por exemplo, da maneira como executada por Andrade, (1989)) e com imagens de resolução ainda mais baixa (a do AVHRR, por exemplo).

Quanto ao modelo do sensor desenvolvido, apesar de estar baseado no SSR/MECB, foi elaborado de modo a não tornar rígidos os dados da órbita - inclinação (I), altitude (H) - ou da câmera - número de detetores (ndt), campo de visada (θ_{FOV}) e campo de visada instantânea

(IFOVrad). Preserva-se que estes dados devam ser ajustados à resolução espacial desejada, ao nadir ao equador, atribuindo-se uma característica de atenuação da FTM (γ_i , $i = 1, 2$). Portanto, a utilização desse modelo pode ser extrapolada para uma dimensão onde a observação de uma determinada porção da superfície terrestre independa das características de um sensor especificamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, V.M.B. *Classificação de imagens de alta resolução usando atributos de textura*. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. 102 p. (INPE-4888-TDL/379).
- Bakker, M.P.R. *Cartografia: noções básicas*. s.l., Marinha do Brasil, 1965.
- Banon, G.J.F. *Bases da computação gráfica*. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1989.
- _____ *Simulação de imagens de baixa resolução*. *SBA: Controle e Automação*, 2(3):180-192, 1990.
- Chaves, M.A.; Kazmierczak, M.L.; Amaral, S.; Zerbini, N.J. *Potencialidade da imagem MECB para classificação de áreas florestais*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 6.*, Manaus, 1990. *Anais*. Manaus, INPE, 1990, v. 1, p. 34-39.
- Chen, H.S. *Space remote sensing systems: an introduction*. New York, Academic, 1985.
- Cláudio, D.M.; Marins, J.M. *Cálculo numérico computacional*. São Paulo, Editora Atlas, 1988.
- D'Alge, J.C.L. *Qualidade geométrica de imagens TM do Landsat-5*. In: *Congresso Brasileiro de Cartografia, 13.*, Brasília, 1987. *Anais*. Brasília, SBC, 1987, p. 44-59.
- De Luca, N. *Mecânica celeste*. Curitiba, Universidade do Paraná, 1982.

- Duck, K.I.; King, J.C. *Orbital mechanics for remote sensing*. In: Colwell, R.N., ed. *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA, ASP, 1983. v. 1, cap. 16, p. 699-717
- ENGESPAÇO. *Manual do usuário do SITIM-150*. São José dos Campos, 1988.
- Escobal, P.R. *Methods of orbit determination*. New York, John Wiley, 1965.
- Fonseca, L.M.G. *Restauração e interpolação de imagens do satélite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR*. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1988.
- Fonseca, J.M.; Lourenção, P.T.M. *O uso do quaternion para a descrição do movimento de atitude de um satélite artificial*. São José dos Campos, INPE, 1985. (INPE-3668-RPE/4888).
- Formaggio, A.R. *Considerações sobre as imagens SSR/MECB simuladas*. jul. 1991. Comunicação pessoal.
- Galvão, F.L. *MECB SSR1 satellite configuration status*. São José dos Campos, INPE, 1990. (MECB-SSR1-A-CFG-1000).
- Gane, C; Sarson, T. *Análise estruturada de sistemas*. Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- Gaskill, J.D. *Linear systems, Fourier transforms, and optics*. New York, John Wiley, 1978.
- Goodman, J.W. *Introduction to Fourier optics*. New York, McGraw-Hill, 1968.

- Heffron, W.G.; Watson, S.B. *Relationships between geographic and inertial coordinates of position*. Washington, DC, NASA, 1966. 20p. (NASA-CR-75926).
- Holben, B.N.; Justice, C.O. *Evaluation and modelling of the topographic effect on the spectral response from nadir pointing sensors*. Greenbelt, MD, GSFC, 1979. (NASA-TM-80305).
- Instituto de Pesquisas Espaciais. Departamento de Processamento de Imagens (INPE.DPI). *Manual de sub-rotinas do SITIM-150*. São José dos Campos, 1988.
- Jensen, J.R. *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1986.
- Justice, C.O.; Markham, B.L.; Townshend, J.R.G.; Kennard, R.L. Spatial degradation of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 10(9): 1539-1561, 1989.
- Lima, D.G. Cartografia metropolitana. *Revista Brasileira de Cartografia*, (22):53-62, dez. 1978.
- Machado e Silva, A.J.F. *Modelos de correção geométrica para imagens HRV-SPOT*. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. 239 p. (INPE-5001-TDL/395).
- Marins, J.M. Separação das raízes reais de equações polinomiais pelo método de Sturm. *Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional*, 2., São José dos Campos, 1985.

- Mather, P.M. *Computer processing of remotely sensed images: an introduction*. New York, John Wiley, 1987.
- McCracken, D.D.; Dorn, W.S. *Numerical methods and fortran programming*. New York, John Wiley, 1964.
- McCuskey, S.W. *Introduction to celestial mechanics*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1963.
- Moik, J.G. *Digital processing of remotely sensed images*. Washington, DC, NASA.GSFC, 1980.
- Oliveira, C. *Curso de cartografia moderna*. Rio de Janeiro, IBGE, 1988.
- Papoulis, A. *The Fourier integral and its applications*. New York, McGraw-Hill, 1962.
- Peterson, D.L.; Running, S.W. Applications in forest science and management. In: Asrar, G. *Theory and applications of optical remote sensing*. New York, John Wiley, 1989.
- Pilchowski, H.U.; Silva, W.C.C.; Ferreira, L.D.D. *Introdução à mecânica celeste*. São José dos Campos, INPE, 1981. (INPE-2126-RPE/350).
- Radix, J.C. *Systemes inertiels à composants liés: strap-dawn*. Toulouse, Cepadues Editions, 1980.
- Richardus, P.; Adler, R.K. *Map projections*. Amsterdam, North-Holland, 1972.
- Rosenfeld, A.; Kak, A.C. *Digital picture processing*. New York, Academic, 1976.

- Roy, A.E. *Foundations of astrodynamics*. New York, The Macmillan, 1965.
- Santana, C.E.; Carvalho, H.C.; Kono, J. *MECB SSR1 remote sensing satellite concept review*. São José dos Campos, INPE, 1988. (MECB-SSR1-A-REV-1000).
- Santana, C.E.; Muzzio, J.L.R.; Kono, J.; Carvalho, H.C. *MECB SSR1 imaging instrument subsystem specification*. São José dos Campos, INPE, 1989. (MECB-SSR1-A-ETC-1014).
- Santos, V.L. As zonas de projeção no sistema UTM. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 14., Gramado, RS, maio 21-26, 1989. *Anais*. Gramado, RS, SBC, 1989, v. 2, p. 450-461.
- Serra, P.R.M. *Geometric corrections of images TM-Landsat*. Cachoeira Paulista, INPE, 1984. Documentação de sistema.
- _____ Geração de imagens TM-Landsat em fitas compatíveis com computador geometricamente corrigidas. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 13., Brasília, 1987. *Anais*. Brasília, SBC, 1987, p. 94-104.
- Serra, P.R.M.; Machado e Silva, A.J.F. Geração de mosaicos digitais de imagens TM-Landsat no INPE. *Revista Cartográfica*, (51/52):7, 1987.
- Snider, J.P. *Map projections used by the U. S. geological survey*. Washington, DC, U. S. Government Printing Office, 1984.
- Schowengerdt, R.A. *Techniques for image processing and classification and remote sensing*. Orlando, FL, Academic, 1983.

