

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

MÓDULO DE TREINAMENTO:
SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E
GEOPOSICIONAMENTO: UMA APLICAÇÃO URBANA

Apostila Teórica 1: Sensoriamento Remoto

Autores: Cláudia A. Soares Machado e José Alberto Quintanilha

São Paulo
2008

Corpo docente:

- Professor Titular Denizar Blitzkow - dblitzko@usp.br
- Professor Doutor Edvaldo Simões da Fonseca Junior - edvaldoj@usp.br
- Professor Associado Jorge Pimentel Cintra - jpcintra@usp.br
- Professor Associado José Alberto Quintanilha - jaquinta@usp.br
- Professor Associado Nicola Paciléo Netto - pacileon@usp.br
- Cláudia Aparecida Soares Machado – Mestre em Engenharia – Doutoranda do Programa de Pós-Graduação da EPUSP - claudia.soares@poli.usp.br
- Fernando César Dias Ribeiro - Mestrando do Programa de Pós-Graduação da EPUSP - fabiano.cesar@poli.usp.br

Realização:

- PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
<http://www.pece.org.br/>
- AEP – Associação dos Engenheiros Politécnicos
<http://www.aep.poli.usp.br/>
- PTR – Departamento de Engenharia de Transportes da EPUSP <http://www.ptr.poli.usp.br/ptr/>
- LTG - Laboratório de Topografia e Geodésia da EPUSP
<http://www.ptr.poli.usp.br/ltg/>
- LGP – Laboratório de Geoprocessamento da EPUSP
<http://www.ptr.poli.usp.br/labgeo/>



Laboratório de Geoprocessamento

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1: (a) Pombos usados como plataforma de sensoriamento remoto, (b) Fotografia aérea adquirida a partir de um pombo como plataforma..... | 4 |
| Figura 2: Mais antiga fotografia aérea norte-americana, Boston – Massachusetts - 1860..... | 5 |
| Figura 3: São Francisco, Califórnia, EUA – maio de 1906..... | 5 |
| Figura 4: Piloto e fotógrafo a bordo de um avião AH-14 carregando uma câmera Graflex – 1915..... | 6 |
| Figura 5: Equipamento Wild A5 Stereo-Autograph fabricado na Suíça..... | 7 |
| Figura 6: Unidade móvel de processamento fotográfico..... | 8 |
| Figura 7: Imagem de RADAR do projeto RADAM..... | 11 |
| Figura 8: Avião norte-americano militar de espionagem U-2..... | 13 |
| Figura 9: Satélite soviético Sputnik-1..... | 13 |
| Figura 10: Satélite norte-americano de reconhecimento Corona..... | 14 |
| Figura 11: Avião de resgate das imagens do satélite Corona..... | 14 |
| Figura 12: Imagem do satélite Corona..... | 15 |
| Figura 13: Satélite soviético Zenit e a preparação do foguete para o seu lançamento..... | 15 |
| Figura 14: Imagem do satélite norte-americano U.S. KH-11..... | 16 |
| Figura 15: Imagem do satélite da NASA TIROS-1..... | 17 |
| Figura 16: (a) Satélite TIROS-1 (b) satélite ERTS-1..... | 17 |
| Figura 17: Satélite LANDSAT-5..... | 18 |
| Figura 18: Imagens LANDSAT..... | 19 |
| Figura 19: Satélite IKONOS..... | 23 |
| Figura 20: Satélite EROS A1..... | 23 |
| Figura 21: Satélite QuickBird-II..... | 24 |
| Figura 22: Satélite OrbView-3..... | 24 |
| Figura 23: Imagem IKONOS - incêndio florestal na Califórnia..... | 25 |
| Figura 24: Imagem IKONOS - desastre no World Trade Center..... | 26 |
| Figura 25: Estação terrena de rastreamento e comando de satélite em Cuiabá..... | 28 |
| Figura 26: Satélite CBERS-I | 29 |
| Figura 27: Foguete chinês Longa Marcha 4B..... | 30 |
| Figura 28: Órbita hélio-síncrona do satélite CBERS..... | 30 |
| Figura 29: Imagem do sensor CCD do satélite CBERS-II..... | 33 |

| | |
|---|-----|
| Figura 30: Imagem do sensor IRMSS do satélite CBERS-II..... | 34 |
| Figura 31: Imagem do sensor WFI do satélite CBERS-II..... | 34 |
| Figura 32: Corrente do Golfo - imagem do sensor MODIS..... | 37 |
| Figura 33: Onda eletromagnética..... | 38 |
| Figura 34: Decomposição da luz solar no prisma..... | 39 |
| Figura 35: Espectro eletromagnético..... | 42 |
| Figura 36: Interação entre a energia eletromagnética e as feições da Terra..... | 43 |
| Figura 37: Assinatura espectral..... | 44 |
| Figura 38: Veículo do tipo “truck-mounted boom”..... | 46 |
| Figura 39: Sensoriamento remoto aéreo: (a) aeronave, (b) imagem..... | 47 |
| Figura 40: Lançamento do ônibus espacial Endeavour para a missão SRTM..... | 48 |
| Figura 41: Imagem SRTM, Monte Kilimanjaro, Tanzânia..... | 48 |
| Figura 42: Imagem de satélite: estádio de futebol – São Paulo – SP..... | 57 |
| Figura 43: Cores-luz primárias..... | 59 |
| Figura 44: Imagem LANDSAT TM..... | 59 |
| Figura 45: Textura em uma imagem de região agrícola..... | 60 |
| Figura 46: Imagem IKONOS do obelisco em Washington, EUA..... | 61 |
| Figura 47: Imagem CBERS..... | 61 |
| Figura 48: Elementos de interpretação de imagens: associação..... | 62 |
| Figura 49: Elementos de interpretação de imagens: padrão..... | 63 |
| Figura 50: Esticamento linear de contraste..... | 71 |
| Figura 51: Equalização do histograma..... | 71 |
| Figura 52: Equalização de uma imagem..... | 72 |
| Figura 53: Filtragem espacial: convolução..... | 74 |
| Figura 54: Modelo RGB..... | 79 |
| Figura 55: Modelo IHS..... | 79 |
| Figura 56: Representação da classificação supervisionada..... | 86 |
| Figura 57: Representação da classificação não-supervisionada..... | 87 |
| Figura 58: Objetos e classes..... | 89 |
| Figura 59: Fluxograma dos procedimentos adotados na classificação orientada a objetos..... | 96 |
| Figura 60: Fusão de dados..... | 100 |
| Figura 61: Concepção de imagens hiperespectrais..... | 101 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características dos sensores do satélite CBERS..... | 31 |
| Tabela 2: Principal divisão de espectro eletromagnético..... | 41 |
| Tabela 3: Principais missões de satélites: em operação e projetos futuros..... | 50 |
| Tabela 4: Proposta de relação entre a resolução espacial (no terreno) e a escala..... | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPRS: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing

AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

AVIRIS: Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer

CAST: Chinese Academy of Spacial Technology

CBERS: China-Brazil Earth Resources Satellite

CCD: Charged Coupled Device

CGIS: Canadian Geographic Information System

CNES: Centre National d'Etudes Spatiales

DCS: Data Collection System

DNPM: Departamento Nacional de Produção Mineral

EROS: Earth Remote Observation System

ERTS: Earth Resources Technology Satellite

ETM: Enhanced Thematic Mapper

EUA: Estados Unidos da América

GEMS: Goodyear Mapping System

GIS: Geographic Information System

GPS: Global Positioning System

GSD: Ground Sample Distance

HRC: High Resolution Camera

IFOV: Instantaneous Field of View

IHS: Intensity, Hue, Saturation

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IRMSS: Infrared Multispectral Scanner

IRS: Indian Remote Sensing Satellite

IV: Infravermelho

IVP: Infravermelho Próximo

JPL: Jet Propulsion Laboratory

LANDSAT: Land Remote Sensing Satellite

LIDAR: Light Detection and Ranging

MA: Maranhão

MCT: Ministério da Ciência e Tecnologia

MECB: Missão Espacial Completa Brasileira

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MT: Mato Grosso

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NGA: National Geospatial-Intelligence Agency

NRSA: National Remote Sensing Agency

ONU: Organização das Nações Unidas

O-O: Orientado a objetos

OST: Outer Space Treaty
PIN: Plano de Integração Nacional
Pixel: Picture Element
RADAM: Projeto Radar na Amazônia
RADAR: Radio Detection and Ranging
RGB: Red, Green, Blue
SCD: Satélite de Coleta de Dados
SELPER: Sociedade Latino Americana de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Espacial
SEM: Space Environment Monitor
SIG: Sistema de Informação Geográfica
SLAR: Side-Looking Airborne Radar
SONAR: Sound Navigation and Ranging
SP: São Paulo
SPOT: Satellite Pour l'Observation de la Terre
SPRING: Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
TIROS: Television Infrared Observation Satellite
TM: Thematic Mapper
TMO: Técnica de modelagem de objetos
URSS: União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
USGS: United States Geological Survey
UV: Ultravioleta
V: Vermelho
VLS: Veículo Lançador de Satélite
WFI: Wide Field Imager

SUMÁRIO

| | |
|---|----------|
| INTRODUÇÃO..... | 1 |
| CAPÍTULO 1 | |
| EVOLUÇÃO HISTÓRICA..... | 3 |
| CAPÍTULO 2 | |
| DEFINIÇÃO..... | 35 |
| CAPÍTULO 3 | |
| A RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA..... | 38 |
| CAPÍTULO 4 | |
| PLATAFORMAS DE SENSORIAMENTO REMOTO..... | 46 |
| CAPÍTULO 5 | |
| SISTEMAS SENSORES E SUAS CARACTERÍSTICAS..... | 52 |
| CAPÍTULO 6 | |
| INTERPRETAÇÃO VISUAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO..... | 56 |
| CAPÍTULO 7 | |
| PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO..... | 65 |
| 7.1 RETIFICAÇÃO E RESTAURAÇÃO DA IMAGEM..... | 67 |
| 7.1.1 CORREÇÃO GEOMÉTRICA..... | 67 |
| 7.1.2 CORREÇÃO RADIOMÉTRICA..... | 68 |
| 7.1.3 REMOÇÃO DE RUÍDO..... | 68 |
| 7.2 REALCE NA IMAGEM..... | 69 |
| 7.2.1 MANIPULAÇÃO DE CONTRASTE..... | 69 |
| 7.2.1.1 LIMAR DE NÍVEL DE CINZA..... | 69 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 7.2.1.2 | FATIAMENTO..... | 70 |
| 7.2.1.3 | ESTICAMENTO DO CONTRASTE (STRETCH)..... | 70 |
| 7.2.1.4 | EQUALIZAÇÃO DO HISTOGRAMA..... | 71 |
| 7.2.2 | MANIPULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS..... | 72 |
| 7.2.2.1 | FILTRAGEM ESPACIAL..... | 72 |
| 7.2.2.2 | ANÁLISE DE FOURIER..... | 75 |
| 7.2.3 | MANIPULAÇÃO DE MÚLTIPLAS IMAGENS (BANDAS)..... | 76 |
| 7.2.3.1 | OPERAÇÕES MATEMÁTICAS ENTRE AS DIFERENTES BANDAS ESPECTRAIS..... | 76 |
| 7.2.3.2 | COMPONENTES PRINCIPAIS..... | 77 |
| 7.2.3.3 | COMPONENTES CANÔNICAS..... | 78 |
| 7.2.3.4 | TRANSFORMAÇÃO DO MODELO RGB PARA O MODELO IHS..... | 78 |
| 7.3 | CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM..... | 81 |
| 7.3.1 | CLASSIFICAÇÃO <i>PIXEL A PIXEL</i> | 83 |
| 7.3.1.1 | CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA..... | 84 |
| 7.3.1.2 | CLASSIFICAÇÃO NÃO-SUPERVISIONADA..... | 86 |
| 7.3.1.3 | CLASSIFICAÇÃO HÍBRIDA..... | 88 |
| 7.3.2 | CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS..... | 89 |
| 7.3.2.1 | TÉCNICA DE MODELAGEM DE OBJETOS..... | 90 |
| 7.3.2.2 | CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS ORIENTADA A OBJETOS..... | 95 |
| 7.3.2.3 | SEGMENTAÇÃO..... | 97 |
| 7.4 | FUSÃO DE DADOS E INTEGRAÇÃO COM SIG..... | 99 |
| 7.5 | ANÁLISE DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS..... | 101 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 7.6 | MODELAGEM BIOFÍSICA..... | 103 |
| 7.7 | TRANSMISSÃO E COMPRESSÃO DE IMAGENS..... | 104 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 106 |

SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG) E GEOPOSICIONAMENTO: UMA APLICAÇÃO URBANA

INTRODUÇÃO

O objetivo deste módulo de treinamento é a apresentação dos conceitos relacionados às novas tecnologias referentes à área de Informações Espaciais, ou seja, geoprocessamento, sensoriamento remoto, e sistemas de posicionamento por satélites (GPS), bem como uma aplicação prática dessas teorias em um ambiente urbano.

O módulo se destina a profissionais graduados que desejem conhecer e aplicar as inovações tecnológicas atualmente empregadas em várias áreas do conhecimento, notadamente em Engenharia.

Serão apresentados e discutidos conceitos, princípios e fundamentos necessários para que ao final do módulo de treinamento o profissional esteja apto a desenvolver análises e extrair resultados de um sistema de informação geográfica (SIG), com uma base de dados proveniente dos produtos de sensoriamento remoto e de GPS.

Nas aulas práticas as análises serão feitas no software SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas), desenvolvido pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Cada participante realizará os trabalhos práticos individualmente no computador, gerando os próprios resultados, de acordo com sua base de dados, que será disponibilizada durante o treinamento.

O propósito é a construção de uma visão sinóptica do que é possível realizar com SIGs. Para isso o módulo conta com uma carga horária de 100 horas/aula, distribuídas entre aulas teóricas e práticas, com acompanhamento de professores e assistentes com conhecimento e capacitação técnica em suas áreas de atuação, além do respaldo e seriedade impostos pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SENSORIAMENTO REMOTO

“O Homem deve elevar-se acima da Terra – ao topo da atmosfera e além – para assim somente entender na totalidade o mundo em que vive”.

Sócrates – 500 A.C.

CAPÍTULO 1: **EVOLUÇÃO HISTÓRICA**

Desde as eras mais remotas o Homem percebeu a vantagem de observar seu território de pontos elevados para melhor avaliar as suas redondezas. Do topo dos altos penhascos rochosos e dos galhos das mais altas árvores, eles obtinham informações vitais para sua sobrevivência, tais como a identificação de boas áreas para as caçadas ou a aproximação de inimigos.

O valor da “visão dos olhos dos pássaros¹” aumentou dramaticamente a partir do momento que foi direcionada para a confecção de desenhos e mais tarde mapas das regiões, que podiam ser estudados e compartilhados com outras pessoas para múltiplos propósitos.

A tecnologia do sensoriamento remoto vem sendo utilizada a mais de um século. O sensoriamento remoto moderno começou com a invenção da fotografia e da câmera fotográfica a mais de 150 anos atrás. Nicéphore Niepce, William Henry Fox Talbot e Louis Jacques-Mandé Daguerre demonstraram ao mundo sua nova tecnologia em 1839. O diretor do Observatório de Paris, François Arago, defendia o uso de fotografias aéreas para pesquisas em topografia no começo da década de 1840. No início o sensoriamento remoto se dava apenas na forma de fotografias adquiridas a partir de balões cativos² e mais tarde a partir de aeronaves e espaçonaves. Nos primórdios do sensoriamento remoto eram utilizados como plataformas para as câmeras até mesmo pipas e pombos. Os pombos eram umas das mais modernas plataformas para fotografias aéreas. Uma esquadrilha de pombos (figura 1a) atuou na Bavária,

¹ Do original “bird’s-eye view”.

² Balão cativo: balão em forma de zepelim preso a um fio e que tem anexado um sensor de temperatura. Este fio pode atingir um comprimento de 1000 metros o que permite elevar o balão cativo à altitude desejada (inferior a 1000 metros), retirando os valores de temperatura do ar à altitude considerada e que são transmitidos diretamente a um receptor fixo à superfície. O balão cativo é ideal para obter-se perfis verticais de temperatura (variação da temperatura com a altitude) no caso do sensor anexado ser de temperatura. Pode também ser anexado um sensor de umidade relativa do ar ou de pressão, (e no caso em questão uma câmara fotográfica).

