



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5068-TDL/407

**SISTEMA DE OBTENÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO PARA A
AMÉRICA DO SUL POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE
IMAGENS NOAA/AVHRR**

Divino Cristino de Figueirêdo

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto,
aprovada em outubro de 1989

INPE
São José dos Campos
1990

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

Dr. Vitor Celso de Carvalho

Vitor Celso de Carvalho

Presidente

Dr. Alberto Waingort Setzer

Alberto W. Setzer

Orientador

Dr. Eduardo Delgado Assad

Eduardo Delgado Assad

Membro da Banca
-convidado-

Dr^a Marlene Elias Ferreira

Marlene Elias Ferreira

Membro da Banca

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Gerald Jean Francis Banon

Membro da Banca

Candidato: Divino Cristino de Figueiredo

São José dos Campos, 13 de outubro de 1989

Este trabalho é dedicado a

Leny, Tatiana, Tiago, Aline, Anali,
Catarina e Jerônimo (em memória)
pelo amor, incentivo e dedicação em
todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Alberto W. Setzer pela orientação, apoio e incentivos constantes.

Ao Instituto de Pesquisas Espaciais, em especial aos funcionários:

Adélio Gurgel do Amaral, Adriana Abrahão, Ambrozina V. Magalhães, Ângela Blanco Gomes, Carlos Alberto Felgueiras, Celina Foresti, Celso Luiz Mendes, Diógenes Salas Alves, Edméa Plácido Oliveira, Eliana Miglioranza, Evlyn Márcia Leão de M. Novo, Fernando Augusto Mitsuo II, Fernando Yutaka Yamaguchi, Geraldi Jean Francis Banon, Gertrud Ulmi, Getúlio Teixeira Batista, Gilberto Câmara Neto, Guaraci José Erthal, Janete da Cunha, João Argemiro de C. Paiva, Joaquim Godoi Filho, José Carlos Moreira, José Luis de Oliveira, Keiko Tanaka, Marcos da Costa Pereira, Marlene Elias Ferreira, Moacir Godoy Junior, Paulo Roberto Menezes, Ricardo Cartaxo M. de Souza, Silvia Mitsuo, Silvio Pereira Coimbra, Sônia Maria de P. Spilak, Suelena Costa Braga Coelho, Sueli Pissara Castellari, Thelma Krug, Valder Matos de Medeiros, Vitor Celso de Carvalho,

que, pela acolhida, apoio material e técnico, propiciaram a realização deste trabalho.

À Secretaria de Informática do Ministério da Agricultura pela iniciativa na busca de novos conhecimentos que me foi confiada.

À Comissão Permanente de Treinamento do Ministério da Agricultura pela autorização na realização do curso.

À Banca Examinadora pelas sugestões oportunas.

A todos amigos e colegas pela compreensão e incentivo nos momentos difíceis.

ABSTRACT

The purpose of this work was to develop software to obtain Vegetation Index products for South America through images of the NOAA polar orbiting satellites, using the SITIM image processing equipment. Input data are the AVHRR sensor images in the visible (0.58 - 0.68 μ) and near-infrared (0.72 - 1.1 μ) spectral bands with 1.1 km spatial resolution received by INPE/Cachoeira Paulista, SP, and also the corresponding orbital parameters of the NOAA satellites. The following final products were produced: a) a digital Normalized Difference Vegetation Index - NDVI mosaic image with 1020 x 1024 pixels and 5 km spatial resolution covering the continent between 0 and 45 degrees South and 32 and 77 degrees West over a period of 15 days; b) graphs showing temporal variations and listings of NDVI for places of interest. The main programs developed were those for direct image navigation (finding geographical coordinates for NOAA/AVHRR image pixels) and inverse navigation (opposite calculation), for production of digital mosaic images, for combining images and maps with political boundaries, and to produce NDVI for areas of interest. Structured Analysis technique was used to support the software development. The results, considered as tests with 1988 images, indicated that the objective of the work was accomplished. Other AVHRR useful applications based on the navigation software can also be derived, such as biomass burning, sea surface temperature and cloud monitoring. Considering the current use of the SITIM in Brazil, it is possible that this work will have numerous uses in the near future for regional and continental studies.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</u>	1
1.1 - Diagnóstico.....	1
1.2 - Alternativa de solução.....	2
1.3 - Objetivos do trabalho.....	3
1.4 - Apresentação.....	4
<u>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</u>	7
2.1 - Bandas espectrais mais favoráveis para estudos da vegetação.....	7
2.2 - Efeitos atmosféricos e da geometria sol-alvo-sensor.....	9
2.3 - Índices de vegetação.....	11
2.4 - Casos de aplicações do IVDN NOAA/AVHRR.....	15
2.5 - O sistema imageador NOAA/AVHRR.....	18
2.6 - Justificativa de uso das imagens NOAA/AVHRR.....	23
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</u>	25
3.1 - Sistema de obtenção de índice de vegetação.....	25
3.1.1 - Produção de imagens de índice de vegetação.....	26
3.1.2 - Utilização de resultados de índice de vegetação.....	37
3.2 - Sistemas auxiliares.....	42
3.2.1 - Sistema de informações geográficas (SIG).....	42
3.2.2 - Sistema de tratamento de imagens (SITIM).....	43
3.3 - Imagens NOAA/AVHRR utilizadas.....	43
3.4 - Sistema de projeção cartográfica.....	43
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	47
4.1 - Imagem IVDN.....	47
4.2 - Programas de navegação para imagens NOAA/AVHRR.....	49
4.3 - Variação temporal do IVDN.....	50

4.4 - Valores do IVDN.....	51
4.5 - Sobreposição de fronteiras políticas à imagem IVDN	51
4.6 - Alcance das imagens NOAA/AVHRR.....	51
4.7 - Aproveitamento das imagens NOAA/AVHRR.....	54
4.8 - Otimização do tempo de processamento.....	56
4.9 - Ajuste de parâmetros.....	57
4.10 - Metas alcançadas.....	57
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....</u>	59
<u>CAPÍTULO 6 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</u>	61
6.1 - Alternativas para novas versões do sistema.....	61
6.2 - Gravação das imagens NOAA/AVHRR.....	62
6.3 - Análise e avaliação das imagens IVDN.....	63
6.4 - Otimização dos parâmetros orbitais e de imageamento.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
APÊNDICE A - ALGORITMOS DE NAVEGAÇÃO	
APÊNDICE B - DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS	
APÊNDICE C - SIGLAS	

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Curvas do comportamento espectral da soja e do solo.....	8
2.2 - Simulação do IVDN para vegetação verde, solo e água, com a geometria de visada e de iluminação durante o solstício de verão.....	10
3.1 - DFD do sistema de índice de vegetação.....	27
3.2 - Imagem de índice de vegetação.....	28
3.3 - Imagem NOAA/AVHRR com delimitação de setores.....	30
3.4 - Geração de mosaicos de índice de vegetação.....	31
3.5 - Distorções da imagem NOAA/AVHRR.....	32
3.6 - Proporção da faixa de imageamento NOAA/AVHRR sobre a superfície terrestre.....	34
3.7 - Imagem NOAA/AVHRR com marca de localidade.....	39
3.8 - Variação temporal do índice de vegetação.....	40
3.9 - Listagem de IVDN.....	41
3.10 - Imagem IVDN geo-referenciada.....	42
3.11 - Mapa de fronteiras políticas da América do Sul no sistema de projeção cilíndrica equidistante.....	44
4.1 - Imagem IVDN.....	47
4.2 - Variação temporal do IVDN.....	50
4.3 - Sobreposição de divisões políticas e feições geográficas..	52
4.4 - Contorno irregular do litoral norte do Brasil.....	52
4.5 - Mapa de divisões políticas utilizado como base.....	53
4.6 - Imagem IVDN classificada.....	54
4.7 - Imagem NOAA/AVHRR com cobertura de nuvens.....	55
6.1 - Imagem de queimadas.....	62
6.2 - Estação receptora das imagens NOAA/AVHRR em Cachoeira Paulista.....	63
A.1 - Geometria orbital conhecida.....	A.2
A.2 - Geometria dos planos que definem a linha de varredura.....	A.5
A.3 - Geometria dos planos que definem a posição do satélite....	A.9
A.4 - Latitudes geocêntrica (Latg) e geodésica (Latp).....	A.10
B.1 - DFD do módulo de produção de imagens de índice de vegetação.....	B.1

B.2 - DFD do módulo de utilização de resultados de índice de ve-
getação..... B.2

LISTA DE SÍMBOLOS

Aorb	- Ângulo geocêntrico no plano orbital, com abertura do plano equatorial à posição do satélite, radianos.
arccos	- Função trigonométrica arco co-seno.
arcsen	- Função trigonométrica arco seno.
arctang	- Função trigonométrica arco tangente.
Avar	- Ângulo de varredura do AVHRR, com vértice no satélite e abertura do nadir ao ponto de interesse, radianos.
cos	- Função trigonométrica co-seno.
Dr	- Distância radial do ponto geográfico, ou distância do ponto de interesse ao centro terrestre.
Elem	- Número da coluna ou "pixel" na imagem NOAA/AVHRR.
fa	- Fator de achatamento terrestre, constante = 298,257.
Fvarre	- Frequência de varredura de elementos do AVHRR, 12288 "pixels"/seg.
Fvarrl	- Frequência de varredura de linhas do AVHRR, 6 linhas/seg.
H	- Altitude do satélite.
IFOV	- Campo instantâneo de visada, radianos.
Imax	- Valor limite superior para IVDN.
Imin	- Valor limite inferior para IVDN.
IVDN	- Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, obtido por: $(M2 - M1)/(M2 + M1)$.
Lao	- Latitude na origem da imagem IVDN, radianos.
Latg	- Latitude geocêntrica de um ponto na superfície terrestre, radianos.
Linha	- Número das linhas na imagem NOAA/AVHRR.
Lo	- Longitude ascendente determinada pela intersecção do plano orbital e linha do equador em um determinado instante, radianos.
Latp	- Latitude do ponto navegado, radianos.

Lo0	- Longitude no instante do cruzamento do satélite pelo equador, radianos.
Lonp	- Longitude do ponto navegado, radianos.
Loo	- Longitude da origem da imagem IVDN, radianos.
M1	- Média dos níveis de cinza dos "pixels" NOAA/AVHRR na banda 1, utilizada no cálculo do IVDN.
M2	- Média dos níveis de cinza dos "pixels" NOAA/AVHRR na banda 2, utilizada no cálculo do IVDN.
Nc1	- Valor digital (nível de cinza) do "pixel" NOAA/AVHRR na banda 1.
Nc2	- Valor digital do "pixel" NOAA/AVHRR na banda 2.
Nci	- Número da coluna ou "pixel" na imagem IVDN.
Niv	- Valor digital do "pixel" na imagem IVDN.
Nli	- Número da linha na imagem IVDN.
pi	- Grandeza trigonométrica, 3,141592654 radianos.
Npix	- Quantidade de "pixels" NOAA/AVHRR entre o ponto navegado e o nadir.
Persat	- Período orbital do satélite.
Pixc	- Número do "pixel" na coluna central da imagem NOAA/AVHRR.
R	- Raio terrestre médio, 6378,16 km.
sen	- Função trigonométrica seno.
So	- Sentido orbital (= 1 ascendente; = -1 descendente).
t	- Tempo de percurso do satélite a partir do equador, mais tempo de varredura de "pixels" do NOAA/AVHRR, para um ponto de interesse, seg.
tan	- Função trigonométrica tangente.
t1	- Tempo decorrido entre o cruzamento pelo equador até a posição do satélite, seg.
t2	- Tempo de varredura de "pixels" NOAA/AVHRR para um ponto de interesse, seg.

Tcruz	- Horário no cruzamento do satélite pelo equador, seg.
Tinic	- Horário do início da gravação da imagem NOAA/AVHRR, seg.
Tp	- Taxa de precessão da órbita do satélite, radianos/seg.
Tvl	- Taxa de variação da longitude terrestre, radianos/seg.
u	- Micro (unidade de medida).
Varre	- Velocidade angular de varredura do AVHRR, radianos/seg.
Vat	- Velocidade angular da Terra, $2 * \pi / 86400$ radianos/seg.
Vas	- Velocidade angular do satélite NOAA, 6120 radianos/seg.
x	- Componente do versor de estado do satélite no eixo X.
xn	- Componente do versor normal ao plano orbital no eixo X.
xv	- Componente do versor velocidade do satélite no eixo X.
xvar	- Componente do versor varredura do sensor no eixo X.
y	- Componente do versor de estado do satélite no eixo Y.
yn	- Componente do versor normal ao plano orbital no eixo Y.
yv	- Componente do versor velocidade do satélite no eixo Y.
yvar	- Componente do versor varredura do sensor no eixo Y.
z	- Componente do versor de estado do satélite no eixo Z.
zn	- Componente do versor normal ao plano orbital no eixo Z.
zv	- Componente do versor velocidade do satélite no eixo Z.
zvar	- Componente do versor varredura do sensor no eixo Z.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - DIAGNÓSTICO

Conforme estudos realizados pela FAO, (Food and Agriculture Organization), a produção de alimentos em todo o mundo terá de aumentar a uma taxa de aproximadamente 3,5% ao ano para atender a crescente demanda decorrente do aumento demográfico; esta taxa é 1/3 maior que a conseguida pelo mundo em desenvolvimento nos últimos 15 anos, (O'Hagan, 1983).

Os recursos naturais, entre eles a cobertura vegetal, necessitam ser amplamente conhecidos para otimizar o gerenciamento destes recursos, bem como a produtividade e preservação das áreas em exploração, o que possibilita a ocupação racional de novas fronteiras. Estimativas globais e periódicas, da produtividade agrícola são de vital importância para propósitos econômicos e agrônômicos.

Neste sentido, espera-se ampla contribuição da agricultura brasileira para a produção de alimentos a fim de atender as necessidades do consumo interno e externo, tendo também contribuído para o fornecimento de matéria prima necessária à produção de outros bens, como insumos para fins energéticos.

Por outro lado, a extensão territorial e as peculiaridades regionais e sazonais de nosso País têm dificultado estudos de natureza global e temporal da vegetação natural e de culturas, impondo fortes restrições a uma política agrícola compatível à realidade nacional.

Regionalmente observam-se grandes áreas com diferentes características físicas e temporais. A floresta amazônica, o pantanal, o cerrado, as grandes áreas de cultivo, entre outras, com seus diferentes tipos de cobertura, apresentando desenvolvimentos diferenciados

da vegetação natural e culturas, distintas dimensões e distribuição espacial, constituem grande desafio em frente dos limitados recursos materiais, financeiros, técnicos e humanos, disponíveis para estudos da cobertura vegetal destas grandes áreas e do País como um todo.

1.2 - ALTERNATIVA DE SOLUÇÃO

Como alternativa auxiliar em estudos de casos como os acima caracterizados, o sensoriamento remoto tem se apresentado como ferramenta de grande utilidade e indispensável para a obtenção de informações abrangentes e confiáveis.

Várias áreas como Pesquisa Mineral e Energética, Geologia, Oceanografia, Análise Ambiental, etc. vêm se beneficiando largamente com o uso do sensoriamento remoto. Também na Agricultura é grande seu potencial de utilização; tem possibilitado, por exemplo, estudos sobre identificação, vigor e taxa de crescimento de culturas; estimativas de áreas de plantio; produtividade; aptidões agrícolas dos solos; recursos hídricos; danos provocados por geadas; inundação; queimadas; estiagem, etc.

As informações pertinentes ao sensoriamento remoto são obtidas, em grande parte, por tratamento e análise de imagens de satélites. Vários tipos de processamento de imagens têm sido utilizados para estudos da vegetação natural e culturas, entre os quais se destaca o que obtém um padrão de informação denominado Índice de vegetação, a partir de pares de imagens nas bandas dos espectros vermelho e infravermelho próximo.

Alguns tipos de índices de vegetação podem ser obtidos a partir de imagens destas duas bandas (Tucker, 1977). Entre eles utilizou-se, neste trabalho, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN). Este índice é bastante relacionado com as propriedades biofísicas da vegetação natural e culturas, possibilitando inferências sobre a taxa de fotossíntese, resistência dos estômatos ao in-

fluxo de CO_2 e sobre a evapotranspiração foliar (Tucker e Sellers, 1986; Sellers, 1985), que são atividades básicas do processo biológico da vegetação verde (Gates et al., 1965; Lyzenza, 1972; Meador e Weaver, 1979).

Vários estudos foram realizados em outros países com aplicação dos índices de vegetação, tais como a análise da dinâmica da cobertura vegetal na África, os levantamentos sobre a seca de 1983 e 1984 na Etiópia, o monitoramento da cobertura vegetal no leste africano, a avaliação das condições ecológicas associadas à devastação causada por gafanhotos em 1980 e 1981 no oeste africano. No Brasil, estes índices foram aplicados a métodos de previsão da produção agrícola e de estimativa da precipitação.

1.3 - OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver e testar a versão preliminar de um sistema de tratamento digital de imagens NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer). Entre as principais finalidades deste sistema citam-se: a) produção de imagens digitais de índice de vegetação, com resolução espacial de 5 km, que cobre a parcela do continente sul-americano compreendida entre os paralelos 0 e 45 graus sul e entre os meridianos 32 e 77 graus oeste, corrigidas geometricamente para um sistema de projeção convencional, geradas a partir das bandas 1 e 2 de imagens NOAA/AVHRR e gravadas em períodos de interesse; b) cálculo e geração de gráficos da variação temporal do índice de vegetação para localidades de interesse; c) geração de listagens de valores de índice de vegetação.

Em decorrência da não-disponibilidade de programas de correção geométrica de imagens NOAA/AVHRR implementados em microcomputador no País, uma tarefa adicional foi incorporada aos objetivos inicialmente estabelecidos. Trata-se do estudo de algoritmos e desenvolvimento de programas de navegação para imagens NOAA/AVHRR em ambiente SITIM.

Para o cumprimento dos objetivos do trabalho foram realizadas várias etapas, dentre as quais se destacam:

- seleção, implementação e teste de algoritmos de navegação;
- criação de modelo para geração de imagem-mosaico digital de índice de vegetação;
- busca de alternativas para otimização do tempo de processamento;
- obtenção de métodos para melhoria da qualidade radiométrica das imagens de índice de vegetação, inclusive eliminação da cobertura de nuvens;
- criação de método para minimizar os efeitos geométricos relacionados à não-uniformidade da resolução espacial das imagens NOAA/AVHRR;
- seleção de imagens NOAA/AVHRR;
- processamento para geração de uma imagem-mosaico a título de teste;
- digitalização de mapa de fronteiras políticas;
- composição de imagem de índice de vegetação com mapa de divisões políticas;
- obtenção de gráficos de variação temporal e listagem de valores de índice de vegetação.

1.4 - APRESENTAÇÃO

No Capítulo 2 constam: a) os fundamentos teóricos sobre índices de vegetação, que envolvem uma avaliação das bandas espectrais

adequadas ao cálculo destes índices, bem como os efeitos atmosféricos e da geometria sol-alvo-sensor sobre eles; b) citações de aplicações do índice de vegetação; c) descrição do sistema imageador NOAA/AVHRR.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos empregados na realização do trabalho. São descritos: as funções e as especificações para o desenvolvimento do sistema; o equipamento e a linguagem de programação utilizados; os sistemas de processamento de imagens e computação gráfica auxiliares na operacionalização do sistema proposto; as imagens NOAA/AVHRR utilizadas; o sistema de projeção cartográfica utilizado para a geração das imagens IVDN.

No Capítulo 4 são apresentados resultados tais como imagem digital IVDN, algoritmos de navegação, variação temporal dos índices de vegetação; são também discutidos temas de caráter geral, tais como limitação de abrangência espacial e aproveitamento das imagens NOAA/AVHRR recebidas em Cachoeira Paulista - SP, medidas para redução do tempo de processamento, ajuste dos parâmetros orbitais e de imageamento, entre outros.

No Capítulo 5 são relatadas as conclusões e no Capítulo 6 são apresentadas recomendações para futuros trabalhos, tais como alternativas para novas versões e infra-estrutura para operacionalização do sistema, análise e avaliação das imagens IVDN.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As duas seções a seguir são baseadas em Tucker e Sellers (1986).

2.1 - BANDAS ESPECTRAIS MAIS FAVORÁVEIS PARA ESTUDOS DA VEGETAÇÃO

A variabilidade da reflectância do solo tem um forte efeito sobre todos os índices da vegetação verde, sendo necessário, para superar este problema, obter acurados dados de campo sobre a reflexibilidade espectral dos solos encontrados nas áreas em estudo.

Estudos da vegetação natural e culturas por sensoriamento remoto normalmente usam comprimentos de ondas específicos selecionados para obter informações sobre a área de interesse. Estas regiões do espectro são selecionadas de modo que a correspondente radiação venha a produzir um forte sinal da cobertura vegetal e a ter bom contraste espectral em relação à maioria dos materiais do solo. Este contraste pode ser representado em um esquema simplificado onde as curvas das reflectâncias espectrais da soja e do solo são sobrepostas em um mesmo sistema de eixos (Fig. 2.1). A curva de reflectância espectral da soja foi utilizada apenas como exemplo representativo da cobertura vegetal.

Cinco regiões primárias e duas de transição têm sido propostas entre 0,4 μ e 2,5 μ . Estas regiões podem ser ligeiramente modificadas em função do percentual de cobertura vegetal, do ângulo zenital solar e do ângulo de visada do sensor. As regiões são: 1) 0,4 μ a 0,5 μ , onde ocorre forte absorção espectral pela clorofila e carotenóides. 2) 0,5 μ a 0,62 μ , onde reduzido nível de absorção pela clorofila é observado; 3) 0,62 μ a 0,7 μ , onde se verifica um pico de forte absorção pela clorofila; 4) 0,7 μ a 0,74 μ , região de transição de forte para fraca absorção; 5) 0,74 μ a 1,1 μ , onde mínima absorção ocorre e o mecanismo de espalhamento das folhas resulta em alta reflectância

espectral, especialmente em áreas de densa cobertura vegetal; 6) 1,1u a 1,3u, região de transição onde a absorção pela água líquida cresce muito; 7) 1,3u a 2,5u, onde ocorre forte absorção pela água contida nas folhas.