Souza, R.C.M. *INPE Landsat D Thematic Mapper computer compatible tape format specification*. São José dos Campos, INPE, 1982. (INPE-2553-PRE/207).

Williamson, R.E.; Crowell, R.H.; Trotter, H.F. *Cálculo de funções vetoriais*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1976.

APÊNDICE ADETERMINAÇÃO DA ALTITUDE DO SATÉLITE, DADO O PONTO
SUB-SATÉLITE, EM FUNÇÃO DO RAIOS DA ÓRBITA (R) E DOS
PARÂMETROS DA SUPEFÍCIE DE REFERÊNCIA (a e e)

Em um determinado instante, sejam a posição do satélite $P(x_{PIN}, y_{PIN}, z_{PIN})$ em S_{IN} , ou $P(\phi_p, \lambda_{PIN}, h_p)$ dado S_{IN} , e o ponto sub-satélite $Q_s(x_{sIN}, y_{sIN}, z_{sIN})$ em S_{IN} , ou $Q_s(\phi_s, \lambda_{sIN})$ dado S_{IN} , verificando-se $\phi_p = \phi_s$ e $\lambda_{PIN} = \lambda_{sIN}$.

Seja o plano $\pi(\lambda_{PIN})$ determinado pela posição do satélite P em S_{IN} e o eixo z (suporte de k_{IN}). Isto é, $\pi(\lambda_{PIN})$ é o plano formado por todos os pontos $X(\phi, \lambda_{IN}, h)$ dado S_{IN} tais que $\lambda_{IN} = \lambda_{PIN}$ (Fig. A.1).

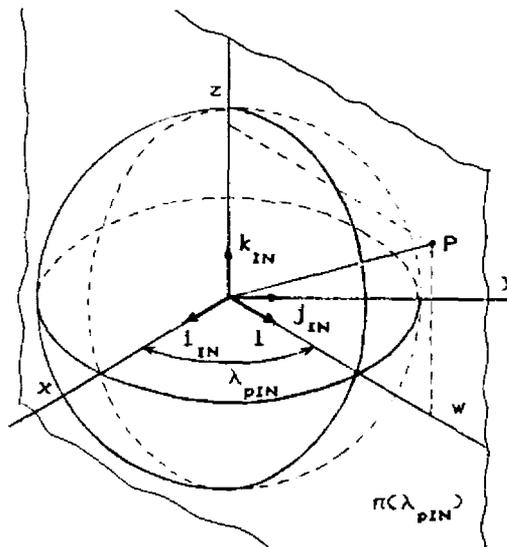


Fig. A.1 - O plano $\pi(\lambda_{PIN})$ e o sistema S_{π} .

Sobre o plano $\pi(\lambda_{PIN})$ monta-se um sistema de coordenadas cartesianas $S_{\pi} = \{i, k_{IN}\}$, ortonormal e anti-

-horário, com origem no ponto O , origem de S_{IN} . Desse modo, dado um ponto $M(x, y, z)$ em S_{IN} , obter-se-á $M_{\pi}(w, z)$ em S_{π} que verifica $\overrightarrow{OM_{\pi}} = wl + zk_{IN}$, onde

$$w = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (\text{A.1a})$$

$$e \quad l = (x/w)i_{IN} + (y/w)j_{IN}, \quad (\text{A.1b})$$

visto que,

$$x = w \cos \lambda_{pIN} \quad (\text{A.2a})$$

$$e \quad y = w \sin \lambda_{pIN}. \quad (\text{A.2b})$$

Portanto, os pontos P e Q_s em S_{IN} acima podem ser representados pelos pontos P_{π} e $Q_{s\pi}$ em S_{π} , tais que:

$$P_{\pi}(w_{pIN}, z_{pIN}), \quad w_{pIN} = (x_{pIN}^2 + y_{pIN}^2)^{1/2}, \quad (\text{A.3a})$$

$$Q_{s\pi}(w_{sIN}, z_{sIN}), \quad w_{sIN} = (x_{sIN}^2 + y_{sIN}^2)^{1/2}. \quad (\text{A.3b})$$

Seja a Figura A.2. Observa-se que:

$$w_{pIN} - w_{sIN} = h_p \cos \phi_s,$$

$$z_{pIN} - z_{sIN} = h_p \sin \phi_s,$$

$$w_{pIN}^2 + z_{pIN}^2 = R^2.$$

Estas equações geram um sistema de equações a três incógnitas (w_{pIN} , z_{pIN} e h_p) cuja solução (positiva) para h_p é

$$h_p = (b^2 + c)^{1/2} + b,$$

onde

$$b = w_{sIN} \cos \phi_s + z_{sIN} \operatorname{sen} \phi_s$$

e

$$c = R^2 - (w_{sIN}^2 + z_{sIN}^2).$$

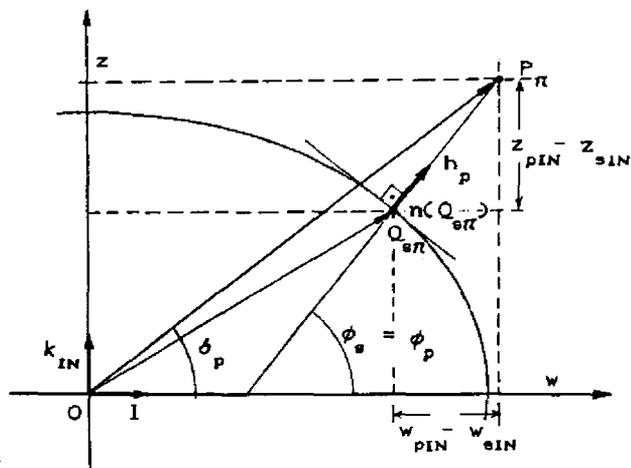


Fig. A.2 - Representação de P e Q_s no sistema S_π.

h_p pode ser determinada somente em função de ϕ_s , da maneira seguinte. Combinando-se a equação (2.4) com a equação (A.2) extraem-se as equações:

$$w = (Rc) \cos \phi \tag{A.4a}$$

$$z = (Rc) (1 - e^2) \operatorname{sen} \phi \tag{A.4b}$$

onde Rc é dado pela equação (2.4d).

