



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8984-PUD/62

CAPÍTULO 2
SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO

José Carlos Neves Epiphanyo

INPE
São José dos Campos
2002

CAPÍTULO 2

SATÉLITES DE SENSORIAMENTO REMOTO

José Carlos Neves Epiphanyo¹

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE

¹ E-mail: epiphani@ltid.inpe.br
DSR/INPE

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	2-5
LISTA DE TABELAS	2-7
1. INTRODUÇÃO	2-9
2. CARACTERÍSTICAS ORBITAIS DOS SATÉLITES	2-10
2.1 ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA	2-11
2.2 ÓRBITA BAIXA	2-11
3. PROGRAMA LANDSAT	2-13
4. PROGRAMA SPOT	2-19
5. PROGRAMA BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO	2-25
6. SATÉLITES NOAA	2-29
7. PROGRAMA EOS (EARTH OBSERVING SYSTEM)	2-30
8. PROGRAMAS DE RADAR	2-32
9. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	2-35

LISTA DE FIGURAS

1 – SATÉLITE CBERS E SEUS COMPONENTES.	2-27
--	-------------

LISTA DE TABELAS

1 – PROGRAMA LANDSAT	2-15
2 - PARÂMETROS DO ETM+/LANDSAT-7	2-16
3 - BANDAS ESPECTRAIS DO ETM+/LANDSAT-7.....	2-16
4 - SENSORES DO SPOT-4.....	2-21
5 - CÂMERA CCD DO CBERS.....	2-26
6 - CARACTERÍSTICAS DO AVHRR-3/NOAA-K, L E M.....	2-30

1. INTRODUÇÃO

Para que haja o sensoriamento remoto é necessário que haja uma “medição”, à distância, das propriedades dos objetos ou alvos. As principais propriedades “primárias” dos alvos que são medidas¹ pelos sensores remotos são a capacidade de reflexão e de emissão de energia eletromagnética. Essas propriedades primárias podem ser usadas diretamente, de uma forma “bruta”, através de uma imagem de um sensor remoto. Essa é a forma mais comum de uso dos produtos de sensoriamento remoto, pois são as imagens na forma como as conhecemos. Por exemplo, um objeto tortuoso e de baixa reflexão (escuro) numa certa imagem traduz-se a nós como sendo um rio. Porém, aquelas propriedades primárias podem sofrer transformações e permitir-nos fazer inferências sobre características secundárias dos alvos. Por exemplo, quando uma imagem de um sensor remoto entra num modelo que a relaciona com a fotossíntese da vegetação, gera-se um novo produto, ou uma nova imagem que, agora, passa a representar uma propriedade do alvo que não foi medida diretamente pelo sensor remoto. No caso do rio, se houver uma equação ou um modelo que permita um relacionamento entre reflectância medida por satélite e quantidade de sedimentos num meio aquático, pode-se gerar uma imagem secundária que expressa a quantidade de sedimentos.

De qualquer modo que se veja um produto de sensoriamento remoto, seja ele primário ou secundário, há sempre a necessidade de que a propriedade de reflexão ou emissão do alvo seja medida, mensurada, por um sensor remoto. Os sensores remotos fazem parte do que se denomina “sistemas de sensoriamento remoto”. Os chamados “sistemas de sensoriamento remoto” são os veículos e instrumentos necessários à coleta de dados para serem analisados pela comunidade científica e de usuários em geral. E há uma estreita associação entre sensoriamento remoto e satélites artificiais. É que, embora outros sistemas façam parte do sensoriamento remoto, como os radiômetros de campo e de laboratório, e os sensores fotográficos e outros

¹ Comentário: Página: 9
fazer análise de “medida” em relação a uma régua, sem padronização. Isto é, um sensor faz uma medida sem escala padronizada, a princípio; portanto, é preciso, posteriormente, que haja

uma calibração em relação a um padrão para que se tenha uma medida precisa da propriedade do alvo.

sistemas que operam em aeronaves, são os satélites que, a cada dia, mais e mais se tornam os instrumentos quotidianos dos profissionais de sensoriamento remoto. Assim, é necessário que haja um conhecimento dos principais satélites e de suas características.

Os satélites são veículos colocados em órbita da Terra e que promovem continuamente a aquisição de dados relacionados às propriedades primárias dos objetos. Por estarem a grandes altitudes (tipicamente entre 600 e 1.000 km) têm a capacidade de abranger em seu campo de visada uma grande porção de superfície terrestre. Ao mesmo tempo, como têm que orbitar ao redor da Terra, promovem uma cobertura que se repete ao longo do tempo, permitindo o acompanhamento da evolução das propriedades de reflexão ou emissão dos objetos e fenômenos.

Neste capítulo são abordados os principais satélites em operação e, particularmente, aqueles voltados para o sensoriamento remoto da superfície terrestre com ênfase naqueles mais utilizados no Brasil. Assim, são descritos os sistemas Landsat, SPOT, NOAA, Terra, Radarsat e ERS (todos programas internacionais) e o CBERS e o SSR/MECB (do Brasil). Porém, antes de descrever os sistemas propriamente ditos, é feita uma introdução sobre órbitas e outros aspectos dos satélites, cujos princípios aplicam-se a todos os sistemas.

2. CARACTERÍSTICAS ORBITAIS DOS SATÉLITES

Os satélites podem apresentar uma grande variação quanto ao padrão orbital em relação à Terra. Os que mais interessam para o sensoriamento remoto enquadram-se em duas grandes categorias: os de órbita baixa e os de órbita alta. Estes últimos são os geoestacionários e têm sua maior aplicação no campo da meteorologia, sendo apenas marginal sua aplicação em

sensoriamento remoto. Os de órbita baixa englobam a maioria dos satélites de sensoriamento remoto, e são discutidos mais pormenorizadamente.

2.1 ÓRBITA GEOESTACIONÁRIA

Os satélites nesta órbita estão a uma altitude de cerca de 36.000 km. São chamados geoestacionários porque sua órbita acompanha o movimento de rotação da Terra. Possuem uma velocidade de translação em relação à Terra que equivale ao movimento de rotação da Terra, de modo que, em relação à Terra, estão imóveis. Como ficam dispostos ao longo do Equador terrestre, e por causa da grande altitude podem ter uma visão sinóptica completa, ou seja, de todo o disco terrestre compreendido pelo seu campo de visada. Além disso, como estão “fixos” em relação à Terra, permanecem voltados para o mesmo ponto da superfície e, assim, podem fazer um imageamento muito rápido daquela porção terrestre sob seu campo de visada. É por essa grande abrangência de superfície terrestre coberta em um curto intervalo de tempo que eles são muito úteis para estudos de fenômenos meteorológicos, os quais são bastante dinâmicos.

2.2 ÓRBITA BAIXA

Embora nesta categoria enquadrem-se inúmeros sistemas espaciais, a discussão a seguir é restrita às situações e características que abrangem os sistemas que mais interessam ao sensoriamento remoto. Sempre que couber, são discutidos os impactos dos desvios em relação à situação usual.

Em geral, a órbita dos satélites de sensoriamento remoto enquadra-se no que se denomina órbita baixa, o que equivale a dizer órbitas com menos de 1.000 km de altitude.

Para os satélites de sensoriamento de órbita baixa, tal órbita é também circular, pois dessa forma o satélite fica sempre orbitando a uma altitude quase que fixa em relação à Terra, o que permite uma escala de imageamento praticamente constante para todas as imagens. Como a variação de altitude é pequena

numa situação de circularidade, a variação de escala também é pequena. Toda a órbita circular tem esta característica de manter a escala constante, o que facilita os trabalhos de interpretação e análise das imagens.