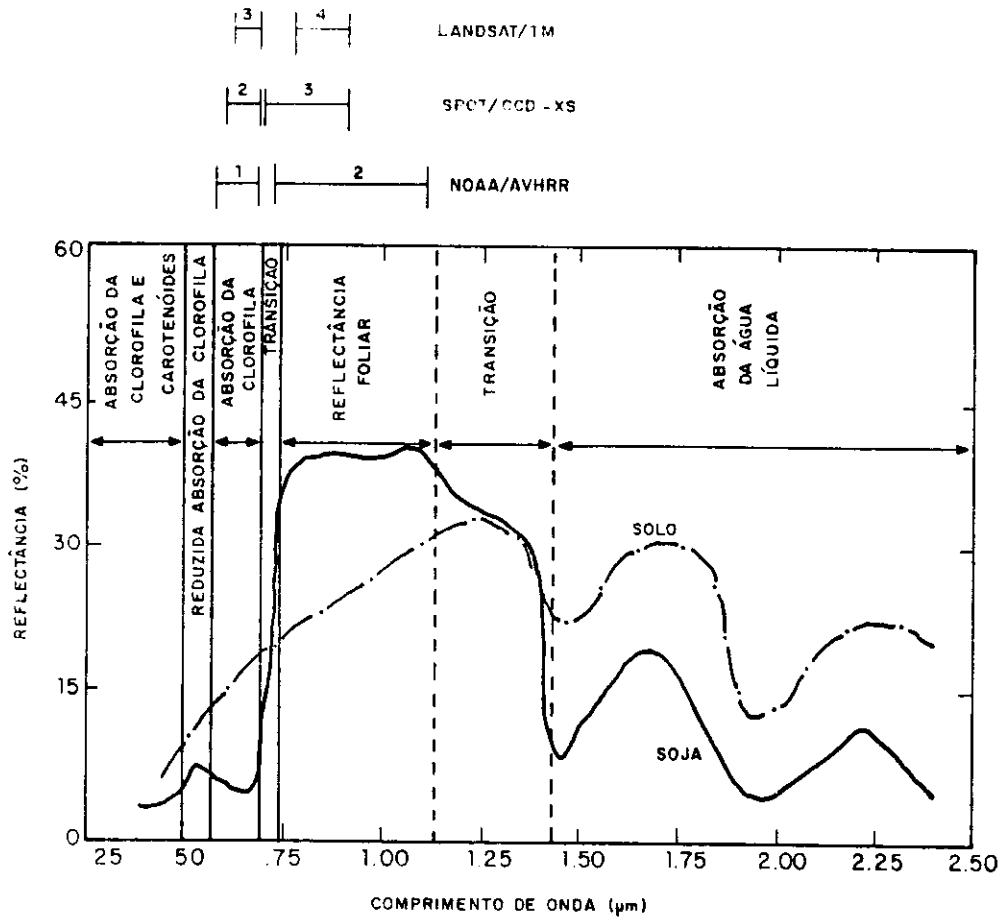


Fig. 2.1 - Curvas do comportamento espectral da soja e do solo.

FONTE: Adaptado de Tucker e Sellers (1986).

- Delineação da região 0,4u a 2,5u em intervalos espectrais onde diferentes propriedades biofísicas da vegetação verde controlam a reflectância correspondente à irradiância solar incidente sobre a vegetação em questão. As curvas de reflectância da vegetação e do solo são sobrepostas para ilustrar porque alguns comprimentos de onda têm maior contraste espectral que outros.

Pelo que se observa, estudos da cobertura vegetal por sensoriamento remoto podem utilizar convenientemente dados da radiância espectral das regiões 0,4 μ a 0,7 μ , 0,74 μ a 1,1 μ e 1,3 μ a 2,5 μ para inferir propriedades relacionadas à absorção pelos pigmentos, à densidade de folhas verdes e ao conteúdo de água na cobertura vegetal. Contudo, a absorção pelos pigmentos e o conteúdo de água na planta são altamente relacionados; desta maneira, têm-se usado apenas duas faixas do espectro da radiação eletromagnética para inferir propriedades biofísicas da vegetação. Estas duas faixas são a porção superior do visível 0,6 μ a 0,7 μ e a do infra-vermelho próximo 0,75 μ a 1,1 μ . As medidas obtidas por sensores nestas duas regiões podem ser combinadas para normalizar diferenças da irradiância espectral solar, enquanto fornece informação sobre o grau de absorção e espalhamento verificado na área imageada.

2.2 - EFEITOS ATMOSFÉRICOS E DA GEOMETRIA SOL-ALVO-SENSOR

As radiâncias espectrais medidas a partir de satélites são também influenciadas pela geometria variável sol-alvo-sensor e pela composição da atmosfera através da qual o sensoriamento ocorre.

Estudos realizados sobre o efeito do ângulo zenital solar têm constatado que a reflectância espectral de superfícies com completa e homogênea cobertura vegetal, nas bandas 0,55 μ a 0,68 μ e 0,73 μ a 1,1 μ , tendem a um mínimo próximo ao nadir e tendem a aumentar a medida que se aumenta o ângulo de visada para todas as direções azimutais. Nestes casos de cobertura vegetal, a distribuição da reflectância espectral tende a ser simétrica em relação ao azimute. Para outros casos de superfície, as propriedades de espalhamento anisotrópico dos solos influenciam significativamente a reflectância espectral direcional.

Os efeitos do espalhamento e da absorção atmosférica sobre a radiação afetam largamente os valores dos índices de vegetação. Estudos recentes têm constatado que, exceto nos casos de crepúculo, fatores tais como afastamento da visada em relação ao nadir, espalhamento atmosférico e nuvens podem somente reduzir os índices de vege-

tação. Os processos para redução destes efeitos têm resultado no método de "composição de imagens temporais por máximo valor de índice de vegetação", que consiste na obtenção diária de dados de satélite, mapeando-os em um mesmo sistema de coordenadas, onde se realiza o registro geográfico dos dados mapeados e, então, seleciona-se para cada ponto o maior entre os vários valores de índice de vegetação obtidos por um período de vários dias. Este método possibilita reduzir os efeitos distorcidos da geometria sol-alvo-sensor e da atmosfera sobre os valores de índices de vegetação (Fig. 2.2).

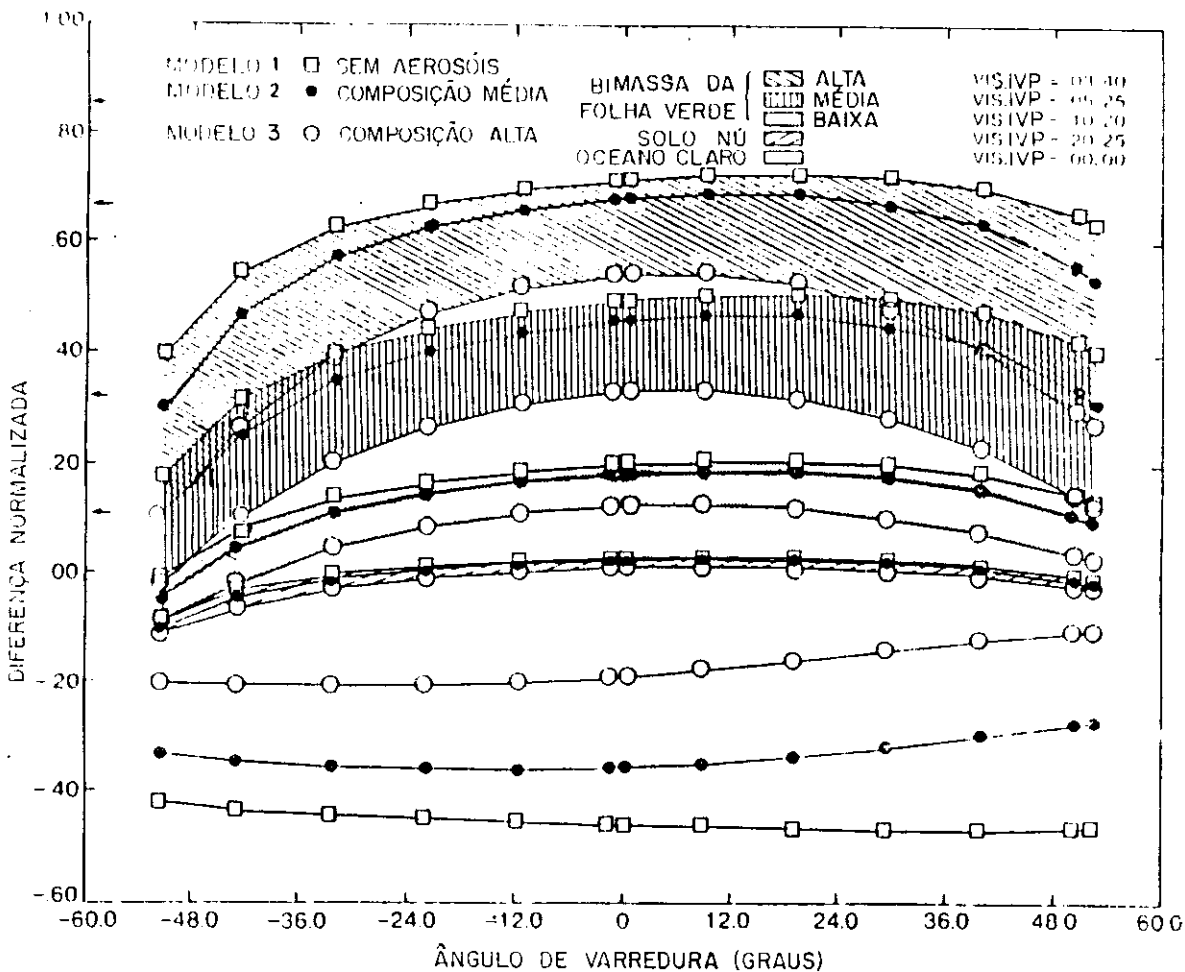


Fig. 2.2 - Simulação do IVDN para vegetação verde, solo e água, com a geometria de visada e de iluminação durante o solstício de verão.

FONTE: Adaptado de Holben (1986).

2.3 - ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Uma grande variedade de índices de vegetação pode ser obtida a partir da combinação de bandas espectrais de imagens de satélites, notadamente a banda do vermelho e a do infravermelho próximo.

Se grande parte dos índices são correlacionados com a densidade da cobertura vegetal, alguns deles foram criados para estudos bem particulares e são de aplicações restritas. A seguir são apresentados alguns tipos de índices e respectivas aplicações.

a) C.V.I. - "Colour Vegetation Index"

Obtido pela relação $MSS5 - MSS7$, possibilita diferenciação direta dos níveis de atividade da clorofila e da densidade da cobertura vegetal.

Foi utilizado para estudos do solo em experiência feita por Bardinnet e Monget (1980).

b) A.V.I. "Ashburn Vegetation Index" ou "Agricultural Vegetation Index"

Criado por Ashburn (1978), é obtido pela relação $2 * MSS7 - MSS5$. O fator de multiplicação 2 pela banda 7 permite compatibilizar os valores digitais em 6 bits desta banda com os da banda 5 em 8 bits, o que minimiza também os resultados negativos.

Valores altos deste índice indicam cobertura vegetal sadia e densa, enquanto valores mais baixos caracterizam solo nu ou vegetação esparsa.

É sensível aos efeitos atmosféricos e inadequado para indicar a deficiência hídrica das plantas.

Este índice foi testado posteriormente por Ashburn (1979) para identificação de culturas com resultados satisfatórios.

Jackson et al. (1983) testaram o índice para cobertura de trigo e descobriram que este índice detecta cobertura vegetal a partir de 15 a 20% de cobertura.

c) D.V.I. "Differenced Vegetation Index"

Criado por Richardson e Wiegang (1977), é obtido pela relação $2,40 * MSS7 - MSS5$.

Segundo a metodologia desenvolvida pelos autores, os valores menores que zero caracterizam a água; os iguais a zero, o solo nudo; os maiores que zero, a vegetação.

Foi utilizado em experiência feita por Bardinet e Monget (1980).

d) I.B. "Índice de Brillance"

Criado por Anglade (1982), é calculado pela relação $(V^2 + (IVP)^2)^{\frac{1}{2}}$, onde V representa a banda do vermelho e IVP a banda do infravermelho próximo.

Foi utilizado em teste de simulação do SPOT na região de Toulouse para diferenciação de cultura de uva e solo descoberto.

e) R.V.I. "Ratio Vegetation Index"

Obtido pela razão entre uma banda do vermelho e uma do infravermelho próximo, tal como $MSS5/MSS7$, $MSS5/MSS6$ ou $TM4/TM5$.

É inadequado para discriminação da vegetação verde quando esta apresenta uma taxa de cobertura inferior a 50%, porque a banda do

vermelho poderá subestimar a biomassa em função das variações do azimute e da orientação de linhas de plantio (Suits, 1983).

Experiências desenvolvidas por Rouse et al. (1973, 1974) apresentaram estudos mais profundos de sensibilidade do R.V.I. Da mesma maneira, Colwell (1973, 1974) e Duggin (1980, 1983) comprovaram a forte dependência angular deste índice que pode exagerar os efeitos angulares, necessitando de correções acuradas do efeito da geometria de iluminação.

Como exemplos de estudos deste índice, citam-se:

- experimento com trigo, que apresenta boa correlação entre os valores da relação MSS5/MSS6 e o índice de área foliar (Knematsu et al., 1974);
- estudo com milho e aveia a partir da relação MSS5/MSS7, com resultados diferentes em função dos tipos de solos e da localização na paisagem (Myers et al., 1974).

f) V.I.D. - "Vegetation Index Difference"

Obtido a partir da relação

$$(MSS7/MSS5)_{(data1)} - (MSS7/MSS5)_{(data2)},$$

é utilizado para comparação de medidas realizadas diretamente sobre a biomassa verde, para detecção de mudanças observadas entre duas datas.

Entre suas aplicações, citam-se:

- estudo da desfolhação de florestas na Pensilvânia (Nelson, 1983);
- detecção de mudanças na utilização do solo em regiões urbanas (Angelici e Bryant, 1977);

- estudo do desenvolvimento de culturas em New Brunswick (Yazdani, 1984).

g) N.D. - "Normalized Difference" ou IVDN - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

Criado por Rouse et al. (1973), pode ser obtido pela relação $(MSS7 - MSS5)/(MSS7 + MSS5)$ ou $(AVHRR2 - AVHRR1)/(AVHRR2 + AVHRR1)$.

O índice da vegetação verde é sem dúvida, o mais frequentemente utilizado. Sua formulação é equivalente à razão da banda do infravermelho próximo pela banda do vermelho; entretanto, seu emprego só é justificado a medida que existe uma melhora nas informações obtidas pelo N.D. em relação a esta razão, segundo estudos de Perry e Lautenschlager (1984).

Saint et al. (1981) mostraram que o índice elimina em parte as variações simultâneas do brilho nas duas bandas devido principalmente à heterogeneidade da estrutura da paisagem observada ou das condições de aquisição de imagens em tempos diferentes, o que possibilita comparação das biomassas das plantas em diversas localidades.

Este índice é muito sensível à difusão atmosférica que reduz sua eficácia.

Alguns casos de estudo deste índice são citados:

- Mariette et al. (1982) e Delavigne (1983), utilizando cena do LANDSAT, puderam diferenciar 13 tipos de cobertura vegetal, onde os valores nulos corresponderam à água ou a superfície sem vegetação, as zonas urbanas corresponderam aos valores entre 0 e 120, e os valores entre 120 e 240 representaram cobertura vegetal;

- estudo de florestas densas realizados por Blair e Baumgardner (1977);
- variação sazonal da resposta do índice correlacionado com o crescimento e o desenvolvimento das folhas (Ashley et al., 1975);
- estudo da desertificação no Sudão, setor de Kordofan; aplicações do N.D. após correção dos efeitos da bruma atmosférica e do ângulo solar (Hellden, 1984).

Esta rápida revisão de alguns tipos de índices de vegetação e suas aplicações mostram seu potencial e evidenciam a importância dos satélites LANDSAT e SPOT como fontes de informação sobre a cobertura natural a partir da utilização destes índices.

Vários trabalhos sobre índices de vegetação foram publicados; entretanto, uma extensa revisão bibliográfica é apresentada por Bariou et al. (1985), onde aplicações, limites e restrições de diversos índices são discutidos exaustivamente.

2.4 - CASOS DE APLICAÇÕES DO IVDN NOAA/AVHRR

As faixas espectrais do vermelho, 0,58u a 0,68u, e do infravermelho próximo, 0,72u a 1,1u, registradas nas bandas 1 e 2 do sistema sensor AVHRR possibilitam o cálculo do IVDN pela relação $(Nc2 - Nc1)/(Nc2 + Nc1)$, onde Nc1 e Nc2 são os valores digitais das bandas 1 e 2, respectivamente.

A alta frequência de imageamento em base diária, a natureza regional e/ou global da superfície imageada e as características espectrais das bandas NOAA/AVHRR utilizadas indicam que as imagens IVDN constituem base de dados do sensoriamento remoto de real valor nos estudos e acompanhamento regional e sazonal da vegetação natural e culturas.

Na América do Sul, as aplicações do IVDN para análise global da cobertura vegetal em grandes áreas encontram-se ainda em sua fase inicial. Em parte, esta situação pode decorrer da não-disponibilidade de imagens de índice de vegetação, corrigidas geometricamente, para regiões que cobrem relativamente grandes áreas, obtidas sistematicamente a partir de dados de satélites. Contudo, para outros continentes, notadamente em estudos relacionados com o continente africano, freqüentes resultados têm sido obtidos. Como ilustração, apresentam-se alguns casos destas aplicações;

- 1) **Análise da dinâmica da vegetação africana que usa o IVDN** (Townshend e Justice, 1986). Imagens de IVDN a uma resolução de 8 km foram correntemente geradas para toda a África. Estas imagens foram submetidas a processo de composição temporal para reduzir o efeito da cobertura de nuvens e a variação da atmosfera. Gráficos do IVDN contra o tempo indicaram que diferentes tipos de cobertura apresentam características muito próximas de sua fenologia. O padrão resultante de valores de IVDN apresentados na imagem foram analisados em termos dos tipos de cobertura presentes e da variação local de precipitação. Comparações entre imagens dos anos de 1983 e 1984 de um modo geral apresentaram semelhanças, mas significativas diferenças da cobertura vegetal foram observadas nas regiões norte e leste da África.

- 2) **Reflexões sobre a seca: Etiópia 1983-1984** (Henricksen, 1986). Realizaram-se comparações de 4 imagens NOAA/AVHRR da Etiópia obtidas em agosto e setembro de 1983 e 1984, a fim de analisar os efeitos da estiagem sobre a vegetação verificada naquele país nestes dois anos. Comparações das imagens NOAA/AVHRR revelaram dramático contraste nas condições de crescimento da vegetação nestes dois anos, durante o período crítico de maturação das lavouras, nos meses de agosto e setembro.

- 3) **Monitoramento da cobertura vegetal do leste africano usando dados AVHRR** (Justice et al., 1986). Dados de IVDN obtidos pelo período de um ano a partir de maio de 1983 foram usados para examinar a fenologia de vários tipos de vegetação. Dados do IVDN integrados neste mesmo período foram comparados com um mapa ecoclimático da região e mostraram marcadas semelhanças. Particular ênfase foi dada à quantificação da fenologia de florestas da espécie *Acácia Commiphora*. Considerável variação foi encontrada na fenologia das florestas determinada por meio do IVDN, o que foi explicado pela alta variabilidade espacial na distribuição das chuvas. O relacionamento entre precipitação e IVDN foi examinado por meio de estações meteorológicas existentes na região. Uma preliminar estimativa da extensão do crescimento sazonal da cobertura vegetal foi realizada usando a técnica de fatiamento da imagem IVDN.

- 4) **Avaliação das condições ecológicas associadas à desertificação provocada pela praga de gafanhotos que surgiu no oeste africano em 1980/81, usando dados de satélites ambientais.** (Hielkema et al., 1986; Tucker e Sellers, 1986). Dados NOAA/AVHRR foram analisados para documentar a dinâmica da biomassa vegetal associada à desertificação regional provocada por gafanhotos em uma área em torno de 600.000 km². As distribuições espacial e temporal da biomassa da vegetação registradas por satélites foram altamente correlacionadas tanto às pesquisas da população de gafanhotos quanto aos dados de precipitação coletados em estações da região. Análises dos dados multitemporais do satélite indicaram que os dados de índice de vegetação estivessem operacionalmente disponíveis no ano de 1980, medidas para controle preventivo teriam sido necessárias apenas para uma área de 600 km².

- 5) **NOAA/AVHRR e seus usos para monitoramento da precipitação e vegetação** (Kerr, 1988). Foram utilizados índices globais da vegetação, obtidos a partir de imagens NOAA-7/AVHRR durante a

estação chuvosa de 1986 para monitorar a precipitação sobre o Senegal. Os dados de satélites foram usados em conjunto com medidas de estações terrestres para derivar relacionamentos empíricos entre a precipitação e GVI. A regressão obtida foi então usada para mapear a precipitação total correspondente à estação de crescimento da vegetação, chegando-se a bons resultados. O relacionamento entre IVDN derivado dos dados HRPT e da evapotranspiração também foi obtido.

- 6) **Aplicação de métodos recentes de previsão da produção agrícola para o Brasil** (Liu, 1983). O IVDN obtido a partir dos dados do satélite NOAA foi utilizado para analisar a progressão da soja, milho, arroz e café durante a estação de crescimento.
- 7) **Estimativa da precipitação através dos índices de vegetação do satélite NOAA** (Assad et al., 1988). Realizou-se um estudo com 70 imagens NOAA gravadas no período de setembro a março dos anos de 1982, 1983 e 1984. Extraíu-se o índice de vegetação sobre região representativa de 89 estações pluviométricas do Estado de Minas Gerais. Posteriormente estabeleceram-se as correlações entre o índice de vegetação e as alturas pluviométricas.
- 8) **Monitoramento de secas no Nordeste com índices de vegetação** (Setzer e Malingreau, 1989). Fez-se um estudo da variação temporal de IVDN para várias localidades do Nordeste brasileiro, estudo este que mostra forte correlação com dados de precipitação e permite o mapeamento de áreas afetadas pela seca.

2.5 - O SISTEMA IMAGEADOR NOAA/AVHRR

O texto a seguir baseia-se em Justice (1986).

Nos últimos anos têm ocorrido importantes desenvolvimentos no sensoriamento remoto terrestre que afetarão positivamente os conhe-

cimentos sobre o assunto. Um destes desenvolvimentos tem sido o uso de dados de satélites de alta frequência temporal e baixa resolução espacial para o sensoriamento remoto. A própria NASA tem dado ênfase à aplicação de recursos em pesquisas a fim de avaliar os dados de satélites de baixa resolução espacial para monitoramento em escala global.

O principal sensor para monitoramento da superfície terrestre em baixa resolução espacial tem sido o AVHRR, a bordo dos satélites meteorológicos norte-americanos da série NOAA. As características principais deste sistema são a captação de dados de baixa resolução espacial e de alta resolução radiométrica multiespectral para toda a superfície da Terra em base diária e baixos custos. No seu planejamento está prevista a continuidade de sua operação na década de 90. Os primeiros sensores AVHRR passaram por uma série de modificações, principalmente para a escolha das bandas espectrais (Tabelas 2.1 e 2.2).