Pela relação dada na equação (A.4), h_p pode ser obtido por:

$$h_p = (R^2 - A^2)^{1/2} - B,$$

onde

$$A = ae^2 \operatorname{sen}(2\phi_s) / 2(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi_s)^{1/2}$$

e

$$B = a(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi_s)^{1/2}.$$

APÊNDICE BRELAÇÃO DO VETOR k_{ST} COM A POSIÇÃO DO SATÉLITE E O PUNTO SUB-SATÉLITE, EM UM DETERMINADO INSTANTE.

Em um determinado instante, sejam a posição do satélite $P(x_{PIN}, y_{PIN}, z_{PIN})$ em S_{IN} , ou $P(\phi_p, \lambda_{PIN}, h_p)$ dado S_{IN} , e o ponto sub-satélite $Q_s(x_s, y_s, z_s)$ em S_{IN} , ou $Q_s(\phi_s, \lambda_{sIN})$ dado S_{IN} , verificando-se $\phi_p = \phi_s$ e $\lambda_{PIN} = \lambda_{sIN}$.

Sejam o plano $\pi(\lambda_{PIN})$, o sistema S_π a este ligado, os pontos P_π e $Q_{s\pi}$ em S_π , como definidos na equação (A.3), e a superfície de referência definida em S_{IN} .

A superfície de referência seccionada pelo plano $\pi(\lambda_{PIN})$ resulta em uma elipse (Fig. A.2), cuja equação é definida por

$$s_\pi(w, z) = 0 \quad (B.1a)$$

onde

$$s_\pi(w, z) = (1 - e^2)w^2 + z^2 - a^2(1 - e^2) \quad (B.1b)$$

Seja o vetor $n(Q_{s\pi})$, o vetor unitário normal à elipse no ponto $Q_{s\pi}$ dado por

$$n(Q_{s\pi}) = \|v_\pi\|^{-1} v_\pi,$$

sendo v_π definido por

$$v_\pi \left(k(1 - e^2)w_{sIN}, kz_{sIN} \right) \text{ em } S_\pi, \quad (B.2)$$

onde k é um número real positivo. Ous eja, v_π é um vetor de módulo qualquer, na direção e sentido de $(\partial s_\pi / \partial w, \partial s_\pi / \partial z)$ em S_π .

Vetorialmente, verifica-se a seguinte expressão:

$$\vec{OP}_\pi = \vec{OQ}_{s\pi} + h_p \mathbf{n}(Q_{s\pi}),$$

de onde são retiradas as equações:

$$w_{pIN} = w_{sIN} + h_p \|\mathbf{v}_\pi\|^{-1} k (1 - e^2) w_{sIN}$$

$$z_{pIN} = z_{sIN} + h_p \|\mathbf{v}_\pi\|^{-1} k z_{sIN},$$

e, eliminando-se o termo $h_p \|\mathbf{v}_\pi\|^{-1} k$ destas equações, obtém-se

$$z_{sIN} = \frac{(1 - e^2) z_{pIN}}{w_{pIN} - e^2 w_{sIN}} w_{sIN}. \quad (\text{B.3})$$

Seja o elemento $\Delta w'$ de \mathbb{R} definido por

$$\Delta w' = e^2 \Delta w / (1 - e^2), \quad (\text{B.4a})$$

$$\text{com } \Delta w = w_{pIN} - w_{sIN}. \quad (\text{B.4b})$$

O objetivo do desenvolvimento seguinte é encontrar uma expressão para \mathbf{v}_π em função de Δw e P_π . Reunindo-se (B.3) e (B.4), tem-se como resultado

$$z_{sIN} = [z_{pIN} / (w_{pIN} + \Delta w')] w_{sIN} \quad (\text{B.5})$$

e, sendo $Q_{s\pi}$ um ponto da elipse definida por (B.1), a partir de (B.5) encontra-se w_{sIN} como

$$w_{sIN} = \frac{(w_{pIN} + \Delta w') a (1 - e^2)^{1/2}}{[(1 - e^2) (w_{pIN} + \Delta w')^2 + z_{pIN}^2]^{1/2}}. \quad (\text{B.6})$$

Substituindo-se (B.6) de volta na equação (B.5):

$$z_{sIN} = \frac{z_{pIN} a(1 - e^2)^{1/2}}{[(1 - e^2)(w_{pIN} + \Delta w')^2 + z_{pIN}^2]^{1/2}} \quad (\text{B.7})$$

A partir de (B.6), (B.7) e (B.2), fazendo-se

$$k' = k \frac{a(1 - e^2)^{1/2}}{[(1 - e^2)(w_{pIN} + \Delta w')^2 + z_{pIN}^2]^{1/2}},$$

obtém-se

$$v_{\pi} \left(k'(1 - e^2)(1 + \Delta w'/w_{pIN})w_{pIN}, k'z_{pIN} \right). \quad (\text{B.8})$$

As seguintes considerações sobre v_{π} podem ser feitas. Observa-se que $k' > 0$ e não altera o sentido (nem a direção de v_{π}) e, portanto, não interfere na determinação de $n(Q_{s\pi})$. Logo, a sua eliminação é permitida. E, o termo $(1 - e^2)(1 + \Delta w'/w_{pIN})$, aplicando-se a definição de $\Delta w'$ (equação (B.4)), é dado por

$$(1 - e^2)(1 + \Delta w'/w_{pIN}) = 1 - e^2 \Delta e$$

onde

$$\Delta e = 1 - \Delta w/w_{pIN}$$

ou

$$\Delta e = 1 - h_p \cos \phi_p / R \cos \delta_p \quad (\text{B.9})$$

onde δ_p é a declinação geocêntrica de P (Fig. A.2).

Portanto, (B.8) pode ser escrita como:

$$\mathbf{v}_{\pi} \left((1 - e^2 \Delta e) w_{pIN}, z_{pIN} \right).$$

Aplicando-se a definição de l (da equação (A.1b)), retorna-se \mathbf{v}_{π} em S_{π} às suas coordenadas em S_{IN} , isto é,

$$\mathbf{v} \left((1 - e^2 \Delta e) x_{pIN}, (1 - e^2 \Delta e) y_{pIN}, z_{pIN} \right) \text{ em } S_{IN}$$

e, conseqüentemente, o vetor $\mathbf{n}(Q_s)$ em S_{IN} , onde

$$\mathbf{n}(Q_s) = \|\mathbf{v}\|^{-1} \mathbf{v}.$$

Seja $\mathbf{k}_{ST}(k_{ST1}, k_{ST2}, k_{ST3})$ em S_{IN} o vetor definido na equação (4.13). Então,

$$\begin{aligned} k_{ST1} &= (1 - e^2 \Delta e) x_{pIN} / D \\ k_{ST2} &= (1 - e^2 \Delta e) y_{pIN} / D \\ k_{ST3} &= z_{pIN} / D \end{aligned}$$

onde

$$D = \|\mathbf{v}\| = \left[(1 - e^2 \Delta e)^2 (x_{pIN}^2 + y_{pIN}^2) + z_{pIN}^2 \right]^{1/2}$$

e Δe é dado por (B.9).