Outra característica de órbita para os satélites de sensoriamento remoto é a altitude. Ela tem se situado entre 700 e 1.000 km, aproximadamente. A altitude do satélite define uma série de outros parâmetros de engenharia do sistema. Ela tem que obedecer às leis da mecânica orbital e depende muito da definição do projeto da missão e características dos sensores destinados ao imageamento. No caso da série Landsat, por exemplo, a mudança de altitude entre a primeira geração (Landsat 1 a 3) e a segunda geração (Landsat 4 a 7) exigiu que o campo de visada do sensor *Thematic Mapper* (Mapeador Temático, ou simplesmente TM), a bordo dos satélites da segunda geração, fosse aumentado a fim de manter a mesma faixa de imageamento do sensor *Multispectral Scanner System* (Sistema de Varredura Multiespectral, ou MSS), da geração anterior. Isso quer dizer que se fosse mantido o mesmo ângulo de imageamento para as duas gerações, a faixa imageada no terreno seria menor na segunda geração, uma vez que sua altitude era menor.

Uma vez definido que a órbita é circular e que ela tem uma certa altitude em relação à Terra, descrevendo um círculo com raio praticamente fixo, é preciso definir o ângulo que esse plano da órbita fará com os pólos da Terra. Em geral os satélites de sensoriamento remoto têm órbita quase polar, com um pequeno e constante desvio do plano orbital em relação ao eixo norte-sul. O imageamento é descendente, em direção ao sul, quando a Terra está iluminada (embora pudesse também haver imageamento no sentido ascendente em certos comprimentos de onda). A órbita quase-polar tem a importante característica de permitir que a Terra toda (exceto os pólos) seja imageada após um certo número de órbitas. A cada órbita, cuja duração é de cerca de 100 minutos, o sistema (satélite e sensor) recobre uma faixa longitudinal e constante no terreno equivalente a um certa faixa de terreno. Essa faixa de imageamento varia de acordo com o sensor. Nessas condições, ocorrem aproximadamente 14,5 órbitas diárias e, como o perímetro da Terra no

equador é de cerca de 36.000 km, após um certo número de dias e um certo número de órbitas, a Terra toda será imageada.

No projeto da missão e, particularmente da característica orbital, para fins de sensoriamento remoto há uma preferência para que haja uma ciclicidade das passagens ou dos recobrimentos. Isso quer dizer que é desejável que, após determinado número de dias, o satélite volte a recobrir a mesma faixa de terreno. Isso é conseguido através de um projeto orbital adequado, no qual fatores como altitude e velocidade do satélite são considerados. Também a faixa imageada no terreno em cada órbita é um fator importante, já que faixas de imageamento mais estreitas determinarão ciclos de revisitas mais longos, e faixas mais largas diminuirão o tempo entre uma visita e outra. Ou seja, se a faixa de terreno que o sistema (satélite mais sensor) consegue imagear é estreita, haverá necessidade de muitas órbitas para cobrir toda a superfície da Terra. Ao contrário, se a faixa de imageamento é mais larga, exige-se menos tempo para que esse recobrimento seja completo.

Entre outros fatores, na determinação da configuração de um sistema de imageamento há um que diz respeito ao horário do dia em que deverá ser efetuado o imageamento. Em geral, os satélites de sensoriamento remoto possuem órbita chamada heliossíncrona, ou seja, sincronizada com o Sol. Isso quer dizer que a cada órbita o satélite cruza a linha do Equador no mesmo horário. Esta característica de órbita é importante pois assim todas as imagens são sempre obtidas aproximadamente no mesmo horário, e as variações entre imagens podem ser atribuídas às propriedades intrínsecas dos alvos, e não a influências de posicionamento angular do sol. Para que isso possa ser conseguido, é necessário que o ângulo entre a normal ao plano da órbita do satélite e a linha terra-sol seja mantido constante. Isso significa que a precessão do plano orbital do satélite deve estar numa taxa que seja equivalente à taxa da translação da Terra ao redor do Sol. Isso é obtido através do estabelecimento de uma relação apropriada entre o raio (ou o período) da órbita circular e o ângulo de inclinação da órbita do satélite.

3. PROGRAMA LANDSAT

O primeiro satélite da série Landsat foi lançado no início dos anos 70, conforme a Tabela 1. Atualmente, no ano 2001, estão operando o quinto e o sétimo da série. Esta série de satélites é a principal no campo do sensoriamento remoto, não só por ser a de período de vida mais longo de fornecimento contínuo de dados, mas também pela notável facilidade de acesso e qualidade dos dados gerados.

A partir do final do anos 60 os Estados Unidos decidiram colocar em órbita um satélite de sensoriamento remoto. A estrutura do satélite baseou-se em um projeto já em operação naquela época que era a dos satélites Nimbus, de meteorologia. Posteriormente, iniciando com o Landsat-4, foi projetada uma plataforma própria para esses satélites e também uma inovação quanto aos sensores a bordo. Assim, é comum falar em duas gerações para a série Landsat. Uma que compreende os três primeiros, e uma segunda, que compreende os quatro últimos. O de número 7, o último da série, apresenta um sensor que, embora muito semelhante aos três anteriores, tem certas características que são tidas como um avanço em relação a seus predecessores.

Como se observa pela Tabela 1, os satélites de uma determinada série são lançados um a um, depois de um intervalo irregular de tempo. Cada satélite lançado tem uma vida útil esperada. Os primeiros satélites da série Landsat tinham vida útil estimada de dois anos. Alguns duraram muito mais do que isso. Os últimos da série já tinham especificações de vida útil maiores, e também ultrapassaram em muito as especificações. O Landsat-5, por exemplo, opera a mais de 15 anos. Porém, não é incomum a ocorrência de fracassos; o Landsat-6 foi perdido durante o lançamento, antes de ser posicionado em órbita.

Quanto à primeira geração da série Landsat, cabe destacar que o sensor MSS (Sistema de Varredura Multiespectral) demonstrou ser o principal instrumento a bordo dos Landsats. O sensor RBV (Sistema Vidicon de Feixes Retornantes,

similar a um sistema de televisão), que operava no Landsat-3, embora permitisse uma melhor resolução espacial, em relação ao MSS, acabou sendo descontinuado a partir do Landsat-4 por causa de sua baixa fidelidade radiométrica e de sua pequena cobertura espectral. Muitas dessas imagens do RBV estão disponíveis nos arquivos do INPE, em Cachoeira Paulista, SP.

TABELA 1 – PROGRAMA LANDSAT*

Sistema	Lançamento (fim das operações)	Instru-mentos	Resolução (metros)	Comunica-ção	Altitude (km)	Revi-sita	Taxa de dados (Mbps)
Landsat-1	23/7/1972 (1/6/1978)	RBV	80	TD com gravadores	917	18	15
		MSS	80				
Landsat-2	22/1/1975 (25/2/1982)	RBV	80	TD com gravadores	917	18	15
		MSS	80				
Landsat-3	5/3/1978 (31/3/1983)	RBV	30	TD com gravadores	917	18	15
		MSS	80				
Landsat-4	16/7/1982 (Transmissão TM terminou em 08/1993)	MSS	80	TD com TDRSS	705	16	85
		TM	30				
Landsat-5	1/3/1984	MSS	80	TD com TDRSS	705	16	85
		TM	30				
Landsat-6	5/10/1993 (5/10/1993)	ETM	15 (pan) 30 (ms)	TD com gravadores	705	16	85
Landsat-7	15/4/1999	ETM+	15 (pan) 30 (ms)	TD com gravadores de estado sólido	705	16	150

*RBV = return beam vidicon; MSS = multispectral scanner system; TM = thematic mapper; ETM+ = enhanced thematic mapper plus; pan = pancromático; ms = multiespectral; TD = transmissão direta; Mbps = mega bits por segundo.