(Fonte: http://geofisica.fc.ul.pt/actividades/dias_abertos0405.htm)

Alemanha, carregando miniaturas de câmeras que fotografavam automaticamente, tal como a fotografia apresentada na figura 1b, feita em 1903 de um castelo bávaro. Os objetos irregulares em ambos os lados da imagem são as asas do pombo.

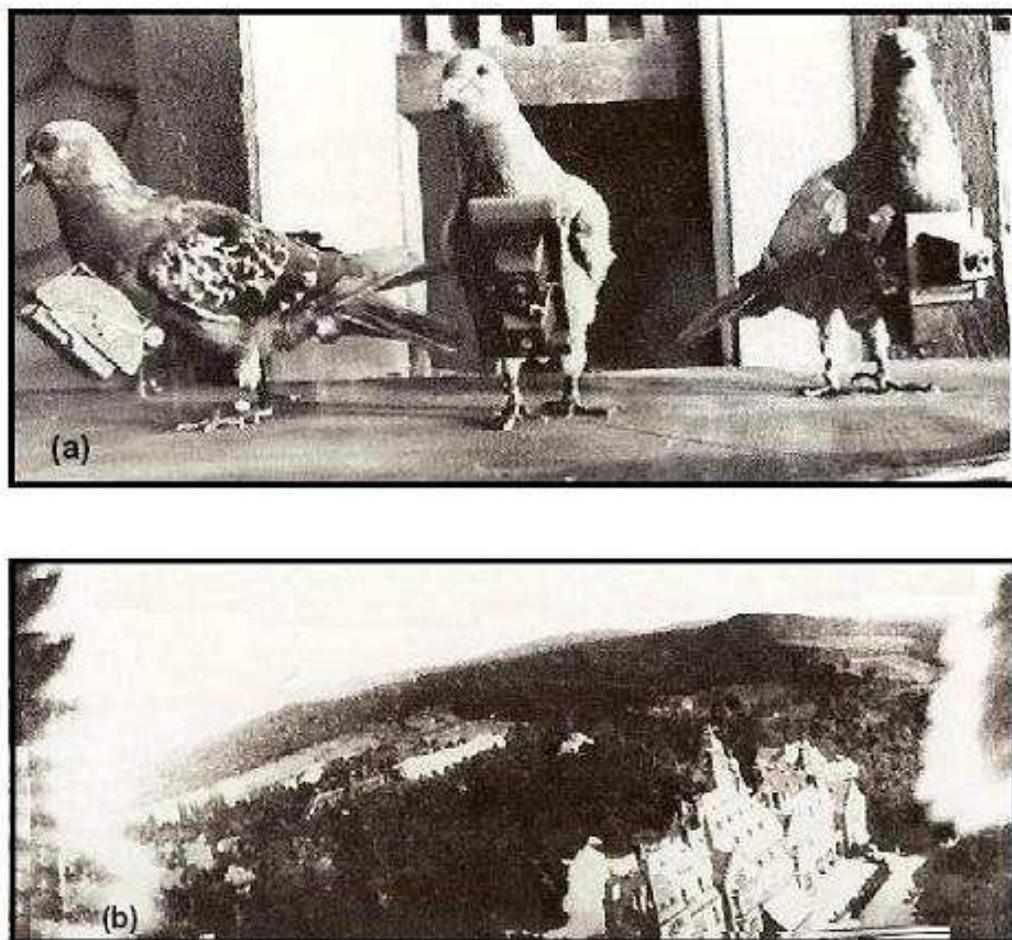


Figura 1: (a) Pombos usados como plataformas de sensoriamento remoto. (b) Fotografia adquirida por uma câmera acoplada a um pombo.
Fonte: Aronoff (2005): p.12

Desde então o sensoriamento remoto tem demonstrado ser uma versátil e valiosa fonte de diversas informações geográficas. A primeira fotografia aérea conhecida foi feita em 1858 por Gaspard Felix Tournachon. Ele usou um balão cativo para fotografar Bièvre, França, de uma altitude de 80 metros. A mais antiga fotografia aérea que sobreviveu ao tempo nos Estados Unidos foi feita por James Wallace Black, também a partir de um balão cativo à cerca de 365 metros de altitude, na cidade de Boston, em 1860, conforme pode ser visto na figura 2. A porção do distrito comercial de Boston e os mastros dos navios no cais adjacente podem ser vistos.

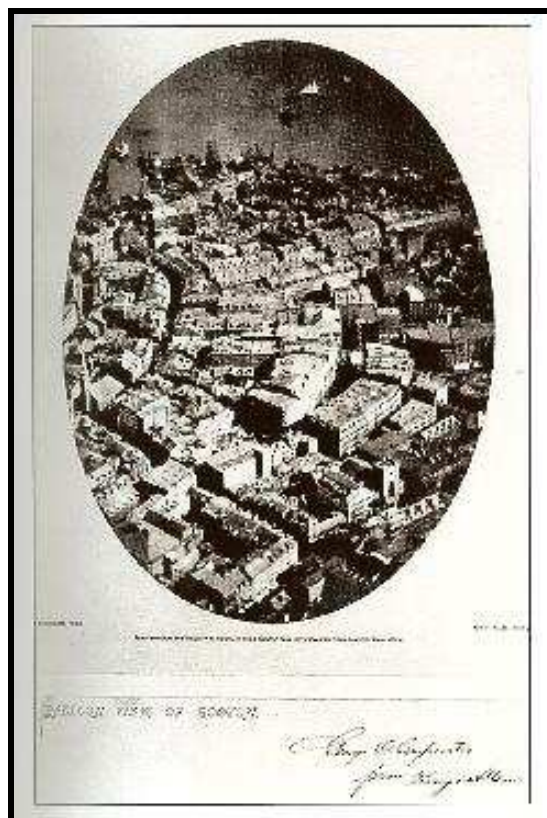


Figura 2: Mais antiga fotografia aérea norte-americana, cidade de Boston, Massachusetts - 1860.
 Fonte: Aronoff (2005): p.11

No início do século passado o valor das fotografias aéreas começou a ser reconhecido e amplamente difundido, notadamente após a ocorrência de um terremoto e uma série de incêndios subseqüentes que causaram grande destruição na cidade de São Francisco, Estados Unidos em 1906, e o fotógrafo George R. Lawrence ter registrado, apenas algumas semanas após o evento, as imagens aéreas de uma altitude de 610 metros, utilizando um dirigível teleguiado como plataforma (figura 3). Tais imagens foram a grande sensação ao redor do mundo, não apenas pela novidade que representavam, mas também porque elas capturavam um excepcional evento com grande detalhamento.



Figura 3: São Francisco, Califórnia, EUA - maio de 1906.
 Fonte: Aronoff (2005): p.12

Entretanto, para que as fotografias aéreas se tornassem um recurso com utilidade prática era necessário a utilização de plataformas navegáveis, que permitissem que a câmera estivesse localizada onde fosse necessário ou desejado. Isto se verificou com o surgimento das aeronaves tripuladas.

Com o advento da Primeira Grande Guerra Mundial as agências militares de inteligência propiciaram um rápido desenvolvimento das fotografias aéreas e de métodos práticos para fotointerpretação. Porém, mesmo com o uso regular de aeronaves militares desde agosto de 1914, no início da guerra as fotografias aéreas não foram utilizadas, pois as autoridades militares estavam relutantes com o uso da nova tecnologia. Apenas após um oficial da Força Aérea Britânica ter feito uma série de fotografias aéreas das instalações militares alemãs dentro do território alemão é que as autoridades militares aliadas se convenceram do valor das fotografias aéreas como “arma” de inteligência.

A partir de 1915 começaram a ser desenvolvidas câmeras especificamente para o uso aéreo. Os fotointerpretadores passaram a ser chamados de “os olhos das forças armadas” por todos os países envolvidos na guerra, e as fotografias aéreas feitas a partir de aviões (como o da figura 4), ajudaram ambos os lados a tomarem decisões estratégicas. Como em muitas outras áreas do conhecimento, o sensoriamento remoto teve sua evolução fortemente impulsionada pela indústria bélica e intimamente ligada a atividades militares.



Figura 4: Piloto e fotógrafo a bordo de um avião AH-14 carregando uma câmera Graflex, 1915.
Fonte: Aronoff (2005): p.13

No período compreendido entre as duas grandes guerras – 1918 a 1939, o sensoriamento remoto e as técnicas de fotointerpretação evoluíram pouco, porém significantes avanços foram realizados nas áreas comercial e científica. O uso civil das fotografias aéreas em campos como a geologia, silvicultura³, agricultura e cartografia foi introduzido e isto conduziu ao desenvolvimento de câmeras, filmes e equipamentos de interpretação cada vez mais sofisticados.

A fotogrametria, os princípios e tecnologias de realização de medições precisas nas fotografias foram aplicados nas fotografias aéreas (aerofotogrametria), e instrumentos foram projetados e concebidos especificamente para este propósito, como por exemplo, o equipamento mostrado na figura 5, extensivamente usado para a produção de mapas topográficos a partir de pares estereoscópicos de fotografias aéreas (3D).

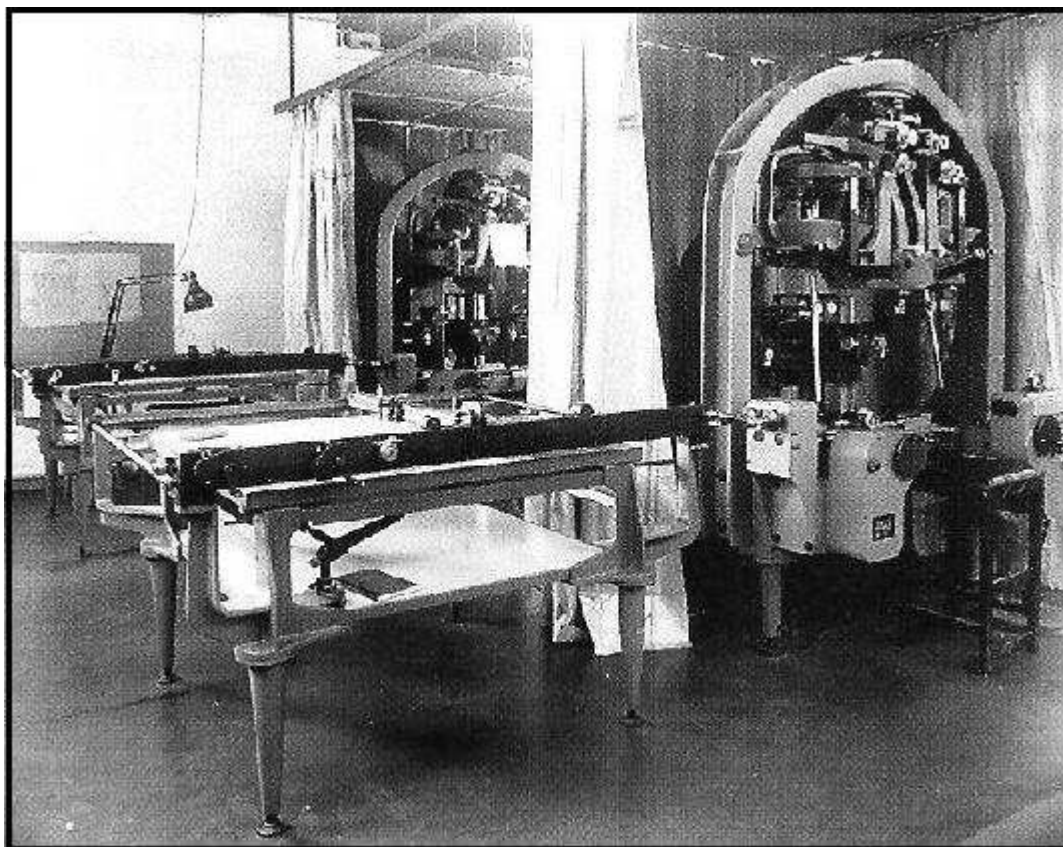


Figura 5: Equipamento Wild A5 Stereo-Autograph, fabricado na Suíça.
Fonte: Aronoff (2005): p.14

Em 1934 a Sociedade Americana de Fotogrametria, atualmente Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (American Society of Photogrammetry and

³ Ciência que se dedica ao estudo dos métodos naturais e artificiais de regenerar e melhorar os povoamentos florestais e que compreende o estudo botânico das espécies, além da identificação, caracterização e prescrição da utilização das madeiras.

Fonte: Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa, versão on line.

Remote Sensing - ASPRS), foi fundada como uma organização científica e profissional para impulsionar avanços na área. Até 1940 periódicos técnicos haviam sido publicados nos Estados Unidos, Alemanha e Rússia, apresentando centenas de estudos e trabalhos sobre fotointerpretação aérea. Tais artigos tratavam de diversas aplicações, tais como: arqueologia, ecologia, silvicultura, geologia, engenharia e planejamento urbano.

Em 1938 o Chefe do Estado Maior do Exército Alemão, o General Werner von Fritsch afirmou que:

“A nação com a melhor tecnologia de foto-reconhecimento vencerá a próxima guerra” (ARONOFF, 2005, p.15).

Esta afirmação profética, infelizmente, se concretizou com o advento da Segunda Grande Guerra Mundial (1939-1945). Apesar de tudo, esse período trouxe um extraordinário avanço para as técnicas de sensoriamento remoto. Foi durante a Segunda Guerra que os exércitos dos países aliados desenvolveram o “Estado da Arte” das técnicas de fotointerpretação. Para exemplificar o desenvolvimento que o sensoriamento remoto percebeu nesta época pode-se citar a criação dos laboratórios de processamento móveis, empregados para manipular milhares de imagens de reconhecimento aéreo. Os oficiais aliados estavam convencidos de que o uso de fotografias aéreas para reconhecimento militar antes, durante e após as operações era essencial para a moderna “arte da guerra”. A figura 6 ilustra um desses laboratórios móveis do exército aliado durante seu embarque para a Normandia, em agosto de 1944.



Figura 6: Unidade móvel de processamento fotográfico
Fonte: Aronoff (2005): p.16

Os aliados desenvolveram também a fotografia aérea noturna, para detectar os comboios de suprimentos do exército inimigo, que operavam sob o manto da escuridão da noite.

Com o avanço da guerra a qualidade da inteligência de fotointerpretação alemã declinou, em parte devido à morte do General von Fritsch, enquanto que por sua vez a fotointerpretação dos aliados evoluía fortemente. Na preparação da invasão da Normandia, por exemplo, os fotointérpretes aliados identificaram instalações militares, incluindo redes e rotas subterrâneas e linhas de comunicação, prepararam mapas detalhados das defesas inimigas, e construíram mosaicos de fotografias aéreas e modelos de terreno da área. Durante a investida pela Europa as fotografias aéreas foram ampliadas, anotadas, divididas em *grids* e usadas no lugar de mapas desatualizados.

A Segunda Guerra Mundial também estimulou o desenvolvimento de novas tecnologias de sensoriamento remoto. A introdução de novos filmes fotográficos e filtros especializados levaram ao desenvolvimento do filme infravermelho colorido. Usado para identificar equipamentos e utensílios sob a camuflagem militar, o filme era sensível aos comprimentos de onda referentes às bandas do vermelho, verde e infravermelho próximo. A vegetação verde aparecia com a cor vermelha, enquanto que objetos pintados de verde ou vegetação cortada usada para esconder equipamentos, apareciam com a cor verde azulada.

A tecnologia do RADAR (Radio Detection and Ranging) foi também desenvolvida neste período. Graças ao desenvolvimento de poderosos transmissores de microondas, que operavam com ondas curtas, a Grã-Bretanha construiu com sucesso o primeiro RADAR imageador – o Indicador de Posição Plana (“Plan Position Indicator”). O RADAR pode fazer o imageamento durante o dia ou a noite, e é capaz de penetrar na cobertura de nuvens. Esta característica torna esse sistema ideal para o imageamento de regiões com cobertura de nuvens, tais como as florestas tropicais.