APÊNDICE CDETERMINAÇÃO DO PAR (IFOV₁, IFOV₂) RELATIVO À PROJEÇÃO DO
DETETOR c SOBRE A SUPERFÍCIE TERRESTRE

Em um determinado instante t , sejam a posição do satélite $P(t)(\phi_p, \lambda_p, h_p)$ e o ponto sub-satélite $Q_s(t)(\phi_s, \lambda_s)$, dado S_{CG} (com $\phi_p = \phi_s$ e $\lambda_p = \lambda_s$). t é o instante de aquisição da linha l da imagem g' pelo sensor com largo campo de visada.

Considere-se a seção da superfície de referência obtida pelo plano determinado pelos vetores k_{ST} e j_{ST} (Fig. C.1). Esta seção, no trecho correspondente à porção imageada, será aproximada para um arco de circunferência de raio Rc_{Q_s} . Rc_{Q_s} é o raio de curvatura da seção meridiana da superfície de referência no ponto sub-satélite, calculado pela equação (2.4d). A altitude $h_p = h_{Q_s}$ (onde h_{Q_s} é a altitude do satélite dado $Q_s(t)$) é determinada pela equação (2.7).

O par (IFOV₁, IFOV₂) corresponde às dimensões (representadas na Fig. C.2) relativas à aproximação para um retângulo da projeção do detetor c sobre a superfície de referência.

Seja a Fig. C.1 onde (no detalhe C.1b) as retas \leftrightarrow AD e BF são admitidas como paralelas à reta \leftrightarrow CP. Conhecendo-se o campo de visada instantâneo em radianos, IFOVrad, e o ângulo de visada, θ , associado ao detetor c , as seguintes equações relativas às dimensões IFOV₁ e IFOV₂ podem ser deduzidas. O ângulo θ é dado pela equação (4.20b) e tomado em módulo (admitindo-se uma simetria em relação ao detetor c_0).

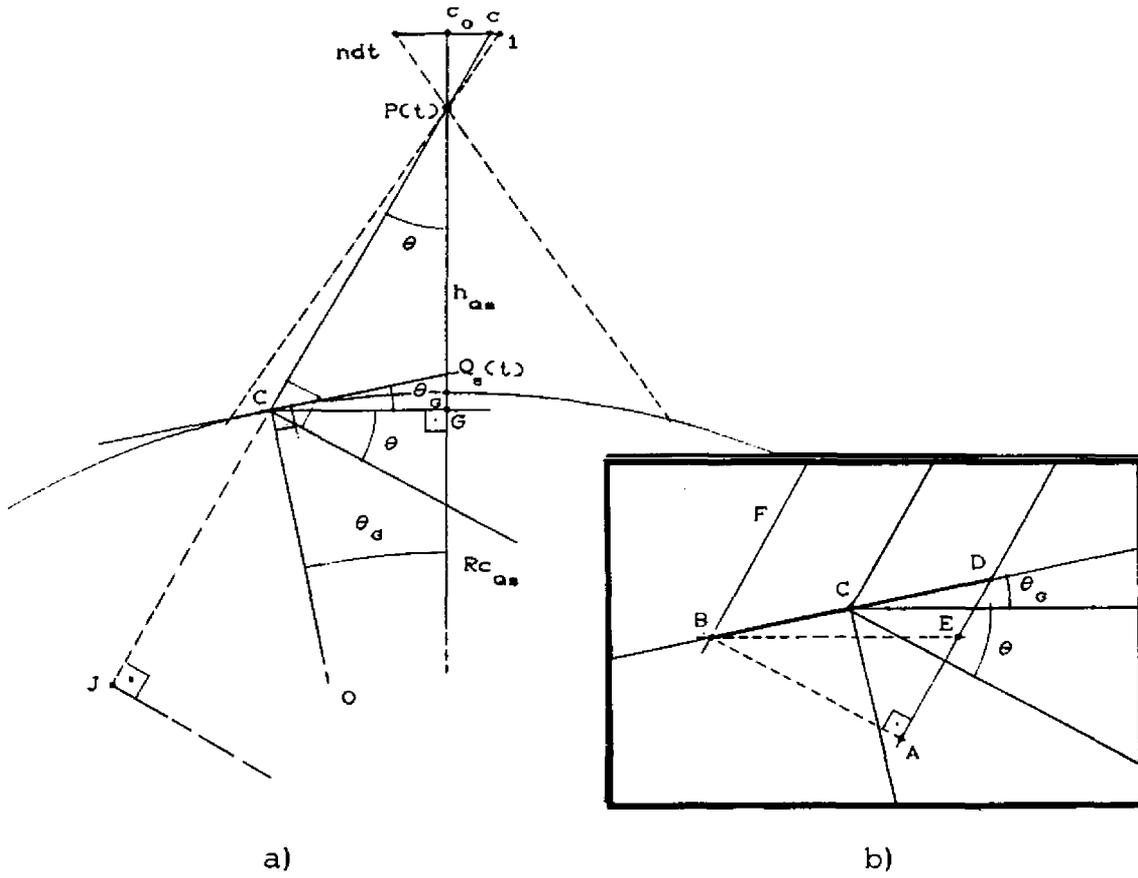


Fig. C.1 - Geometria de aquisição do pixel (1, c) da imagem g', em um determinado instante t. a) Relação entre o sensor e a superfície terrestre; b) Geometria no ponto C visado.

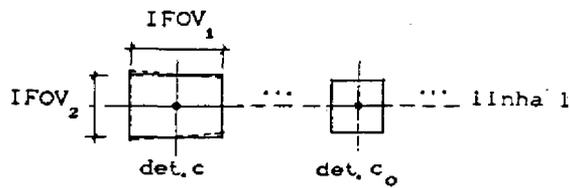


Fig. C.2 - Projeção do detetor c sobre o elipsóide de referência.

A medida do segmento \overline{BE} é dada por

$$\overline{BE} = (r) (\text{IFOVrad})$$

onde r é a medida do segmento \overline{CP} . \overline{BE} está situado em um plano paralelo ao plano do detetor c e, portanto, representa a medida que corresponderia ao lado de um quadrado como projeção. A medida \overline{BE} só depende da variação de r e será aqui utilizada para obter IFOV_2 , isto é

$$\text{IFOV}_2 = (r) (\text{IFOVrad})$$

onde r , dado por

$$r = (Rc_{0s} + h_{0s}) \cos(|\theta|) + \\ - [Rc_{0s}^2 - (Rc_{0s} + h_{0s})^2 \text{sen}^2(|\theta|)]^{1/2},$$

é deduzido a partir dos triângulos ΔJPO e ΔJCO .