O mais recente satélite da série é o Landsat-7, lançado em 15/04/1999, e o principal sensor a bordo é o ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*, Mapeador Temático Avançado). Este sensor é uma continuação do TM anteriormente a bordo dos Landsats-4 a 6. As principais características do ETM+ são resumidas nas Tabelas 2 e 3. O ETM+ fornece uma imagem digital

com uma visão sinóptica, repetitiva, multiespectral, com alta resolução espacial da superfície terrestre.

TABELA 2 - PARÂMETROS DO ETM+/LANDSAT-7

Tipo	radiômetro de varredura mecânica tipo "wiskbroom"	
Bandas	3 Bandas no Visível, 1 no infravermelho Próximo, 2 no Infravermelho Médio Refletido, 1 no Infravermelho Termal, 1 Pancromática	
Função	cobertura global periódica da superfície terrestre	
Faixa imageada no terreno	185 km ($\pm 7,5^\circ$)	
Massa	425 kg	
Potência	590 W (imageando), 175 W (repouso)	
Controle térmico	resfriador radiativo de 90 K	
Dimensões físicas	radiômetro	196 x 114 x 66 cm
	eletrônica auxiliar	90 x 66 x 35 cm

FONTE: King e Greenstone (1999, p.113)

TABELA 3 - BANDAS ESPECTRAIS DO ETM+/LANDSAT-7

Banda Espectral	Largura da Banda à meia amplitude (μm)	Dimensão do IFOV (μrad)	Dimensão nominal da amostra no terreno (m)
Pancromática	0,50-0,90	18,5 x 21,3	15
1 (visível, azul)	0,45-0,52	42,6	30
2 (visível, verde)	0,52-0,60	42,6	30
3 (visível, vermelho)	0,63-0,69	42,6	30
4 (infravermelho próximo)	0,76-0,90	42,6	30
5 (infravermelho médio refletido)	1,55-1,75	42,6	30
6 (infravermelho termal)	10,42-12,50	85,2	60
7 (infravermelho médio refletido)	2,08-2,35	42,6	30

FONTE: King e Greenstone (1999, p.113)

O satélite Landsat-7 tem uma órbita circular (escala praticamente constante), heliossíncrona (horário de cruzamento do Equador sempre às 10:00 ± 15

minutos na órbita descendente), com uma inclinação de $98,2^\circ$, altitude de 705 km. Nesta configuração orbital, o Landsat-7 precede o satélite Terra (a ser discutido adiante) de cerca de 30 minutos na mesma faixa de imageamento da superfície terrestre. A faixa de 185 km imageada pelo campo de visada (FOV – *field of view, campo de visada*) do ETM+ permite uma cobertura global da terra a cada 16 dias. Cada órbita dura aproximadamente 100 minutos. Neste tempo, ocorre um deslocamento no terreno de cerca de 2.400 km entre o centro de uma órbita e a seguinte. Como a Terra desloca-se para leste, as faixas imageadas vão se deslocando para oeste. Esse padrão de recobrimento orbital, onde são descritas as órbitas no sentido longitudinal e as imagens propriamente ditas, “recortadas” a cada 185 km na órbita, ou seja, no sentido latitudinal, formam o que se denomina *sistema de referência mundial*. Esse sistema permite que se localize uma imagem correspondente a qualquer ponto da Terra através de dois números, correspondentes à órbita (sentido longitudinal) e ao ponto (sentido latitudinal). Assim, por exemplo, uma imagem do ETM+/Landsat-7 de São José dos Campos, SP, é referenciada como sendo a 219/76, lida como “órbita 219, ponto 76”.

O ETM+ é um sensor que possui dois planos focais, onde ficam localizadas as matrizes de detectores. Cada matriz de detectores é responsável pela detecção de uma banda. Há, portanto, oito matrizes, sendo que as quatro primeiras (bandas 1-4, correspondentes às três do visível e à do infravermelho próximo) ficam no plano focal primário. As quatro seguintes (pancromática, infravermelhos médios, e infravermelho termal) encontram-se num plano focal secundário e refrigerado. Ambos os planos focais, apesar de fisicamente separados, encontram-se opticamente alinhados, de modo que há o registro entre todas as bandas. Cada matriz é composta de 16 detectores (exceto a banda pancromática, que tem 32, e a do infravermelho termal, que tem oito). A função de cada uma dessas matrizes é promover o registro da radiação proveniente do terreno em cada uma das oito bandas. Esta matriz de oito bandas por 16 detectores por banda (oito na infravermelha termal e 32 na pan) tem uma largura de 480 metros no terreno, que são 16 linhas de 30 metros nas bandas 1-4, 32 linhas de 15 metros no pan, 8 linhas no infravermelho termal.

O ETM+ é um sensor que faz um imageamento através de dois movimentos perpendiculares entre si. O primeiro movimento é feito pelo deslocamento do próprio satélite ao longo de sua órbita. A projeção desse movimento, juntamente com o FOV, definem o que se denomina faixa de imageamento. No caso ETM+ esta faixa de imageamento é de 185 km. O segundo movimento necessário para constituir uma imagem no sistema de varredura mecânico multiespectral é produzido pelo movimento de um espelho oscilante transversalmente à faixa de imageamento.

O espelho oscilante projeta, no terreno, as matrizes de detectores que estão nos planos focais. A cada movimento lateral do espelho oscilante numa direção (leste para oeste, ou oeste para leste), são imageadas 16 linhas de 30 metros (32 de 15 metros no pan e 8 de 60 metros no infravermelho termal), ou 480 metros de largura e com 185 km de extensão. Em cada banda particular, um certo detector é responsável pelo imageamento de uma linha completa. Porém, cada detector tem um IFOV (*instantaneous field of view*, campo de visada instantâneo) de apenas 30 metros (15 no pan e 60 no infravermelho termal). Portanto, para que uma linha de 185 km seja completamente “varrida” é necessário que cada um dos detectores de cada banda seja acionado milhares de vezes (185.000 metros dividido pelo IFOV de cada detector – 15, 30 ou 60 metros, de acordo com a banda).

Se for fixada uma certa posição inicial do espelho oscilante, no terreno haverá a projeção de toda a matriz de detectores. Portanto, nesta posição, nenhum detector estará cobrindo uma mesma área no terreno. Nesta posição, são lidos os valores de radiância de cada elemento de terreno projetado em cada detector em particular. A esta seqüência singular de leitura de todos os detectores de todas as oito bandas dá-se o nome de *minor frame* (seqüência primária de leitura). Após esse *minor frame* o espelho desloca-se para leste ou para oeste (dependendo do sentido do espelho oscilante e o *minor frame* adjacente é lido. Vê-se que entre um *minor frame* e outro, há uma adjacência de elementos de 30 m no terreno (15 m para o pan e 60 m para o infravermelho termal). A continuação dessa seqüência de *minor frames* fará com que toda a

linha seja coberta após um certo tempo, que equivale ao *major frame* (seqüência completa de leitura). Ao terminar um *major frame*, o espelho oscilante e o sistema de leitura e registro dos sinais terão varrido e lido mais de 6.000 *minor frames*; e também o espelho oscilante terá chegado ao fim de um FOV (185 km de largura), e imageado um comprimento no terreno (sentido descendente da órbita) equivalente a 480 m. Quando o espelho oscilante retornar para imagear outros 480 m, o satélite terá avançado em sua órbita o equivalente a 480 m no terreno e, assim, esse próximo conjunto de linhas (480 m) estará contíguo ao conjunto anterior, e assim por diante. Essa seqüência de *minor frames* nas linhas e a seqüência de *major frames* na direção do caminamento da órbita forma a imagem.