O propósito original deste sensor foi fornecer estimativa da cobertura de nuvens e medidas de temperatura da superfície. Bandas espectrais foram subsequentemente adicionadas para permitir melhor discriminação de nuvens do gelo e neve e ainda para possibilitar correção atmosférica para medidas de temperatura.

As primeiras publicações que descrevem o potencial dos dados do AVHRR para aplicações sobre a superfície terrestre apareceram em 1981. A natureza multitemporal dos dados tem possibilitado aos pesquisadores dedicação aos aspectos do monitoramento global e regional do sensoriamento remoto, até então impraticáveis devido à insuficiência de imageamentos sem cobertura de nuvens e aos volumes de dados associados com a resolução espacial do sistema LANDSAT.

Em 1982 o grupo de Estudos do Monitoramento e Modelamento de Inventário Global (GIMMS) da NASA dedicou-se a estudos multitemporais da vegetação usando dados NOAA/AVHRR. O principal objetivo do grupo foi avaliar a utilização dos dados de satélites de baixa resolução espacial para prover informações sobre a distribuição e fenologia da

vegetação. Nos primeiros três anos as metas do projeto foram: (1) adquirir suficientes bases de dados destinados ao monitoramento global; (2) desenvolver hardware e software para processamento e análise destas bases de dados; e (3) estabelecer projetos cooperativos de pesquisa na área.

TABELA 2.1 - DESENVOLVIMENTO DAS SÉRIES DO SENSORES NOAA/AVHRR

SATÉLITE Nº	DATA DE LANÇAMENTO	SENSOR	BANDAS
NOAA(ITOS) 2-5 TIROS N	1972- 1976 out/78	VHRR AVHRR	2 (visível e termal) 4 (sobrepos. visível infravermelho próximo)
NOAA(A) 6	jun/79	AVHRR(1)	4 (visível, infravermelho próximo, termal)
NOAA(B) NOAA(C) 7	falhou jun/81	AVHRR(2)	5 (visível, infravermelho próximo, infravermelho medio termal)
NOAA(D)	não lançado		
NOAA(E) 8	mar/83	AVHRR(1)	4
NOAA(F) 9	nov/84	AVHRR(2)	5
NOAA(G)	ago/86	AVHRR(1)	4
NOAA(H-J)		AVHRR(2)	5
NOAA(K)		AVHRR(3)	6 são propostas uma mudança
NOAA(L)/NOAA(M)		AVHRR(3)	6 para aumentar a precisão da banda 2 e uma mudança no nível de saturação da banda 5. O AVHRR 3a terá uma banda 1,6u e o 3b terá uma banda 3,8u

FONTE: Adaptado de Justice (1986).

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS NOAA/AVHRR

Ciclo de cobertura	9 dias				
Ângulo de varredura	+ 55,4 a - 55,4 graus				
Cobertura no solo	2700 km				
Inclinação orbital	98,8 graus				
Período orbital	102 minutos				
Nº de órbitas/dia	14,1				
Altitude orbital	~ 860 km				
IFOV	1,39 - 1,51 mrad				
Resolução no solo	1,1 km (nadir); 2,4 km (máximo ângulo orbital); 6,9 km (máximo ângulo de visada)				
Quantização	10 bits				
Cruzamento equatorial	descendente		ascendente		
	07:30hs		19:30hs	(NOAA-6, 8 e 10)	
	14:30hs		02:30hs	(NOAA-7, 9 e 11)	
Bandas espectrais	1	2	3	4	5
Faixas espectrais	0,58	0,725	3,5	10,3	11,5
	a	a	a	a	a
	0,68	1,1	3,93	11,3	12,5

FONTE: Adaptado de Justice (1986) e Kidwell (1986).

A natureza global das pesquisas caracteriza a necessidade de cooperação científica internacional, que tem encontrado interesse em vários estabelecimentos e organizações de pesquisas de vários países. As áreas de pesquisas nos primeiros cinco anos do projeto destinaram-se principalmente ao desmatamento tropical, ao monitoramento regional de queimadas, à desertificação provocada por gafanhotos, ao mapeamento continental da cobertura terrestre, à fenologia global da vegetação, ao relacionamento global vegetação-CO₂.

Estes estudos até o momento têm enfatizado largamente o uso do IVDN como ferramenta conveniente para análises multitemporais da vegetação. Em um fórum de discussões patrocinado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP), ocorrido em fevereiro de 1985, constatou-

-se a natureza normalmente descritiva e exploratória dos trabalhos, na maioria relacionados com a avaliação do potencial desta fonte de dados recentemente descoberta e com o estabelecimento de métodos para análise dos dados. As pretensões dos projetos são o desenvolvimento de metodologias NOAA/AVHRR no contexto de programas operacionais de monitoramento existentes, o que garante uma base sólida para contínuas aplicações dos dados. Como qualquer nova tecnologia em sensoriamento remoto, existe o cuidado de não superestimar as possibilidades do sistema antes da real comprovação de seu verdadeiro potencial. No presente estágio de desenvolvimento, em que a comunidade de pesquisadores e usuários têm consciência da fonte de dados e, portanto, criam ambiente propício ao investimento em pesquisas necessárias, deve ser dada ênfase à análise quantitativa baseada em sistemática e adequada coleta de dados de campo para validar a interpretação dos e avaliar o sistema sensor. Não se pode afirmar que o sistema NOAA/AVHRR é redundante ao sistema LANDSAT, e claramente existe muito a ganhar com o uso dos dados NOAA/AVHRR em conjunção com os sistemas de alta resolução espacial. Contudo, o NOAA/AVHRR oferece uma abordagem alternativa para estudos ambientais em larga escala para os quais os sistemas LANDSAT e SPOT podem ser inadequados.

Resultados dos estudos do NOAA/AVHRR criaram suficiente interesse na comunidade de pesquisa a ponto de propor a instalação de sensores de baixa resolução espacial a bordo de satélites de missões futuras: a próxima geração dos satélites NOAA, L, M, o Sistema de Observações Terrestres da NASA (EOS), o Sistema Japonês de Observação e Sensoriamento do Mar, o terceiro satélite SPOT francês e os próprios satélites brasileiros. As resoluções espaciais propostas para estes sistemas variam de 500 m a 1 km, sujeitas a futuras avaliações, e é certo que estes sistemas para sensoriamento remoto terrestre estarão disponíveis já na próxima década. Os dados de baixa resolução espacial constituirão, indiscutivelmente, uma importante fonte de informações globais que complementarão os atuais dados de alta resolução espacial.

2.6 - JUSTIFICATIVA DO USO DAS IMAGENS NOAA/AVHRR

Os satélites imageadores mais utilizados para aplicações em sensoriamento remoto de recursos naturais têm sido os das séries LANDSAT, SPOT e NOAA. As características básicas das imagens destes sistemas são: resolução espacial (menor alvo identificável na superfície terrestre); resolução radiométrica (sensibilidade à intensidade de radiação); resolução espectral (possibilidade de registrar dados por meio de estreitas faixas do espectro eletromagnético); e resolução temporal (frequência de imageamento, ou frequência de obtenção de imagens sucessivas de uma mesma região da Terra).

Tais características determinam os tipos de aplicações para estes dados. As diferenças mais acentuadas destes sistemas imageadores estão nas resoluções espacial e temporal. Os sistemas das séries LANDSAT/TM e SPOT/CCD obtêm dados com resolução espacial de 30m e 10m, respectivamente, considerados excelentes para aplicações que envolvem alvos terrestres de menor porte. Os períodos de imageamentos sucessivos destes dois sistemas, 16 e 25 dias, respectivamente, associados ao problema de cobertura de nuvens, pode dificultar estudos de fenômenos dinâmicos da superfície terrestre. Como se sabe, grande parte do território nacional está sob regime de clima tropical e, portanto, com alta média de cobertura de nuvens, o que constitui forte restrição à captação de dados por técnicas de sensoriamento remoto. Este problema pode comprometer a disponibilidade dos dados em tempo hábil, inviabilizando, por exemplo, estudos sobre vegetação de rápido ciclo fenológico, como é o caso das culturas de um modo geral.

Dependendo da dimensão da área terrestre a ser estudada, surge um outro problema quando se usam dados dos satélites LANDSAT e SPOT, cujas imagens cobrem uma superfície de 180 km x 180 km e 60 km x 60 km, respectivamente. Para estudos em escala regional, por exemplo, seria necessário uma grande quantidade de imagens para a completa cobertura da área de interesse, o que pode ser tecnicamente inviável até mesmo com fartos recursos computacionais. A título de exemplo, são

necessárias mais de 300 imagens LANDSAT para a cobertura do território nacional.

Em contrapartida, o sistema da série NOAA/AVHRR obtém imagens com resolução espacial da ordem de 1 km, impróprias para aplicações que envolvem pequenas feições; no entanto, são consideradas boas para estudos de regiões de maior porte. A extensão territorial coberta e a frequência de imageamento em base diária tornam este sistema particularmente promissor para estudos de feições em larga escala. A alta frequência de imageamento aumenta a probabilidade de obtenção de imagens sem cobertura de nuvens, além de cobrir grandes áreas, da ordem de 2700 km x 3000 km. Não há dúvida de que as imagens LANDSAT e SPOT são de grande utilidade na obtenção de índices de vegetação, para estudos de menores áreas. Verifica-se também que não ocorre redundância de dados destes satélites quando comparados com os do NOAA, existindo grandes possibilidades de complementação entre eles. Uma descrição detalhada das imagens NOAA/AVHRR pode ser encontrada em Kidwell (1986).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - SISTEMA DE OBTENÇÃO DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

O "Sistema de Obtenção de Índice de Vegetação para a América do Sul por Processamento Digital de Imagens NOAA/AVHRR", objeto do presente trabalho, tem caráter experimental, tendo sido testada principalmente a viabilidade de correção geométrica e produção sistemática de imagens-mosaico em equipamento de pequeno porte, no caso o SITIM-150. Este equipamento fabricado pela ENGESPAÇO, baseado em um microcomputador PC, permite processamento e visualização de imagens multiespectrais (ENGESPAÇO, 1988), tendo a seguinte configuração: microprocessador de 16 bits, com processador de ponto flutuante; memória RAM de 512 kbytes; unidade de disco do tipo "winchester" a partir de 10 Mbytes; unidade de disco flexível de 5 1/4" (320 Kbytes); monitor de vídeo monocromático e teclado; monitor de vídeo colorido (RGB), 512 linhas x 470 colunas; unidade de visualização de imagens, constituída de 4 placas de memória com 1 Mbyte cada, organizada em 4 planos de 1020 x 1024 pontos de 8 bits, sendo 1 plano gráfico; impressora serial 100 cps e 132 colunas; unidade de fita magnética 9 trilhas 45 ips; mesa digitalizadora de coordenadas; e "Plotter".

Além do aspecto computacional do trabalho, procurou-se gerar produtos de imediata aplicação para o sensoriamento remoto, como é o caso dos resultados derivados do índice de vegetação. O sistema, nesta versão preliminar, além dos resultados acima, consiste em programas básicos para desenvolvimentos futuros, que deverá dar origem a novas versões que atendam outras demandas relacionadas com os dados NOAA.

Pelos motivos operacionais a seguir descritos, o sistema é dividido em dois módulos:

- Produção de imagens IVDN, onde são executados processos relativamente morosos como a carga das imagens NOAA, o ajuste dos parâmetros orbitais e a geração das imagens IVDN, sendo conveniente sua operacionalização por equipe treinada para esta finalidade.
- Utilização de resultados de índice de vegetação, onde são produzidos gráficos da variação temporal e listagens do índice de vegetação, podendo-se também efetuar composição digital do mapa de divisões políticas da América do Sul com imagens IVDN. Este módulo de operação relativamente simples pode ser executado pelo usuário final.

No diagrama de fluxo de dados (DFD) a seguir (Fig. 3.1), consta o desmembramento do sistema em suas funções principais, o inter-relacionamento entre elas, as entidades que interagem com o sistema, as fontes, a tramitação e o destino dos dados (Gane e Sarson, 1983).

No Apêndice B encontram-se os DFDs dos módulos acima mencionados.

3.1.1 - PRODUÇÃO DE IMAGENS DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Este primeiro módulo tem por objetivo produzir imagens IVDN geradas gradativamente por processamentos sucessivos das imagens NOAA/AVHRR gravadas diariamente em períodos de interesse.

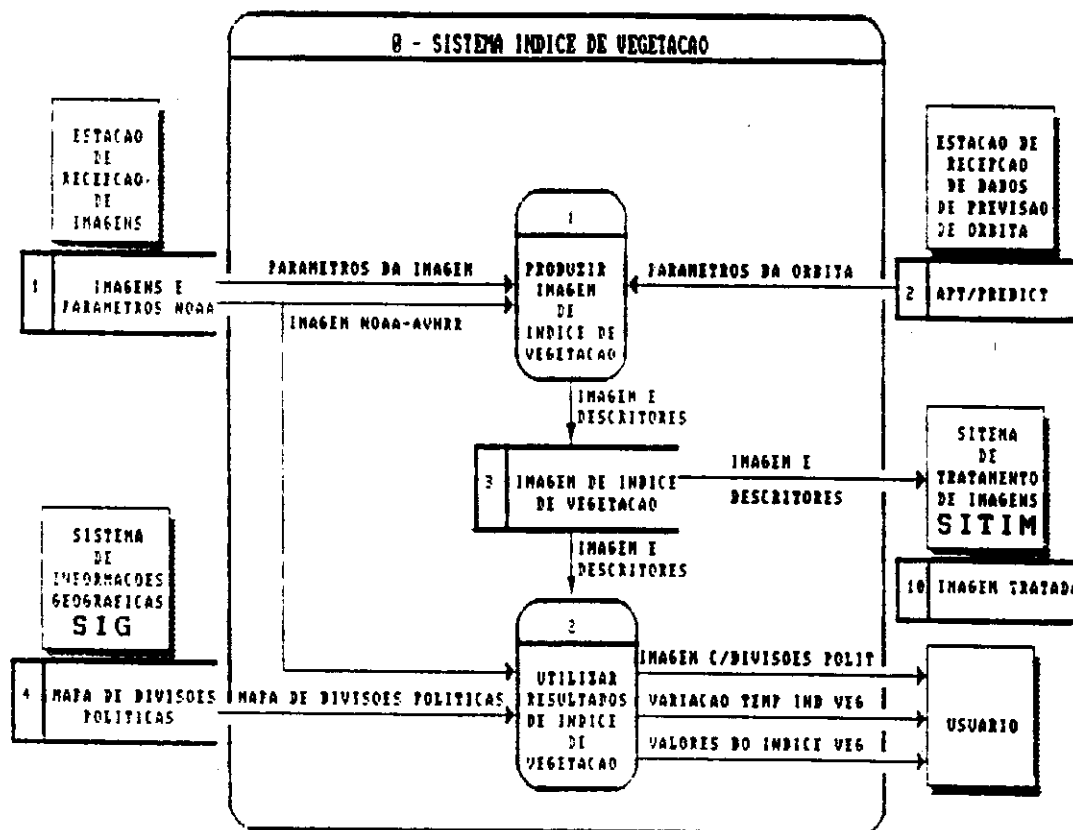


Fig. 3.1 - DFD do sistema de índice de vegetação.

Como entradas deste processo constam:

- imagens NOAA/AVHRR bandas 1 e 2; e
- parâmetros orbitais e de imageamento NOAA:
 - . horário inicial de gravação,
 - . horário do cruzamento pelo equador.
 - . longitude de cruzamento pelo equador,
 - . sentido da órbita,
 - . inclinação da órbita.
 - . período orbital,
 - . raio da órbita.

Estes parâmetros são obtidos nos boletins "APT/predict", recebidos diariamente, exceto o primeiro, que tem origem nos procedimentos de recepção da imagem.

Como resultado principal deste módulo do sistema, consta portanto a produção das imagens IVDN com 1020 x 1024, 256 níveis de cinza e uma resolução espacial de 5 km ao longo do equador. A região geográfica coberta por esta imagem compreende a parcela da América do Sul entre os paralelos 0 e 45 graus sul, e 32 a 77 graus oeste (Figura 3.2.).

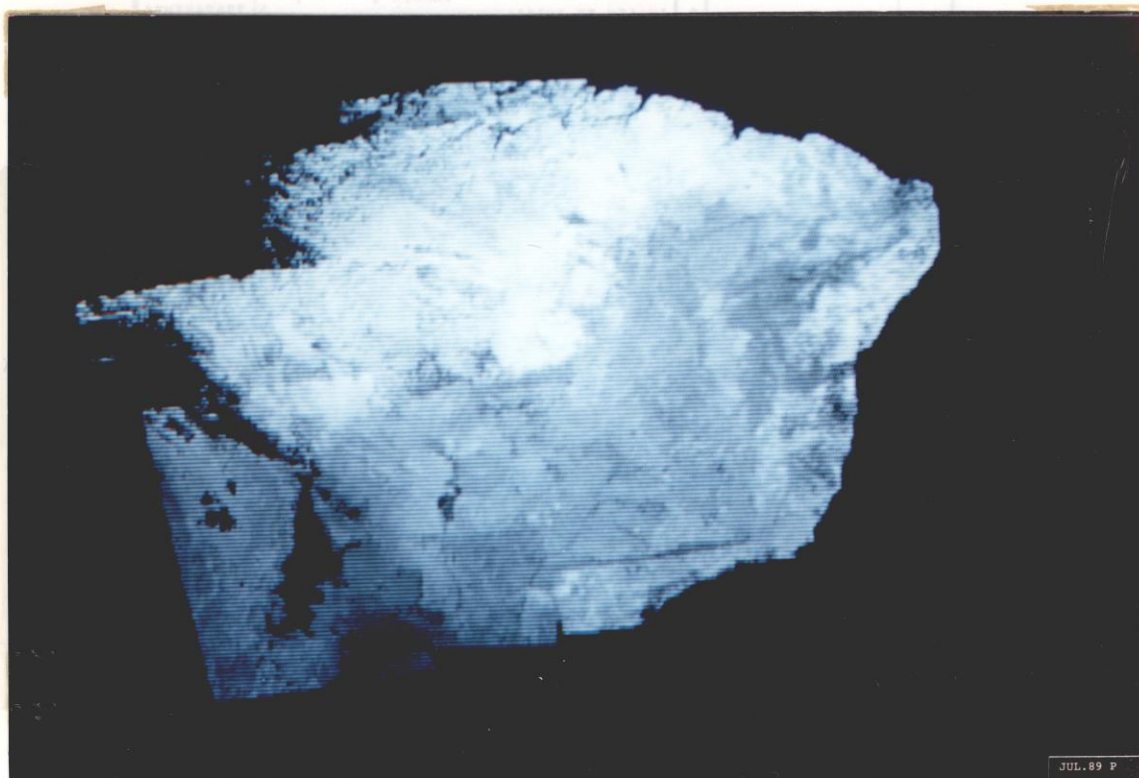


Fig. 3.2 - Imagem de índice de vegetação.

Os processos relacionados com este primeiro módulo são realizados de forma sequencial pelo cumprimento das funções descritas a seguir.

a) Carga da imagem NOAA/AVHRR

A imagem NOAA/AVHRR, bandas 1 e 2, contida na fita CCT é carregada para disco juntamente com os parâmetros orbitais e do imageamento. Nesta transferência é realizada conversão dos valores digitais dos níveis de cinza de 10 para 8 bits. Do disco a imagem é transferida para a Unidade de Visualização de Imagens (UVI), onde é realizado o processamento.

b) Ajuste de parâmetros

Trata-se de processo semi-automático onde os parâmetros orbitais e de imageamento são submetidos a ajustes, com base em pontos de controle conhecidos na imagem NOAA/AVHRR.

c) Seleção de setor da imagem NOAA/AVHRR

A partir da imagem armazenada no UVI, são selecionados visualmente, por meio do cursor sobre a tela, setores da imagem NOAA/AVHRR, preferencialmente sem cobertura de nuvens. Esta seleção visa otimizar o processamento, evitando processos para regiões inaproveitáveis da imagem (Fig. 3.3). A extensão destes setores é limitada. Esta limitação decorre da necessidade de retenção de uma matriz de pontos navegados em memória para posterior interpolação. A extensão desta região é controlada automaticamente pelo programa.

d) Navegação

O termo navegação é definido neste trabalho como o processo de transformação matemática entre os sistemas de referência do satélite (linha, "pixel") e o de coordenadas terrestres (latitude, longitude).

Esta função visa, portanto, a obtenção da correspondência espectral entre os "pixels" das imagens de entrada (NOAA/AVHRR) e os

da imagem de saída (IVDN), a fim de que esta, gerada a partir de várias imagens NOAA/AVHRR, seja corrigida geometricamente aos níveis de precisão pertinentes ao trabalho.

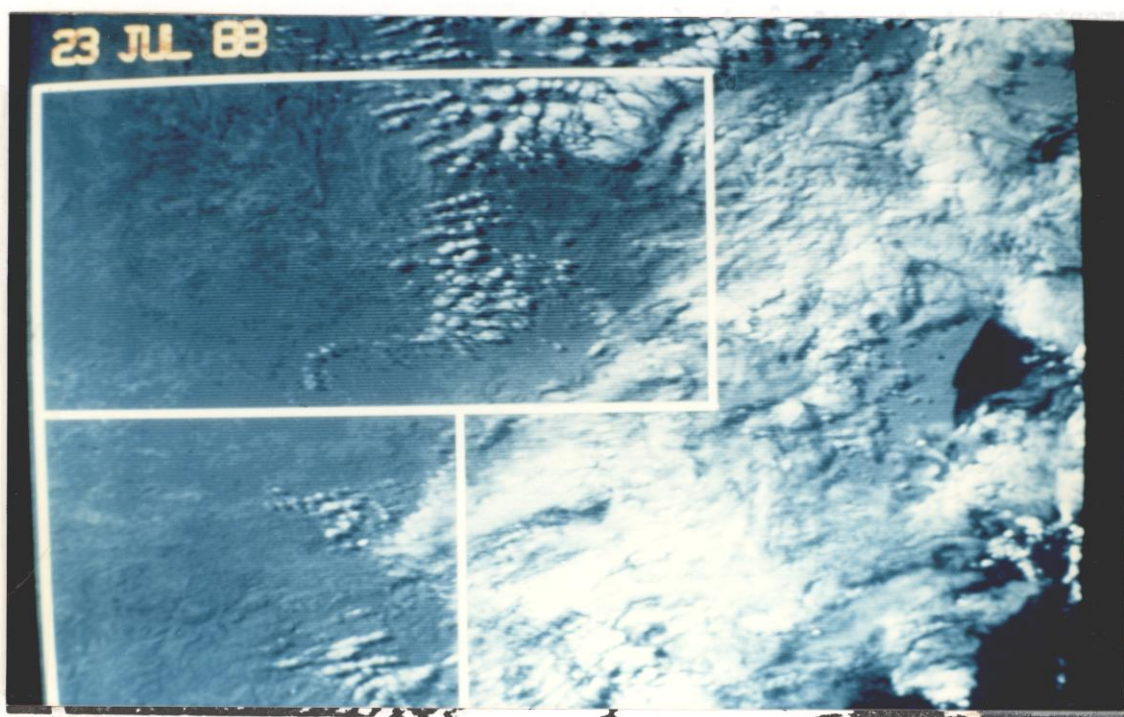


Fig. 3.3 - Imagem NOAA/AVHRR com delimitação de setores.