A medida do segmento \overline{BD} será utilizada para aproximar IFOV_1 . Considerando-se a Fig. C.1b:

$$\overline{AB} = \overline{BD} \cos(|\theta| + \theta_G)$$

$$\overline{AB} = \overline{BE} \cos(|\theta|)$$

onde

$$\theta_G = \arcsen[r \text{sen}(|\theta|) / Rc_{0s}]$$

é deduzido a partir dos triângulos ΔCGP e ΔCGO da Fig. C.1a.

Portanto, reunindo-se as equações relativas a \overline{AB} acima e fazendo-se $\overline{BD} = \text{IFOV}_1$ e $\overline{BE} = \text{IFOV}_2$:

$$\text{IFOV}_1 = \text{IFOV}_2 [\cos(|\theta|) / \cos(|\theta| + \theta_c)].$$

APÊNDICE DO SISTEMA DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA UTM

Na projeção cartográfica UTM (Universal Transverse Mercator), a superfície de projeção é um cilindro tangente à superfície de referência em um meridiano chamado *Meridiano Central (MC)*. O cilindro tem 60 posições possíveis, cada uma destas correspondendo a uma Zona de Projeção UTM com 6° de amplitude longitudinal (Fig. D.1).

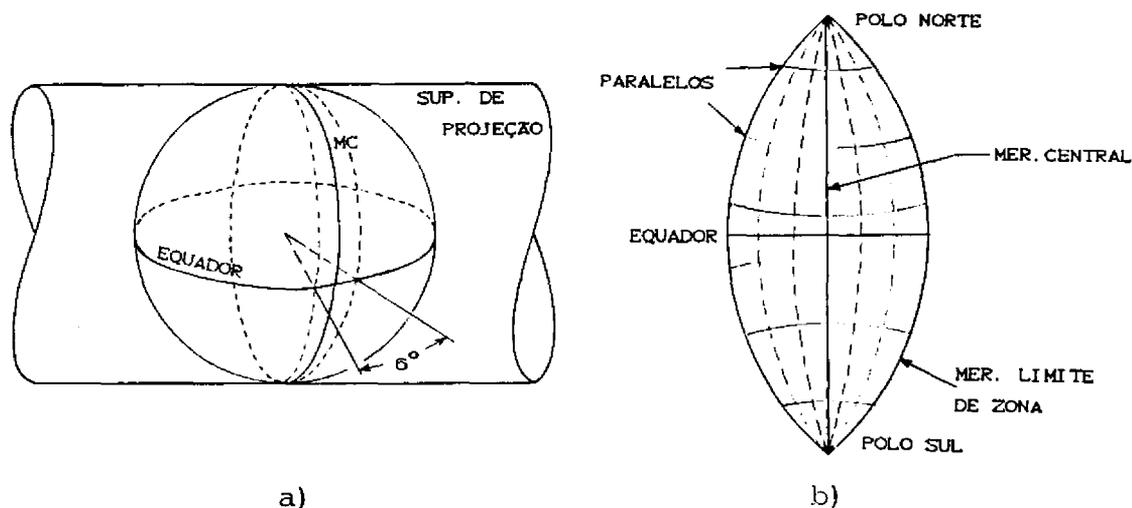


Fig. D.1 - Uma zona de projeção UTM. a) Posicionamento do cilindro; b) Configuração.

A superfície de projeção cilíndrica é, a rigor, secante à superfície de referência: a razão entre o raio do cilindro e o semi-eixo maior do elipsóide de referência designa o chamado *coeficiente de deformação linear (K)* igual a 0.9996 (Santos, 1989; Snider, 1984).

As zonas de projeção UTM são numeradas a partir do antimeridiano de Greenwich (Oliveira, 1988), no sentido leste, de modo que a zona $n^{\circ} 1$ corresponde à faixa de 180° a 174° de longitude oeste, e a zona de $n^{\circ} 60$, à

faixa de 174° a 180° de longitude leste. A Fig. D.2 mostra a disposição das zonas UTM em relação ao Brasil.

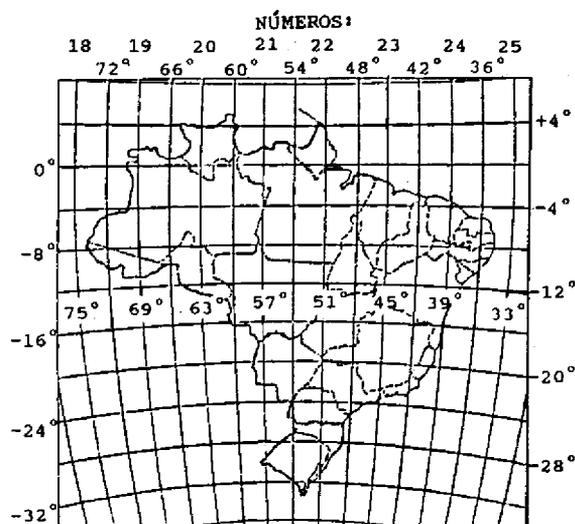


Fig. D.2 - Zonas de projeção UTM no Brasil.

FONTE: Santos (1989), p. 458.

Portanto, cada zona UTM pode ser identificada pelo seu número, ou pela longitude do correspondente meridiano central. A seguinte relação entre o número da zona de projeção (nz) e a respectiva longitude do meridiano central (λ_{MC}) (em graus) é estabelecida, a partir das características acima citadas:

$$\lambda_{MC} = 6(nz) - 183 \text{ (graus)}. \quad (D.1)$$

A longitude λ_{MC} leste é positiva e a oeste, negativa.

Dado um ponto $X(\phi, \lambda)$ da superfície de referência, o número da zona UTM a que este ponto pertence pode ser identificado através da equação abaixo:

$$nz = \begin{cases} 30 + \text{int}(\lambda/6), & \text{para } \lambda \text{ negativo} \\ 31 + \text{int}(\lambda/6), & \text{para } \lambda \text{ positivo.} \end{cases} \quad (D.2)$$

para a determinação do ponto correspondente a $X(\phi, \lambda)$ em coordenadas de projeção $M(x_c, y_c)$, cujas equações constam em Snider (1984).

APÊNDICE EDIAGRAMAS DE FLUXOS DE DADOS

Um diagrama de fluxo de dados (DFD) é uma ferramenta utilizada em análise de sistemas (Gane e Sarson, 1983), onde um conjunto de símbolos e os conceitos que representam encontram-se a nível lógico. A este nível, dá-se margem a várias maneiras de implementação física.

Nas Figuras E.1 e E.2 são apresentados os DFDs referentes aos módulos 1.0 e 2.0 do diagrama da Figura 6.1. Oportunamente, são acrescentadas referências a equações contidas no texto, bem como fornecidos mais detalhes efetuando-se expansões em novos DFDs.