Após a detecção do sinal proveniente do terreno, ele sofre processamentos internos e é gravado a bordo ou encaminhado na forma digital para uma estação em terra. No caso do Brasil, esta estação fica em Cuiabá, MT. Depois, é enviado para Cachoeira Paulista, SP, para os processamentos necessários à preparação dos produtos a serem arquivados ou enviados aos usuários. Atualmente, o principal produto solicitado pelos usuários são as imagens na forma digital e gravados em CDROM.

4. PROGRAMA SPOT

O programa SPOT (*Satellite Pour Observation de la Terre*, Satélite Para Observação da Terra) é um programa Francês de satélites de sensoriamento remoto. O primeiro da série foi lançado em 22/2/1986, o segundo em 22/1/1990, o terceiro foi lançado em 26/9/1993, mas perdeu-se no lançamento. Em 22/3/1998 foi lançado, pelo veículo lançador Ariane, o SPOT-4 que, embora guarde muitas características dos seus predecessores 1-3, representa um avanço em vários sentidos. O sistema de observação da terra SPOT foi projetado pela Agência Espacial Francesa (CNES – Centre National d'Études Spatiales) e é operado por sua subsidiária Spot Image. Nesta seção a discussão é centrada no Spot-4, mas sempre que necessário haverá referência

aos satélites anteriores ou mesmo a outros sistemas, particularmente ao Landsat.

O Spot-4 classifica-se como um satélite de órbita baixa, ficando a 830 km de altitude. Sua órbita é circular, o que garante que todas as cenas sejam adquiridas a uma altitude praticamente constante, garantindo constância na resolução espacial e na escala. A heliossincronicidade de sua órbita faz com que o Spot-4 passe sobre uma certa área sempre à mesma hora solar, o que permite que a cena apresente as mesmas condições de iluminação daquela cena durante todo o ano (as variações passam a ser creditadas à sazonalidade das estações do ano e às variações intrínsecas dos alvos). O ângulo entre o plano orbital do Spot-4 e a direção Terra-Sol é praticamente constante e de $22,5^\circ$, fazendo com que o cruzamento com o equador no sentido descendente norte-sul ocorra à hora solar de 10:30. A sua órbita também é quase polar, sendo que o ângulo entre o plano da órbita e o plano equatorial é de $98,8^\circ$, garantindo que toda a terra seja recoberta durante um ciclo de revisita (considerando a possibilidade de visada fora do nadir). Como a órbita é em fase, o satélite passa sobre o mesmo ponto após um número inteiro de dias que, para as visadas no nadir (visada vertical), é de 26 dias. Neste período o Spot-4 terá completado 369 órbitas ao redor da terra. Cada revolução orbital dura 101,5 minutos. Em cada órbita o Spot-4 cruza o plano equatorial duas vezes, uma no sentido norte-sul, ou órbita descendente, durante o período iluminado do dia; o segundo cruzamento ocorre no sentido ascendente sul-norte durante o período noturno.

O Spot-4 foi concebido para ser um satélite com características bastante diferenciadas em relação ao Landsat. As principais diferenças são a alta resolução espacial de seus sensores, o sistema de imageamento por varredura eletrônica (*pushbroom*) e a capacidade de visada lateral. O seu sistema de imageamento é constituído por dois sensores denominados HRVIR (*haute resolution visible et infra rouge*, alta resolução no visível e infravermelho). Na verdade são dois sensores idênticos, colocados um ao lado do outro. A largura

da faixa de imageamento de cada um é de 60 km, perfazendo 117 km de largura, pois há um recobrimento de 3 km no equador.

Um outro sensor a bordo do Spot-4 e também de interesse para o sensoriamento remoto é o Vegetation. A Tabela 4 apresenta algumas características dos HRVIR e do sensor Vegetation (Vegetação, VGT)

TABELA 4 - SENSORES DO SPOT-4

Bandas (μm)	HRVIR		Vegetação (VGT)	
	Resolução espacial (m)	Faixa de imageamento (km)	Resolução espacial (km)	Faixa de imageamento (km)
B0 (azul)	-	-	1,1 km	2.250 km
B1 (verde, 0,50 a 0,59 μm)	20 m	60 km	-	-
Pan (vermelho, 0,61 a 0,68 μm)	10 m	60 km	-	-
B2 (vermelho, 0,61 a 0,68 μm)	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
B3 (infravermelho próximo, 0,78 a 0,89 μm)	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
MIR (infravermelho médio, 1,58 a 1,75 μm)	20 m	60 km	1,1 km	2.250 km
Alinhamento HRVIR/VGT	0,3 pixel do VGT			
Calibração absoluta	9%		5%	
Cobertura global da Terra	26 dias		1 dia	

Cada um dos HRVIR possui 4 bandas espectrais, conforme a Tabela 4. A banda pancromática possui a mesma faixa espectral da banda B2 (vermelho) no Spot-4, mas era uma banda separada (0,51 a 0,70 μm) nos Spots anteriores. Esse instrumento de imageamento é projetado para cobrir instantaneamente uma linha completa de pixels de uma só vez ao longo do FOV. Isso é conseguido usando uma matriz linear de detectores do tipo CCD (*charge-coupled device*, ou dispositivo de cargas acopladas). A radiação proveniente do terreno é separada por dispositivos ópticos especiais em quatro bandas espectrais. As matrizes lineares do CCD operam no modo chamado *pushbroom*. Um telescópio de grande abertura angular forma uma imagem instantânea dos elementos adjacentes do terreno na matriz de detectores no plano focal do instrumento. Isso significa que num mesmo instante uma linha inteira (de 60 km de largura por 10 ou 20 m de comprimento, para o modo mono-espectral (M) ou multi-espectral (X), respectivamente). Após a leitura dos valores de radiância em todos os detectores do CCD, o satélite terá avançado 20 ou 10 metros (modo X ou P, respectivamente) no terreno, e uma nova linha de detectores será lida. Ou seja, o próprio movimento do satélite é que produz a varredura no sentido latitudinal da órbita, enquanto que o imageamento longitudinal (transversal ao sentido da órbita) é promovido pelo arranjo matricial fixo de detectores. Os sinais gerados pelos detectores (que são fotodiodos) são lidos seqüencialmente num determinado intervalo de tempo. Assim, embora o arranjo linear de detectores não faça a “varredura” da linha para serem sensibilizados pela luz, os detectores são varridos eletronicamente para gerar o sinal de saída.

O telescópio de cada HRVIR tem um campo de visada (FOV) de 4° que, à altitude de 830 km, corresponde a uma largura de 60 km no terreno. Esta largura é vista instantaneamente pela linha de 6.000 detectores da matriz linear de detectores. Assim, cada HRVIR gera uma imagem de 60 km de largura ao longo da órbita. Cada detector gera um pixel por vez, e cada pixel tem uma dimensão de 10 m por 10 m no modo de alta resolução. Quando detectores adjacentes são varridos (lidos) eletronicamente aos pares, eles geram pixels correspondentes a uma área no terreno medindo 20 m x 20 m resultando numa

imagem com 20 m de resolução espacial. O movimento do satélite ao longo de sua órbita resulta em varreduras de linhas sucessivas e isso completa a imagem.