Desde então o sensoriamento remoto é considerado um componente essencial da inteligência militar. Pesquisas e desenvolvimento de aplicações militares para o sensoriamento remoto iniciaram-se durante a guerra e continuaram depois a passos largos. Porém, os interesses relativos às questões de segurança restringiram a

introdução de novas tecnologias de sensores para aplicações civis. Antes da Segunda Guerra o acesso às novas tecnologias e técnicas de aerofotogrametria e fotointerpretação não sofriam qualquer restrição. Todavia, após a guerra ter provado o valor militar dessa tecnologia, duras restrições foram impingidas ao acesso do “Estado da Arte” de sistemas de sensoriamento remoto como o RADAR e sensores de infravermelho termal. Enquanto que antes da guerra a troca e o trânsito de informações entre especialistas civis e militares de sensoriamento remoto era ampla e cooperativa, após a guerra as restrições impostas em nome da segurança e a competitividade que visava as verbas dos governos fizeram com que a colaboração se tornasse mais difícil. Desde então, a pesquisa e as verbas para o desenvolvimento de novas tecnologias de sensoriamento remoto nas atividades militares ou nas agências de inteligência, excedem em muito àquelas para aplicações civis.

Após a guerra, o uso das tecnologias de sensoriamento remoto aumentou exponencialmente. Milhares de fotointerpretes altamente treinados deixaram as Forças Armadas e aplicaram suas habilidades em atividades civis. As técnicas de fotointerpretação desenvolvidas nos tempos de guerra tornaram-se os procedimentos padrões para aplicações civis como levantamentos topográficos (dirigido para a confecção de mapas), geologia e engenharia.

A partir da década de 1970 as tecnologias de sensoriamento remoto como o RADAR e sensores termais de infravermelho se tornaram disponíveis para as aplicações civis. Uma das primeiras e mais ambiciosas aplicações civis que envolviam essas novas tecnologias foi o projeto RADAM (RADAR na Amazônia). Este projeto envolveu o governo brasileiro e empresas comerciais de sensoriamento remoto dos Estados Unidos.

O projeto RADAM foi um esforço pioneiro do governo brasileiro, organizado pelo Ministério de Minas e Energia por meio do Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM e com recursos do PIN – Plano de Integração Nacional, na pesquisa de recursos naturais em uma região considerada, na ocasião, como uma das mais pobremente mapeadas do mundo. O uso do RADAR de visada lateral (SLAR – Side-Looking Airborne Radar) representou um avanço tecnológico, pois sendo um sensor ativo, a imagem poderia ser obtida tanto durante o dia como a noite e em condições

meteorológicas de nebulosidade, pois as microondas podem penetrar na maioria das nuvens.

O objetivo deste projeto foi a coleta de dados acerca dos recursos minerais, solos, vegetação, uso da terra e cartografia da Amazônia e áreas adjacentes da região Nordeste. Em junho de 1971 foram iniciados os vôos para imageamento. A plataforma utilizada foi o avião Caravelle, a altitude média do levantamento foi de 12 km, e o sistema imageador utilizado foi o GEMS (Goodyear Mapping System 1000), operante na banda X (comprimentos de onda próximos a 3 cm e frequência entre 8 e 12,5 GHz). Devido aos bons resultados do projeto RADAM, em julho de 1975 o levantamento de radar foi expandido para o restante do território nacional, visando o mapeamento integrado dos recursos naturais brasileiros. Este projeto se denominou RADAMBRASIL. O inventário e os mapas produzidos por esse projeto propiciaram a exploração mineral e facilitaram o manejo da região. Os cientistas brasileiros interpretaram as imagens de RADAR com escala 1:200.000 e produziram mapas de geologia, geomorfologia, hidrologia, solos, vegetação e potencial de uso do solo. A figura 7 ilustra uma imagem da área do Rio Xingu na Amazônia brasileira. A distância representada na imagem é aproximadamente de 14 km de um lado a outro.

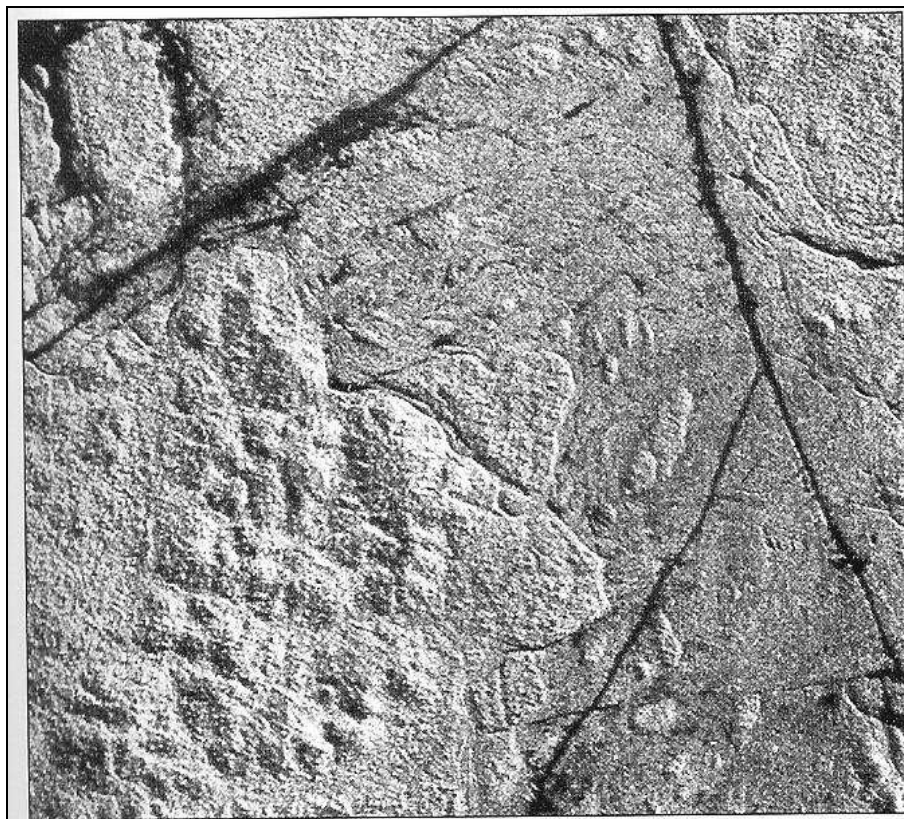


Figura 7: Imagem de RADAR do projeto RADAM..
Fonte: Aronoff (2005): p.19

O sensoriamento remoto experimentou mais uma onda de grandes e velozes avanços durante o período denominado “Guerra Fria⁴”, ou seja, o conflito político-ideológico entre os Estados Unidos, defensores do capitalismo, e a União Soviética, defensora do socialismo, compreendendo o período entre o final da Segunda Guerra Mundial e a extinção da União Soviética, na década de 1990. Mesmo sem ter ocorrido nenhum combate físico (daí a denominação “fria”) o que caracterizou este período foi a preocupação mundial de uma guerra abastecida pelos arsenais nucleares das duas superpotências da época. O equilíbrio bélico evitou a guerra, mas fomentou uma luta travada nos campos: ideológico, político, econômico e tecnológico. Iniciou-se então a chamada “corrida espacial”, onde EUA e URSS disputavam qual era o sistema mais avançado. Em virtude disso, é nessa época que se intensifica dramaticamente o papel da espionagem, que estava diretamente associada à necessidade que as superpotências tinham de conhecer os detalhes sobre as novas conquistas tecnológicas do adversário. E para esse propósito os satélites orbitais eram um trunfo para que fosse possível “observar” discreta e silenciosamente o inimigo.

Em 1955 o então presidente norte-americano Dwight David Eisenhower propôs ao primeiro ministro soviético Nikita Khrushchev que cada país conduzisse missões de reconhecimento (utilizando plataformas aéreas e orbitais para a obtenção de produtos de sensoriamento remoto) um sobre o outro, e que o imageamento resultante dessas missões fosse entregue às Nações Unidas. Entretanto, o primeiro ministro Khrushchev declinou da proposta norte-americana, que ficou conhecida como “Open Skies Policy”. O resultado foi que cada país se apressou a desenvolver, em segredo, a mais sofisticada tecnologia de sensoriamento remoto.

Foram, então iniciados programas secretos de satélites militares de reconhecimento, bem como de aviões espões, como por exemplo, o avião U-2 (figura 8), que começou a ser concebido e projetado em agosto de 1955, e sua primeira missão aconteceu em julho de 1956 sobrevoando a antiga União Soviética com a finalidade de produzir pares estereoscópicos de fotografias aéreas com resolução espacial menor de 15 centímetros. O avião norte-americano militar de espionagem U-2 voava a altas altitudes (acima de 21.000 metros), para vigilância e reconhecimento, com uma autonomia de vôo de 9 horas ou mais. Suas versões posteriores, como o U-2R (desenvolvido em 1967) e o U-2S (desenvolvido em 1994) continuam a fazer vôos militares de

⁴ “A Guerra Fria foi um período em que a guerra era improvável, e a paz, impossível” – Raymond Aron – filósofo, sociólogo e comentarista político francês, 1905-1983.

reconhecimento, bem como missões de auxílio de busca e resgate, combate ao tráfico de drogas, e socorro às vítimas de desastres naturais.



Figura 8: Avião norte-americano militar de espionagem U-2.
Fonte: Aronoff (2005): p.20 e www.militaryfactory.com/aircraft/imgs/u2.jpg

As imagens obtidas pelo uso dos aviões de espionagem foram extremamente úteis para o governo norte-americano, porém os riscos de sobrevoar o território soviético eram muito grandes. As aeronaves podiam ser localizadas pelos radares e abatidas por mísseis ou outras aeronaves soviéticas, sem mencionar os protestos do governo da URSS contra a espionagem aérea em seu território, o que tornou o projeto politicamente inviável.

A solução encontrada para o impasse foi conduzir operações de inteligência no espaço. O espaço proporcionou a vantagem ideal. Toda e qualquer nação do mundo poderia ser observada sem a necessidade de permissão. Esse “ponto estratégico de observação” passou a ser utilizado por norte-americanos e soviéticos. Porém, a URSS saiu na frente nessa corrida quando do lançamento do primeiro satélite a ser colocado em órbita, em 4 de outubro de 1957 – o Sputnik-1 (figura 9). Quatro meses depois os EUA lançam o U.S. Explorer-1. Com isto estava oficialmente aberta a “era da espionagem espacial”.

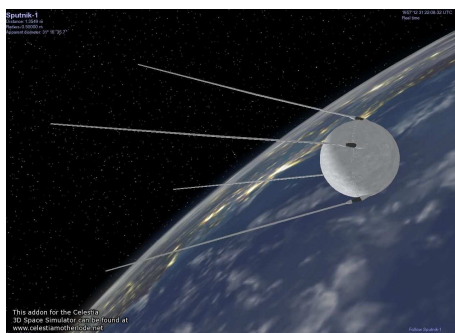


Figura 9: Satélite soviético Sputnik-1.
Fonte: celestiamotherlode.net/catalog/satellites.php

Em agosto de 1960 os EUA produziram suas primeiras fotografias espaciais com a série de satélites espões denominada Corona (figura 10). O primeiro satélite da série carregava uma câmera de alta resolução com sistema de filme.

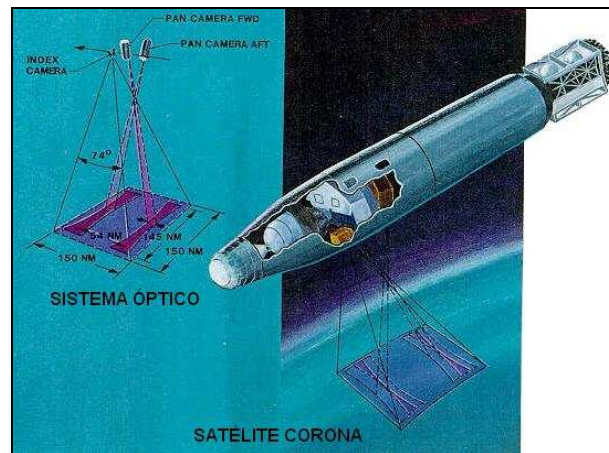


Figura 10: Satélite norte-americano de reconhecimento Corona..

Fonte: Adaptado de: www.nro.gov/corona/recsys-a.jpg

As missões do satélite Corona eram curtas, apenas dois ou três dias. A região de interesse era fotografada e o filme retornava a Terra em cápsulas especiais de reentrada na atmosfera terrestre. Quando a cápsula atingia a atmosfera e estavam sobre o oceano, pára-quedas eram acionados, e as cápsulas eram recuperadas por aviões especialmente equipados para esta tarefa (figura 11: avião de resgate capturando uma cápsula contendo o filme realizado pela câmera a bordo do satélite Corona. A cápsula está presa ao pára-quedas por sobre o oceano), ou então elas caíam no oceano, pois podiam flutuar, e eram depois resgatadas.



Figura 11: Avião de resgate das imagens do satélite Corona.

Fonte: Aronoff (2005): p.22

As fotografias do satélite Corona eram todas em preto e branco, com exceção de algumas amostras experimentais de filme infravermelho e colorido usados em algumas missões. A primeira missão do Corona cobriu uma área de mais de 1,5 milhões de

milhas quadradas (aproximadamente 3,9 milhões de km²) da URSS. A resolução espacial era boa o suficiente para identificar feições com tamanho de aproximadamente 10 metros, conforme se pode observar na figura 12, que é uma imagem do Pentágono, EUA adquirida pelo satélite Corona em 25 de setembro de 1967.

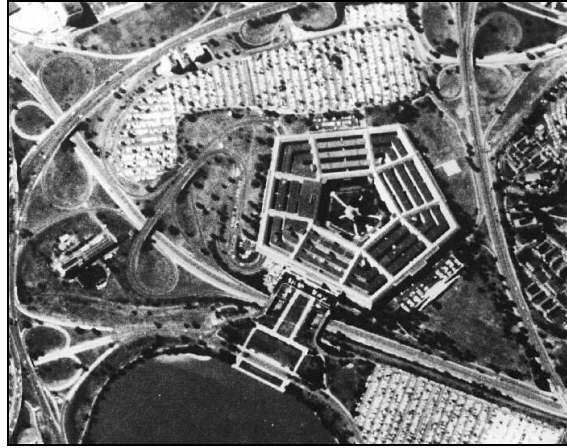


Figura 12: Imagem do satélite Corona.

Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Corona_pentagon.jpg

O primeiro satélite espião da União Soviética foi o Zenit-2 (figura 13), que foi lançado em abril de 1962. A exemplo do programa norte-americano Corona, seu verdadeiro propósito estava disfarçado. Os soviéticos afirmavam que as missões tinham como objetivo a exploração científica, e adotaram o nome de Programa Kosmos. O Zenit produzia fotografias coloridas, onde era possível identificar objetos menores de 5 metros de lado a lado. Ambos os satélites, Corona e Zenit, fotografaram estrategicamente importantes áreas, incluindo bases de lançamento de mísseis, depósitos de munições e armamentos, instalações militares e as grandes cidades.

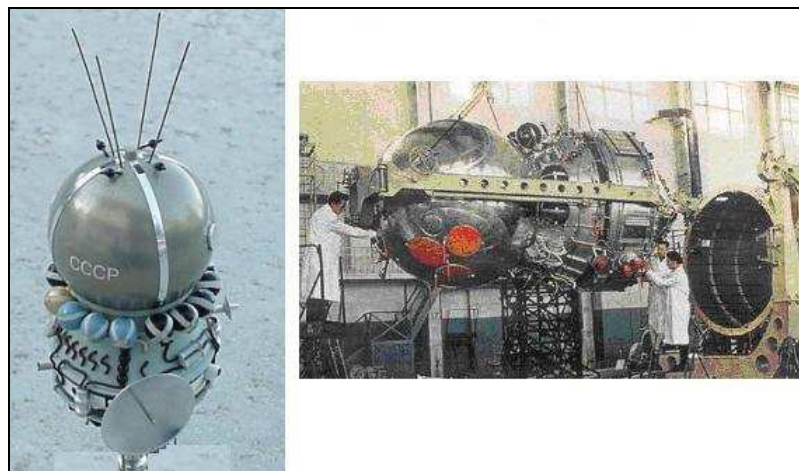


Figura 13: Satélite soviético Zenit e a preparação do foguete para o seu lançamento.

Fonte: www.ussr-airspace.com/.../al/53/10161439.jpg

Porém, as fotografias adquiridas por meio dos satélites possuíam importantes limitações. Eram necessários dias e até semanas para que as imagens espaciais

fossem enviadas (pelas cápsulas de reentrada), recuperadas, processadas, analisadas, e por fim o resultado de suas informações fosse encaminhado aos políticos (tomadores de decisões) e aos estrategistas de planejamento militar.