Deve ser observado na Fig. E.1 que os módulos 1.7, 1.10 e 1.13 não foram implementados, dadas as simplificações adotadas na experimentação conforme exposto no Capítulo 7. Portanto, no módulo 1.13 verifica-se que (x_{c_0}', y_{c_0}') é retornado igual a (E_0, N_0) .

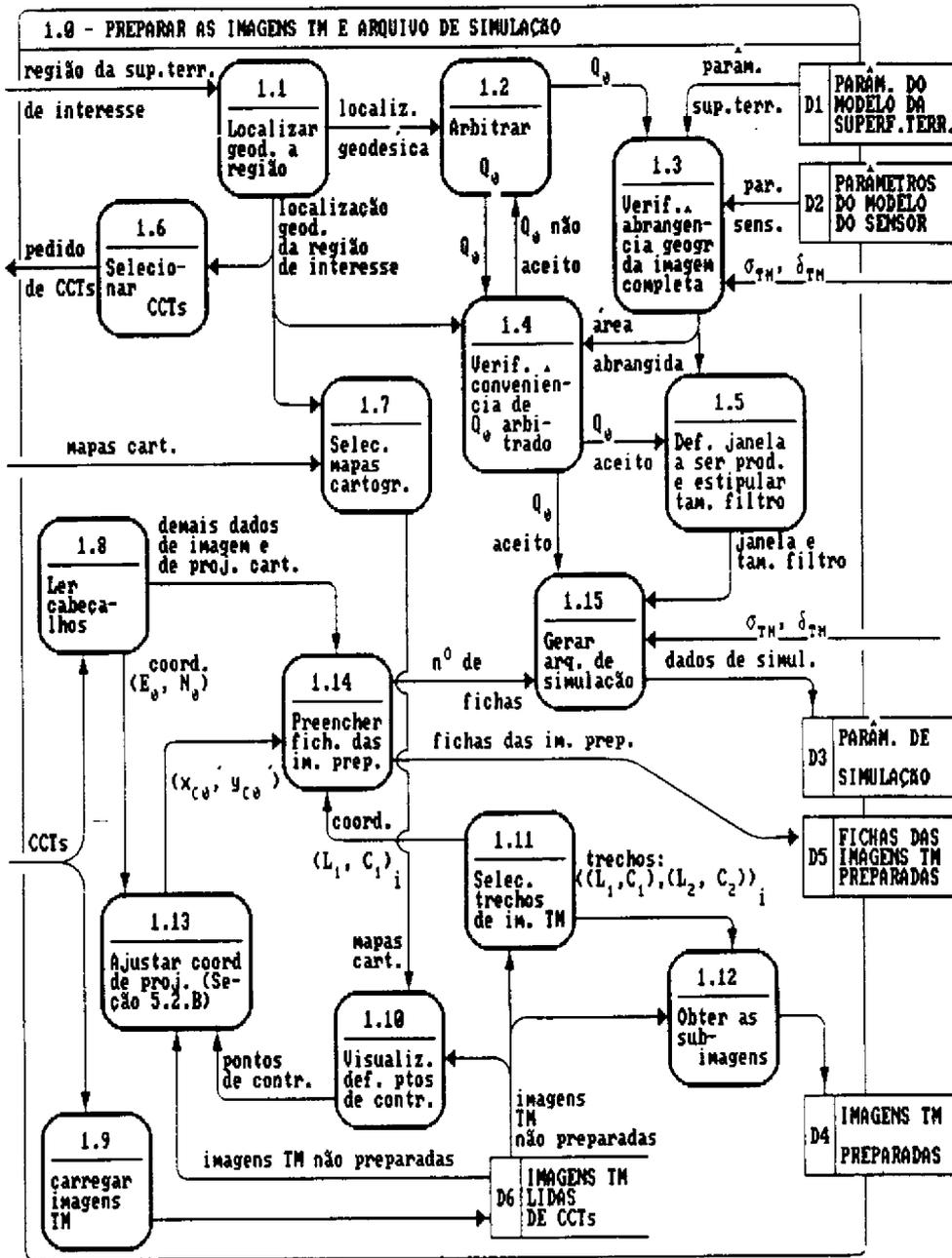


Fig. E.1 - DFD do módulo de preparação das imagens TM e do arquivo de simulação.

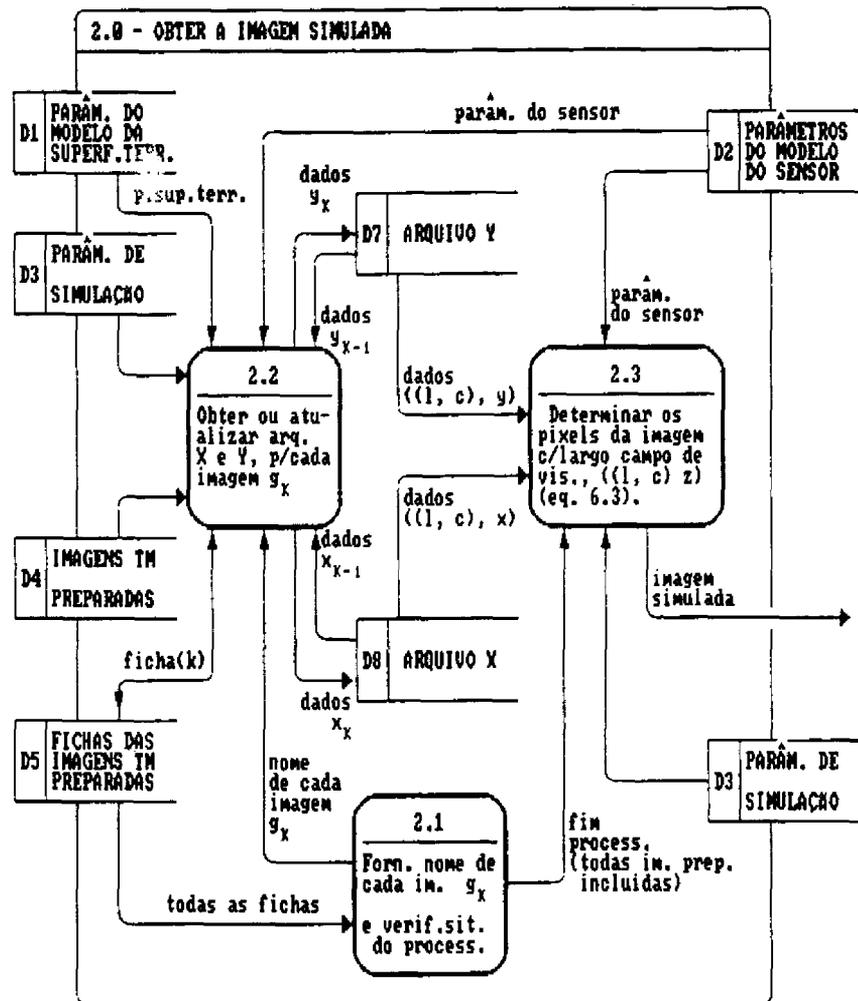


Fig. E.2 - DFD do módulo de obtenção da imagem simulada.