O HRVIR tem dois modos de operação quanto à resolução espacial, dependendo se os detectores são lidos um a um (modo M, de monoespectral) ou em pares (modo X, de multiespectral). A luz que entra no sistema óptico é dividida em quatro feixes correspondentes a quatro bandas espectrais por um divisor espectral constituído de prismas e filtros. Esses feixes são posteriormente focalizados nas quatro matrizes de detectores (uma para cada banda). Dessa forma, quatro linhas de detectores geram simultaneamente quatro planos espectrais para uma mesma linha no terreno; portanto, as imagens geradas por cada banda para uma mesma superfície do terreno são perfeitamente registradas, pois cada um de seus pixels provêm simultaneamente de um mesmo feixe eletromagnético.

Os HRVIRs têm três modos de imageamento: o multiespectral (modo X) correspondendo às bandas B1, B2 e B3, mais a banda do infravermelho médio, com uma resolução espacial no terreno equivalente a 20 metros; o modo monoespectral (M) correspondendo à banda B2 (vermelho) com uma resolução de 10 metros no terreno; e o modo X + M que combina os modos X e M. O imageamento feito por cada instrumento HRVIR é inteiramente independente entre si.

Na entrada óptica de cada HRVIR do Spot-4 há um espelho com um mecanismo que permite o desvio da visada para uma faixa de terreno adjacente à projeção da órbita no terreno. Isso quer dizer que o Spot-4 tem a possibilidade de ter visadas laterais, fora do nadir. Esse redirecionamento da visada para as laterais pode ser de $\pm 27^\circ$ em relação ao nadir. Esse desvio é controlado por um mecanismo que permite uma graduação lateral com incrementos de $0,3^\circ$. Tal característica pode ser usada para adquirir uma imagem, em resposta a uma solicitação de programação pelo usuário, em qualquer posição afastada de até 450 km para ambos os lados da trajetória do satélite no terreno; isso é conseguido com os ângulos extremos ($+27^\circ$ ou $-$

27°). Outra função dessa característica é a de ser usada principalmente para a obtenção de imagens de um mesmo local mas em ângulos diferentes para a geração de pares estereoscópicos com as finalidades de restituição fotogramétrica e mapeamento do relevo. Também é usada para permitir o posicionamento do instrumento para a direção de uma fonte de calibração.

Um aspecto sensível do Spot-4 é a calibração, que se dá de duas maneiras. A finalidade da calibração é a obtenção de valores radiométricos entre os pixels que guardem uma relação entre si e também que guardem uma relação com as propriedades de reflexão da energia eletromagnética dos alvos. O primeiro modo de calibração é aquele chamado calibração intra-banda, ou também de normalização de respostas dos detectores CCD. O objetivo dessa calibração é balancear a resposta dos 3.000 detectores de cada banda quando o instrumento vê uma superfície perfeitamente uniforme. Ou seja, para uma mesma banda, todos os detectores têm que gerar o mesmo sinal quando são sensibilizados por uma mesma fonte. A segunda calibração é chamada de calibração absoluta e tem a finalidade de medir a responsividade dinâmica do instrumento através do estabelecimento de uma relação precisa entre uma fonte externa perfeitamente estável (o Sol) e o sinal de saída do instrumento. O sistema de calibração é usado a intervalos regulares para verificar e, se necessário, ajustar a resposta do instrumento. Alguns dos efeitos que podem suscitar de ajustes compensatórios são mudanças na transmissividade dos componentes ópticos como resultado do envelhecimento em órbita, distorções mecânicas causadas por variações de temperatura, variações no ruído gerado pela eletrônica do imageamento ou dos detectores do CCD.

O sensor Vegetation é uma câmera multiespectral também num sistema de imageamento do tipo *pushbroom*, mas de baixa resolução espacial (1,1 km, Tabela 4). As funções desse sensor são permitir um monitoramento contínuo, regional e global da biosfera continental e das culturas. Com seu grande campo angular (FOV de 101°, o que corresponde a uma faixa de imageamento de 2.250 km) consegue cobrir 90% da terra num só dia, e os outros 10% restantes

no dia seguinte. Como há coincidência de bandas entre o HRVIR e o VGT, os dois sistemas são bastante complementares.

Da mesma forma que o Landsat, o Spot transmite o sinal de imagens para estações localizadas em diversas partes da Terra. Além disso, tem um sistema de gravação a bordo, que permite o armazenamento de até 40 minutos de gravação (uma cena HRVIR de 60 km por 60 km é imageada em menos de 15 segundos).

5. PROGRAMA BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO

O Brasil possui basicamente dois programas de sensoriamento remoto. Um, é denominado CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*, Satélite Sino-Brasileiro de Sensoriamento Remoto, com descrição mais pormenorizada na internet, no endereço: <http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/index.html>, e o outro MECB (Missão Espacial Completa Brasileira, cuja descrição pode ser encontrada também na internet no endereço: <http://www.inpe.br/programas/mecb/default.htm>) (INPE, 2000a,b).

O programa CBERS é uma missão conjunta entre o Brasil, através do INPE, e a China, através da CAST (Agência Chinesa de Ciência e Tecnologia), e envolve a construção, lançamento e gerenciamento operacional de dois satélites de sensoriamento remoto. O primeiro foi lançado em 14/10/1999 a partir da base de lançamentos de Tayuan, pelo veículo lançador Longa Marcha 4B.

O CBERS é um satélite com massa de 1.450 kg, com dimensões de 1,8 x 2,0 x 2,2 m, além de ter os painéis solares com 6,3 x 2,6 m. Está a uma altitude de 778 km, em órbita circular (período de 100,26 minutos), quase polar (inclinação de 98,5° em relação ao plano equatorial), heliossíncrona com cruzamento do equador no sentido norte-sul às 10:30 da manhã. Nesta configuração orbital obtém imagens aproximadamente com mesma escala, recobre quase que inteiramente a Terra a intervalos regulares de 26 dias, e os imageamentos de um mesmo ponto sempre ocorrem a uma mesma hora solar.

A constituição de sua carga útil é muito interessante, pois traz características de diversos outros satélites, e ainda oferece novidades em termos de imageamento. Possui três sensores a bordo: a câmera CCD (*charge-coupled device*, dispositivo de cargas acopladas), o imageador por varredura mecânica IRMSS (*infrared multispectral scanner system*, sistema varredor multiespectral de infravermelho), e a câmera WFI (*wide field imager*, imageador de grande campo de visada).

A câmera CCD/CBERS apresenta semelhanças com o HRVIR do Spot-4. Suas principais características estão na Tabela 5 e uma visão de seus constituintes está na Figura 1.

TABELA 5 - CÂMERA CCD DO CBERS

Bandas espectrais	0,51 - 0,73 μm (pancromático) 0,45 - 0,52 μm (azul) 0,52 - 0,59 μm (verde) 0,63 - 0,69 μm (vermelho) 0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo)
Resolução espacial no terreno	20 m x 20 m
Resolução temporal	26 dias no nadir; até 3 dias com visada lateral
FOV	8,3°
Faixa de imageamento	113 km
Visada lateral	$\pm 32^\circ$
Taxa de dados	2 x 53 Mbits/segundo

FONTE: INPE (2000)

A câmera CCD/CBERS é um sensor que cobre as faixas espectrais do visível e se estende até o infravermelho próximo. Com esse conjunto de bandas consegue-se atender uma grande parcela da demanda por dados de sensoriamento remoto. Além disso, possui uma banda pancromática que cobre todo o visível e, ao contrário do Spot-4, esta banda do CBERS é mais larga, porém com menor resolução espacial. O fato de cobrir todo o visível permite um aproveitamento da experiência e das técnicas de fotointerpretação feitas sobre fotografias aéreas preto e branco normais.