O passo seguinte trouxe a próxima geração de satélites espíões, que oferecia um maior poder de resolução e a capacidade de realizar missões mais longas. Os sistemas passaram a capturar e processar as imagens espaciais. O filme era escaneado, e então a imagem era transmitida de volta a Terra. Os sistemas de sensoriamento remoto orbital com finalidade militar se tornaram totalmente digitais e passaram a carregar sistemas sensores substancialmente mais avançados do que aqueles disponíveis para aplicações civis. Um exemplo dessa superioridade tecnológica foi apresentado ao mundo em 1983, quando um analista da marinha dos EUA, Samuel Morison, divulgou imagens secretas de um porta-aviões soviético que estava sendo construído em um estaleiro no Mar Negro (figura 14). As imagens foram adquiridas pelo satélite norte-americano U.S. KH-11, com resolução espacial de 0,5 a 1 metro, muito embora o satélite fora concebido para ser capaz de adquirir imagens com resolução espacial de 10 centímetros quando diretamente por sobre o objeto a ser imageado

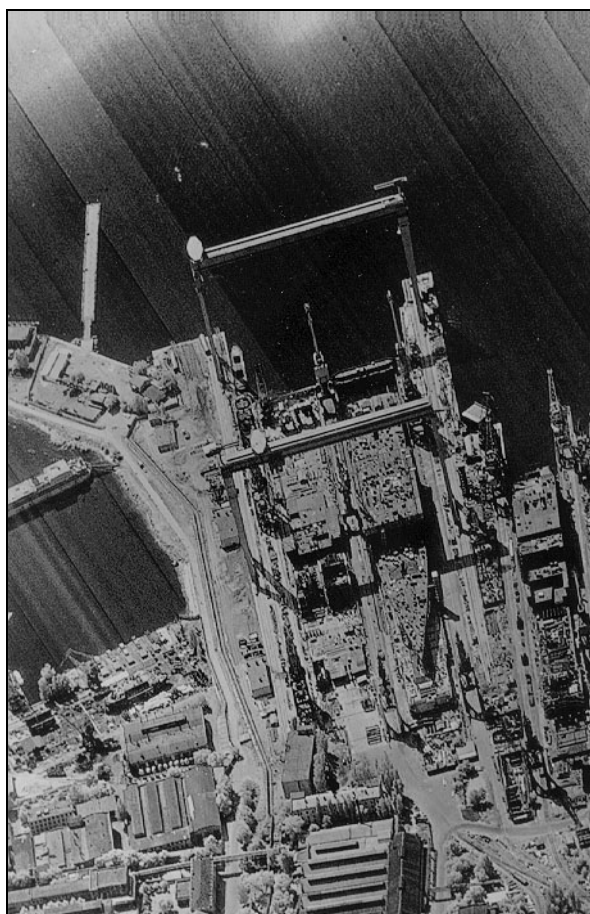


Figura 14: Imagem do satélite norte-americano U.S. KH-11.
Fonte: <http://www.gwu.edu/~nsarchiv/NSAEBB/NSAEBB13/#21>

O primeiro satélite não militar de observação da Terra foi o satélite meteorológico TIROS-1 (Television Infrared Observation Satellite), lançado pelos EUA em 1960 (figura 15). Esse satélite fez a primeira imagem da Terra vista do espaço e transmitida pela TV em 1 de abril de 1960.



Figura 15: Imagem do satélite da NASA TIROS-1.
 Fonte: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:TIROS-1-Earth.png>

Devido ao desenvolvimento da tecnologia dos sensores, os satélites meteorológicos desenvolveram a capacidade de coletar imagens de feições terrestres e atmosféricas. Os meteorologistas podiam, a partir de então, avaliar feições de água, neve e gelo, bem como padrões de nuvens. Embora concebido para aplicações meteorológicas e climatológicas, o satélite TIROS-1 proporcionou a base para o desenvolvimento do primeiro satélite de recursos naturais – o ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) (figura 16).

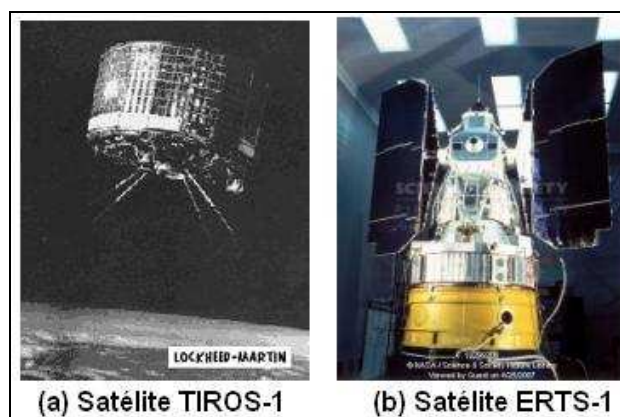


Figura 16: Satélite TIROS-1 e o satélite ERTS-1

Fontes: http://galileo.cyberscol.qc.ca/InterMet/satellite/satellite_instrument.htm
<http://www.scienceandsociety.co.uk/results.asp?image=10299208&wwwflag=2&imagepos=6>

Em 1972 iniciou-se uma nova era para o sensoriamento remoto para aplicações civis com o lançamento do satélite LANDSAT (Land Remote Sensing Satellite), o primeiro de muitos satélites civis dedicado ao sensoriamento remoto de recursos terrestres (programa gerenciado pela NASA - National Aeronautics and Space Administration, e pelo USGS - United States Geological Survey). Foi durante este período também que vários sensores que anteriormente eram de uso restrito militar foram liberados para o uso civil do sensoriamento remoto. Dentre esses sensores estão incluídos scanners multiespectrais, sistemas de infravermelho termal e sistemas de imageamento por RADAR.

A série LANDSAT contou com sete satélites (lançados entre 1972 e 1999). Eles foram projetados para coletar dados sobre recursos terrestres com uma média resolução espacial em vários comprimentos de onda do espectro eletromagnético. As imagens eram adquiridas separadamente (cada uma das bandas gerava uma imagem), porém simultaneamente. Dos sete satélites da série apenas o LANDSAT 5, lançado em 1 de março de 1984 (figura 17), ainda encontra-se em operação, porém com algumas restrições, mas de qualquer forma ele contrariou, e muito, seus prognósticos de vida útil.



Figura 17: Satélite LANDSAT 5

Fontes: http://landsat.usgs.gov/project_facts/history/images/landsat-5.jpg

Os satélites LANDSAT proporcionaram por mais de 3 décadas uma cobertura de quase todo o globo terrestre, produzindo imagens de boa qualidade e moderado detalhamento com um mínimo de distorção. O imageamento tinha um baixo custo e era livre de

restrições políticas e de segurança. Em um primeiro momento, as análises das imagens LANDSAT eram primordialmente visuais, porém a disponibilidade dos dados em formato digital encorajou o desenvolvimento do processamento digital de imagens.

A disponibilidade das imagens digitais multiespectrais de quase toda a superfície da Terra, capturadas pelos satélites da série LANDSAT, contribuiu muito para a expansão do número de pessoas que desenvolveram interesse pelo assunto e tornaram-se especialistas na análise desses dados. As imagens LANDSAT foram muito usadas para estudos de meio-ambiente, tais como desmatamento de florestas tropicais, onde o acesso a essas regiões era (e ainda é) difícil ou negado pelas autoridades locais.

Aproximadamente 30% (3,5 milhões de km²) das florestas tropicais mundiais são encontradas no Brasil. A figura 18 traz imagens LANDSAT, adquiridas em junho de 1975 e agosto de 1986, que ilustram a rápida taxa de desmatamento da área de floresta tropical brasileira, estimada em 15.000 km² por ano durante este período.

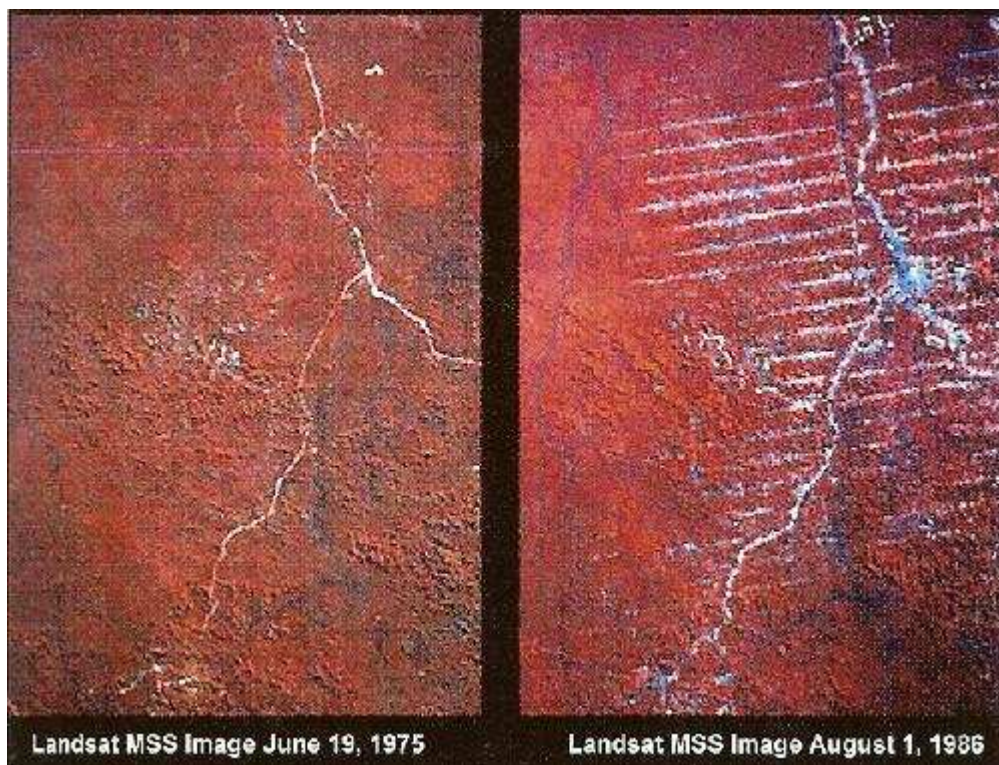


Figura 19: Imagens LANDSAT.
Fonte: Aronoff (2005): p.31

As técnicas de tratamento e análise de imagens foram desenvolvidas para facilitar a interpretação visual e melhorar o desempenho da classificação automática. A classificação provou ser uma poderosa técnica adaptável a uma ampla gama de

aplicações, incluindo a geração de mapas de cobertura do solo, projeção de impactos decorrentes do desenvolvimento de regiões e cidades, detecção de mudanças e alterações de padrões de uma área, monitoramento ambiental e inventário de recursos naturais.

Além dos EUA outros países como Austrália e Canadá, e a Comunidade Européia disponibilizaram substanciais recursos financeiros para o desenvolvimento do sensoriamento remoto orbital.

Desde a década de 1970 até a França lançar o satélite SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) em 1986, os EUA foram o único país a operar satélites de sensoriamento remoto, que coletavam sistematicamente informações de todo o planeta (a série LANDSAT) para aplicações civis.

Devido a este “quase-monopólio” no que se refere à aquisição e disponibilidade das imagens de satélite, os EUA enfrentaram uma pressão internacional para limitar o acesso aos dados do LANDSAT e restringir futuros desenvolvimentos. O assunto envolvia uma discussão sobre soberania, defesa e segurança das nações, pois como o sensoriamento remoto era capaz de prover imagens irrestritamente, poderia munir o usuário de vantagens econômicas e militares sobre o país que está sendo sensoriado.

A comunidade mundial via o programa LANDSAT como um risco à segurança de suas nações, que poderiam estar sendo “observadas” por seus “inimigos”. Isto gerou uma série de debates na Organização das Nações Unidas (ONU), onde foi proposto que:

- Os países que operavam satélites devem primeiro obter a aprovação das nações imageadas antes de coletar os dados;
- Os países observados têm o direito de acessar livremente todas as informações coletadas sobre seu país por uma nação estrangeira.
- É necessário o consentimento prévio do país sensoriado para que os dados e informações sobre o território sob sua jurisdição sejam cedidos ou comercializados a uma terceira nação ou entidade.

Tais propostas não foram aplicadas, pois desagradaram os EUA, que refutaram-nas com o argumento de que se entrassem em vigor apenas os dados LANDSAT

referentes a áreas dentro dos EUA seriam livremente disponíveis, e apenas para cidadãos norte-americanos.

Mais tarde, porém, a ONU estabeleceu diretrizes para o sensoriamento remoto em um documento: a Resolução 41/65 da Assembleia Geral da ONU, de 9 de dezembro de 1986. Essa resolução ficou conhecida como “LANDSAT ACT”, ou Princípios Sobre Sensoriamento Remoto. Antes dessa resolução da ONU o uso do espaço externo⁵ era regulado pelo “Tratado do Espaço Externo” ou “Outer Space Treaty” (OST) de 1967, que afirma que o espaço externo deve ser livre para ser explorado e utilizado por todas as nações, com equidade e sem nenhum tipo de discriminação e de acordo com as leis internacionais.

A resolução da ONU restringe a regulamentação à aplicação do sensoriamento remoto da superfície da Terra feito do espaço externo, com o propósito de melhorar a gestão dos recursos naturais, o uso da terra e a proteção do meio ambiente. Diz ainda em seu artigo 2º que:

“...as atividades de sensoriamento remoto deverão ter em mira o bem e o interesse de todos os Estados, qualquer que seja o estágio de seu desenvolvimento econômico, social, científico e tecnológico, levando em especial consideração às necessidades dos países em desenvolvimento”.

O artigo 9º da Resolução 41/65 da ONU prevê que os países observados têm o direito de acessar livremente todas as informações coletadas sobre seu país por uma nação estrangeira, ou seja, eles deverão ter acesso aos dados primários e processados relativo ao território sob sua jurisdição, assim que forem produzidos, em base não discriminatória e a um custo razoável.

A resolução que rege os princípios do sensoriamento remoto, desde seu surgimento até agora, nunca foi contestada ou objeto de divergência. Isto se deve ao fato de que esses princípios agradam aos países detentores da tecnologia do sensoriamento remoto, pois essas diretrizes prevêm:

- A liberdade de sensoriar o mundo inteiro;
- A liberdade de comercializar os produtos do sensoriamento.

⁵ Espaço externo ou espaço sideral: expressão usada pela astronomia para se referir à porção vazia do universo, fora das atmosferas dos corpos celestes.

(Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Espa%C3%A7o#Espa.C3.A7o_Sideral)

Porém, os Princípios sobre Sensoriamento Remoto de 1986 estão alarmantemente desatualizados, tanto diante das novas tecnologias usadas na atividade, quanto diante da variedade de serviços e produtos que ela deu origem e de seu mais recente e florescente mercado.

Nos dias atuais ressen-te-se da existência de um Tratado Internacional que regule e discipline as atividades de sensoriamento remoto, notadamente o orbital. Mas na verdade, há um receio por parte da comunidade detentora das tecnologias de sensoriamento que a transformação dos princípios em tratado traga de volta antigas discussões a respeito, por exemplo, da necessidade ou não de autorização prévia para sensoriar o território de um país ou de autorização prévia do país sensoriado para vender as imagens obtidas sobre seu território. Os Princípios sobre Sensoriamento Remoto, hoje admitidos como costume internacional, perderiam tal condição ao se tornarem novamente motivo de debate e controvérsia no âmbito das Nações Unidas.

Paralelamente a essas questões políticas que envolviam o exercício da atividade de sensoriamento remoto, havia também a questão econômica. Os satélites utilizados para aplicações civis visavam lucro, e mesmo o programa LANDSAT sendo amplamente conhecido e difundido na comunidade de sensoriamento remoto, sua operação não era tida como rentável. Os satélites de sensoriamento remoto da superfície da Terra precisavam ser subsidiados pelo governo, tanto no que se refere ao seu lançamento, equipamentos de hardware, software, etc.

Essa situação perdurou até 1999 com o lançamento do satélite comercial norte-americano IKONOS⁶, da empresa Space Imaging, que em janeiro de 2006 foi incorporada à empresa ORBIMAGE e passou a se chamar GeoEye (figura 19), com resolução espacial de 1 metro. Anteriormente tal poder de resolução era disponível apenas para usos militares. Essa característica do satélite IKONOS equipara suas imagens a fotografias aéreas de alta altitude. Suas imagens foram rapidamente adotadas em uma vasta gama de aplicações. A alta resolução tornou as imagens IKONOS valiosas para o uso civil e também o militar. Para a comunidade militar era mais vantajoso o uso dessas imagens comerciais com alto poder de resolução do que

⁶ IKONOS: derivado da palavra grega para “imagem”. Segundo a revista “Earth Observation Magazine”, trata-se de um jogo de palavras, pois a pronúncia leva ao trocadilho: “Eye-KOH-nos”. (Fonte: http://ranier.hq.nasa.gov/Sensors_page/MissionLinks/mlj.html)

lançar e operar um satélite militar próprio com características similares. O governo dos Estados Unidos apresentou suporte ao projeto na forma de aquisição de grandes volumes de dados (imagens). O que fez convergir os interesses das comunidades civis e militares de sensoriamento remoto.