A Fig. E.3 mostra expansão do módulo 2.2 da Fig. E.2, relativo a abertura (se nenhuma imagem TM preparada foi ainda incluída no processamento) ou atualização dos arquivos X e Y (Cap. 6). Este módulo é executado para cada imagem de entrada (nim vezes). O módulo 2.3 só é executado após a inclusão de todas as imagens TM preparadas.

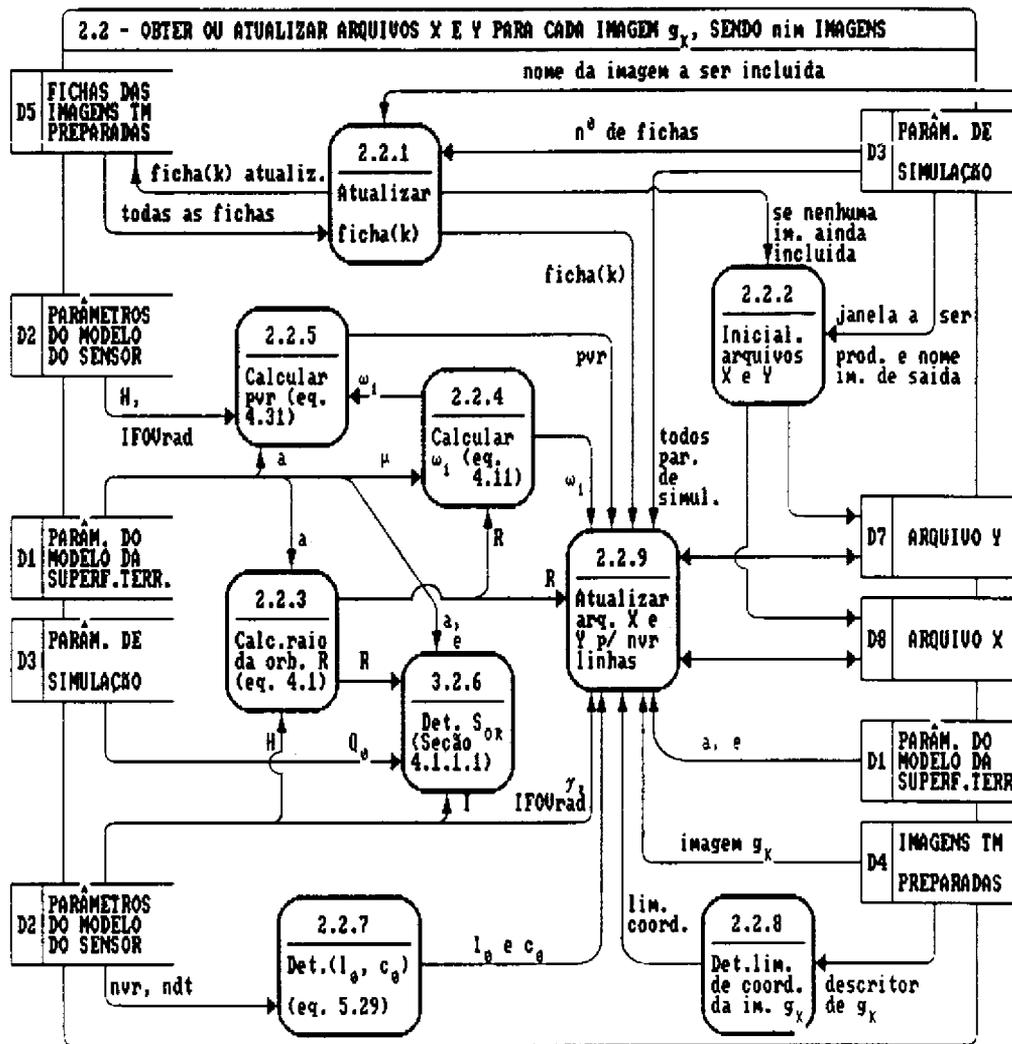


Fig. E.3 - DFD do módulo de abertura ou atualização dos arquivos X e Y.

Dada uma imagem de entrada, para cada linha desta é obtida uma linha correspondente nos arquivos X e Y. O módulo 2.2.9 da Fig. E.3 (cuja expansão é mostrada na Figura E.4) é executado portanto n_{vr} vezes.