A sua faixa de imageamento é maior que a do Spot, mas menor que a do Landsat. A capacidade de imageamento lateral, ou fora do nadir, em ângulos bastante amplos ($\pm 32^\circ$), é uma vantagem comparativa importante em relação aos sistemas existentes. Essa maior capacidade de visada lateral permite que se possam fazer revisitas com até 3 dias entre passagens. Isso é uma característica relevante em situações de ocorrência de eventos que precisam ser monitorados em curto espaço de tempo.

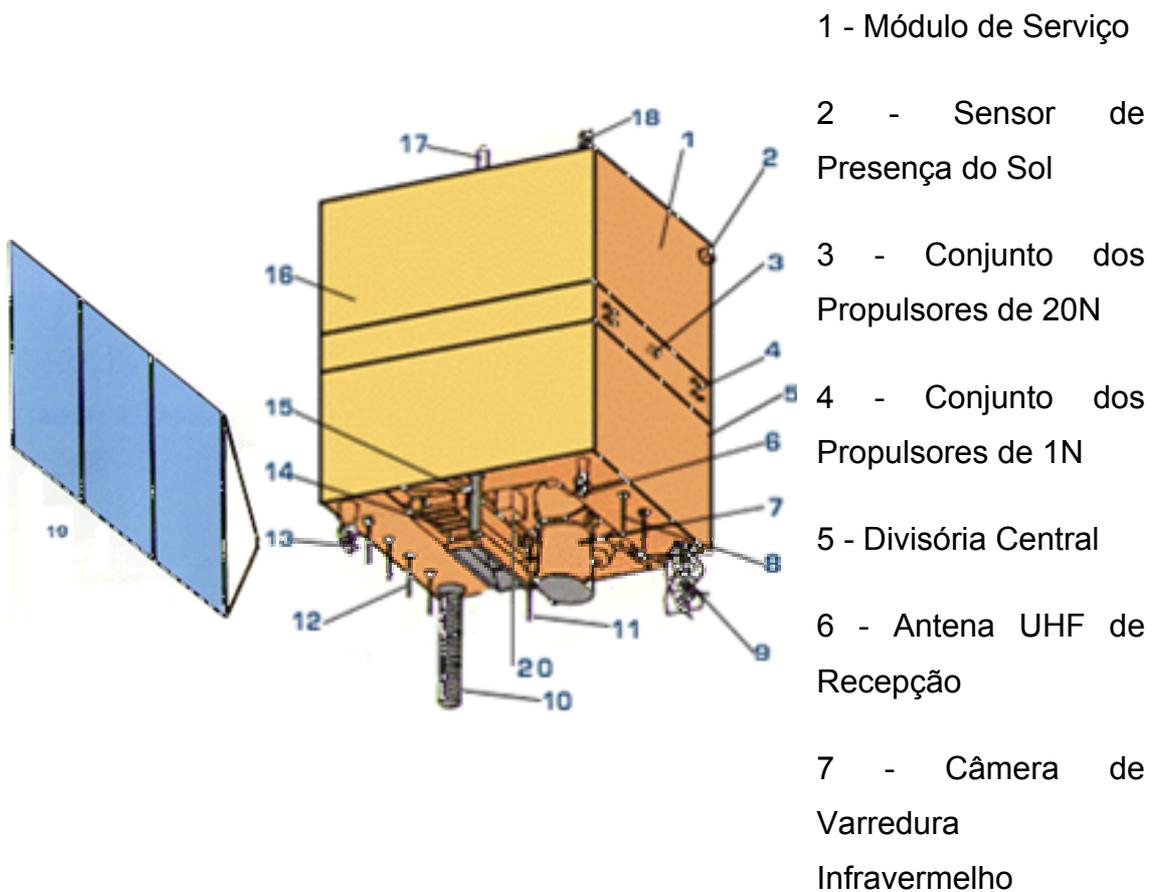


Fig. 1 – Satélite CBERS e seus componentes.

FONTE: INPE (2000)

Outro componente do Cbers é o imageador por varredura mecânica (IRMSS). Esse sensor opera com um FOV de $8,8^\circ$, o que equivale a 120 km de largura no terreno. Possui quatro bandas espectrais, sendo uma que abrange desde o visível até o infravermelho próximo (0,50 a $1,1 \mu\text{m}$), duas no infravermelho DSR/INPE

médio (1,55 a 1,75 μm e 2,08 a 2,35 μm). Essas três bandas espectrais possuem resolução espacial de 80 metros no terreno. Uma quarta banda espectral localiza-se no infravermelho termal (10,4 a 12,5 μm). Sua resolução temporal é de 26 dias, e não possui capacidade de visada fora do nadir.

O outro sensor a bordo do CBERS, e de interesse para o sensoriamento remoto, é a câmera WFI (imageador de grande campo de visada). É um sensor baseado na tecnologia CCD; portanto, não possui componentes móveis para o imageamento, o qual é feito eletronicamente na direção transversal à órbita, e passivamente pelo próprio deslocamento do satélite no sentido da órbita. A WFI/CBERS possui apenas duas bandas espectrais: uma na região do vermelho (0,63 a 0,69 μm) e outra na do infravermelho próximo (0,77 a 0,89 μm). A WFI/Cbers possui um FOV de 60°, o que corresponde a uma faixa de 890 km no terreno. Isso garante ao sensor um período de revisita de apenas cinco dias. Como em todo sistema há uma solução de compromisso entre os diversos requisitos da missão, no caso da WFI/CBERS, para ter essa resolução temporal e cobrir uma faixa extensa de terreno a cada passagem, houve um sacrifício da resolução espacial, que passou a ser de 260 m.

A WFI/CBERS, apesar da baixa resolução espacial, apresenta-se como um sensor de alto potencial de aplicação. Possui características intermediárias entre todos os sistemas existentes para o estudo da superfície terrestre. Sua resolução espacial não é tão boa quanto a do ETM+/Landsat-7 (30 m na maioria das bandas) mas também não é melhor do que a do AVHRR/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer* da National Oceanic and Atmospheric Administration, Radiômetro Avançado com Resolução Muito Alta), que é de 1,1 km. O nome deste sensor pode induzir a um equívoco de entendimento quanto à sua resolução espacial. Porém, é que o AVHRR/NOAA é originariamente um sensor meteorológico e, para esta aplicação, a resolução espacial de 1,1 km é muito alta; ao contrário do que ocorre para boa parte das aplicações de sensoriamento remoto, onde são exigidas resoluções melhores do que essa. Além disso, a WFI/CBERS, embora não possua a alta resolução temporal de um dia do AVHRR/NOAA, também não possui a baixa resolução

temporal do HRVIR/Spot, que é de 26 dias no nadir. Com essas características, é provável que se consiga identificar diversas aplicações que demandem tais resoluções intermediárias.

As suas duas bandas espectrais são dispostas em pontos estratégicos do espectro eletromagnético e são destinadas principalmente ao estudo da vegetação. Nestas duas regiões (vermelho e infravermelho próximo) são os locais em que a vegetação apresenta o maior contraste espectral, ou seja, a banda do vermelho é de alta absorção de energia, e a do infravermelho próximo é de alta reflexão. Esse contraste deverá ser explorado através dos índices de vegetação, que visam exatamente a realçar a vegetação representada numa cena de sensoriamento remoto.

Os dados do CBERS são gravados por estações terrenas; no caso Brasil, a estação está em Cuiabá, MT. O processamento dos dados para que sejam gerados os produtos a serem distribuídos aos usuários é feito em Cachoeira Paulista, SP. O catálogo para verificação de cobertura de imageamento e qualidade de imagens pode ser acessado a partir da internet no seguinte endereço: <http://www.dgi.inpe.br/index.html> (INPE, 2000a).