No Apêndice A é apresentado um resumo da formulação matemática do modelo de navegação utilizado. Além deste, outros modelos foram estudados: Brooks (1977); Brunel (1987); Moura (1975), Santana et al. (1974); Tozawa (1983), Brush (1985). Este último foi implementado, contudo não se obtiveram a precisão e os resultados necessários. É oportuno lembrar que dados de relevo, de atitude do satélite e outros fatores considerados de efeitos secundários para os propósitos do trabalho não estão presentes no processo de navegação utilizada.

e) Geração de imagens-mosaico IVDN

Este processo é realizado em duas etapas (Fig. 3.4). Na primeira (caso direto) são determinadas as coordenadas geográficas cor-

respondentes aos quatro vértices do setor selecionado sobre a imagem de entrada NOAA/AVHRR. A partir destas coordenadas é definido o retângulo a ser preenchido na imagem de saída do IVDN. Na segunda (caso inverso), este retângulo da imagem de saída é atualizado de modo seqüencial pelas linhas e colunas. A cada 16 "pixels" IVDN a navegação é realizada obtendo os "pixels" AVHRR para a geração do correspondente "pixel" de índice de vegetação. A determinação dos "pixels" AVHRR destinados ao cálculo dos demais "pixels" IVDN é realizada por interpolação bilinear (Banon, 1988), o que propicia ganho substancial de tempo de processamento. Observações visuais das imagens IVDN não indicaram qualquer anomalia ou deformação que justificasse, dentro dos propósitos deste trabalho, uma investigação quantitativa do processo de interpolação utilizado, sugerindo-se para o futuro análise mais detalhada neste sentido. Não se utilizou apenas a transformação direta (imagem de entrada para a de saída) pelo fato de que as grandes distorções da imagem NOAA/AVHRR (Fig. 3.5) não oferecem garantia de um preenchimento uniforme da imagem IVDN, podendo ocorrer "buracos" nela.

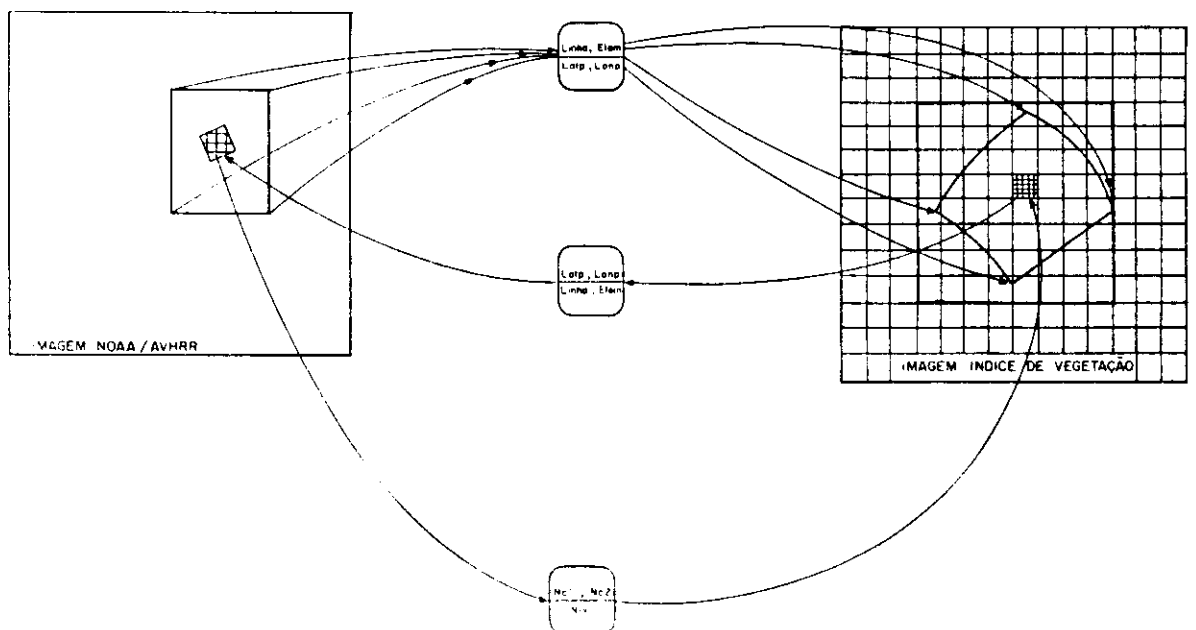


Fig. 3.4 - Geração de mosaicos de índice de vegetação.

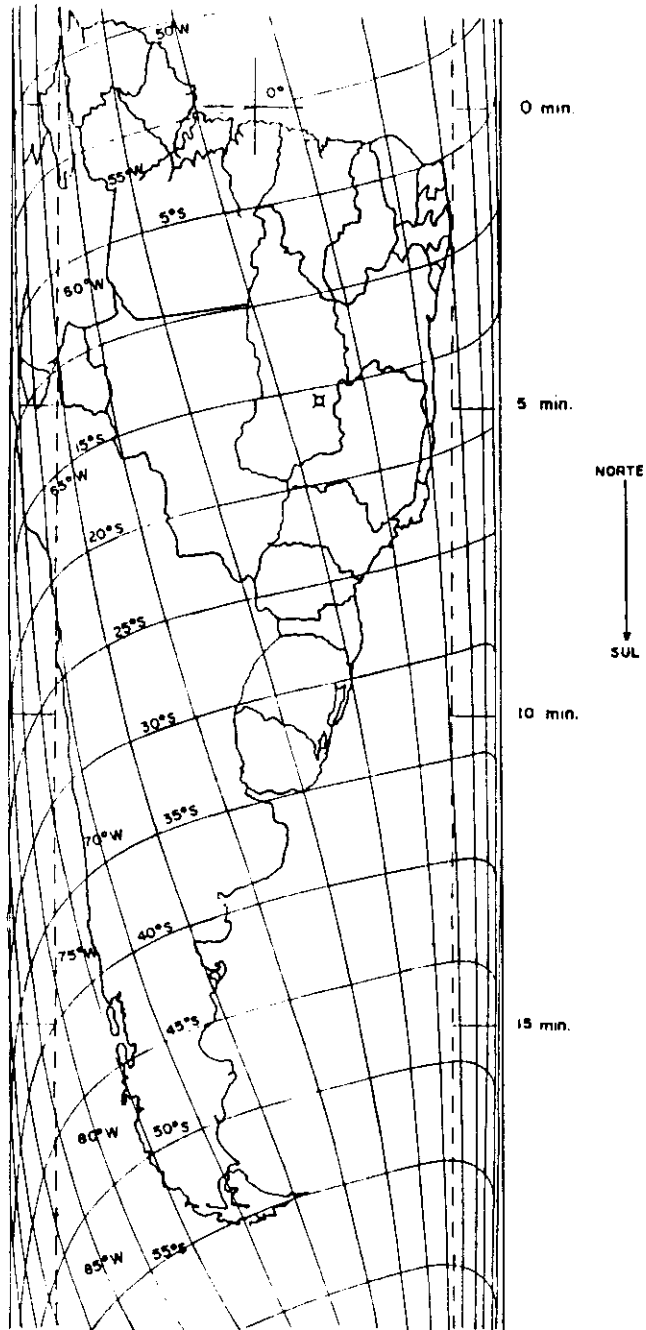


Fig. 3.5 - Distorções da imagem NOAA/AVHRR.
FONTE: Elias et al. (1977).

f) Composição do "pixel" IVDN

Outro problema é a não-uniformidade da dimensão dos "pixels" AVHRR, associada à larga faixa imageada sobre a superfície curva da Terra (Fig. 3.6), que varia, principalmente, na direção de varredura, de 1,1 km no centro da imagem a de aproximadamente 6 km nas bordas. Para sua solução, a região compreendida por cada "pixel" da imagem IVDN é fracionada em uma matriz de 5 x 5 elementos de 1 km², realizando a navegação para os 4 vértices e interpolando, pelo processo de interpolação bilinear, os demais pontos desta matriz. Deste modo, é determinado automaticamente o conjunto de "pixels" AVHRR para a composição de cada "pixel" IVDN. Por exemplo, para um "pixel" da imagem IVDN obtido de uma região central da imagem NOAA/AVHRR, utilizam-se cerca de 25 "pixels" desta imagem. Já na borda da imagem NOAA/AVHRR, uma quantidade bem menor de "pixels" desta imagem seria suficiente, pois nesta região eles são maiores.

No processo de interpolação, os valores não-inteiros determinados para os pontos da matriz acima citada são aproximados para o inteiro mais próximo, pois os números de linhas e colunas de imagens digitais são valores inteiros.

É importante observar que a cada 16 "pixels" IVDN, quatro (e não um) "pixels" AVHRR são navegados. Estes quatro "pixels" correspondem aos vértices da região compreendida por cada "pixel" IVDN.

g) Localização do "pixel" IVDN

Foi escolhido o sistema de projeção cilíndrica equidistante na geração da imagem IVDN, tendo em vista não apenas as facilidades de cálculo que este sistema propicia, mas principalmente sua compatibilidade com trabalhos de índices de vegetação e estudos climáticos que, conforme literatura, utilizam mais amplamente este sistema.

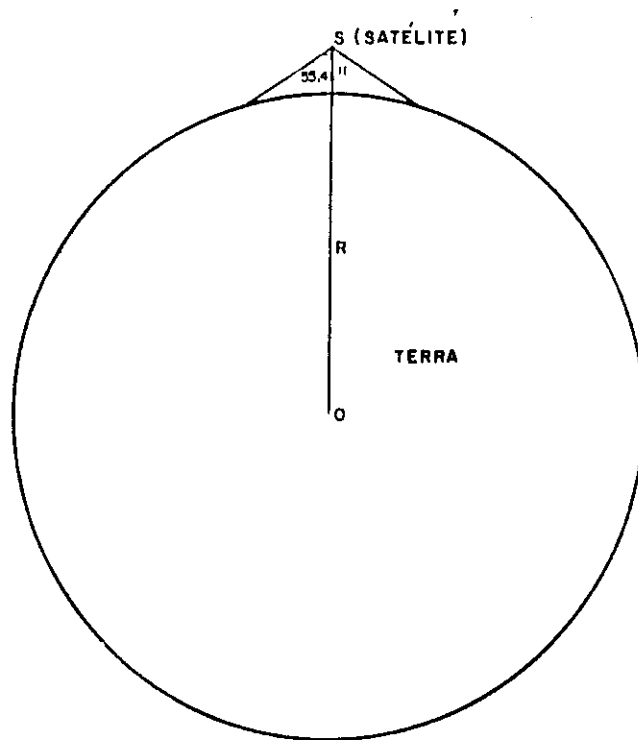


Fig. 3.6 - Proporção da faixa de imageamento NOAA/AVHRR sobre a superfície terrestre.

A imagem IVDN cobre uma região fixa, com limites geográficos e resolução espacial preestabelecidos. Deste modo, os números de linha (N_{li}) e coluna (N_{ci}) do "pixel" IVDN podem ser obtidos por:

$$N_{li} = (L_{ao} - L_{atp}) / (5/R), \quad (3.1)$$

$$N_{ci} = (L_{oo} - L_{onp}) / (5/R), \quad (3.2)$$

onde L_{ao} e L_{oo} são, respectivamente, a latitude e a longitude na origem (canto superior esquerdo, quando visualizada na tela) da imagem digital completa de índice de vegetação; L_{atp} e L_{onp} são, respectivamente, a latitude e a longitude de um "pixel" de índice de vegetação; o termo $(5/R)$ é a dimensão do "pixel" IVDN em radianos, pois tem resolução espacial de 5 km, sendo R o raio terrestre médio em km.

h) Processamento do índice de vegetação

Nesta função é obtido o valor digital para o "pixel" IVDN, atualizando-o na imagem de saída. O processo é realizado conforme passos a seguir:

I) Seleção dos "pixels" AVHRR sem cobertura de nuvens

Uma vez determinados os números das linhas e das colunas dos "pixels" AVHRR que compõem 1 "pixel" IVDN, eles são acessados nas bandas 1 e 2, e desprezam-se aqueles cujos valores sejam superiores ao limite do nível de cinza para nuvens (50) adotado neste trabalho. Este valor foi determinado a partir de imagens NOAA/AVHRR, em cujas bandas se constatou que "pixels" sem nuvem nunca têm valor superior a 40 e que "pixels" com nuvem dificilmente têm valor inferior a 50.

II) Cálculo do IVDN

O IVDN foi calculado, conforme equação abaixo, a partir dos níveis de cinza do conjunto de "pixels" AVHRR que o compõem, isto é:

$$\text{IVDN} = (M2 - M1)/(M2 + M1), \quad (3.3)$$

onde M1 e M2 são, respectivamente, as médias dos níveis de cinza dos 25 elementos das bandas 1 e 2 que dão origem a cada "pixel" IVDN.

A avaliação do método do cálculo do IVDN não constitui objeto do presente trabalho. A utilização da média dos níveis de cinza possibilita a identificação de feições de maior porte e com alto contraste, como no caso dos maiores rios e represas. Esta característica da imagem IVDN, além de certas vantagens para interpretação, facilita verificação da sobreposição do mapa de divisões políticas a esta imagem.

A título de esclarecimento adicional, é oportuno observar que neste conjunto de 25 elementos pode haver "pixels" AVHRR repetidos. O importante é que eles cobrem, embora de modo aproximado, os 25 km² do "pixel" IVDN.

III) Cálculo do nível de cinza para o "pixel" IVDN

Algebricamente o valor deste índice de vegetação pode variar na faixa de -1 a 1; no entanto, o que se verifica na prática é uma variação menor (Tucker, 1977). Para melhor codificação digital do valor do índice de vegetação, a ser gravado em 8 bits, na imagem de saída, este valor é distribuído em níveis de cinza na faixa de 0 a 255; logo:

$$\text{Niv} = (\text{IVDN} - \text{Imin}) / (\text{Imax} - \text{Imin}) * 255, \quad (3.4)$$

onde Imin e Imax são, respectivamente, os valores limites inferior e superior do índice de vegetação. Estes valores podem ser facilmente modificados nos programas computacionais, sendo recomendável adotar padrão compatível com estudos já realizados. Não é objeto do presente trabalho verificar diferenças dos índices de vegetação quando imagens de diferentes satélites são utilizadas; no entanto, existem possibilidades de que tais diferenças ocorram. Para o valor do nível de cinza (Niv), aceita-se apenas a parte inteira da expressão acima.

IV) Atualização do "pixel" IVDN

Como a imagem IVDN é atualizada por várias imagens NOAA/AVHRR, um mesmo "pixel" IVDN pode receber atualização por mais de uma vez; neste caso, utiliza-se o maior valor do índice de vegetação. Este processo obtém um valor mais realista para o IVDN (Holben, 1986).

3.1.2 - UTILIZAÇÃO DE RESULTADOS DE ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Os objetivos pertinentes a este segundo módulo do sistema são:

- gerar gráficos da variação temporal do índice de vegetação;
- emitir listagens de valores de índice de vegetação;
- compor imagem IVDN com mapa de fronteiras políticas e grade de referência geográfica.

Como entradas deste módulo utilizam-se:

- imagens NOAA/AVHRR;
- imagens IVDN;
- mapa de fronteiras políticas da América do Sul;
- parâmetros orbitais NOAA.

Os resultados principais deste módulo são:

- gráficos da variação temporal do índice de vegetação, que enfatizam a possibilidade de ter acesso a localidades geograficamente conhecidas sobre as imagens originais NOAA/AVHRR;
- listagens de valores de IVDN;
- imagens de índice de vegetação com o mapa de fronteiras políticas e grade de referências geográficas no terminal de visualização de imagens.

As funções que compõem este módulo são descritas a seguir.

a) Carga das imagens de trabalho

As imagens de interesse são carregadas da fita para o disco por meio de funções específicas integrantes do sistema SITIM.

b) Geração de gráficos da variação temporal do IVDN

A partir de uma seqüência de imagens NOAA/AVHRR correspondentes ao período de interesse, são produzidos gráficos IVDN x tempo para localidades determinadas pelo usuário, conforme passos a seguir.

1) **Obtenção do índice de vegetação para localidades de interesse**

Este processo é realizado por meio de função específica que calcula, a partir de imagens NOAA/AVHRR, o valor do índice de vegetação em pontos escolhidos, bem como a média deste valor para uma célula em torno de cada ponto. A dimensão desta célula é determinada por uma matriz de "pixels" AVHRR, que podem variar de 1 x 1 a 5 x 5.

As localidades podem ser determinadas de dois modos: a) por meio do cursor diretamente sobre a imagem NOAA/AVHRR na tela (Figura 3.7), caso em que o programa fornece, além do índice de vegetação, as coordenadas geográficas do ponto assinalado; b) fornecendo a latitude e a longitude da localidade, caso em que o programa assinala sobre a imagem o ponto de interesse.

O índice de vegetação é obtido para todas as imagens NOAA/AVHRR do período de interesse, formando-se então uma série de dados temporais. Como tais dados montam-se arquivos por localidade a serem utilizados na função de geração dos gráficos. Estes dados são apresentados em listagem ou via terminal; pode-se, mediante fácil adaptação em programa, gerar arquivo digital com eles.

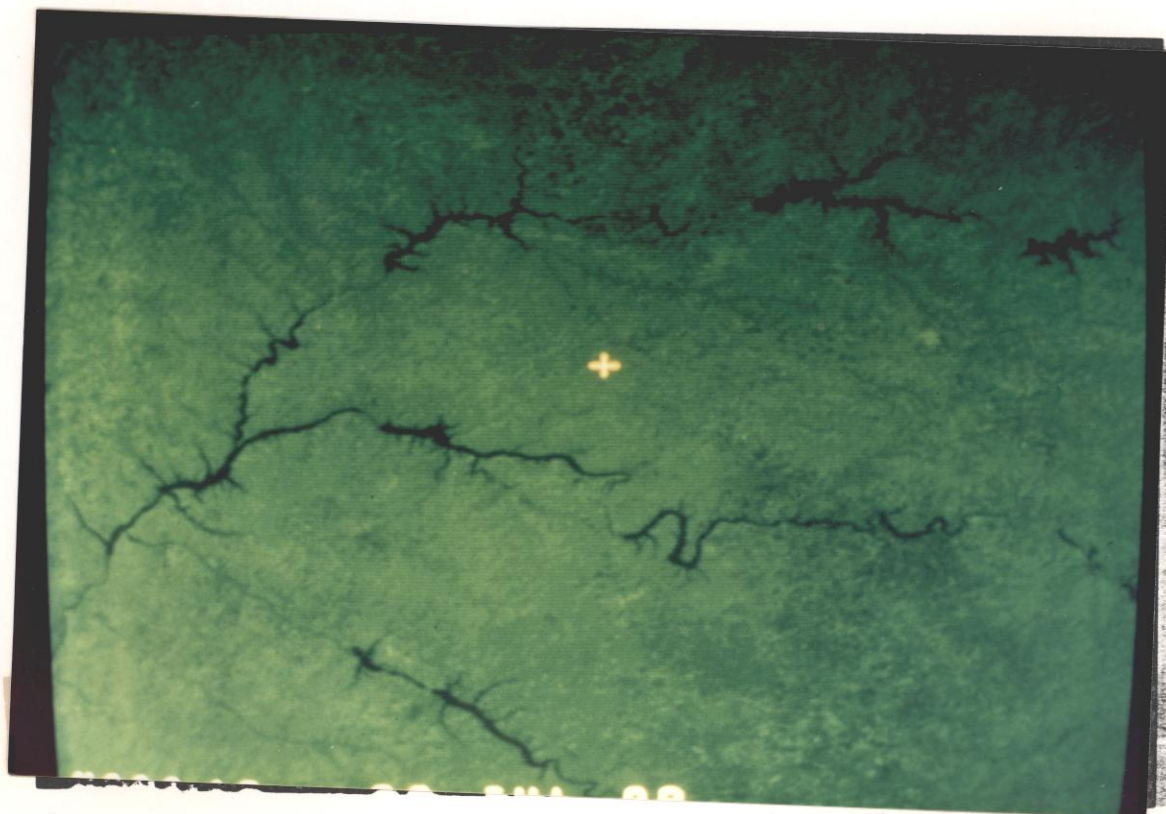


Fig. 3.7 - Imagem NOAA/AVHRR com marca de localidade.

II) Plotagem IVDN x tempo

A partir do conjunto de pares de valores (IVDN, data), traça-se o gráfico da variação temporal do IVDN para cada localidade. As curvas podem ser traçadas em um único sistema de eixos cartesianos, neste caso diferenciadas por cores, sendo também impressa legenda de identificação das localidades, com opções de saída em vídeo e "plotter". A Fig. 3.8 exemplifica uma distribuição espacial das localidades e respectivas curvas de variação temporal.