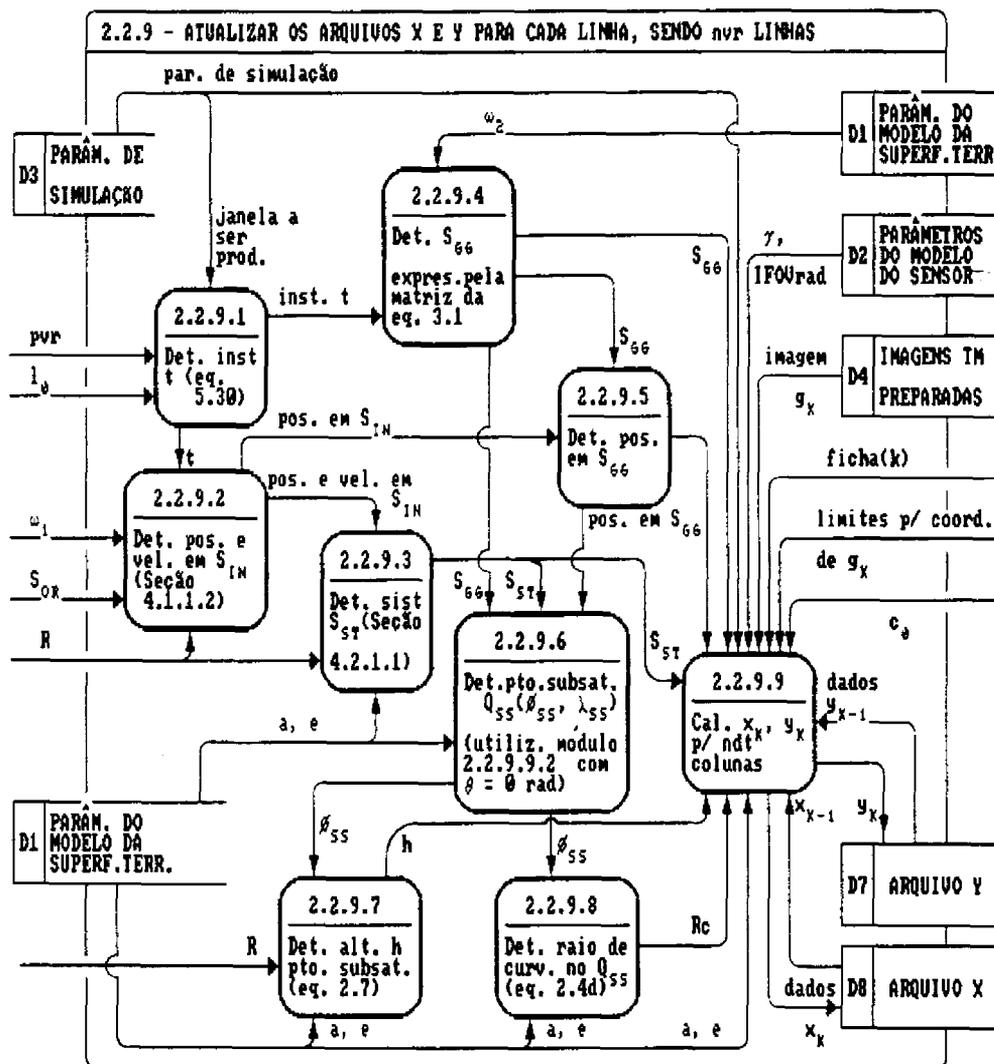


Fig. E.4 - DFD do módulo de atualização dos arquivos X e Y para cada linha da imagem de saída.

Dada uma linha, cada elemento desta, correspondente nos arquivos X e Y, é calculado executando-se o módulo 2.2.9.9 da Fig. E.4. Este módulo, cuja expansão é mostrada na Fig. E.5, é executado ndt vezes para cada linha.

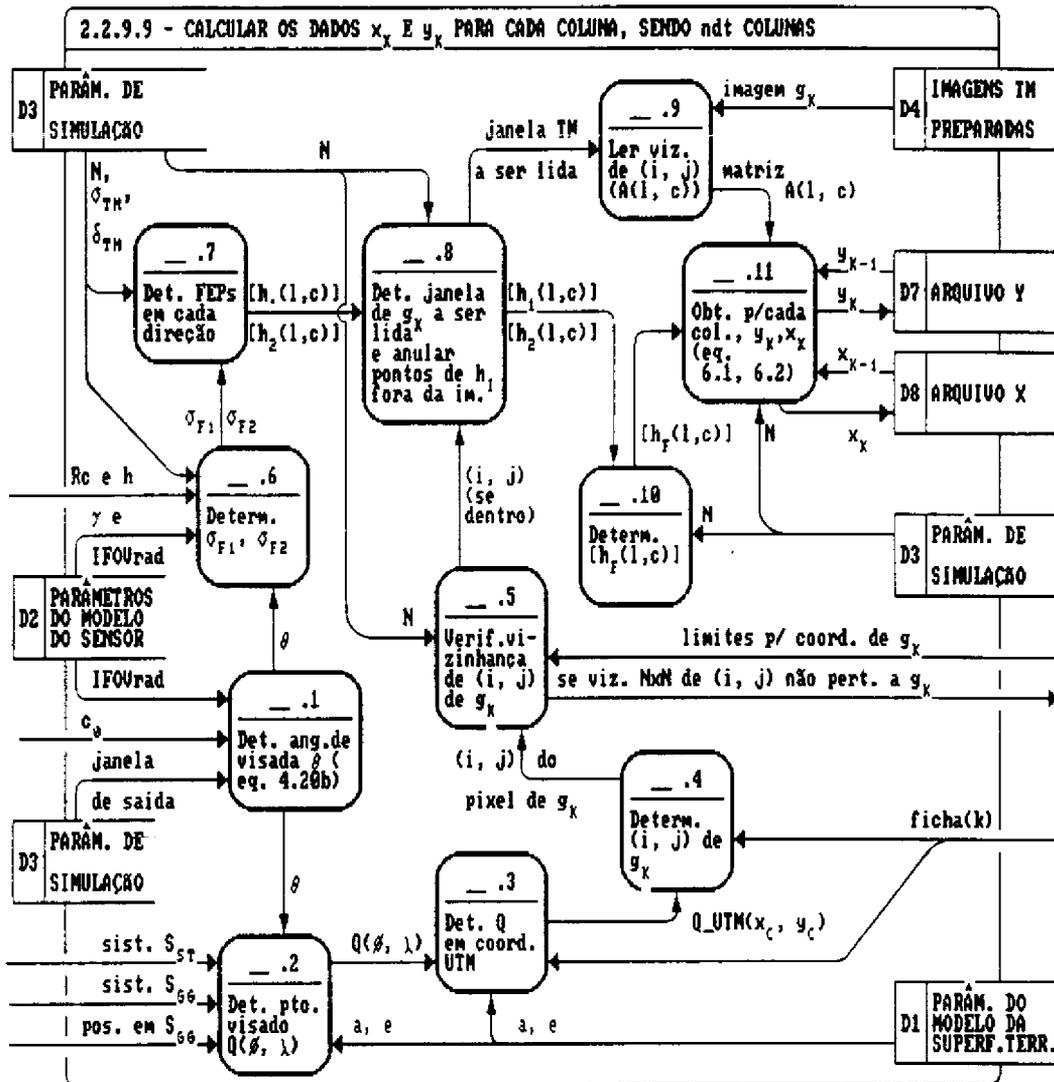


Fig. E.5 - DFD do módulo de obtenção dos elementos dos arquivos X e Y para cada coluna, dada uma linha da imagem de saída.

O módulo 2.2.9.9.2 da Figura E.5 é mostrado na Fig. E.6. Este módulo é importante pois é utilizado também na determinação do ponto sub-satélite em um dado instante (ver Fig. E.4).

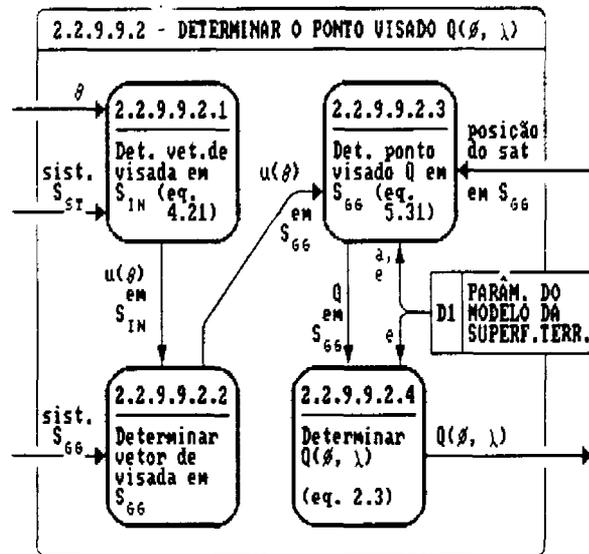


Fig. E.6 - DFD do módulo de determinação do ponto visado da superfície terrestre em dado instante.