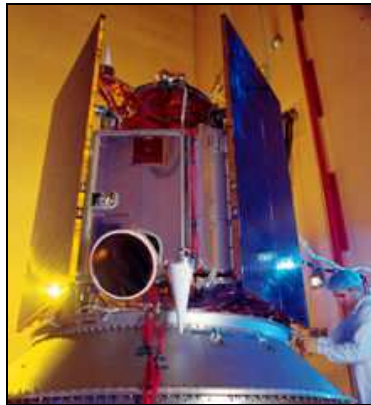


Figura 19: Satélite IKONOS.

Fonte: www.answers.com/topic/ikonos

Após o satélite IKONOS ser lançado e entrar em operação outros satélites de alto poder de resolução também surgiram. Em 2000 foi lançado o satélite EROS A1 (Earth Remote Observation System) pela empresa ImageSat, a junção de duas companhias israelitas (a Israel Aircraft Industries e a Electro-Optics Industries) e uma companhia norte-americana (a Core Software). O satélite EROS A1 (figura 20), proporciona 1,8 metro de resolução espacial na imagem pancromática⁷.



Figura 20: Satélite EROS A1

Fonte: <http://www.defense-update.com/directory/eros1.htm>

No ano seguinte, em 2001 a empresa DigitalGlobe lança com sucesso o satélite QuickBird II (figura 21), com 0,61 metro de resolução espacial na banda pancromática e 2,44 metros na imagem multiespectral.

⁷ O termo pancromático significa uma banda mais larga que incorpora as faixas espectrais mais estreitas, por esta razão a quantidade de energia da banda pancromática chega ao satélite com maior intensidade, e isto possibilita ao sensor uma definição melhor. A imagem pancromática é em preto e branco, pois há a sensibilidade a todas as bandas de espectro visível, e muitas vezes também inclui uma porção do infravermelho próximo.



Figura 21: Satélite QuickBird II

Fonte: <http://www.satnews.com/images/4oct2001-quickbird.jpg>

Em 2003, a companhia ORBIMAGE (atual GeoEye) lança seu satélite OrbView 3 (figura 22), que proporciona 1 metro de resolução espacial na banda pancromática e 4 metros na imagem multiespectral.



Figura 22: Satélite OrbView 3

Fonte: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/orbview3.gif>

Como os sensores desses satélites passaram a ter um alto poder de resolução espacial, a área de cobertura de cada satélite passou a diminuir, em contrapartida o custo por unidade de área cresceu substancialmente. Em geral, o custo de imagens de sensoriamento remoto por unidade de área aumenta com a resolução espacial. Satélites com baixo poder de resolução espacial, como por exemplo, o AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) com 1,1 quilômetro de resolução espacial tem suas imagens distribuídas a um mínimo ou nenhum custo. O sensor TM (Thematic Mapper) da satélite LANDSAT varre uma área no terreno de 185 km de largura, enquanto que satélites de alta resolução como o IKONOS ou o QuickBird varrem uma área de 11 e 16,5 km respectivamente. Os custos por pixel desses satélites são comparáveis, percebe-se isto pelo exemplo que segue: para cobrir uma mesma área de um único *pixel* LANDSAT (30 metros) são necessários 900 *pixels* de 1 metro (i.e. 30x30). Portanto, para uma imagem de uma mesma área haverá muitos mais *pixels* de um satélite de alta resolução, portanto sua imagem é bem mais onerosa.

Os satélites de alta resolução não coletam imagens repetidamente de toda sua área de cobertura, mas adquirem suas imagens seletivamente, dependendo da solicitação do cliente. No entanto, as empresas que operam esses satélites têm gerenciado a operação de maneira que se construa progressivamente um acervo completo de imagens enquanto se executa as ordens de seus clientes

Tais imagens têm provado ser muito úteis para mapeamento e monitoramento de infraestrutura urbana, proporcionando informações comparáveis àquelas obtidas de fotografias aéreas de média escala. Elas são usadas: no planejamento urbano regional, inventário e monitoramento de recursos naturais, e resposta à situações de emergência causada por desastres naturais tais como inundações, furacões, incêndios florestais e desastres causados pelo homem. A figura 23 traz uma imagem IKONOS falsa-cor com 4 metros de resolução, adquirida em 28 de outubro de 2003, e que mostra um incêndio florestal em San Bernardino, Califórnia. A vegetação verde (viva) aparece como vermelho brilhante a marrom, enquanto que as áreas queimadas aparecem em cinza escuro. Já a figura 24 ilustra o desastre no World Trade Center, Manhattan, Nova Iorque. A imagem foi adquirida um dia depois do 11 de setembro de 2001, pelo satélite IKONOS, com 1 metro de resolução. A imagem mostra uma área com poeira branca e fumaça no local onde se encontravam as torres de 450 metros de altura do World Trade Center. Como todos os aviões estavam proibidos de sobrevoar a área, essa imagem de alta resolução IKONOS é a única “visão de cima” do incêndio e da destruição das torres gêmeas naquele dia.



Figura 23: Imagem IKONOS – incêndio florestal na Califórnia.
Fonte: Aronoff (2005): p.43



Figura 24: Imagem IKONOS – desastre no World Trade Center
Fonte: Aronoff (2005): p.44

Muitos outros países estão desenvolvendo satélites de reconhecimento que produzem imagens com um bom poder de resolução. Pode-se citar China, Brasil, França, Índia, Itália, Japão, Rússia e Coreia do Sul. Para muitos países as imagens comerciais de satélites de alta resolução são o melhor produto para reconhecimento que eles podem adquirir. Portanto, não é surpresa que os governos e seus órgãos são os maiores compradores e, portanto, são os responsáveis pela maior receita das empresas operadoras de satélites comerciais.

Antes do satélite IKONOS existia uma distinção clara entre os satélites pertencentes ou controlados pelo governo, mas com aplicações civis e os programas militares de aquisição de imagens. Os satélites militares coletavam as imagens com uma resolução espacial muito superior do que a dos satélites para uso civil. O advento dos satélites comerciais com resolução espacial de 1 metro ou menos e a capacidade de transmitir rapidamente as imagens adquiridas começou a obscurecer a distinção entre resoluções e tempo de transmissão para aplicações civis e militares.

Similarmente, a distinção entre satélites do governo para aplicações civis e satélites comerciais de observação (de propriedade particular, mas com permissão do governo) tem caído por terra. Os governos dos países que detêm a tecnologia de sensoriamento remoto esforçam-se para recuperar os recursos gastos com esses programas

comercializando imagens no mercado internacional, em contrapartida, as empresas privadas que operam satélites de sensoriamento remoto têm como seus maiores clientes as agências governamentais.

Entretanto, sem o forte apoio do governo dos Estados Unidos, representado pela USGS e pela NASA, o sensoriamento remoto de recursos terrestres não teria se desenvolvido tão rapidamente. No início da década de 1960 a NASA iniciou um programa de pesquisa de sensoriamento remoto que continua até os dias atuais dando suporte às pesquisas de sensoriamento remoto em universidades e outras instituições por todo o território norte-americano. O governo dos EUA, através da NASA e do USGS, oferece suporte técnico e financeiro para estudos topográficos, geológicos e minerais, geográficos, hidrológicos, de uso do solo, de planejamento urbano, de redes de transportes e etc. Oferece ainda condições de desenvolvimento de equipamentos (hardware), softwares e técnicas de análise para estas áreas de aplicação.

Uma indústria mundial competitiva de sensoriamento remoto favorece a inovação tecnológica, diminui os preços e aumenta a variedade e qualidade das imagens, produtos derivados e serviços.

No Brasil, país com dimensões continentais com mais de 8,5 milhões de quilômetros quadrados de um território muito diversificado e aproximadamente 7.500 quilômetros de linha costeira, o uso do sensoriamento remoto se justifica para que seja possível a visualização de grandes áreas do seu território, oferecendo a planejadores urbanos, ambientalistas, engenheiros de telecomunicações, de concessionárias de serviços de utilidade pública, de gás e petróleo, e especialistas em emergências e situações de calamidade pública, a ferramenta ideal para o planejamento de um novo desenvolvimento, monitoramento da infra-estrutura existente e monitoramento de mudanças e impactos ambientais, mesmo em áreas remotas e de difícil acesso.

O Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) do Brasil, por meio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com sede em São José dos Campos – SP, é responsável:

- pelo programa espacial brasileiro, batizado de Missão Espacial Completa Brasileira (MECB – cujo objetivo é promover o avanço da tecnologia espacial no Brasil, através do desenvolvimento de um foguete lançador (VLS – Veículo

Lançador de Satélite) para satélites de pequeno porte e satélites experimentais para aplicações em órbita terrestre);

- e pelo programa de satélites (satélites de coleta de dados - SCD⁸ e de sensoriamento remoto), e seu segmento de solo associado, que compreende um centro de controle de satélites em São José dos Campos, estações terrenas de rastreamento e comando em Cuiabá – MT e Alcântara – MA, e um centro de missão e coleta de dados em Cachoeira Paulista – SP.

O Brasil adotou extensamente as tecnologias de sensoriamento remoto e é líder em tecnologia espacial na América Latina. Desde 1972 o Brasil trabalha com sensoriamento remoto, portanto são 36 anos de investimentos na área. A primeira instituição que começou a trabalhar com esta tecnologia foi o INPE, por meio do uso das imagens do satélite LANDSAT, do qual se dispõe de uma estação de recepção de imagens em Cuiabá, centro geográfico da América do Sul (figura 25). São recebidas imagens LANDSAT do território nacional desde 1974. Isto permitiu a construção de um banco de dados que guarda a “história ambiental” do Brasil desde 1974 até os dias de hoje, em forma de imagens.

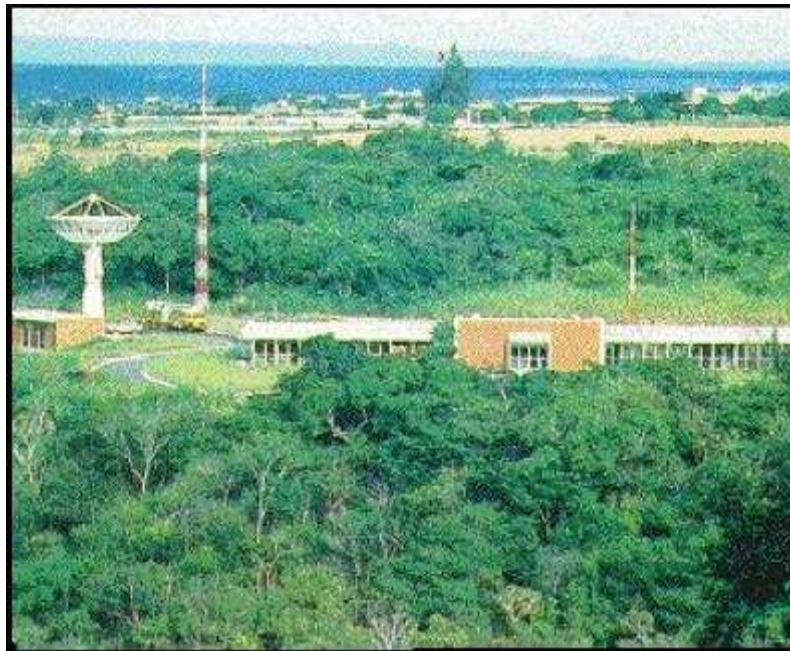


Figura 25: Estação terrena de rastreamento e comando de satélite em Cuiabá.
Fonte: <http://www.ltid.inpe.br/selper/image/caderno2/cad19.htm>

⁸ Satélite de Coleta de Dados (SCD): realiza a transmissão remota de dados. Ele necessita que haja uma plataforma instalada, por exemplo, numa represa ou rio da Amazônia, que mede, por exemplo, a vazão desse rio. Quando o satélite passa na área de visibilidade daquela plataforma recebe aquele dado, retransmite para uma central no INPE, que por sua vez reenvia a informação a todos os órgãos que se interessem por ele. Os sensores são remotos no sentido geográfico, não se trata de satélite de sensoriamento remoto.

Em 1988 o Brasil começou o seu próprio programa de satélite em sensoriamento remoto, com a assinatura de um acordo com a República Popular da China para a construção de uma série de satélites denominados pela sigla CBERS (China-Brazilian Earth Resources Satellite ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). O acordo envolveu o INPE e a CAST (Chinese Academy of Spacial Technology ou Academia Chinesa de Tecnologia Espacial). Esse programa de cooperação é a união de recursos financeiros e tecnológicos entre o Brasil e a China, num investimento superior a US\$ 300 milhões, sendo 30% brasileiro e 70% chinês⁹. A figura 26 ilustra o satélite CBERS I com o painel solar aberto nas instalações do INPE – SP.

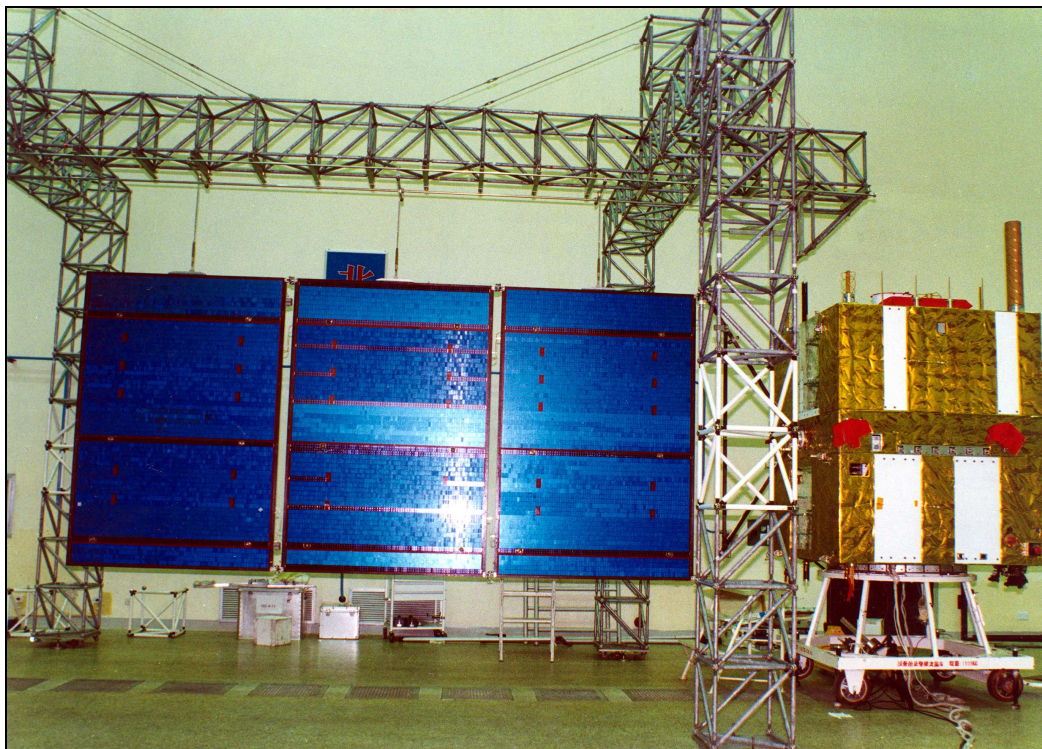


Figura 26: Satélite CBERS-I.

Fonte: http://www.cbbers.inpe.br/_fig/cbbers1_foto6_high.jpg

O primeiro satélite da série CBERS foi lançado em 14 de outubro de 1999 pelo foguete chinês Longa Marcha 4B (figura 27), do Centro de Lançamento de Taiyuan, na China, e operou até julho de 2003, quase dois anos a mais do que os dois anos de vida útil originalmente planejados. A parceria conjunta rompeu os padrões que restringiam os acordos internacionais à transferência de tecnologia e o intercâmbio entre pesquisadores de nacionalidades diferentes. O programa CBERS foi a primeira cooperação neste campo entre dois países em desenvolvimento no mundo.