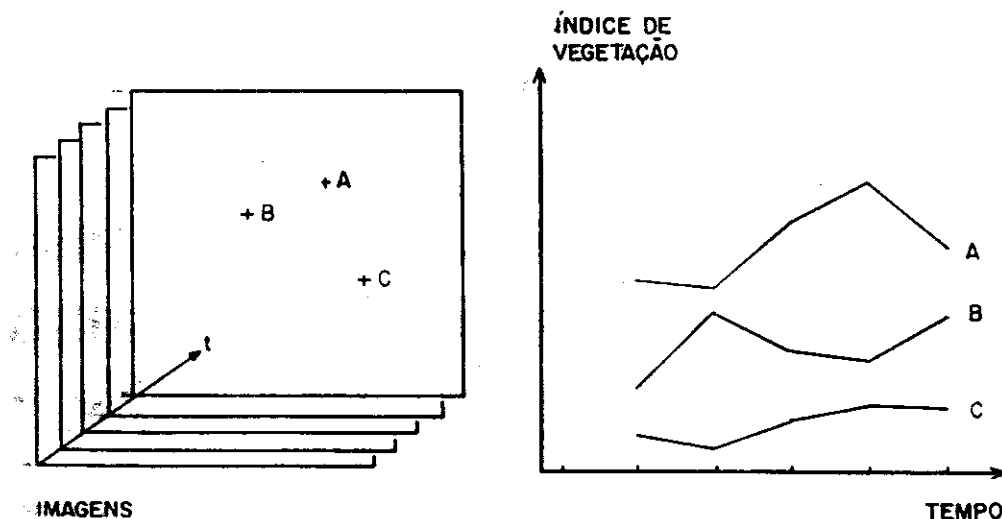


Fig. 3.8 - Variação temporal do índice de vegetação.

c) Emissão da listagem de índice de vegetação

É emitida listagem dos valores de índice de vegetação (Fig. 3.9) para regiões delimitadas por meio do cursor sobre a imagem IVDN na tela.

d) Composição da imagem IVDN com mapa de fronteiras

Nesta função a imagem IVDN é sobreposta pelo mapa de fronteiras políticas da América do Sul, uma vez que ambos são gerados no mesmo sistema de projeção (Fig. 3.10). O mapa digitalizado disponível compreende todo o continente; porém, esta função utiliza apenas a região preestabelecida para a qual a imagem é gerada. Este processo é realizado na UVI, com a imagem carregada no canal 0 e o mapa sendo traçado no canal gráfico.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6
33	+0.46	+0.40	+0.39	+0.52	+0.06	-0.16	+0.47	+0.54	+0.47	33							
34	+0.48	+0.45	+0.25	+0.52	+0.39	+0.29	+0.41	+0.42	+0.36	34							
35	+0.45	+0.51	+0.50	+0.40	+0.42	+0.47	+0.43	+0.26	35								
36	+0.40	+0.46	+0.50	-0.04	+0.08	+0.42	+0.41	+0.50	+0.21	36							
37	+0.50	+0.45	+0.42	+0.20	+0.45	+0.33	+0.50	+0.46	+0.31	37							
38	+0.45	+0.45	+0.46	+0.16	+0.30	+0.50	+0.45	+0.40	+0.48	38							
39	+0.46	+0.45	+0.36	+0.43	+0.55	+0.47	+0.43	+0.50	+0.48	39							
40	+0.52	+0.33	+0.51	+0.40	+0.54	+0.50	+0.54	+0.48	+0.54	40							
41	+0.56	+0.35	+0.51	+0.52	+0.51	+0.56	+0.57	+0.54	+0.54	41							
42	+0.42	+0.54	+0.50	+0.40	+0.52	+0.54	+0.50	+0.52	+0.60	42							
43	+0.50	+0.55	+0.43	+0.47	+0.46	+0.40	+0.52	+0.52	+0.43	43							

Fig. 3.9 - Listagem de IVDN.

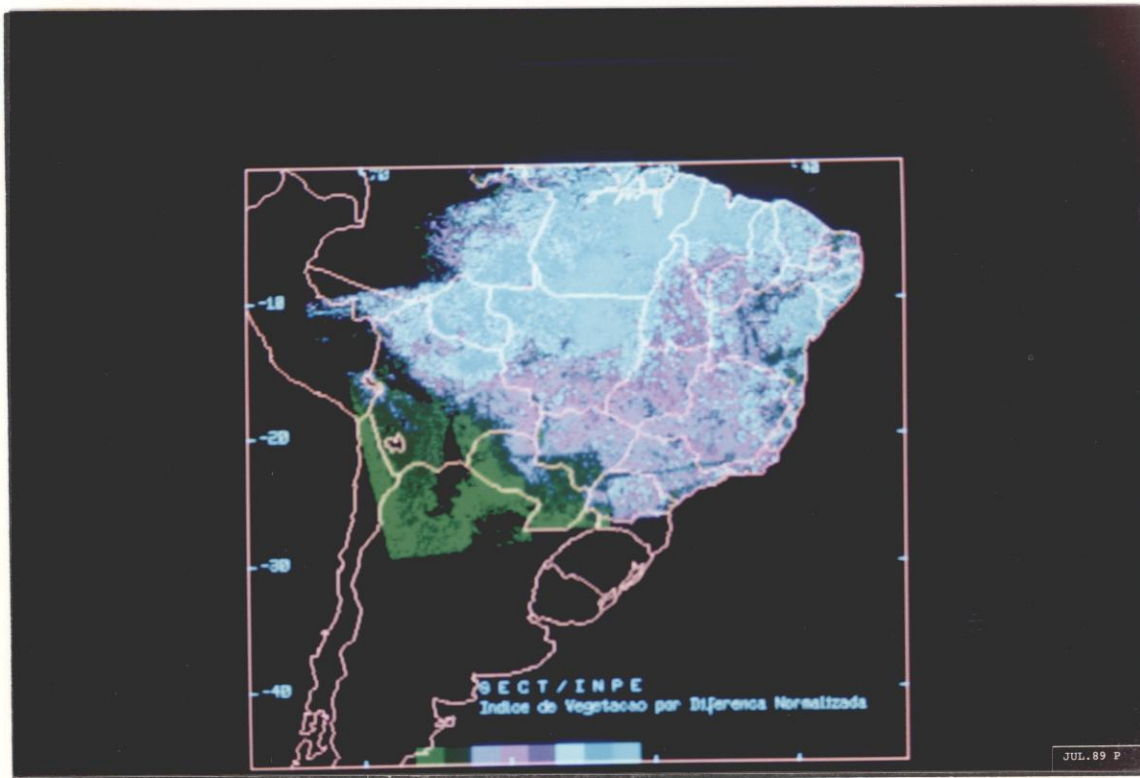


Fig. 3.10 - Imagem IVDN geo-referenciada.

3.2 - SISTEMAS AUXILIARES

São utilizadas funções de dois sistemas desenvolvidos pelo DPI/INPE.

3.2:1 - SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Por meio deste sistema digitalizou-se o mapa de fronteiras políticas, via mesa digitalizadora, criando arquivo em estrutura vetorial dos arcos e polígonos que compõem este mapa (Fig. 3.11). As instruções de utilização deste sistema constam no manual do usuário do SIG (INPE.DPI, 1988a).

3.2.2 - SISTEMA DE TRATAMENTO DE IMAGENS (SITIM)

Na operação do sistema são utilizadas algumas funções do SITIM-150, como as de transferência de imagens entre fita magnética, disco e memória de imagens. As instruções de utilização deste sistema constam no manual do usuário do SITIM (INPE.DPI, 1986).

No desenvolvimento utilizou-se o software básico para programas do sistema SITIM. Este software básico foi desenvolvido pelo departamento de processamento de imagens do INPE e descrito no manual de sub-rotinas do SITIM-150 (INPE.DPI, 1988b). Cabe lembrar que, neste sistema de índice de vegetação, utilizou-se a linguagem de programação "C" pela conveniente compatibilidade junto aos sistemas já existentes no SITIM-150.

3.3 - IMAGENS NOAA/AVHRR UTILIZADAS

Foram utilizadas neste trabalho quinze imagens do satélite NOAA-9, gravadas pela estação receptora do INPE em Cachoeira Paulista - SP no mês de julho de 1988, principalmente na segunda quinzena. Neste período as imagens foram de boa qualidade, com baixo percentual de cobertura de nuvens, pouca ocorrência de fumaça provenientes de queimadas. Não se solicitou gravação de imagens NOAA/AVHRR especialmente para uso neste trabalho. As imagens utilizadas foram selecionadas a partir de um conjunto de imagens gravadas com a finalidade de detecção de queimadas, onde as áreas de interesse estão principalmente no centro e norte do País, o que impossibilitou atualização da imagem IVDN em estados do sul e em alguns países como Uruguai, Paraguai, Argentina e Chile. As imagens utilizadas encontram-se em fitas magnéticas no Centro de Satélites Ambientais do INPE, São José dos Campos - SP.

3.4 - SISTEMA DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA

Procurou-se adotar um sistema de projeção mais comumente utilizado em trabalhos desta natureza e conveniente ao processo de

geração das imagens IVDN. Possivelmente o mais simples sistema de projeção seja o da projeção cilíndrica equidistante, também conhecida como "projeção cartesiana" (Fig. 3.11). Neste sistema, o globo terrestre é inserido e projetado ortogonalmente em um cilindro onde apenas a linha do equador o tangencia. Este paralelo é considerado padrão. Isto significa que o equador é a única latitude apresentada em escala real e sem distorção. Os meridianos e paralelos são equidistantes, o que gera uma grade de quadrados sobre o mapa (Miller e Reddy, 1987).



Fig. 3.11 - Mapa de fronteiras políticas da América do Sul no sistema de projeção cilíndrica equidistante.

(Digitalizado no SIG/DPI).

A projeção cilíndrica equidistante tem as seguintes características:

- a) não preserva forma nem áreas;

- b) os pólos são representados por linhas retas;
- c) os paralelos e meridianos são linhas retas eqüidistantes que se interceptam em ângulo reto;
- d) simplifica os cálculos de conversão de coordenadas geográficas (latitude, longitude) para coordenadas planas (x, y):

$$X = R * longitude,$$

$$Y = R * latitude,$$

onde R é o raio terrestre, e as coordenadas geográficas são em radianos.

Cabe lembrar que este sistema de projeção tem sido utilizado em grande parte dos trabalhos com dados NOAA/AVHRR realizados em outros países, o que poderá facilitar a intercomparação de resultados. Inúmeros produtos na área de Meteorologia, que podem ser integrados com dados de índice de vegetação, também são produzidos neste sistema de projeção, o que facilitará seu eventual uso no futuro. Lembra-se ainda que a dimensão dos "pixels" IVDN só é mantida no equador.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - IMAGEM IVDN

Obteve-se uma imagem de índice de vegetação por diferença normalizada, gerada por processamentos sucessivos de quinze imagens NOAA/AVHRR nas bandas 1 e 2, pelo método de composição de imagem de máximo valor do IVDN. Nos casos de sobreposição de imagens, prevalece o maior valor do índice de vegetação. A imagem foi produzida com resolução espacial de 5 km, que cobre significativa parcela da área inicialmente prevista, entre os paralelos 0 e 45 graus sul, e 32 e 77 graus oeste (Fig. 4.1).



Fig. 4.1 - Imagem IVDN.

Uma análise visual da imagem IVDN sugere seu potencial de informações. Pela escala de níveis de cinza, onde as regiões mais claras caracterizam maior valor do índice de vegetação, constata-se a exuberância da vegetação natural da Região Amazônica, notadamente nas bacias dos rios Xingu, Tapajós e baixo Tocantins no Estado do Pará. Identificam-se também características globais da cobertura vegetal de outras partes do País. Observam-se, por exemplo, menores valores do índice de vegetação nas regiões predominantemente do tipo cerrado, bem como de intensa atividade agrícola, não irrigada, principalmente nas Regiões Centro-Oeste e Sudeste, onde, no mês de julho, as colheitas já foram concluídas. Como se observa, esta imagem parece possibilitar mapeamentos regionais da cobertura vegetal. Considerando a resolução espacial de 5 km, a identificação de feições geográficas é propiciada com significativo nível de detalhe. São visualizados, por exemplo, os corpos d'água de maior porte identificáveis na imagem pela tonalidade escura caracterizada pelo baixo valor do índice de vegetação da água. Entre eles observam-se os maiores rios e represas, tais como os rios Paranaíba, Grande, Paraná, Xingu, Tapajós e Amazonas, e as represas de Tucuruí, Itaipu, Três Marias. Observa-se ainda a área alagada na região do pantanal.

Uma característica de certo valor desta imagem é a incidência quase total da cobertura de nuvens, até mesmo em regiões predominantemente nubladas. No caso do litoral nordeste, onde se verificou intensa nebulosidade nas imagens AVHRR, utilizaram-se imagens de 5 ou 6 passagens no processo de redução dos efeitos da cobertura de nuvens.

Ressalta-se ainda a natureza sintética da imagem IVDN. A título de ilustração, a uma resolução espacial de 5 km, podem-se armazenar em um único disquete (360 mil bytes) imagens de praticamente todo o território nacional.

Embora a imagem IVDN produzida corresponda a um período de aproximadamente 15 dias, imagens IVDN regionais podem ser geradas com menor quantidade de imagens NOAA/AVHRR, portanto, para períodos menores,

principalmente para regiões onde a cobertura de nuvens seja menos frequente.

Apesar do potencial de informações deste resultado, sua real contribuição para aplicações, como no caso da Agricultura, necessita ainda ser avaliada na prática.

4.2 - PROGRAMAS DE NAVEGAÇÃO PARA IMAGENS NOAA/AVHRR

Certamente, entre os melhores resultados obtidos neste trabalho estão os programas de navegação. Espera-se que tais programas possibilitem melhor exploração do potencial das imagens NOAA, até então consideradas de pouca viabilidade de uso no País pelo seu alto grau de distorção geométrica. Estas distorções têm impossibilitado combinar espacialmente imagens de passagens distintas, bem como identificar localidades de interesse em tais imagens.

No presente trabalho, tais programas foram utilizados no processo de geração de imagens de índice de vegetação corrigidas geometricamente; no cálculo do índice de vegetação para localidades de interesse; na obtenção de latitude e longitude de pontos assinalados sobre as imagens NOAA/AVHRR e reciprocamente. Foram também desenvolvidos para microcomputador, em linguagens "C", em conformidade com algoritmos apresentados no Apêndice A.

A imagem IVDN foi também utilizada na avaliação dos algoritmos e programas de navegação. Nos testes visuais considerou-se a precisão na sobreposição de feições geográficas, tais como rios, lagos e região costeira entre si e com o mapa de divisões políticas. Os resultados em termos de precisão geométrica não indicaram de maneira geral erro que pudesse ser detectado visualmente. Outro teste para o processo de navegação foi realizado através do programa operacional do Centro de Satélites Ambientais do INPE para monitoramento de queimada no País, com imagens AVHRR. A verificação em campo das coordenadas geográficas de centenas de focos de queimadas constatou precisão da ordem de um "dixei" AVHRR (Setzer e Pereira, 1989).

4.3 - VARIACÃO TEMPORAL DO IVDN

Um dos principais benefícios na utilização dos dados NOAA/AVHRR reside na alta frequência em que são obtidos, o que possibilita o acompanhamento de fenômenos de alta mutação temporal verificados na superfície terrestre, como no caso de alterações da vegetação, principalmente culturas.

Os gráficos de variação temporal do índice de vegetação para localidades de interesse constituem instrumento de fácil interpretação, registrando variações periódicas do estado fenológico da vegetação em pontos escolhidos a critério de usuários (Fig. 4.2).

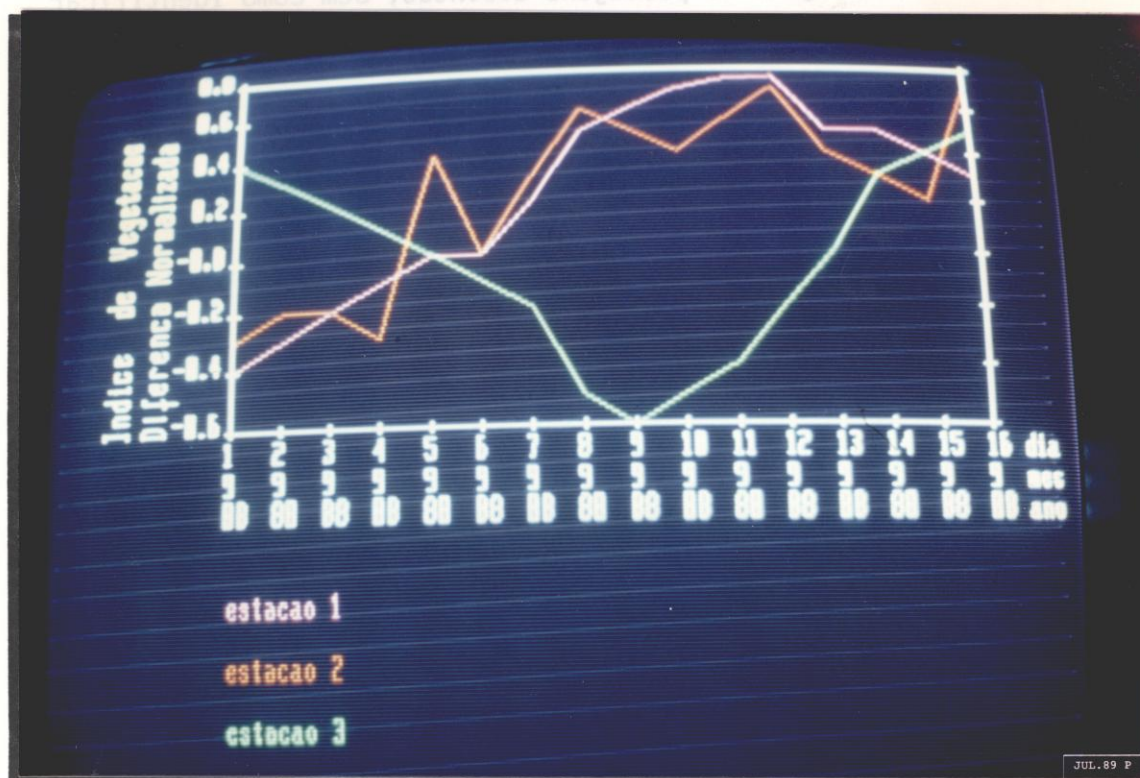


Fig. 4.2 - Variação temporal do IVDN (dados simulados).

4.4 - VALORES DO IVDN

Listagens de valores de índice de vegetação podem ser emitidas para regiões de interesse a partir de imagens IVDN, que mostram numericamente a distribuição espacial deste índice. Podem eventualmente auxiliar no mapeamento da cobertura vegetal, possibilitando discriminar feições às vezes não-identificáveis visualmente sobre a imagem (Fig. 3.9).

4.5 - SOBREPOSIÇÃO DE FRONTEIRAS POLÍTICAS À IMAGEM IVDN

As imagens IVDN são sobrepostas pelo mapa de divisões políticas da América do Sul no sistema de projeção cilíndrica equidistante, uma vez que a imagem é gerada neste mesmo sistema de projeção. A precisão deste processo demonstrou-se bastante satisfatória, ocorrendo sobreposição nas feições no interior do País, tais como rios nas divisas de estados, bem como nos litorais sul e nordeste. Observaram-se algumas imperfeições no litoral norte, entre Fortaleza e Ilha do Marajó, onde há possibilidade de imprecisão do mapa nesta região de contorno irregular (Figs. 4.3, 4.4 e 4.5).

4.6 - ALCANCE DAS IMAGENS NOAA/AVHRR

As imagens NOAA/AVHRR disponíveis não cobriram inteiramente a região compreendida entre os paralelos 0 a 45 graus sul e 32 a 77 graus oeste, o que em parte decorreu da limitação do alcance de rastreamento do satélite a partir da estação receptora em Cachoeira Paulista - SP. Por este motivo, regiões como o extremo noroeste do país não foram cobertas com a imagem IVDN, conforme previsto inicialmente (Fig. 4.6).

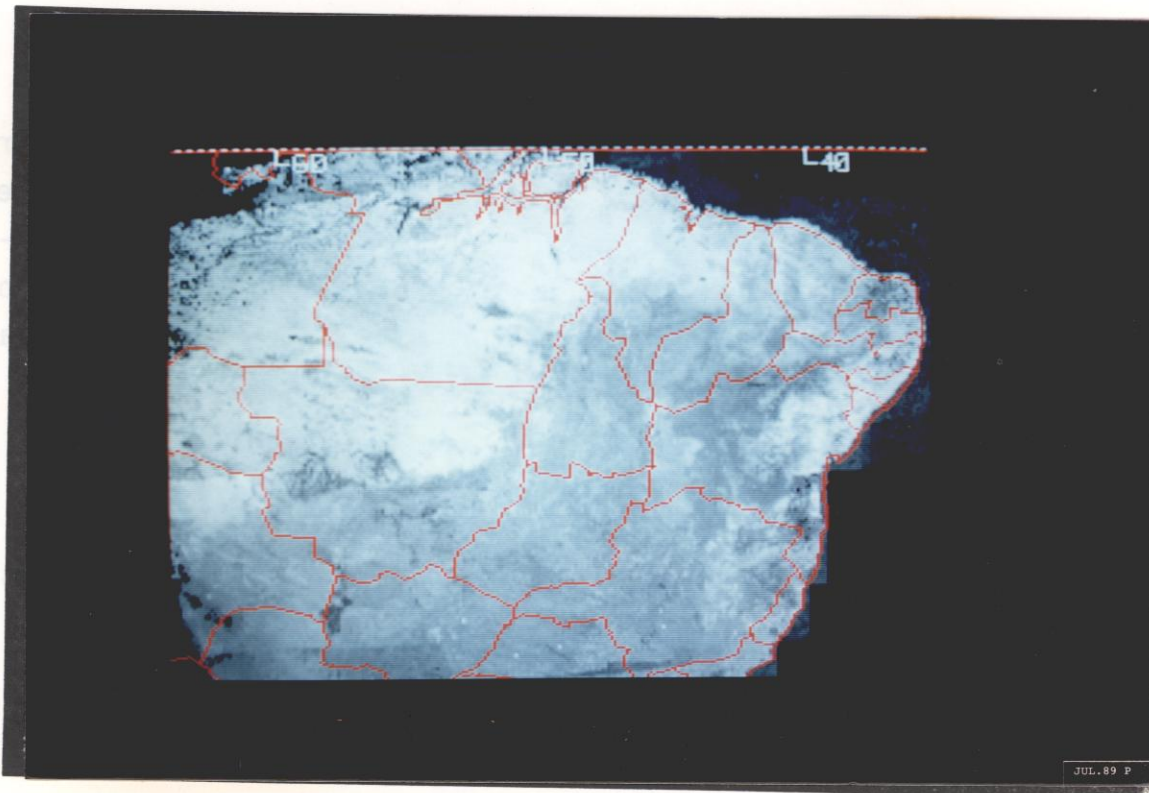


Fig. 4.3 - Sobreposição de divisões políticas e feições geográficas.