6. SATÉLITES NOAA

A NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que é uma agência governamental dos Estados Unidos, é responsável pelos satélites também chamados NOAA (Kidwell, 1997). A série de satélites NOAA tem sido de grande importância no campo da meteorologia. São satélites de órbita heliosíncrona, circular a aproximadamente 850 km. Entre os sensores a bordo, um que será aqui descrito é o AVHRR-3/NOAA (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, Radiômetro Avançado de Muito Alta Resolução). Como esclarecido anteriormente, esta resolução pode ser considerada muito alta para aplicações em meteorologia; mas para muitas aplicações de sensoriamento remoto, esta resolução do AVHRR-3/NOAA é considerada baixa. O AVHRR-3 faz parte dos sensores a bordo dos satélites NOAA K, L e M (que recebem após o lançamento os números de 15, 16 e 17, respectivamente).

O AVHRR-3/NOAA é um radiômetro imageador de varredura mecânica que opera em seis bandas espectrais (Tabela 6). Os dados adquiridos durante cada passagem permitem, após o processamento em terra, a análise de parâmetros de interesse em hidrologia, oceanografia, uso da terra e meteorologia. Os dados dos canais 1, 2 e 3A são usados para monitorar a energia refletida nas porções do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Esses dados permitem a observação da vegetação, de nuvens, lagos, linhas de costa, neve, aerossóis e gelo. Os dados dos canais 3B, 4 e 5 são usados para determinar a energia radiativa da temperatura da superfície terrestre, da água, e do mar bem como das nuvens sobre eles. Apenas cinco canais podem ser transmitidos simultaneamente; os canais 3A e 3B são comutados para passagens diurnas/noturnas, conforme necessário, enquanto que o 3B só opera durante as passagens matutinas do satélite. A Tabela 6 apresenta as características dos canais do AVHRR-3/NOAA. O campo de visada (FOV) do AVHRR-3/NOAA é de $\pm 55,4^\circ$, o que equivale a 2.250 km de largura de faixa imageada no terreno. Com esta largura de faixa e com a taxa de 14 revoluções orbitais por dia, a terra toda é coberta a cada dia. Portanto, a resolução temporal do AVHRR-3/NOAA é muito maior que a dos outros satélites de sensoriamento remoto vistos até aqui. Porém, há o sacrifício da resolução espacial que, no seu caso, é de 1,1 km para os pixels no nadir. Os dados do AVHRR-3/NOAA podem ser recebidos por antenas menores e também a custos reduzidos.

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DO AVHRR-3/NOAA-K, L E M

Canal	Banda espectral (μm)	Resolução espacial (no nadir, em km)
1 (visível)	0,580 – 0,68	1,1
2 (infravermelho próximo)	0,725 – 1,00	1,1
3A (infravermelho médio)	1,580 – 1,64	1,1
3B (infravermelho médio)	3,550 – 3,93	1,1
4 (infravermelho termal)	10,300 – 11,3	1,1
5 (infravermelho termal)	11,500 – 12,5	1,1

FONTE: NOAA (2000)

7. PROGRAMA EOS (EARTH OBSERVING SYSTEM)

O programa EOS (*Earth Observing System*, Sistema de Observação da Terra) é um programa de longo prazo (pelo menos 15 anos), cuja missão é gerar conhecimento científico em profundidade sobre o funcionamento da Terra como um sistema. Tem-se como premissa que esse conhecimento científico forneceria os fundamentos para o entendimento das variações naturais e induzidas pelo homem no sistema climático da Terra e também forneceria uma base lógica para as tomadas de decisão quanto às políticas ambientais (King, 1999). É um programa que envolve vários países e uma grande gama de satélites e sensores.

O primeiro grande satélite desse programa denomina-se Terra, anteriormente chamado EOS/AM-1. O nome “Terra” surgiu após um concurso nacional (nos Estados Unidos) entre estudantes de nível elementar e médio, cuja ganhadora foi uma aluna de 13 anos. O satélite Terra, lançado em 18/12/1999, está numa órbita circular a 705 km de altitude, quase polar, heliossíncrona, cruzando o equador às 10:30 da manhã na órbita descendente, e à 1:30 da madrugada no sentido ascendente.

Esse satélite possui cinco sensores: MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*, Espectrorradiômetro de Imageamento de Moderada Resolução), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*, Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Termal e Reflexão), MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*, Espectrorradiômetro Imageador em Múltiplos Ângulos), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System Network*, Sistema de Medição de Energia Radiante da Terra e Nuvens), e MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*, Medição da Poluição na Troposfera). A seguir é feita uma breve descrição dos três primeiros sensores.

O Modis é um sensor com 36 bandas espectrais, cobrindo desde o limite inferior do visível (0,366 μm) até o infravermelho termal (14,385 μm). É um sistema de varredura transversal à direção da órbita, cujo espelho faz a

varredura a uma taxa de 20,3 rpm. Cada varredura cobre uma faixa de 2.330 km no sentido transversal à órbita e 10 km no sentido longitudinal à órbita, no nadir. Suas dimensões são de 1,0 m x 1,6 m x 1,0 m, e massa de 250 kg. Sua resolução espacial é dependente das bandas, sendo de 250 m para as bandas 1 e 2, de 500 m para as bandas 3-7, e de 1.000 m para as bandas 8-36. As principais aplicações são traçar limites terra/nuvens, avaliar propriedades da superfície terrestre (vegetação, principalmente), nuvens e aerossóis, cor oceânica, fitoplâncton, biogeoquímica, vapor d'água na atmosfera, nuvens do tipo cirrus, temperatura da superfície e das nuvens, medições de ozônio.

O sensor Aster tem 405 kg e possui três subsistemas, um para cada região espectral, com alta resolução espacial. Na região do visível/ infravermelho próximo tem três bandas com 15 m de resolução espacial, sua faixa de imageamento é de 60 km, e pode fazer visadas laterais de $\pm 24^\circ$, pode cobrir até 318 km fora do nadir. Esse sub-sistema é composto de dois telescópios, sendo que um deles pode apontar para trás na mesma direção da órbita, permitindo que se gerem imagens estéreo. O sub-sistema responsável pela região do infravermelho médio mede a radiação em seis bandas entre 1,60 μm e 2,46 μm , com 30 m de resolução espacial, e numa faixa de imageamento de 60 km. O terceiro sub-sistema do sensor Aster é responsável pela medição da radiação em cinco bandas espectrais no infravermelho termal, entre 8,125 μm e 11,65 μm , com resolução espacial de 90 m e faixa de imageamento de 60 km. Esses dois últimos sub-sistemas possuem capacidade de apontamento de $\pm 8,54^\circ$ lateralmente, o que permite que qualquer ponto na superfície possa ser imageado pelo menos a cada 16 dias.

O terceiro sensor do Terra aqui descrito é o Misr. Este sensor faz imagens da terra em nove direções de apontamentos diferentes. Uma câmera aponta para o nadir e outras oito cobrem diferentes ângulos de visada ($26,1^\circ$, $45,6^\circ$, $60,0^\circ$, e $70,5^\circ$ para frente e para trás na direção da órbita); as resoluções espaciais variam de 250 m no nadir a 275 m para a câmera com ângulo mais extremo. A faixa de imageamento é de 360 km e, além disso, cada câmera possui quatro bandas espectrais entre o visível e o infravermelho próximo.