⁹ Dados do INPE, disponíveis on-line em: <http://www.cbbers.inpe.br/pt/programas/historico2.htm>

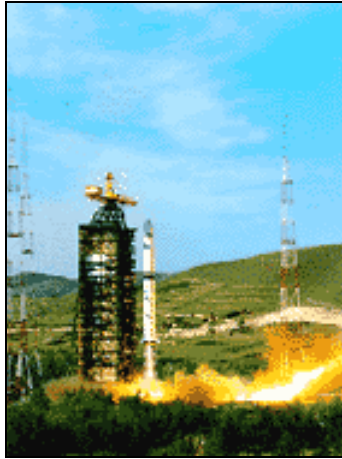


Figura 27: Foguete chinês Longa Marcha 4B.
Fontes: <http://www.cgwic.com.cn/launch/gallery6.html>

O CBERS I com uma órbita hélio-síncrona¹⁰ (figura 28), a uma altitude de 778 km, fazia cerca de 14 revoluções (ou órbitas) por dia (duração de cada órbita de 100,26 minutos), com uma inclinação de 98,504°, e conseguia obter a cobertura completa da Terra em 26 dias. Nessa órbita, o satélite cruzava a Linha do Equador sempre no mesmo horário local (10:30h da manhã), permitindo assim que se obtivesse sempre as mesmas condições de iluminação solar para a comparação de imagens tomadas em dias diferentes.



Figura 28: Órbita hélio-síncrona do satélite CBERS.
Fonte: http://www.cbbers.inpe.br/pt/programas/cbbers1-2_orbita.htm

Os satélites CBERS I e II são idênticos em sua constituição técnica, missão no espaço e em suas cargas úteis (equipamentos que vão a bordo, como câmeras, sensores, computadores entre outros equipamentos voltados para experimentos científicos). O

¹⁰ Órbita hélio-síncrona: caso particular da órbita quase polar. O satélite viaja do pólo norte para o pólo sul e vice-versa, mas seu plano de órbita é sempre fixo para um observador que esteja postado no Sol. Assim o satélite sempre passa aproximadamente sobre o mesmo ponto da Terra todos os dias na mesma hora.

segundo satélite CBERS foi lançado em 21 de outubro de 2003, da mesma base de lançamentos chinesa Taiyuan em Shanxi, China, e pelo mesmo tipo de veículo lançador, o foguete chinês Longa Marcha 4B.

A carga útil dos satélites CBERS consiste de uma Câmera Imageadora de Alta Resolução (CCD – Charged Coupled Device), um Radiômetro Imageador de Varredura no Infravermelho (IRMSS – Infrared Multispectral Scanner), uma Câmera Imageadora de Amplo Campo de Visada (WFI – Wide Field Imager), um Monitor do Ambiente Espacial (SEM – Space Environment Monitor), e um Sistema de Coleta de Dados (DCS – Data Collection System).

| Banda | Resolução Espectral (μm) | Resolução Espacial (m) |
|--------------|---------------------------------------|------------------------|
| CCD 1 (B1) | 0,45 – 0,52 | 19,5 |
| CCD 2 (B2) | 0,52 – 0,59 | 19,5 |
| CCD 3 (B3) | 0,63 – 0,69 | 19,5 |
| CCD 4 (B4) | 0,77 – 0,89 | 19,5 |
| CCD 5 (B5) | 0,51 – 0,73 | 19,5 |
| IRMSS 1 (B6) | 0,50 – 0,90 | 77,8 |
| IRMSS 2 (B7) | 1,55 – 1,75 | 77,8 |
| IRMSS 3 (B8) | 2,08 – 2,35 | 77,8 |
| IRMSS 4 (B9) | 10,4 – 12,5 | 156 |
| WFI 1 (B10) | 0,63 – 0,69 | 258 |
| WFI 2 (B11) | 0,77 – 0,89 | 258 |

Tabela 1: Características dos sensores do satélite CBERS
Fonte: Adaptado de Epiphanyo, 2005.

As aplicações do CBERS envolvem muitas áreas, incluindo monitoramento e mapeamento do desflorestamento, gerenciamento e controle ambiental, aplicações em agricultura, incluindo identificação e monitoramento de culturas, geologia, hidrologia, monitoramento de reservatórios e zonas costeiras, mapeamentos de uso da terra, turismo, etc.

O Brasil e a China acordaram que a política de distribuição interna aos seus territórios é definida por cada um deles. No caso brasileiro os dados do CBERS são vistos como um bem público. De acordo com esta visão as imagens CBERS têm que ser usadas,

tanto quanto possível, pelo público a um baixo custo. Isso significa que as imagens do CBERS podem ser solicitadas gratuitamente pela Internet¹¹ O objetivo é maximizar o uso dos dados CBERS a fim de criar um sólido e forte setor de sensoriamento remoto no país, que envolveria a academia, o setor privado, o terceiro setor, o governo, e outros agentes

O CBERS II foi projetado para uma vida útil de dois anos, mas a exemplo do que ocorreu com o CBERS I, a vida útil já foi superada e ele encontra-se em operação até os dias de hoje. Inicialmente o programa de cooperação entre Brasil e China contemplava apenas dois satélites da série CBERS, mas devido ao desempenho satisfatório dos satélites CBERS I e II os governos brasileiro e chinês decidiram expandir o acordo e incluir outros dois satélites da mesma categoria, os satélites CBERS III e IV, como uma segunda etapa da parceria sino-brasileira.

Como o CBERS III está previsto para ser lançado apenas em 2010, e o CBERS IV em 2013, um outro acordo foi firmado entre os dois países para o lançamento do CBERS IIB, a fim de evitar uma eventual falta de dados de sensoriamento remoto entre o possível fim do CBERS II e o lançamento do CBERS III. O lançamento do CBERS IIB ocorreu no dia 19 de setembro de 2007, a partir da base de lançamento de Taiyuan, na China, com o mesmo foguete chinês Longa Marcha 4, que fez o lançamento dos CBERS I e II.

O CBERS IIB foi montado, integrado e testado na sede do INPE, em São José dos Campos (SP), foi desmontado para o transporte e enviado para a China em um avião cargueiro em abril de 2007. Outros testes foram feitos em território chinês antes do lançamento (testes de calibração das câmeras e testes térmicos).

O CBERS IIB ainda pertence à primeira geração do CBERS e, portanto, é praticamente idêntico aos CBERS I e II. Não obstante, algumas melhorias foram introduzidas. A principal delas é quanto à carga útil, com a substituição do imageador IRMSS por uma Câmera Pancromática de Alta Resolução (HRC), com uma resolução espacial máxima de 5 metros. Outras melhorias são um novo sistema de gravação a bordo, e um sistema avançado de posicionamento, que inclui GPS (Global Positioning System) e sensor de estrelas. A vida útil projetada do satélite é de dois anos.

¹¹ As solicitações das imagens CBERS podem ser feitas pelo endereço eletrônico: <<http://www.obt.inpe.br/catalogo>>

Nos projetos dos satélites CBERS III e CBERS IV a participação brasileira será ampliada para 50%, deixando o Brasil em igualdade de condições com o parceiro. Está previsto um avanço tecnológico desses satélites em relação aos anteriores, o que acarretará em um maior poder de resolução de suas imagens. O satélite CBERS IV poderá ser lançado do Brasil, se para tanto houver condições no Centro de Alcântara, no Maranhão, quando do lançamento em 2013.

As figuras 29, 30 e 31 abaixo exemplificam algumas imagens da satélite CBERS. A figura 29 traz uma imagem adquirida pelo sensor CCD do CBERS II, referente ao Plano Piloto de Brasília, em 8 de setembro de 2004 e cuja resolução espacial é de 19,5 metros (conforme se verifica pela Tabela 1) Nesta figura destaca-se o cinturão das cidades-satélites em plena expansão, bem como a presença de novos loteamentos.

A figura 30 ilustra uma imagem do sensor IRMSS do CBERS II da região de Angra dos Reis e Ilha Grande no litoral sul do Rio de Janeiro. Destaca-se a presença da Mata Atlântica nas serranias e na Ilha Grande. Outro destaque é a grande quantidade de pequenas ilhas que a região abriga. A imagem foi adquirida em 1 de agosto de 2005 e com resolução espacial de 77,8 metros.

E finalmente, uma imagem do sensor WFI, também do CBERS II referente à região de Buenos Aires e do Rio da Prata e adquirida em 21 de janeiro de 2005, com resolução espacial de 258 metros é mostrada pela figura 31. As águas dos rios Paraná e Uruguai se dispersam ao largo de Buenos Aires, formando a grande pluma azul mais claro que avança para o Oceano Atlântico



Figura 29: Imagem do sensor CCD do satélite CBERS II.
Fonte: <http://www.cbbers.inpe.br/pt/imprensa/gimagens.htm>

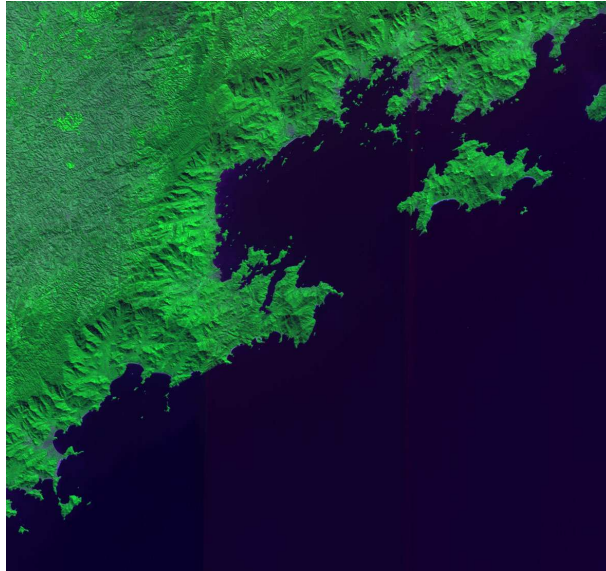


Figura 30: Imagem do sensor IRMSS do satéliteCBERS II.
Fonte: <http://www.cbbers.inpe.br/pt/imprensa/gimagens.htm>

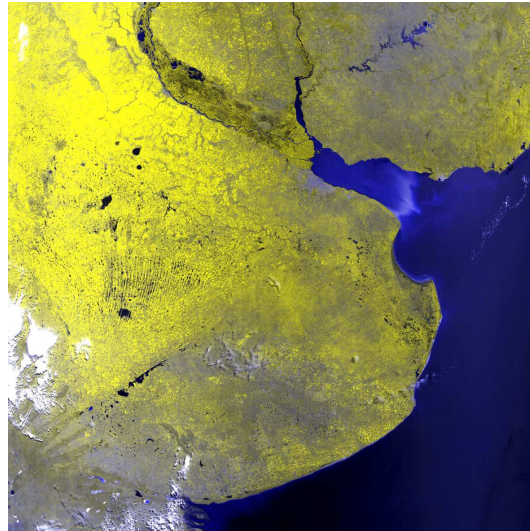


Figura 31: Imagem do sensor WFI do satéliteCBERS II.
Fonte: <http://www.cbbers.inpe.br/pt/imprensa/gimagens.htm>

CAPÍTULO 2: **DEFINIÇÃO**

O termo sensoriamento remoto foi pela primeira vez utilizado no final dos anos 50, por Evelyn Pruitt, cientista que desenvolvia suas pesquisas no Escritório de Pesquisa da Marinha dos Estados Unidos da América (Office of Naval Research). Sua definição incluía fotografias aéreas, bem como as imagens adquiridas pelos então novos sistemas sensores. O termo surgiu para descrever o processo de observação, mensuração e identificação de objetos sem estar em contato direto com eles

O sensoriamento remoto é o modo de obtenção de dados à distância, a partir da utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos de processamento e de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc. Os sensores são os equipamentos capazes de coletar a energia proveniente de um objeto que se deseja avaliar, convertê-la em sinal passível de ser registrado e apresentá-lo em forma adequada à extração de informações. O propósito é o estudo do ambiente terrestre, por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações.

Define-se sensoriamento remoto como a ciência e a arte de obter informações a respeito de um objeto, área ou fenômeno, por meio da análise de dados adquiridos por dispositivos que não estão em contato direto com tal objeto, área ou fenômeno que está sendo investigado. Trata-se, portanto, de uma tecnologia para aquisição, processamento e análise de informações acerca da superfície terrestre, das condições urbanas e das suas mudanças, por meio da interação entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes da superfície. Tais informações são obtidas remotamente por meio de sensores instalados em plataformas orbitais ou aerotransportadas.

A fotografia e o imageamento digital permitem que as visadas aéreas sejam adquiridas rapidamente, tornando possível a obtenção e a análise de imagens de grandes áreas da superfície terrestre. A tecnologia dos satélites possibilita que todo o globo terrestre seja sistematicamente imageado e monitorado. Atualmente, diversas atividades

humanas dependem de um fluxo constante de imagens adquiridas a partir de pontos elevados, muito acima da superfície da Terra, para que seja possível inventariar, avaliar e manejar recursos, agora não mais em uma escala local, mas sim em uma escala global. A análise desse imageamento é o objetivo do sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto permite que sejam coletadas informações a respeito de regiões onde o acesso direto dos observadores humanos seria demasiadamente caro ou perigoso. Vastas áreas do oceano, extensas plantações ou florestas, vulcões ativos, áreas de conflitos militares, regiões de extremo rigor climático (tais como desertos ou geleiras), ou áreas submetidas à radioatividade podem ser facilmente monitoradas com o uso dessa tecnologia.

Os produtos de sensoriamento remoto, ou seja, as imagens digitais ou fotografias aéreas coletadas a partir de aeronaves ou espaçonaves, têm sido muito usados na produção de mapas da superfície da Terra e da topografia do fundo dos oceanos, trabalhos que envolvem recursos naturais e infra-estrutura urbana. O sensoriamento remoto oferece vantagens substanciais em comparação com outros métodos de coleta de dados, o que o tem levado a uma ampla gama de aplicações. Ele proporciona uma visão geral e permite o discernimento de padrões e relações não aparentes quando observadas ao nível do solo. Outra vantagem diz respeito à rapidez com que as informações são disponibilizadas, o que é de grande valor para a prevenção e a avaliação de desastres naturais, por exemplo, onde a resposta das atividades de emergências deve ser o mais breve possível. As imagens provenientes do sensoriamento remoto são ferramentas que assessoram, ajudam a planejar e a monitorar tais atividades emergenciais. O sensoriamento remoto pode registrar comprimentos de onda que o olho humano não pode ver, como o infravermelho, para detectar fenômenos que do contrário não seriam visíveis, como por exemplo, emissão de calor ou radioatividade.

A figura 32 traz uma imagem referente à banda da radiação infravermelho termal capturada pelo sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), que está a bordo do satélite Terra da NASA. A imagem mostra claramente o padrão da Corrente do Golfo, uma corrente de água quente que flui do leste, onde atravessa o Golfo do México, em direção ao norte da Europa. A corrente do Golfo é evidenciada aqui nas cores amarelo, laranja e vermelho, sendo a parte representada com a cor vermelha a porção mais quente.