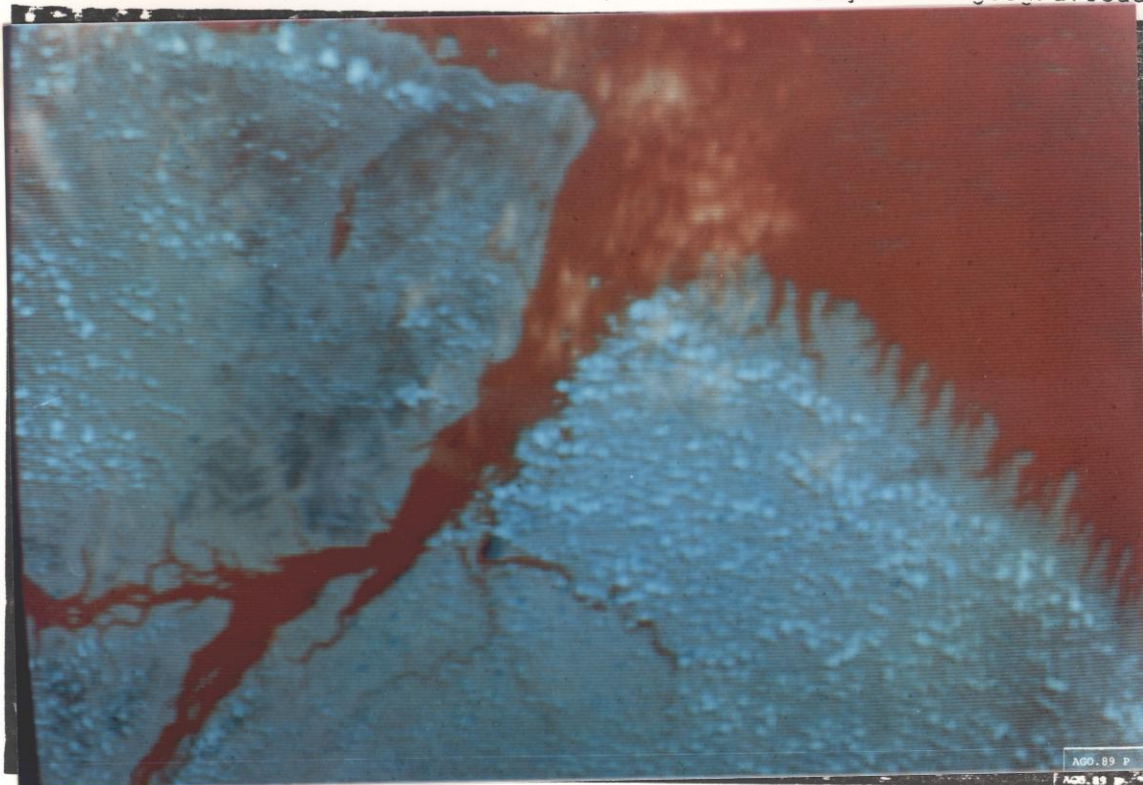


Fig. 4.4 - Contorno irregular no litoral norte do Brasil.

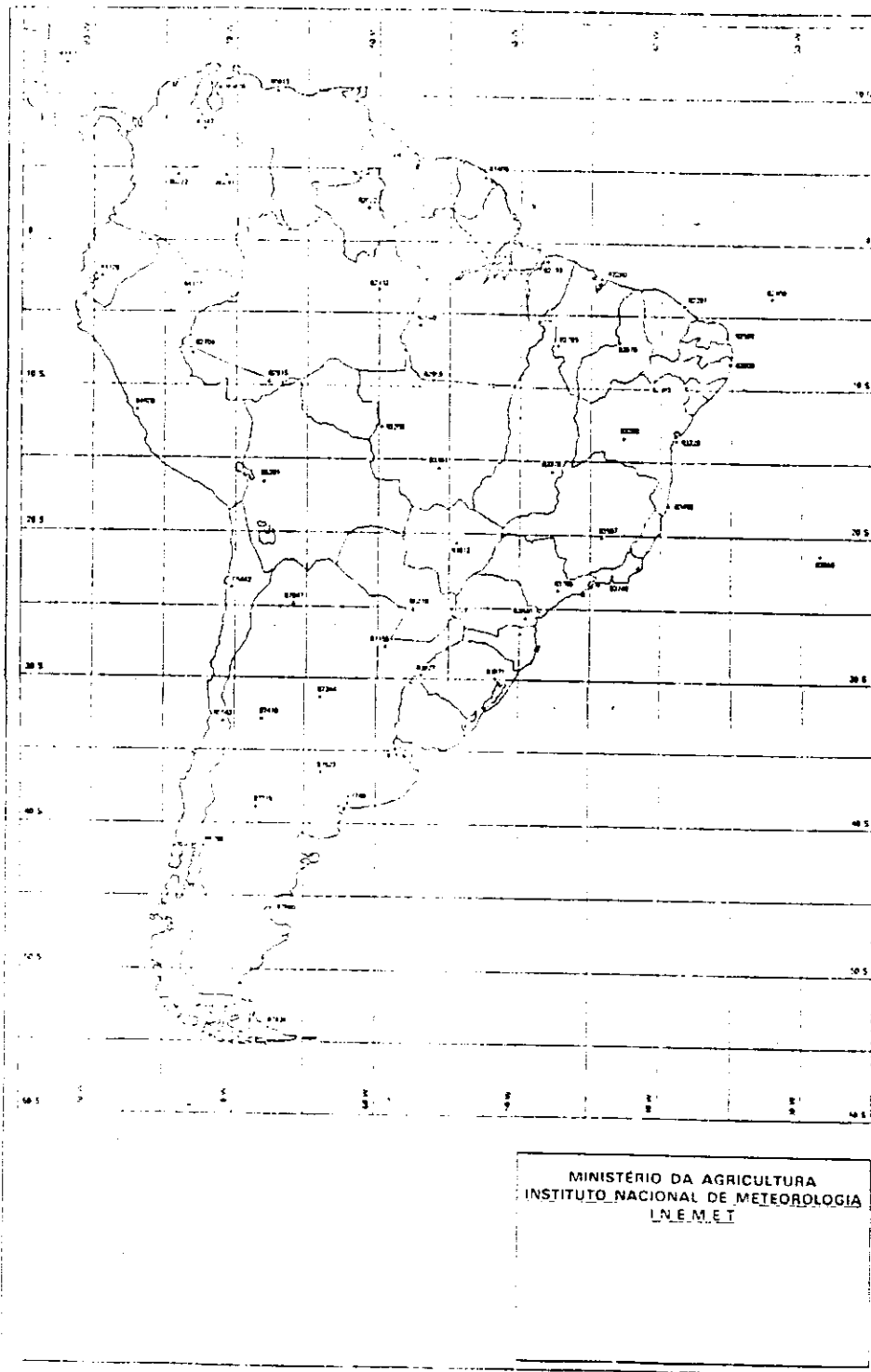


Fig. 4.5 - Mapa de divisões políticas utilizado como base.
FONTE: MA.INEMET (1987).

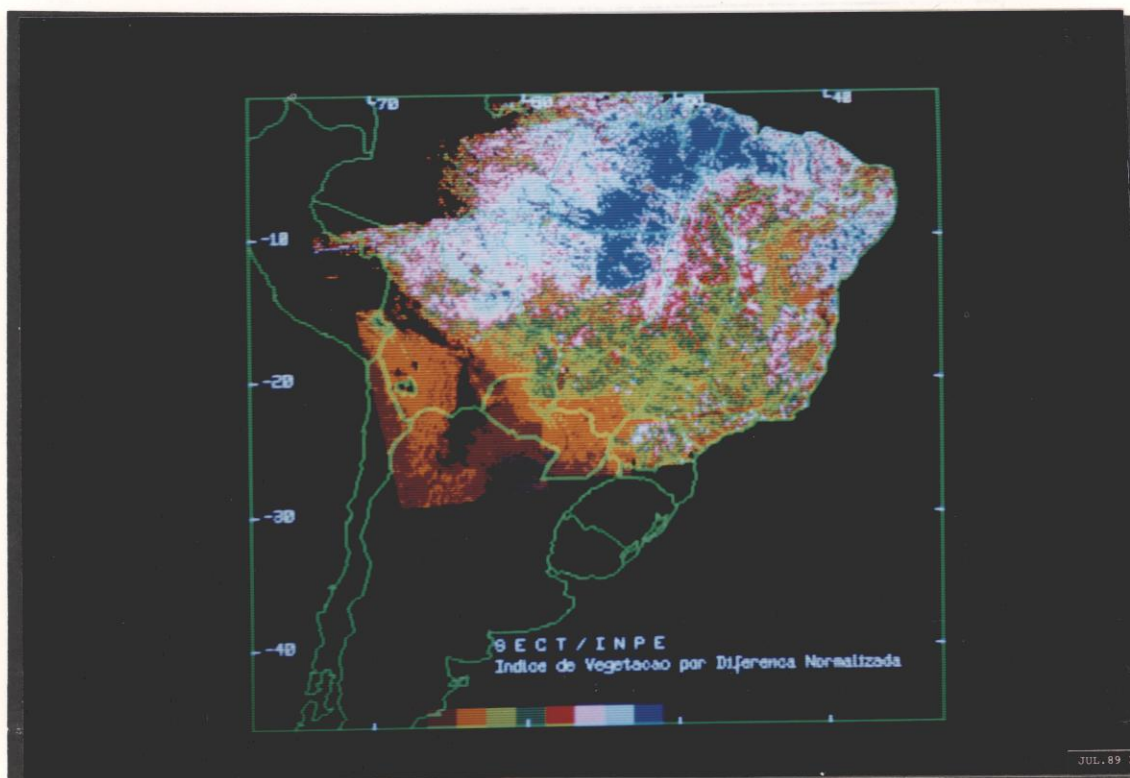


Fig. 4.6 - Imagem IVDN classificada.

4.7 - APROVEITAMENTO DAS IMAGENS NOAA/AVHRR

O ângulo total de visada do AVHRR é de 110,8 graus para uma altitude do satélite em torno de 860 km. Este ângulo visada do sensor faz com que as regiões de maior afastamento do nadir, nas bordas das imagens, sejam inadequadas ao processamento por alguns motivos. Entre eles, a queda do valor do índice de vegetação a níveis irrealistas devido principalmente à maior interferência atmosférica e à cobertura de nuvens nestas regiões da imagem (Fig. 4.7).

Além do ângulo de visada, outros fatores restringem o aproveitamento das imagens NOAA/AVHRR. Para uso na geração das imagens IVDN, foram analisadas visualmente cerca de 40 imagens dos meses de junho, julho e agosto de 1988. Nesta análise consideraram-se os fatores de cobertura de nuvens, posicionamento da imagem em relação à área de interesse e ruídos. Deste conjunto, selecionaram-se 15 imagens

gravadas no mês de julho, principalmente na segunda quinzena. Cada uma destas imagens selecionadas foi utilizada apenas parcialmente em decorrência ainda dos três fatores acima mencionados. Para finalidade de produção de imagens IVDN, o índice de aproveitamento foi relativamente baixo. A cobertura de nuvens foi o fator que mais limitou o aproveitamento das imagens NOAA/AVHRR. Acredita-se que possivelmente mais da metade da área total imageada seja anualmente comprometida por este fator. A cobertura de nuvens no período analisado concentrou-se principalmente no norte da Amazônia, norte da Argentina, Bolívia e no litoral nordeste brasileiro. Ruídos nas imagens NOAA/AVHRR analisadas ocorreram com frequência nas proximidades do equador, ou seja, nas regiões mais distantes da estação receptora de imagens, onde se supõe que a recepção da antena seja comprometida. Contudo, apesar das limitações citadas, a parcela aproveitável das imagens representa imenso volume de dados de utilidade para o sensoriamento remoto, principalmente considerando a natureza multitemporal destes dados que viabilizam a redução de tais efeitos em curto espaço de tempo.

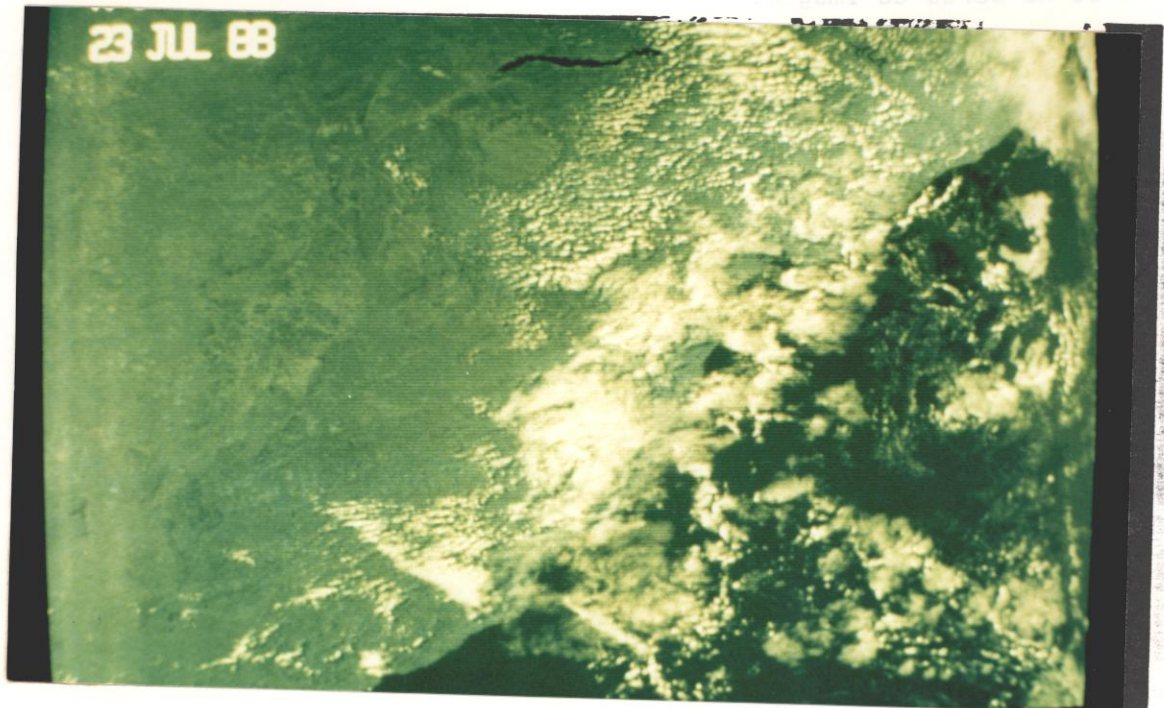


Fig. 4.7 - Imagem NOAA/AVHRR com cobertura de nuvens.

4.8 - OTIMIZAÇÃO DO TEMPO DE PROCESSAMENTO

A geração de imagens IVDN, que cobrem áreas acima de 50% do território nacional, é ainda um processo relativamente trabalhoso e demorado. A carga das imagens NOAA/AVHRR da fita CCT para disco envolve a conversão de "pixels" de 10 para 8 bits, o que tem sido significativamente demorado; a carga de imagens maiores, acima de 2000 linhas, pode demorar até 2 horas. Com a transferência da imagem diretamente da estação de recepção para o disco rígido do SITIM-150, solução em andamento, este tempo poderá ser reduzido em uma ordem de magnitude.

Na geração propriamente dita de imagens IVDN, processos relativamente morosos também ocorrem. Dentre eles destacam-se: a navegação; os dois níveis de interpolação; o acesso "pixel" a "pixel" em três arquivos-imagens (as duas bandas NOAA/AVHRR e a imagem de índice de vegetação anterior); e a atualização da imagem de saída. O processamento de setores de imagens NOAA/AVHRR de 500 x 500 "pixels" demorou de 6 a 12 minutos, dependendo se o setor estava situado no centro ou na borda da imagem.

Algumas medidas que visam a redução do tempo de processamento foram tomadas, dentre as quais se destacam:

- a) Processamento da imagem IVDN na memória de imagens (UVI), onde o acesso e atualização de "pixels" são mais rápidos do que em disco. São utilizados os canais 0 e 1 para as bandas 1 e 2 NOAA/AVHRR, o canal 2 para a saída da imagem IVDN e o canal 3 para visualização dos limites das regiões processadas.
- b) Interpolação bilinear na determinação de "pixels" a serem acessados na imagem NOAA/AVHRR. Em testes realizados constatou-se que esta medida reduziu o tempo de geração das imagens IVDN em cerca de 20 vezes quando comparada com o processamento para navegação de todos os pontos.

4.9 - AJUSTE DE PARÂMETROS

O processamento de imagens que envolve navegação necessita de um conjunto específico de parâmetros orbitais que são recebidos normalmente com imprecisões. Assim, estes parâmetros devem ser ajustados utilizando pontos de controle conhecidos na imagem NOAA/AVHRR. Ajuste de apenas dois parâmetros, o tempo inicial de gravação da imagem e a longitude de cruzamento pelo equador têm garantido suficiente precisão para os propósitos do trabalho.

4.10 - METAS ALCANÇADAS

O sistema desenvolvido, embora em caráter preliminar e experimental, constitui base para desenvolvimento de novos programas aplicativos em áreas do Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Os testes realizados indicaram que tratamentos digitais dos dados NOAA/AVHRR em equipamento de pequeno porte, como é o caso do SITIM-150, podem ser operacionalmente viáveis. Além dos propósitos preliminares do trabalho, acredita-se que outros benefícios foram alcançados, tais como criar instrumentos que possibilitam o uso sistemático dos dados AVHRR; despertar novos interesses na utilização desta fonte alternativa e complementar de informações possivelmente para as áreas da Agricultura, Floresta, Meio Ambiente, Meteorologia, etc., o que poderá alcançar maior número de usuários finais. Algumas possibilidades para implementação de novos programas aplicativos foram constatadas. Verifica-se, portanto, possibilidade de ambiente propício ao crescimento do processamento digital e aplicações das imagens NOAA/AVHRR.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Considerando os objetivos do trabalho descritos inicialmente, são apresentadas as seguintes conclusões.

- 1) O objetivo principal foi satisfatoriamente alcançado. Imagens de índice de vegetação para a América do Sul, com resolução espacial de 5 km, obtidas a partir de imagens brutas dos satélites polares NOAA/AVHRR, foram produzidas através de mosaicos digitais em projeção cartográfica convencional no equipamento SITIM-150.
- 2) Os objetivos de cálculo e geração de gráficos da variação temporal do índice de vegetação para localidades de interesse, bem como a elaboração de listagens de valores de índice de vegetação, também foram atingidos.
- 3) Foram desenvolvidos programas de navegação direta (coordenadas geográficas para pontos da imagem) e inversa (caso recíproco) que permitiram a realização dos objetivos acima. A inexistência de programas para este fim até o presente impediu o desenvolvimento de inúmeras aplicações de imagens NOAA/AVHRR, as quais em princípio poderão agora ser implementadas, abrindo novas possibilidades para o sensoriamento remoto regional e global no País.
- 4) Os mosaicos digitais foram gerados considerando uma matriz de 1020 x 1024 "pixels" espacialmente fixa para uma região da América do Sul, com valores obtidos de "pixels" AVHRR geograficamente correspondentes, por sua vez identificados através de equações de navegação. Este é um método inédito no País, sendo considerado uma importante contribuição da dissertação.

- 5) As imagens NOAA/AVHRR têm seu uso restringido na obtenção do IVDN quando a área de interesse encontra-se: a) na borda da imagem onde ocorrem distorções e interferência atmosférica excessiva; b) com cobertura excessiva de nuvens; c) com ruídos de gravação ou defeitos quaisquer.
- 6) Devido à localização em Cachoeira Paulista, SP, da única estação receptora de imagens NOAA/AVHRR utilizada neste trabalho, não foi possível a produção de IVDN no extremo noroeste do continente e acima da linha do equador. Estas regiões seriam beneficiadas por uma estação adicional na região central da Amazônia.
- 7) O processamento de uma imagem NOAA/AVHRR para a produção de imagem IVDN pode consumir duas ou mais horas no SITIM-150. Embora este tempo não inviabilize o processo, deverá ser considerado na sua eventual operacionalização. Com a evolução acelerada dos recursos computacionais, certamente este tempo poderá ser, a curto prazo, relativamente reduzido.
- 8) Embora os testes deste trabalho tenham sido realizados com apenas quinze imagens NOAA/AVHRR, acredita-se que os produtos IVDN gerados sejam confiáveis.

CAPÍTULO 6

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - ALTERNATIVAS PARA NOVAS VERSÕES DO SISTEMA

A meta principal do presente trabalho foi desenvolver uma versão preliminar de um sistema de aplicações das imagens NOAA/AVHRR para obtenção de índice de vegetação. Este sistema poderá ser implementado para atender outras aplicações. Novas funções poderão ser incorporadas à versão atual, tais como:

- a) Criação de base de dados temporais espacialmente corrigidos, como, por exemplo, índices de vegetação diários ou semanais para estações de estudo distribuídas em regiões de interesse. Este tipo de base de dados é conveniente principalmente para reduzir a pequenos volumes dados valiosos para estudos diversos, não apenas de índices de vegetação, mas também de dados destinados a outras aplicações, tais como meteorologia e queimadas.
- b) Geração de imagens NOAA/AVHRR geometricamente corrigidas, com resolução espacial e faixa de aproveitamento (ângulo de visada) específicos.
- c) Tratamento radiométrico mais apurado, que envolva principalmente efeitos e atmosféricos do ângulo de visada.
- d) Geração de imagens corrigidas para outras finalidades, como no caso de estudo de temperaturas do oceano, cobertura de nuvens e ocorrência de queimadas (Fig. 6.1).
- e) Transformação da imagem IVDN, ora apresentada no sistema de projeção cilíndrica equidistante, em outros sistemas de projeção.

- f) Sobreposição de divisões políticas à imagem NOAA/AVHRR sem correção geométrica. Esta alternativa é vantajosa por se tratar de rápido processamento, pois só são navegados os pontos que formam os polígonos da divisão política.

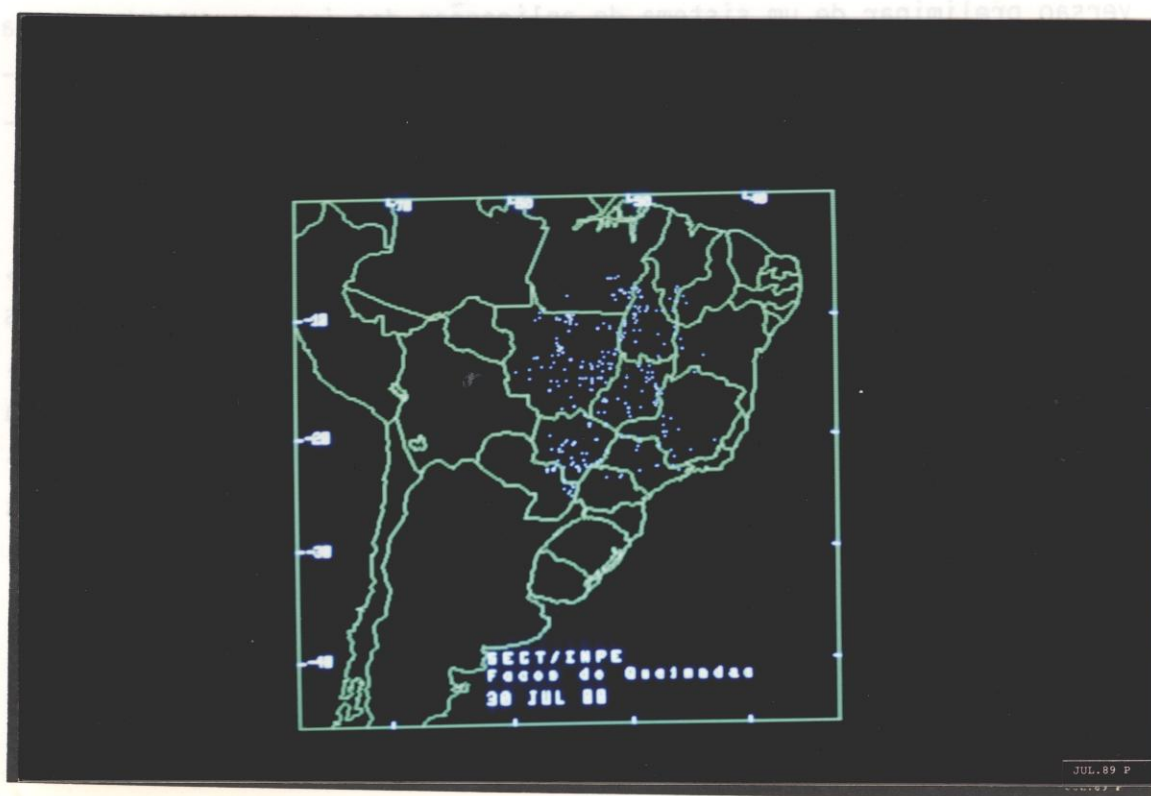


Fig. 6.1 - Imagem de queimadas.