8. PROGRAMAS DE RADAR

O termo radar vem de *radio detection and ranging*, ou detecção de alvos e avaliação de distâncias por ondas de rádio. A operação dos radares se dá em comprimentos de onda bem maiores que os do visível e infravermelho. Operam entre 40 GHz (banda K-alfa) e 300 MHz (banda P) (ou entre 0,8 cm e 100 cm). Os radares, como geram sua própria iluminação, podem funcionar tanto durante o dia como durante a noite e, para alguns comprimentos de onda, praticamente não sofrem interferências atmosféricas (Short, 1998). Essas duas características são importantes, pois ao poderem imagear a qualquer hora, podem otimizar seu posicionamento em relação ao Sol para captar energia solar em seus painéis solares e também operar em horários onde as estações de recepção estão com mais tempo livre, evitando congestionamentos. E, ao serem praticamente imunes às condições atmosféricas, oferecem grande certeza de aquisição de imagens em condições adequadas para uso; os satélites que operam na região óptica têm grande quantidade de imagens inaproveitáveis por causa da cobertura de nuvens.

Em geral um sistema radar é constituído dos seguintes elementos: um gerador que envia pulsos a intervalos regulares a um transmissor. Este os envia a um duplexador (ou multiplexador), que os envia a uma antena direcional que modula e focaliza cada pulso num feixe transmitido ao alvo; os pulsos que retornam são captados pela mesma antena e enviados a um receptor que os converte (e amplifica) em sinais de vídeo, que são conduzidos a um dispositivo de gravação que pode armazená-los digitalmente para processamento posterior. Cada pulso dura apenas alguns microssegundos (em geral há cerca de 1.500 pulsos por segundo). O conhecimento da teoria radar é um tanto quanto complexa, exigindo conhecimentos de várias áreas, entre elas as de física, geometria, eletrônica, e processamento de sinais.

Atualmente há dois grandes programas que envolvem o imageamento da superfície terrestre por sensores radar, a bordo de stélites: o ERS (*European Remote Sensing Satellite*, Satélite Europeu de Sensoriamento Remoto) e o Radarsat, do Canadá.

O programa ERS é europeu e iniciou-se com o ERS-1, cujo lançamento deu-se em 17/7/1991 pelo lançador francês Ariane-4, a partir da base de lançamentos de Kourou, na Guiana Francesa; o ERS-2 foi lançado em 21/4/1995 (Francis et al., 1995). Os dois satélites têm órbita síncrona com o Sol, com cruzamento do equador, no percurso descendente, às 10:30 da manhã, hora local; a órbita é quase polar ($98,5^\circ$), com altitude média de 780 km, e tem um intervalo de revisita de 35 dias. O ERS-2, que é muito semelhante ao ERS-1, pesa cerca de 2,3 toneladas, tem dimensões de 2 m x 2 m de base e 3 m de altura, e tem um painel solar de 12 m x 2,4 m.

O ERS-2 é constituído de vários sensores. Um de especial interesse para o sensoriamento remoto é o radar imageador, com antena de 10 m, e que pode operar no chamado modo “imagem”, em banda C (frequência de 5,3 GHz ou comprimento de onda de 5,6 cm), com polarização VV (transmissão e recepção verticais), e num ângulo de visada fixo em 23° no meio da faixa de imageamento. Fornece imagens com resolução espacial de 30 m x 30 m, numa cena de 100 km x 100 km. Esse modo de operação é o mais largamente utilizado para aplicações terrestres do ERS. Mas esse radar também pode operar no modo onda (*wave mode*, modo onda) e, então, adquire imagens de 5 km x 5 km a cada 200 ou 300 km num sistema de amostragem, com aplicação em oceanografia.

O ERS-2 tem ainda um radar para a medição da velocidade e direção do vento sobre os oceanos; um radar altímetro para fazer medições precisas dos sinais de retorno provenientes dos oceanos e das superfícies de gelo; um radiômetro de varredura mecânica que opera nos comprimentos de onda de 1,6; 3,7; 11 e 12 μ m, com resolução espacial de 1 km x 1 km (no nadir) e com uma largura de faixa de imageamento de 500 km. Também leva um instrumento denominado GOME (*Global Ozone Monitoring Experiment*, Experimento de Monitoramento Global do Ozônio).

O outro satélite com sistema radar de grande importância para o sensoriamento remoto é o Radarsat, do Canadá, lançado em 4/11/1995. O Radarsat tem órbita circular de 798 km de altitude, circulando a Terra a cada

100,7 minutos, 14 vezes por dia , com inclinação de 98,6° em relação ao equador. Sua órbita é heliossíncrona, mas com passagem pelo equador às 6:00 (descendente), hora local; e o período de revisita é de 24 dias para um mesmo modo de operação e ângulo de incidência, embora possa ter imageamentos distanciados de apenas 4,5 dias para ângulos de incidência diferentes. Essa configuração orbital permite que o Radarsat explore ao máximo as condições iluminação de seu painel solar, e ao mesmo tempo passa sobre as estações de recepção em horários não utilizados por outros sistemas evitando, assim, conflitos de gravação no momento da aquisição das imagens (CCRS, 2000).

O Radarsat, com massa de 3.200 kg, opera na banda C (frequência de 5,3 GHz ou comprimento de onda de 5,6 cm), em polarização HH (transmissão e recepção da onda eletromagnética polarizada horizontalmente). É um sistema versátil, possui vários modos de imageamento, pode variar o ângulo de incidência (com antena de 15 m x 1,5 m direcionada para a esquerda no hemisfério sul) desde 20° até 50°, a largura da faixa de imageamento pode variar de 35 km a 500 km, e as resoluções espaciais podem variar de 10 m a 100 m. A filosofia que norteia o sistema é a de fornecer o mais prontamente possível a imagem adquirida ao usuário. O tempo decorrido entre a aquisição e o recebimento pode ser tão rápido quanto um dia.

9. REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS). **Radarsat program**. [online]. <<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca>>. May 2000.

Centre National d'Études Spatiales (CNES). **SPOT program**. [online]. <http://spot4.cnes.fr/spot4_gb/index.htm>. May 2000.

European Space Agency (ESA). **ERS satellite**. [online]. <<http://services.esrin.esa.it/erslist.htm>>. May 2000.

Francis, C.R. et al. The ERS-2 spacecraft and its payload. **ESA Bulletin**, n. 83, p. 12-31, Aug. 1995.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Aquisição de imagens**. [online]. <<http://www.dgi.inpe.br>>. May 2000a.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa CBERS**. [online]. <<http://www.inpe.br/programas/cbers/portugues/index.html>>. May 2000b.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Programa MECB**. [online]. <<http://www.inpe.br/programas/mecb/default.htm>>. May 2000c.

Kidwell, K.B. **NOAA polar orbiter data users guide**. Suitland, NOAA, 1997. 120p.

King, M.D. **EOS science plan**. Greenbelt, NASA, 1999. 397p.

King, M.D.; Greenstone, R. **EOS reference handbook**. Greenbelt, NASA, 1999. 361p. [online]. <http://eos.nasa.gov/eos_homepage/misc_html/refbook.html>. May 2000.

Lauer, D.T.; Morain, S.A.; Solomonson, V.V. The Landsat program: its origins, evolution, and impacts. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 831-838, July 1997.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Landsat program**. [online]. <landsat.gsfc.nasa.gov>. May 2000.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). **Introduction to the NOAA KLM system**. <<http://www2.ncdc.noaa.gov:80/docs/klm/>>. May 2000./

Novo, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 308p.

Short, N.M. **The remote sensing tutorial**. CDROM. Washington, NASA, 1998.