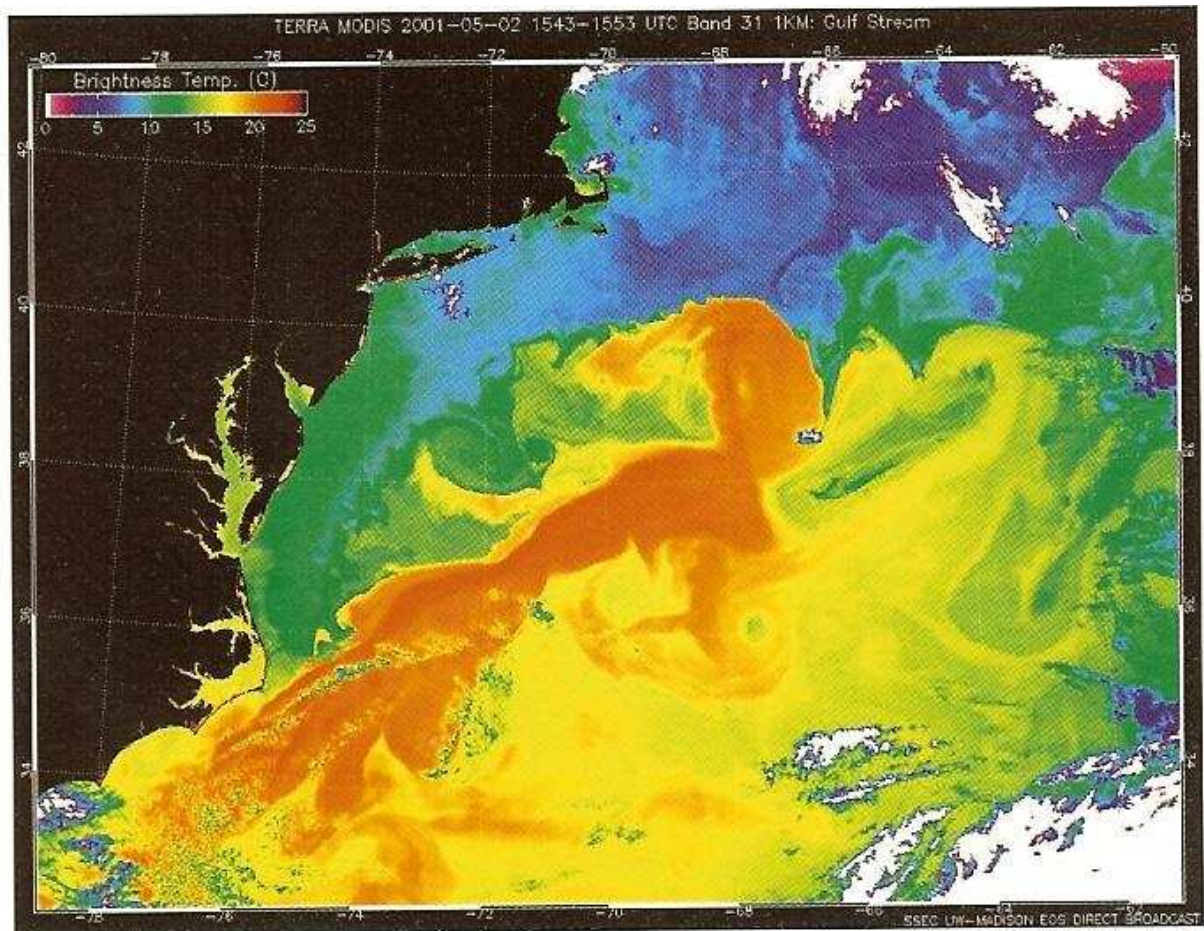


Figura 32: Corrente do Golfo, imagem do sensor MODIS.
 Fonte: Aronoff (2005): p.4

O sensoriamento remoto assume crescente importância e razões existem para tal, principalmente nos dias de hoje. Os dados provenientes de sensoriamento remoto são de abrangência espacial muito superior àqueles advindos de levantamento de campo. Em grandes áreas ou em áreas de difícil acesso, o sensoriamento remoto apresenta a grande vantagem da acessibilidade. A rápida cobertura de grandes áreas facilita a comparação de regiões. O imageamento de grande altitude possibilita uma visão sinóptica permitindo a percepção de variações espaciais de grande escala. O imageamento repetitivo viabiliza o monitoramento de grandes áreas. E a manutenção de arquivos de imagens permite a extração de dados de passado

C APÍTULO 3: A ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

Em uma análise mais rigorosa, o sensoriamento remoto mede as trocas energéticas entre os fenômenos ou objetos e o meio ambiente. Essas trocas manifestam-se predominantemente por emissão ou modificações na radiação eletromagnética, ou perturbações nos campos naturais.

A radiação eletromagnética se propaga na forma de ondas produzidas pela oscilação dos campos elétrico e magnético. Ela é caracterizada por apresentar comprimentos de onda (λ) que representam a distância entre dois pontos de igual intensidade dos campos elétrico e magnéticos.

Os componentes da onda eletromagnética incluem uma onda elétrica senoidal (E) no plano vertical, e uma onda similar magnética (M) no plano horizontal formando um ângulo reto com a onda elétrica. Ambas são perpendiculares à direção de propagação, como pode ser observado na figura 33. As ondas eletromagnéticas são do tipo transversal¹² e não necessitam de um meio de propagação, ou seja, propagam-se até mesmo no vácuo.

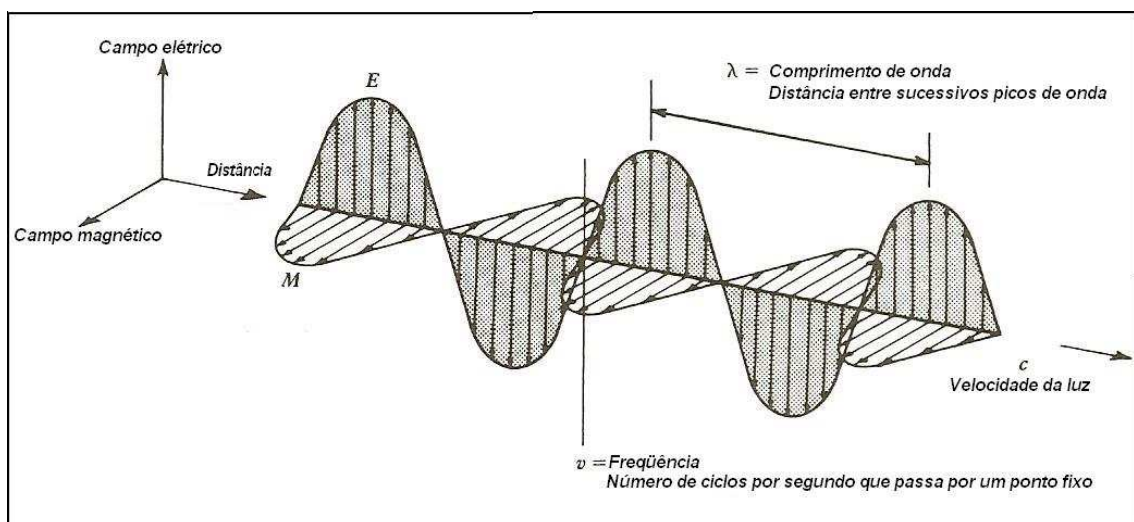


Figura 33: Onda eletromagnética.
Fonte: Adaptado de Lillesand *et al*, 2004 (p.4)

¹² Ondas cujos picos e vales (cristas e depressões) formam ângulos retos com a direção do movimento, como aquelas que se propagam ao longo de uma corda.

No sensoriamento remoto é comum a classificação das ondas eletromagnéticas quanto ao seu comprimento e localização dentro do espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético é a distribuição da radiação eletromagnética em relação ao seu comprimento de onda ou frequência. Muito embora denominações como radiação ultravioleta, infravermelho, microondas, raios gama, etc sejam frequentemente usadas para assinalar as diferentes regiões do espectro eletromagnético, não existe uma divisão clara entre uma região espectral e outra que a sucede ou antecede. Essa divisão do espectro é meramente por uma questão de conveniência para facilitar o estudo sobre o assunto, do que por haver diferenças significativas nas características e propriedades da energia dentre os vários comprimentos de onda do espectro.

O espectro da radiação eletromagnética engloba a luz visível, os raios gama, as ondas de rádio, as microondas, os raios X, ultravioleta e infravermelho. Esses nomes, como já enfatizado anteriormente, indicam áreas do espectro divididas para fins didáticos e práticos, pois o espectro é contínuo e não há diferenças abruptas entre as formas de radiação, e todas são basicamente o mesmo fenômeno físico. Por exemplo, todas se propagam pelo espaço com a mesma velocidade – a velocidade da luz – de cerca de 300 mil km/s. As diferenças estão no comprimento das ondas e na frequência da radiação¹³, que fazem com que tenham diferentes características, como o poder de penetração dos raios X ou o aquecimento do infravermelho. Uma fonte, como o Sol, pode emitir luz dentro de um espectro variado. Por exemplo, decompondo-se a luz solar com um prisma é possível observar um espectro de cores, como as do arco-íris (figura 34). Outras são invisíveis ao olho humano, mas detectáveis por instrumentos.

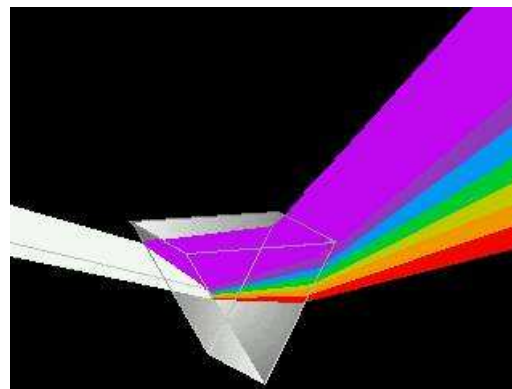


Figura 34: Decomposição da luz solar no prisma
Fonte: http://www.radiacao.com.br/radiacao_eletromagnetica.html

¹³ Conforme descritos na figura 33.

As diferentes denominações para as radiações eletromagnéticas são decorrentes de natureza histórica ou dos processos utilizados na sua produção ou determinação, e são apresentadas a seguir:

- **Radiação Gama:** emitida por materiais radioativos e pelo Sol. Localiza-se no espectro eletromagnético antes dos raios X, ou seja, aquém de 1 angstrom¹⁴. Possui altas frequências e, por isso, é muito penetrante (alta energia). Na prática, tem aplicações na medicina (radioterapia) e em processos industriais, principalmente na conservação de alimentos.
- **Raios X:** Esta denominação foi dada por seu descobridor, o físico alemão Wilhelm Röntgen, em 1895, por não conhecer suas trajetórias. Os raios X surgem do interior da eletrosfera do átomo, por rearranjos eletrônicos. São muito usados em radiografias e em estudos de estruturas cristalinas de sólidos. Os raios X provenientes do Sol são absorvidos pelos gases na alta atmosfera.
- **Radiação ultravioleta (UV):** Estas radiações são muito produzidas durante as reações nucleares no Sol. Entretanto, ao atingir o topo da atmosfera terrestre, são quase totalmente absorvidas pelo gás ozônio (O₃). O espectro do UV é dividido em três bandas: UV próximo, UV distante e UV máximo.
- **Radiação visível (luz):** conjunto de radiações eletromagnéticas compreendidas entre 0,38 e 0,70 µm. As radiações contidas nesta faixa de comprimento de onda, ao incidirem no sistema visual humano, são capazes de provocar uma sensação de cor¹⁵ no cérebro.
- **Radiação infravermelha (IV):** conjunto de radiações eletromagnéticas cujos comprimentos de onda variam de 0,7 a 1000 µm (1 mm). Também são denominadas de radiação térmica

¹⁴ Unidade de comprimento, equivalente a 10⁻¹⁰ metro.

¹⁵ O fato de o ser humano enxergar cores está ligado aos estímulos do cérebro, que utiliza este recurso para diferenciar uma onda da outra, ou melhor, uma frequência da outra. Assim, o vermelho possui uma frequência diferente do violeta. Por esta razão, pode-se dizer que na natureza não existem cores, apenas objetos que refletem ondas de frequências diferentes, que provocam no cérebro humano a sensação de cores.

- **Microondas:** radiações eletromagnéticas que se estendem pela região do espectro de 1000 μm até cerca de 100 cm. São mais comumente referenciadas em Hertz e seus múltiplos, estando, neste caso, compreendidas entre 300 MHz a 300 GHz.
- **Ondas de rádio:** conjunto de radiações com frequências menores que 300 Mhz (comprimento de onda maior que 100 cm). Estas ondas são utilizadas principalmente em telecomunicações e radiodifusão.

A tabela 2 a seguir apresenta a principal divisão do espectro eletromagnético tipicamente utilizado em sensoriamento remoto:

| Região | Limite |
|-------------------------------|--|
| Raios Gama | Menos de 0,03 nm |
| Raios X | 0,03 nm – 240 nm |
| Ultravioleta | 0,24 μm – 0,38 μm |
| Visível | 0,38 μm – 0,70 μm |
| Infravermelho | 0,70 μm – 1000 μm |
| Infravermelho próximo | 0,70 μm – 1,0 μm |
| Infravermelho de ondas curtas | 1,0 μm – 3,0 μm |
| Infravermelho de ondas médias | 3,0 μm – 8,0 μm |
| Infravermelho de ondas longas | 8,0 μm – 14 μm |
| Infravermelho distante | 14 μm – 1000 μm |
| Microondas | 1 mm – 100 cm |
| Ondas de rádio | Mais de 100 cm |

Tabela 2: Principal divisão do espectro eletromagnético.
Fonte: Adaptado de Aronoff (2005), p. 57.

A porção do espectro mais relevante para o sensoriamento remoto é aquela correspondente à faixa da luz (visível) e do infravermelho. Mais recentemente, com o avanço da tecnologia de radar, a porção que se refere às microondas passou a despertar bastante interesse ao sensoriamento remoto. A região de microondas, com comprimentos de onda que podem variar de 1 mm até próximo de 1 m, é a que contém os mais longos comprimentos de onda usados no sensoriamento remoto. A figura 35 traz a representação do espectro eletromagnético.

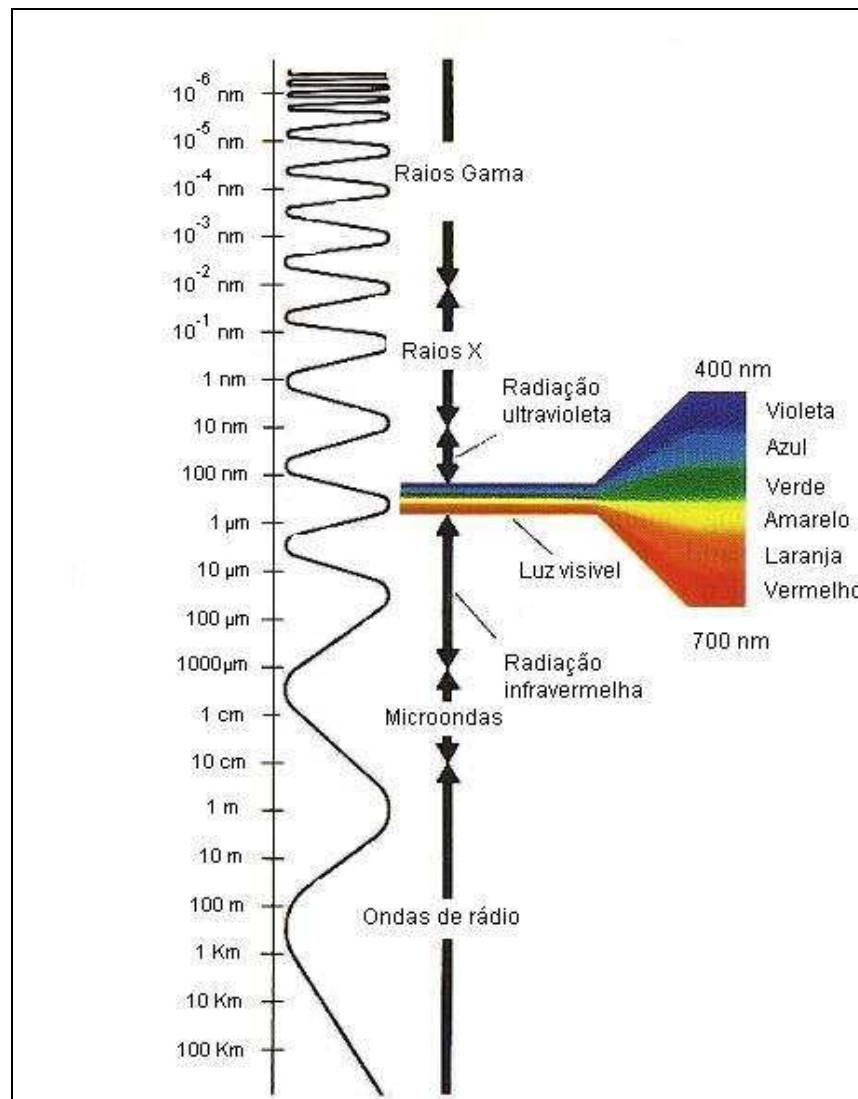


Figura 35: Espectro eletromagnético.

Fonte: Adaptado de Kaufmann III, W. J. **Universe**. Ed. W. H. Freeman, New York, 1991

Toda radiação detectada remotamente pelos sensores percorre uma longa distância até que consiga ultrapassar a atmosfera terrestre. A atmosfera exerce um profundo efeito sobre a intensidade e na composição espectral da radiação disponível para os sistemas sensores. Esses efeitos oriundos da atmosfera variam conforme: a distância a ser percorrida pela radiação, a magnitude da radiação incidente, as condições atmosféricas presentes e o comprimento de onda envolvido. Esses efeitos devem-se, principalmente, aos mecanismos de espalhamento e absorção.