6.2 - GRAVAÇÃO DAS IMAGENS NOAA/AVHRR

As imagens NOAA/AVHRR têm sido gravadas pela estação receptora de Cachoeira Paulista - SP (Fig. 6.2). Nesta posição geográfica a estação é inadequada para a cobertura de regiões mais distantes como o norte do equador, parte noroeste da Amazônia e outras regiões da América do Sul. Ruídos têm sido encontrados com frequência nas imagens. Deste modo, duas providências seriam recomendáveis: a) adequar a estação de Cachoeira Paulista à melhoria da qualidade das imagens

NOAA/AVHRR recebidas; b) instalar outra estação receptora de imagens, desde que haja interesse no monitoramento de outras regiões do continente, não alcançadas pela atual estação.

Em função das aplicações que poderão surgir para as imagens NOAA/AVHRR, poder-se-á definir um calendário anual de gravação, bem como o acervo destas imagens, gravadas em anos anteriores, a ser mantido em fitas magnéticas.



Fig. 6.2 - Estação receptora das imagens NOAA/AVHRR em Cachoeira Paulista - SP.

6.3 - ANÁLISE E AVALIAÇÃO DAS IMAGENS IVDN

Como não se trata de objeto do presente trabalho, estudos sobre aplicações da imagem de índice de vegetação não foram realizados. É recomendável fazê-lo para avaliar esta nova fonte de informações para aplicações diversas.

É conveniente comparar os produtos resultantes com dados de campo e até mesmo de outros satélites, a fim de investigar a confiabilidade e a aplicabilidade deles.

6.4 - OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS ORBITAIS E DE IMAGEAMENTO

O ajuste dos parâmetros utilizados nos algoritmos de navegação tem sido indispensável. Desta forma sugere-se implementação de rotinas para ajuste automático destes parâmetros. O grau de precisão de tais dados deve ser compatível com as necessidades das aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGELICI, G.L.; BRYANT, N.A. **A Land Use Change Monitoring system Based on LANDSAT.** Machine Processing of Remotely Sensed Data, 4th Annual Symposium, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West-Lafayette, Indiana, June 21-23, p. 344, 1977.
- ANGLADE, I. Etude comparée par traitement d'image de quelques paramètres influençant le comportement hydrique des sols nus. **Photo Interprétation**, 82:3/5-6, 1982.
- ASHBURN, P. **The vegetation index number and crop identification.** The LACIE Symposium, Proceedings of the technical session, p. 843-856, 1978.
- ASHLEY, M.D.; REA, J. Seasonal vegetation differences from ERTS imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 41:713-719, 1975.
- ASSAD, E.D.; SETZER, A.; MOREIRA, L. Estimativa da precipitação através dos índices de vegetação do satélite NOAA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal-RN, 11-15 out. 1988. **Anais.** São José dos Campos, INPE, 1988, p. 425-429.
- BANON, G.J.F. Comunicação pessoal por ocasião da apresentação preliminar da dissertação, 1988.
- BARDINET, C.; MONGET, J.M. **Lanchad-Télédétection et géographie appliquée en zone sahélienne du Tchad.** Collection de l'Ecole Normale Supérieure Jeunes Filles n. 12, Paris, p. 544, 1980.
- BARIOU, R.; LACAMUS, D.; LE HENAFF, F. **Índices de Végétation.** Dossiers de Télédétection. Centre Régional de Télédétection, Université de Rennes 2, Haute Bretagne, Juin 1985.

- BLAIR, B.O.; BAUMGARDNER, M.F. Detection of the green and brown
ware in hardwood canopy covers using multidata multispectral data
from LANDSAT-1. **Agronomy Journal**, (69):808-811, 1977.
- BROOKS, D.R. **An introduction to orbital dynamics and its application
to satellite based Earth monitoring missions**. Hampton, VA, 1977.
(NASA RP 1009).
- BRUNEL, P.; MARSQUIN, A. An operational method using ARGOS orbital
elements of navigation of AVHRR imagery. **International Journal of
Remote Sensing**, 8(1):569-578, 1987.
- BRUSH, R.J.H. A method for real-time navigation of AVHRR imagery.
IEEE Transactions Geoscience of Remote Sensing, 23(6):876-887,
1985.
- COLWELL, J.E. **Bidirectional spectral reflectance of grass canopies
for determination of above ground standing biomass**. Ph.D. Thesis.
University of Michigan, Ann Arbor, 1974, 174 p.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of
Environment**, 3:175-183, 1974.
- DELAVIGNE, R. D'ile-de-France vue par satellite. Les cahiers de
l'Institut da d'Aménagement et d'urbanisme de la région d'ile-de-
France, n^o 67, Mars, p. 6-26.
- DUGGIN, M.J. **The effect of angular factors on popularly used
indicator of vegetative vigor**. ASP, 1980. (Technical Paper
TP-239251).
- DUGGIN, M.J. The effect of irradiation and reflectance variability
vegetation conditions assessment. **International Journal of Remote
Sensing**, 4(3):601-608, 1983.

- ELIAS, M.; OLIVEIRA, J.R. de; GARRIDO, J.C.P. de; RODRIGUES, V.; MEIRA FILHO, L.G. **Ground receiving and processing facilities for meteorological satellites in Brazil.** São José dos Campos, INPE, 1977. (INPE-1125-PE/093).
- ENGESPAÇO. **Manual do usuário do SITIM-150.** São José dos Campos, 1988.
- GANE, C.; SARSON, T. **Análise estruturada de sistemas.** Rio de Janeiro, LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1983.
- GATES, D.M.; KEEGAN, H.J.; SCHLETER, J.C.; WEINDER, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, 4(1):11-20, 1965.
- HELLDEN, U. Drought impact monitoring. A remote sensing study of desertification in Kordofan, Sudan. **Lunds Universitets Naturgeografiska Institution**, 61:61, 1984.
- HENRICKSEN, B.L. Reflections on drought: Ethiopia 1983-1984. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1447-1451, 1986.
- HIELKEMA, J.U.; ROFFEY, J.; TUCKER, C.J. Assesment of ecological conditions associated with the 1980/81 desert locust plague upsurfe in West Africa using environmental satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1609-1622, 1986.
- HOLBEN, B.N. Characteristics of maximum-value composite images temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1417-1434, 1986.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. DEPARTAMENTO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS (INPE.DPI). **Manual do usuário do SIG.** São José dos Campos, 1988a.
- _____ **Manual de sub-rotinas do SITIM-150.** São José dos Campos, 1988b.

- INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. DEPARTAMENTO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS (INPE.DPI). **Manual do usuário do SITIM**. São José dos Campos, 1986.
- JACKSON, R.D.; SLATER, P.N.; PINTER JR.; P.J. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clean and turbid atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, 13(3): 187-208, 1983.
- JUSTICE, C.O. Editorial. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1385-1390, 1986.
- JUSTICE, C.O.; HOLBEN, B.N.; GWYNNE, M.D. Monitoring East African vegetation using AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1459-1474, 1986.
- KNEMASU, E.T.; NIBLETT, C.L.; MANGES, H.; LENHERT, D.; NEWMAN, M.A. Wheat: its growth and disease severity as deduced from ERTS-1. **Remote Sensing Environment**, 3(4):255-260, 1974.
- KIDWELL, K.B. **NOAA polar orbiter data (TIROS-N, NOAA-6, NOAA-7, NOAA-8, and NOAA-9) users guide**. Washington, DC, NOAA/NESDIS, 1986.
- KERR, Y.H. NOAA/AVHRR and its uses for rainfall and vegetation monitoring. Submetido ao **International Journal of Remote Sensing**, 1988.
- LIU, W.T.H. **An application of newly developed methods for crop yield prediction in Brasil: a training report**. Boulder, CO, NOAA, 1988.
- LYZENZA, D.R. Note on the modified two-stream approximation of Sagan and Pollack. **Icarus**, 19(1):240, 1972.
- MARIETTE, V.; BIANCALE, N.; DELAVIGNE, R. La télédétection par satellite au service des comptes du patrimoine naturel. Institut d'Aménagement et d'urbanisme de la région d'ile-de-France, 1982, 80 p.

- MEADOR, W.E.; WEAVER, W.R. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: a unified description of existing methods and a new improvement. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 37:360, 1979.
- MEDEIROS, V.M.; TANAKA, K.; YAMAZAKI, Y. Sistema de navegação dos dados AVHRR dos satélites da série NOAA. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 4., Gramado, RS, 10-15 ago. 1986. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 1986, p. 464-471.
- MILLER, R.; REDDY, F. Mapping the world in Pascal. **Byte**, 12(14): 329-334, Dec. 1987.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (MA. INEMET). **Divisões políticas da América do Sul: no sistema de projeção cilíndrica eqüidistante**. INEMET, Brasília, DF, 1987.
- MOURA, A.D. **Mapeamento de pontos sobre a terra para imagens obtidas por radiômetro de varredura a bordo de satélites**. São José dos Campos, INPE, 1975. (INPE-697-NTI/021).
- MYERS, V.I.; WESTIN, F.C.; HORTON, M.L.; LEWIS, J.K. **Soil influences in crop identification (in Effective use of ERTS Multispectral data in Northeast Great Plains)**. Remote Sensing Institute, South Dakota State University, 1974.
- NELSON, R.F. Detecting forest canopy change due to insect activity using LANDSAT MSS. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 49(9):1303-1314, 1983.
- O'HAGAN, J.P. Agricultura-Horizonte 2000. In: SEMINÁRIO AGRICULTURA-HORIZONTE 2000: perspectiva para o Brasil. Brasília, 5-9 dez. 1983. **Anais**. Brasília, SUPLAN/FAO, 1984. p. 29-36.

- PERRY JR., Ch.R.; LAUTENCHLAGER, L.F. Functional equivalence of spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, 14(1-3):169-182, 1984.
- RICHARDSON, A.J.; WIEGANG, C.L. **A table look-up procedure for rapidly mapping vegetation cover and crop development.** Symposium of Remotely Sensed Data, Purdue, p. 284-297, 1977.
- ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.** 3d. ERTS Symposium. Déc. I, p. 309-317, 1973. (NASA SP 351).
- SAINT, G.; PODAIRE, A.; ANGLADE, I. **Simulation radiométrique de SPOT: résultats d'expérimentation sur la végétation et les sols.** Signatures Spectrales d'Objets and Télédétection. Colloque International, Avignon, 8-11 Sept. 1981, p. 73-83.
- SANTANA, P.H.A.; OLIVEIRA, J.R. de; MEIRA FILHO, L.G. **Gradeamento de imagens produzidas por radiômetros de varredura a bordo de satélites.** São José dos Campos, INPE, 1974. (INPE-558-RI/251).
- SELLER, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, 6(8):1335-1372, 1985.
- SETZER, A.W.; MALINGREAU, J.P. **Monitoramento de secas no Nordeste com índices de vegetação.** São José dos Campos, INPE, 1989. Comunicação Pessoal.
- SETZER, A.W.; PEREIRA, M.S. Comunicação pessoal, projeto SEQUE, 1989.
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O. Analysis of the dynamics of african vegetation using the normalized difference vegetation index. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1435-1445, 1986.

- TOZAWA, Y. Fast geometric correction of NOAA AVHRR. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMPOSIUM, 1983. **Proceedings.** West Lafayette, IN, LARS/Purdue University, 1983, p. 46-53.
- TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production. **International Journal of Remote Sensing**, 7(11):1395-1416, 1986.
- TUCKER, C.J. **Use of near infrared/red radiance ratios for estimating vegetation biomass and physiological status.** Washington, DC, NASA, 1977.
- YAZDANI, R. **A simple approach for monitoring vegetation changes for use with a digital geo-data base.** In "Renewable Resources Management. Application of Remote Sensing". American Society of Photogrammetry, p. 236-242, 1984.

APÊNDICE A

ALGORITMOS DA NAVEGAÇÃO

Os algoritmos aqui detalhados foram adaptados a partir do modelo apresentado por Medeiros et al. (1986).

Seja um satélite em órbita circular (Fig. A.1) de raio (R_0) e inclinação (I) conhecidos, em torno de um elipsóide de revolução que possui um sistema de eixos (x, y, z), fixo neste e cruzando a linha do equador (plano xy), numa longitude conhecida (Lo_0).

As longitudes dos pontos de interseção do plano orbital com a linha do equador mudam com o tempo, segundo a equação:

$$Lo = Lo_0 + (\pi/2) * (1 - j) - Tv_1 * t, \quad (A.1)$$

onde $j = 1$ para órbita ascendente; $j = -1$ para órbita descendente; t é o tempo decorrido antes (< 0) ou depois (> 0) do cruzamento com o equador; e Tv_1 é dado por:

$$Tv_1 = Vat - Tp,$$

onde Vat é a velocidade angular da Terra; Tp é a taxa de precessão da órbita em questão.

O movimento do satélite no plano orbital pode ser equacionado por:

$$Aorb = (\pi/2) * (1 - j) + Vas * t, \quad (A.2)$$

onde $Aorb$ representa o ângulo total medido a partir do cruzamento ascendente pelo equador até o satélite e Vas é a velocidade angular dele.

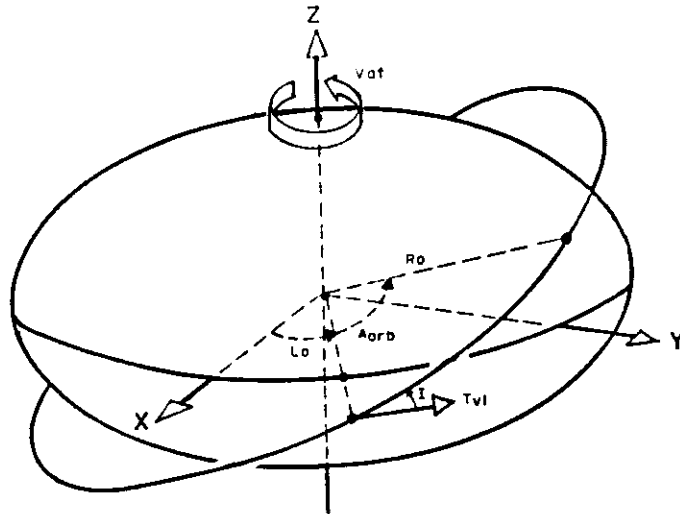


Fig. A.1 - Geometria orbital conhecida.

O tempo t pode ser obtido por:

$$t = t_1 + t_2, \quad (\text{A.3})$$

onde t_1 é o tempo decorrido entre o cruzamento pelo equador e o completo imageamento da linha imediatamente anterior à linha em questão (positivo acima e negativo abaixo do equador). Pode ser obtido tendo em vista serem conhecidos: 1) o tempo inicial de gravação; 2) o tempo no cruzamento pelo equador; 3) a frequência de varredura de linhas. t_2 é o tempo de varredura do "pixel" em questão, que tem como origem o início do imageamento da linha que o contém. Pode ser obtido tendo em vista serem conhecidos: 1) a frequência de varredura de "pixels"; 2) o número do "pixel" no plano orbital; 3) o sentido de varredura.

O ângulo de varredura para o "pixel" em questão pode ser obtido por:

$$\text{Avar} = \text{Varre} * t_2. \quad (\text{A.4})$$

Com estas equações o versor de estado do satélite, conhecido como versor posição, é dado por:

$$x = \cos(Lo) * \cos(Aorb) - \cos(I) * \sin(Lo) * \sin(Aorb), \quad (A.5a)$$

$$y = \sin(Lo) * \cos(Aorb) + \cos(I) * \cos(Lo) * \sin(Aorb), \quad (A.5b)$$

$$z = \sin(I) * \sin(Aorb). \quad (A.5c)$$

O versor velocidade pode ser obtido pela derivada do versor posição em relação ao ângulo Aorb:

$$xv = -\cos(Lo) * \sin(Aorb) - \cos(I) * \sin(Lo) * \cos(Aorb), \quad (A.6a)$$

$$yv = -\sin(Lo) * \sin(Aorb) + \cos(I) * \cos(Lo) * \cos(Aorb), \quad (A.6b)$$

$$zv = \sin(I) * \cos(Aorb). \quad (A.6c)$$

O versor normal ao plano orbital pode ser obtido pelo produto vetorial do versor posição (x, y, z) com o versor velocidade (xv, yv, zv) , obtendo-se as componentes:

$$xn = \sin(Lo) * \sin(I), \quad (A.7a)$$

$$yn = -\cos(Lo) * \sin(I), \quad (A.7b)$$

$$zn = \cos(I). \quad (A.7c)$$

O versor varredura pode ser obtido pela combinação linear do versor posição (x, y, z) com o versor normal (xn, yn, zn) , para o ângulo de varredura (Avar), na forma:

$$xvar = xn * \sin(Avar) + x * \cos(Avar), \quad (A.8a)$$

$$yvar = yn * \sin(Avar) + y * \cos(Avar), \quad (A.8b)$$

A. 4

$$z_{var} = z_n * \text{sen}(A_{var}) + z * \text{cos}(A_{var}). \quad (\text{A.8c})$$

a) Caso direto

O problema direto é definido como a obtenção das coordenadas geográficas, latitude (Latp) e longitude (Lonp), para um ponto (linha, "pixel") conhecido. Para tanto, o problema é colocado na forma do sistema de equações do segundo grau a três incógnitas:

$$A1 * x_p + B1 * y_p + C1 * z_p = 0, \quad (\text{A.9})$$

$$A2 * x_p + B2 * y_p + C2 * z_p = D, \quad (\text{A.10})$$

$$(x_p)^2 + (y_p)^2 + E * (z_p)^2 = 1, \quad (\text{A.11})$$

onde as duas primeiras equações representam planos, cuja interseção define a linha de varredura que intercepta o elipsóide definido pela terceira equação, no ponto cujas coordenadas geográficas sobre este elipsóide correspondem ao "pixel" desejado. Na última equação o coeficiente E é obtido a partir do fator de achatamento terrestre (fa, adotado 1/298,257) na forma:

$$E = 1/(1 - f_a)^2. \quad (\text{A.12})$$

Para que o termo independente dessa equação seja igual a 1, o raio orbital (Ro) deve ser tomado em unidades do raio terrestre (R, adotado 6378,55 km), na forma:

$$R_m = R_o/R. \quad (\text{A.13})$$

Sendo o plano de varredura perpendicular à velocidade (xv, yv, zv), os coeficientes A1, B1, C1 da equação que define este plano coincidem com as componentes xv, yv, zv, e o termo independente é nulo, pois o plano passa pelo centro do elipsóide (origem do sistema). O segundo plano é definido pelos vetores velocidade e varredura, e passa pela posição do satélite (Fig. A.2). Logo, os coeficientes des-

te plano podem ser obtidos pelo produto vetorial entre os vetores varredura e velocidade, que resulta em:

$$A_2 = z_v * y_{var} - y_v * z_{var}, \quad (\text{A.14a})$$

$$B_2 = x_v * z_{var} - z_v * x_{var}, \quad (\text{A.14b})$$

$$C_2 = y_v * x_{var} - x_v * y_{var}. \quad (\text{A.14c})$$

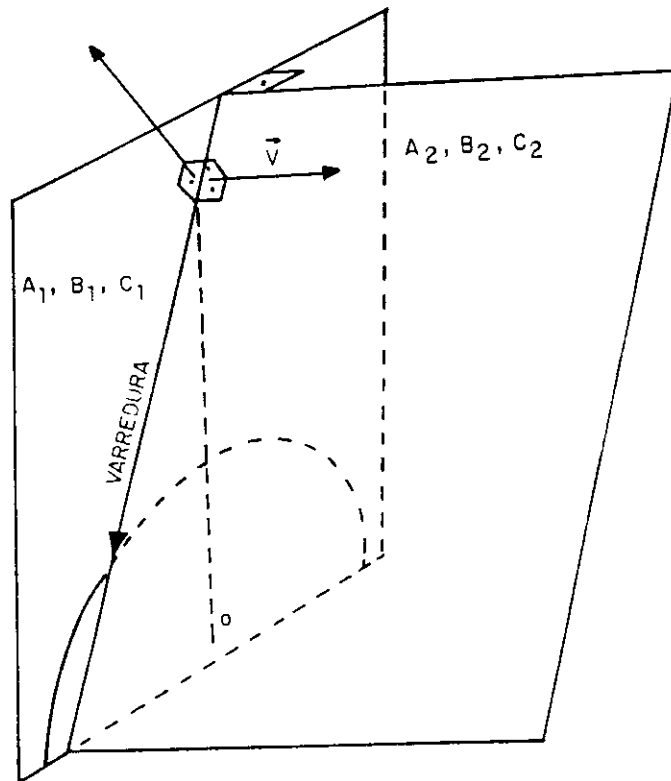


Fig. A.2 - Geometria dos planos que definem a linha de varredura.

O termo independente (D) é obtido por:

$$D = R_m * (A_2 * x + B_2 * y + C_2 * z). \quad (\text{A.15})$$

A.6

O fator R_m é utilizado tendo em vista que (x, y, z) é o versor posição e, no produto com R_m , obtém-se o vetor.

Com todos os coeficientes determinados, o sistema do segundo grau pode ser resolvido a partir das relações:

$$a_1 = -D * C_1 / (B_1 * C_2 - B_2 * C_1), \quad (A.16)$$

$$a_2 = D * B_1 / (B_1 * C_2 - B_2 * C_1), \quad (A.17)$$

$$b_1 = (A_2 * C_1 - A_1 * C_2) / (B_1 * C_2 - B_2 * C_1), \quad (A.18)$$

$$b_2 = (A_1 * B_2 - A_2 * B_1) / (B_1 * C_2 - B_2 * C_1), \quad (A.19)$$

$$b = (a_1 * b_1 + E * a_2 * b_2) / (1 + b_1^2 * E * b_2^2), \quad (A.20)$$

$$c = (a_1^2 + E * a_2^2 - 1) / (1 + b_1^2 + E * b_2^2), \quad (A.21)$$

$$\text{delta} = b^2 - c, \quad (A.22)$$

apresentando as duas soluções para a coordenada x :

$$x_1 = -b + (\text{delta})^{\frac{1}{2}}, \quad (A.23a)$$

$$x_2 = -b - (\text{delta})^{\frac{1}{2}}, \quad (A.23b)$$

e as demais coordenadas a partir de:

$$y_1 = a_1 + b_1 * x_1, \quad (A.24a)$$

$$y_2 = a_1 + b_1 * x_2, \quad (A.24b)$$

$$z_1 = a_2 + b_2 * x_1, \quad (A.25a)$$

$$z_2 = a_2 + b_2 * x_2. \quad (A.25b)$$

Assim, obtêm-se as coordenadas (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) dos dois pontos-solução do sistema de equações do segundo grau, onde deve ser escolhido aquele que se encontra mais próximo da posição do satélite, distante R_m vezes o versor posição. Para tanto, são calculadas as distâncias r_1 e r_2 do satélite aos dois pontos-solução:

$$r_1 = (R_m * x - x_1)^2 + (R_m * y - y_1)^2 + (R_m * z - z_1)^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (\text{A.26a})$$

$$r_2 = (R_m * x - x_2)^2 + (R_m * y - y_2)^2 + (R_m * z - z_2)^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (\text{A.26b})$$

Se $r_1 < r_2$, então o ponto solução (x_p, y_p, z_p) é dado por:

$$x_p = x_1, \quad (\text{A.27a})$$

$$y_p = y_1, \quad (\text{A.27b})$$

$$z_p = z_1. \quad (\text{A.27c})$$

Se $r_1 > r_2$, então:

$$x_p = x_2, \quad (\text{A.28a})$$

$$y_p = y_2, \quad (\text{A.28b})$$

$$z_p = z_2. \quad (\text{A.28c})$$

Se $r_1 = r_2$, a varredura é tangente à Terra e os dois pontos coincidem.

Se $\Delta < 0$, a varredura é feita no espaço e não toca a Terra; neste caso, não há solução determinada.

Com a solução (x_p, y_p, z_p) , as coordenadas geográficas, latitude (Lat_p) e longitude (Lon_p) do ponto, são obtidas pelas equações:

$$\text{Latp} = \arctan \left((E * z_p) / (x_p^2 + y_p^2)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (\text{A.29})$$

$$\text{Lonp} = \arctan (y_p/x_p). \quad (\text{A.30})$$

b) Caso inverso

O problema inverso é definido fornecendo as coordenadas geográficas, latitude e longitude, e determinando o número da linha e o número do elemento ("pixel") observado na imagem. Para tanto, o problema é colocado na forma do sistema de equações do segundo grau a três incógnitas:

$$A3 * x + B3 * y + C3 * z = 0, \quad (\text{A.31})$$

$$A4 * x + B4 * y + C4 * z = 0, \quad (\text{A.32})$$

$$x^2 + y^2 + z^2 = R_m^2, \quad (\text{A.33})$$

onde as duas últimas equações representam a órbita, aqui equacionada como a interseção da esfera de raio orbital (R_m) e o plano orbital ($A4, B4, C4$), e a primeira equação representa o plano de varredura ($A3, B3, C3$), cuja interseção com a órbita fornece o ponto posição do satélite (Fig. A.3).

Neste caso, o tempo a partir do cruzamento com o equador (t) não é conhecido, sendo obtido iterativamente a partir da posição calculada do satélite, através da solução do sistema de equações acima. Para obtenção dos coeficientes destas equações, o tempo (t) é inicializado a partir do cruzamento pelo equador, isto é, igual a zero, e redefinido pela posição calculada do satélite, reentrando na iteração para melhorar os valores dos coeficientes das equações, até que haja uma convergência. Por não se tratar de objeto do presente trabalho, os fundamentos desta convergência não foram analisados.

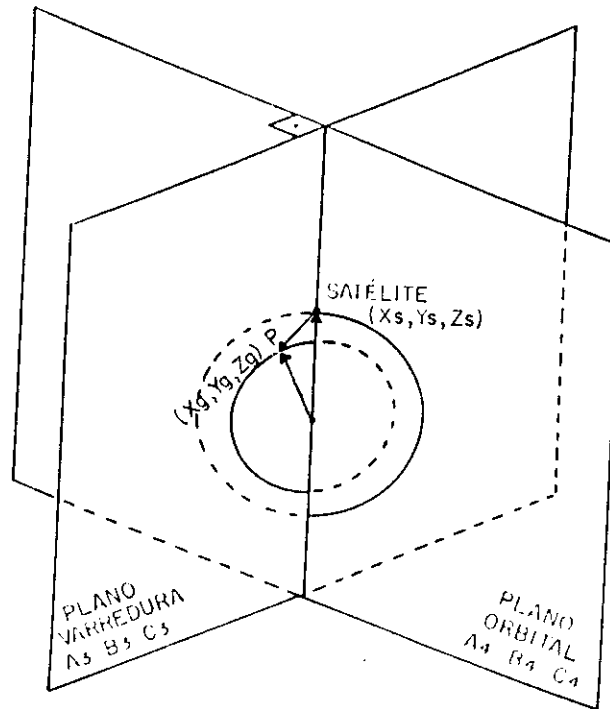


Fig. A.3 - Geometria dos planos que definem a posição do satélite.

Dados a latitude e a longitude, o ponto observado pelo satélite sobre o elipsóide terrestre, definido pela Equação (A.11), com coordenadas (x_g, y_g, z_g) , pode ser calculado a partir da distância radial (D_r) deste ponto e da latitude geocêntrica (Lat_g) (Fig. A.4).

$$Lat_g = \arctan ((\tan (Lat_p))/E), \quad (A.34)$$

$$D_r = (1 - f_a)/(1 - f_a * (2 - f_a) * \cos^2(Lat_g))^{\frac{1}{2}}. \quad (A.35)$$

$$x_g = D_r * \cos(Lat_g) * \cos(Lon_p), \quad (A.36a)$$

$$y_g = D_r * \cos(Lat_g) * \sen(Lon_p), \quad (A.36b)$$

$$z_g = D_r * \sen(Lat_g). \quad (A.36c)$$

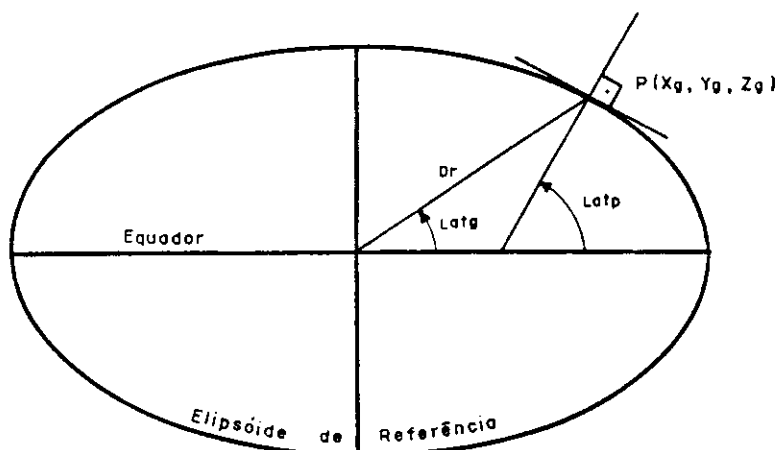


Fig. A.4 - Latitudes geocêntrica ($Latg$) e geodésica ($Latp$).

A partir deste ponto, inicia-se o processo iterativo propriamente.

Utilizando as Equações A.1, A.7a, A.7b e A.7c com t inicialmente igual ao tempo do cruzamento pelo equador, obtém-se o versor normal ao plano orbital (x_n, y_n, z_n). Então os coeficientes da equação que define o plano de varredura (A_3, B_3, C_3) podem ser obtidos a partir do produto vetorial do versor normal ao plano orbital (x_n, y_n, z_n) pelo versor ponto geográfico (x_g, y_g, z_g), que resulta em:

$$A_3 = y_n * z_g - z_n * y_g , \quad (A.37a)$$

$$B_3 = z_n * x_g - x_n * z_g , \quad (A.37b)$$

$$C_3 = x_n * y_g - y_n * x_g . \quad (A.37c)$$

As componentes do versor normal coincidem com os coeficientes do plano orbital, ficando assim definidos:

$$A_4 = x_n, \quad (A.38a)$$

$$B4 = y_n, \quad (A.38b)$$

$$C4 = z_n. \quad (A.38c)$$

E o sistema de equações pode ser resolvido da seguinte forma:

$$a1 = (A3 * C4 - A4 * C3)/(B4 * C3 - B3 * C4), \quad (A.39a)$$

$$a2 = (A4 * B3 - A3 * B4)/(B4 * C3 - B3 * C4), \quad (A.39b)$$

levando a duas soluções:

$$x1 = R_m / (1 + a1^2 + a2^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (A.40a)$$

$$y1 = a1 * x1, \quad (A.40b)$$

$$z1 = a2 * x1, \quad (A.40c)$$

e

$$x2 = -x1, \quad (A.41a)$$

$$y2 = -y1, \quad (A.41b)$$

$$z2 = -z1. \quad (A.41c)$$

A escolha da solução (x_s , y_s , z_s) pode ser resolvida a partir das distâncias do ponto geográfico à posição do satélite:

$$r1 = ((x_g - x1)^2 + (y_g - y1)^2 + (z_g - z1)^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (A.42a)$$

$$r2 = ((x_g - x2)^2 + (y_g - y2)^2 + (z_g - z2)^2)^{\frac{1}{2}}. \quad (A.42b)$$

Se $r1 \leq r2$, então:

$$x_s = x_1, \quad (\text{A.43a})$$

$$y_s = y_1, \quad (\text{A.43b})$$

$$z_s = z_1, \quad (\text{A.43c})$$

senão:

$$x_s = x_2, \quad (\text{A.44a})$$

$$y_s = y_2, \quad (\text{A.44b})$$

$$z_s = z_2. \quad (\text{A.44c})$$

E finalizando o processo iterativo, o tempo (t), procurado para reentrada no processo, pode ser obtido por:

$$t = \arcsen(z_s / (R_m * \sen(I))) / (2 * \pi / \text{Persat}). \quad (\text{A.45})$$

Esta equação se aplica à órbita ascendente.

Após a convergência de t, para obter o número do elemento é necessário calcular o ângulo de varredura.

Inicialmente o versor varredura pode ser obtido por:

$$x_{var} = x_g - x_s, \quad (\text{A.46a})$$

$$y_{var} = y_g - y_s, \quad (\text{A.46b})$$

$$z_{var} = z_g - z_s. \quad (\text{A.46c})$$

Sejam "var 1" e "var 2" duas variáveis auxiliares definidas por:

$$\text{var1} = \text{xvar} * \text{xn} + \text{yvar} * \text{yn} + \text{zvar} * \text{zn}, \quad (\text{A.47})$$

$$\text{var2} = \text{xvar}^2 + \text{yvar}^2 + \text{zvar}^2. \quad (\text{A.48})$$

O ângulo de varredura é então obtido por:

$$\text{avar} = \text{pi}/2 - \arccos(\text{var1}/(\text{var2})^{\frac{1}{2}}). \quad (\text{A.49})$$

E finalmente o número do "pixel" pode ser obtido por:

$$\text{Elem} = \text{pixc} - \text{avar}/\text{IFOV}, \quad (\text{A.50})$$

onde pixc é o número do elemento na coluna central da imagem.

Para obtenção do número da linha, é necessário acrescentar o tempo de varredura do elemento ao tempo t :

$$t = t + \text{pixel}/\text{Fvarre}, \quad (\text{A.51})$$

onde Fvarre é a frequência de varredura de elementos.

E finalmente o número da linha pode ser obtido por:

$$\text{Linha} = (t + \text{tcruz} - \text{tinic}) * \text{Fvarrl}, \quad (\text{A.52})$$

onde tcruz é o tempo no cruzamento pelo equador, tinic é o tempo inicial de gravação e Fvarrl é a frequência de varredura de linhas.

APÊNDICE B

DIAGRAMA DE FLUXO DE DADOS

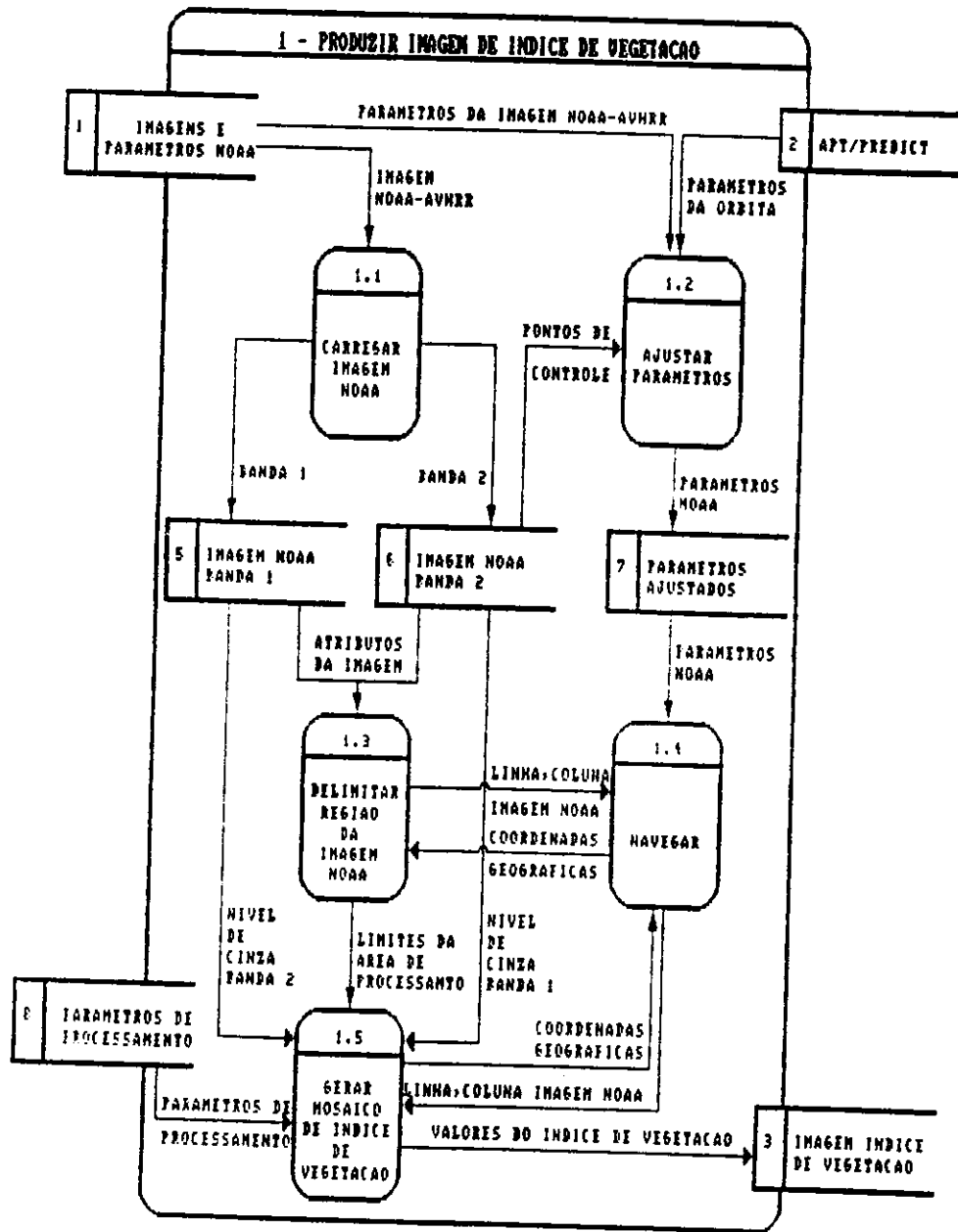


Fig. B.1 - DFD do módulo de produção de imagens de índice de vegetação.

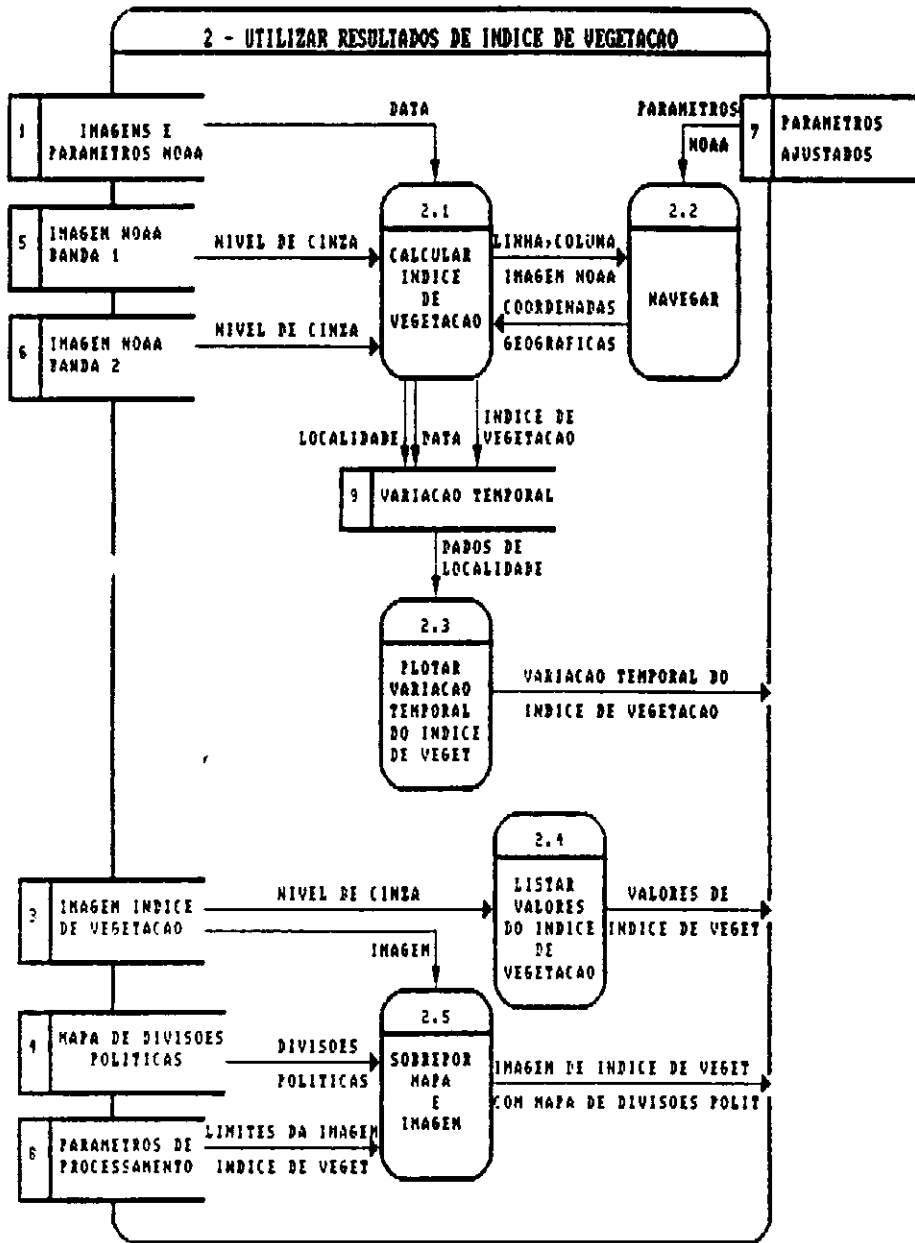


Fig. B.2 - DFD do módulo de utilização de resultados de índice de vegetação.

APÊNDICE C

SIGLAS

- APT - Automatic Picture Transmission.
(Transmissão automática de imagens dos satélites da série NOAA).
- APT/Predict - Relação de parâmetros orbitais dos satélites da série NOAA para cálculo de órbitas, retransmitida diariamente pelos satélites meteorológicos GOES.
- AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer.
(Radiômetro Avançado de Muito Alta Resolução).
- CCD - Coupled Charge Device.
(Sigla utilizada para designar o sistema sensor a bordo do satélite SPOT).
- CCT - Computer Compatible Tape.
(Arquivo-imagem em fita magnética compatível com computador).
- DFD - Diagrama de Fluxo de Dados.
- DPI - Departamento de Processamento de Imagens.
- EOS - Earth Observing System.
(Sistema de Observação da Terra).
- FAO - Food and Agriculture Organization.
(Organização para Agricultura e Alimentos).
- GIMMS - Global Inventory Monitoring and Modelling Studies.
(Estudos de Monitoramento e Modelamento de Inventário Global do Laboratório de Física Terrestre do Centro Goddard da NASA).
- GVI - Global Vegetation Index.
(Índice Global de Vegetação).
- HRPT - High Resolution Picture Transmission.
(Transmissão de Imagens de Alta Resolução).
- IFOV - Instantaneous Field-of-View.
(Campo Instantâneo de Visada).
- INEMET - Instituto Nacional de Meteorologia.
- INPE - Instituto de Pesquisas Espaciais.

C.2

- IVDN - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
- LANDSAT - Land Satellite.
(Sigla utilizada para designar os satélites norte-americanos da série LANDSAT).
- NESDIS - National Environmental Satellite Data and Information Service.
(Serviço Nacional de Dados e Informações de Satélite Ambiental).
- NASA - National Aeronautics and Space Administration.
(Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço).
- NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration.
(Administração Nacional Oceânica e Atmosférica - EUA. Também designação genérica da série de satélites meteorológicos de órbita polar NOAA, anteriormente denominada da TIROS).
- Pixel - Picture element.
(Menor elemento de uma imagem digital).
- RFA - Radiação Fotossinteticamente Ativa.
- RAM - Random Access Memory.
(Memória de acesso randômico).
- SIG - Sistema de Informações Geográficas.
- SITIM - Sistema de Tratamento de Imagens.
(Sigla utilizada para designar o equipamento de processamento de imagens fabricado pela empresa. ENGESPACO, bem como o software de tratamento de imagens desenvolvido pelo INPE).
- SPOT - Satellite Pour Observation de la Terre.
(Sigla utilizada para designar os satélites franceses da série SPOT).
- TIROS - Television Infrared Observational Satellite.
(Satélite de Observação por Televisão no Infravermelho).
- TM - Thematic Mapper
(Sigla utilizada para designar o sistema sensor a bordo do satélite LANDSAT 5).
- UNEP - United Nations Environmental Program.
(Programa Ambiental das Nações Unidas).