O espalhamento é a difusão aleatória da radiação eletromagnética causada por partículas em suspensão na atmosfera. Esse fenômeno gera um campo de energia difusa que se propaga em todas as direções. Por sua vez a absorção é o resultado da perda efetiva de energia para os componentes constituintes da atmosfera. Os mais eficientes absorvedores da radiação solar são o vapor d'água, o dióxido de carbono e o

ozônio. Em virtude desses efeitos exercidos pela atmosfera sobre a radiação eletromagnética incidente na Terra, os sensores remotos são calibrados para operar nas chamadas janelas atmosféricas, que são as faixas espectrais livres ou com menor grau de interferência desses efeitos.

A radiação eletromagnética que não sofre espalhamento ou absorção quando de sua passagem pela atmosfera, pode então atingir e interagir com a superfície terrestre, ou seja, com seus objetos ou alvos. Essa radiação interage de forma diferenciada com os objetos ou alvos, podendo ser absorvida (a energia é absorvida pelo objeto), transmitida (o fluxo de energia passa através do objeto) ou refletida (o fluxo de energia muda de direção após atingir o objeto).

Conforme ilustra a figura 36 para um elemento de volume de um corpo d'água, várias frações da energia incidente no elemento são refletidas, absorvidas, e/ou transmitidas. Aplica-se, então, o princípio da conservação de energia (equação do balanço de energia), onde todos os componentes são função do comprimento de onda λ . É necessário ressaltar, todavia, que as proporções de energia refletida, absorvida e transmitida variam de acordo com as diferentes feições terrestres, seus materiais, tipos e condições. São essas diferenciações que nos permitem distinguir as diversas feições em uma imagem. Além disso, para uma mesma feição, essas proporções de energia refletida, absorvida e transmitida variam para diferentes comprimentos de onda. Isto significa que duas feições podem ser indistinguíveis em um certo comprimento de onda (ou seja, em uma determinada banda do espectro eletromagnético), e bastante diferentes em outra banda espectral.

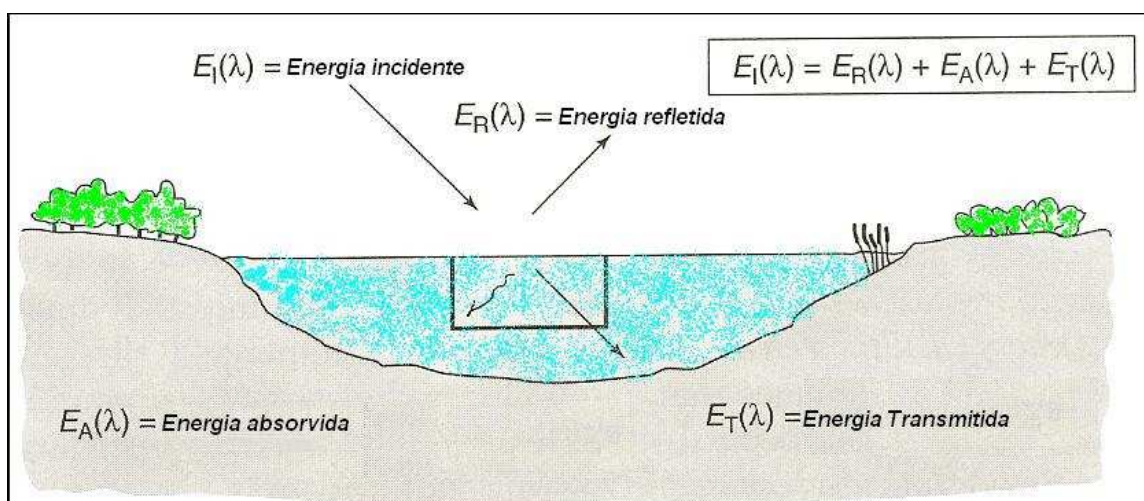


Figura 36: Interação entre a energia eletromagnética e as feições da Terra.
Fonte: Adaptado de Lillesand *et al*, 2004 (p.12).

O sensoriamento remoto utiliza a quantidade de radiação refletida (também chamada de radiância) e a compara com a quantidade incidente (irradiância) sobre o alvo. Isto fornece a medida de reflectância captada por sensores, denominados radiômetros ou espectrorradiômetros¹⁶. Por meio da reflectância pode-se conhecer as características de um objeto quanto à sua capacidade de refletir a radiação eletromagnética, pois ela depende das características físico-químicas deste objeto.

Os objetos estudados são as diversas feições terrestres, como: solo; água (rios oceanos, etc); vegetação (florestas, pastagens, lavouras, etc); estradas; áreas urbanas; e assim por diante. Cada uma destas feições apresenta uma resposta diferente à radiação eletromagnética nela incidente, seja essa radiação oriunda do sol ou gerada por radares. É o que se denomina comportamento espectral de alvos ou assinatura espectral.

Para a extração das informações contidas nos produtos de sensoriamento remoto é imprescindível o conhecimento do comportamento espectral de alvos (objetos) sobre a superfície terrestre, ou seja, como as substâncias se comportam na interação com a energia eletromagnética. A figura 37 mostra a assinatura espectral de alguns alvos terrestres.

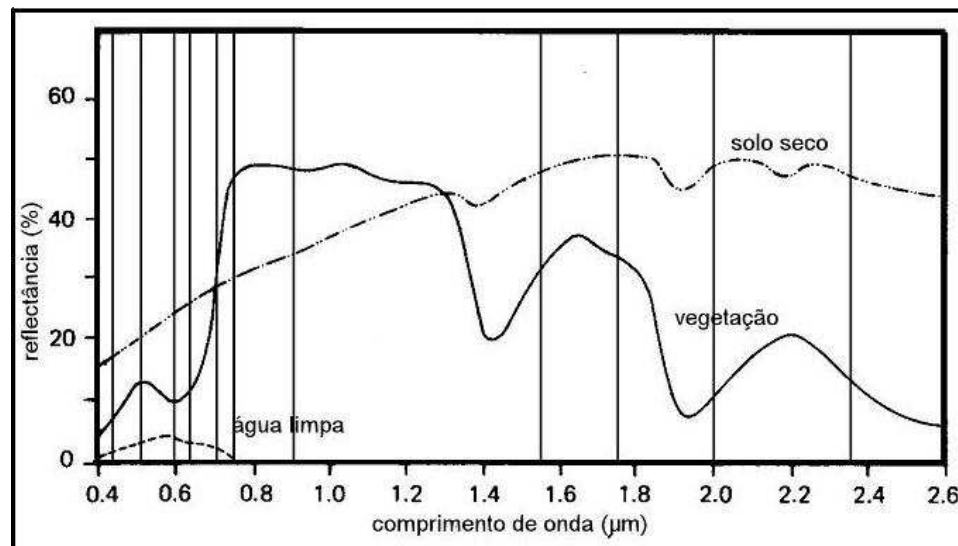


Figura 37: Assinatura espectral.

Fonte: Adaptado de Lillesand *et al*, 2004 (p.17).

Muitos pesquisadores despenderam muito tempo e esforço realizando simulações em laboratório e campos de prova com a finalidade de observar, estudar e catalogar como

¹⁶ Os espectrorradiômetros diferem dos radiômetros por operarem em faixas espectrais estreitas.

determinadas feições da superfície terrestre respondem a diferentes comprimentos de onda da radiação eletromagnética (bandas do espectro). Atualmente, essas informações geradas são utilizadas como referência em muitas pesquisas e projetos de geoprocessamento.

A interpretação e o entendimento de uma imagem de sensoriamento remoto é, essencialmente, um exercício da descoberta e do entendimento de como interage a radiação eletromagnética com o material da superfície terrestre, a fim de se descobrir informações ou propriedades relacionadas com sua natureza intrínseca, ou seja, com a composição de seus constituintes. Desta feita, busca-se nas imagens identificar pelas respostas espectrais dos materiais, que tipo de feição está presente em uma área. O sucesso desta análise depende do número de bandas que o sensor é capaz de analisar e, principalmente, do conhecimento do intérprete sobre os fatores que controlam o comportamento espectral da reflectância dos alvos. Este conhecimento é obtido de medidas espectrais feitas em laboratório ou no campo, usando-se espectrorradiômetros de alta resolução.

CAPÍTULO 4: PLATAFORMAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Os instrumentos de sensoriamento remoto operam a partir de plataformas, que podem variar desde equipamentos terrestres até espaçonaves. Os equipamentos terrestres posicionados ao nível do solo, tais como: em veículos do tipo “truck-mounted boom”¹⁷ (figura 38), altos edifícios, torres de caixa d’água, ou até mesmo escadas, são freqüentemente usados para testar os instrumentos de sensoriamento remoto e para coletar medidas espectrais detalhadas de feições conhecidas, para testar e/ou calibrar as imagens.



Figura 38: Veículo do tipo “truck-mounted boom”.

Fonte: <http://scissorplatforms.co.nz/index.aspx?site=342&page=2232>

O termo imageamento aéreo refere-se aos dados coletados a partir de aviões, helicópteros e outros veículos operando dentro da atmosfera terrestre. O sistema aéreo oferece a flexibilidade de posicionar os instrumentos de sensoriamento remoto quando e onde eles são necessários. Os veículos podem voar a baixas altitudes para adquirir imagens ricas em detalhes e com menor interferência atmosférica do que as imagens adquiridas pelas plataformas espaciais. No entanto, quando sob a ação de fortes ventos, eles são muito menos estáveis do que as plataformas espaciais.

¹⁷ Os veículos do tipo “truck-mounted boom” são equipamentos especialmente projetados para permitir medidas de sensoriamento remoto muito próximas do solo e em locais apropriados para o controle das condições de aquisição dos dados.

A figura 39 traz um exemplo de aeronave utilizada como plataforma para o sensoriamento remoto aéreo e uma imagem por ela adquirida.

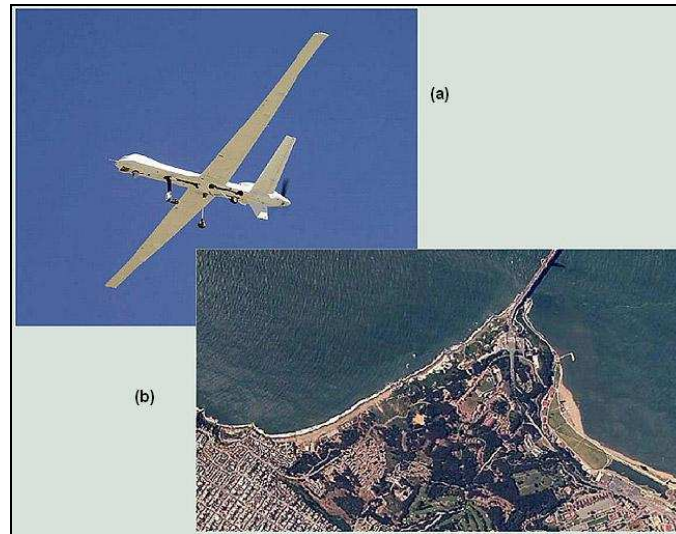


Figura 39: Sensoriamento remoto aéreo: (a) aeronave, (b) imagem.
 Fonte: http://celebrating200years.noaa.gov/visions/remote_sensing/image3.html

Os instrumentos de sensoriamento remoto no espaço ou orbital são basicamente os satélites, embora estações espaciais orbitais de baixa altitude e veículos reutilizáveis, como os ônibus espaciais (space shuttle) também sejam usados.

O uso de veículos espaciais reutilizáveis oferece uma relativa simplicidade operacional e o potencial para uma significativa redução de custos, ao se comparar com os custos relativos do veículo lançador (foguetes) que só pode ser usado uma única vez, e do satélite, que ao final da sua vida útil perde-se no espaço e se transforma em sucata espacial. Entretanto, eles são tecnologicamente muito mais difíceis de serem concebidos, construídos e operados.

Um exemplo da utilização de ônibus espaciais em sensoriamento remoto é a missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) para obtenção do modelo de elevação da superfície terrestre. Trata-se do mais completo banco de dados digital topográfico de alta resolução do planeta (mapa tridimensional da Terra). O SRTM consiste em um sistema de radar especialmente modificado, a bordo do ônibus espacial Endeavour¹⁸ (figura 40), que imageou cerca de 80% da superfície da Terra. A missão teve duração de 11 dias ininterruptos (devido ao uso da tecnologia de radar, que pode adquirir as

¹⁸ O lançamento do ônibus espacial Endeavour ocorreu no Kennedy Space Center, Cabo Canaveral, Flórida, EUA, em 11 de fevereiro de 2000.

imagens durante a noite, e independentemente da cobertura de nuvens), de 11 a 22 de fevereiro de 2000. O SRTM é um projeto internacional, encabeçado pela NGA (National Geospatial-Intelligence Agency), pela NASA e pela USGS (United States Geological Survey).



Figura 40: Lançamento do ônibus espacial Endeavour para a missão SRTM.

Fonte: <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/sts-99/images/high/KSC-00PP-0224.jpg>

O imageamento realizado pela missão SRTM encontra-se disponível gratuitamente para download no site da USGS (<http://srtm.usgs.gov/>), com uma resolução espacial de 90 metros (ou seja, pontos amostrados no terreno a cada 90 metros para a construção do *grid* utilizado no modelo digital de elevação), e de 30 metros para usuários nos Estados Unidos, seus territórios ou possessões¹⁹. A figura 41 é um exemplo de produto obtido pela missão SRTM. A imagem de radar é sobreposta ao modelo digital de elevação e o resultado é uma imagem 3D.

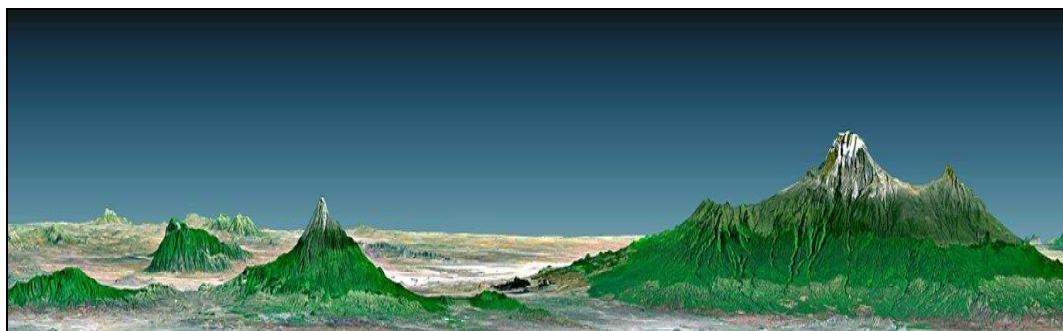


Figura 41: Imagem SRTM: Monte Kilimanjaro, Tanzânia

Fonte:

<http://srtm.usgs.gov/srtmimagegallery/Perspective%20with%20Landsat%20Overlay,%20Mount%20Kilimanjaro,%20Tanzania.php>

¹⁹ Hennig *et al.* (2001), Rabus *et al.* (2003), USGS (2007), apresentam maiores detalhes sobre a missão SRTM e seus produtos.

Os modernos dados de sensoriamento remoto provêm predominantemente de satélites e são imediatamente registrados digitalmente. A maior vantagem dos sensores instalados nos satélites é a sua consistência. Eles são capazes de oferecer uma cobertura contínua usando o mesmo sensor por longos períodos de tempo, proporcionando uma valiosa fonte de dados para o monitoramento ambiental, por exemplo. A tabela 3 apresenta uma visão de conjunto de alguns dos mais utilizados sistemas de satélite atualmente em operação e alguns projetos de lançamentos futuros.

| Empresa / Instituição | NASA EUA | | CAST & INPE China e Brasil | | CNES França | | NRSA Índia | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|--|---|--|---|---|---|------------------|---|
| Sistema | LANDSAT-7 ETM (Lançamento 1999) | | CBERS-2B (Lançamento 2007) | | SPOT 3 (Lançamento 1993) e SPOT 4 (Lançamento 1998) / HRV | | SPOT 5 (Lançamento 2002) | | |
| Modo | Pan (8 bits) | MS + termal (8 bits) | Pan (8 bits) | MS (8 bits) | Pan (8 bits) | MS (8 bits) | Pan (6 bits) | MS (7 bits) | |
| Resolução Geométrica | 15 m | 30 m 60 m (IvT) | 2,5 m | 20 m | 10 m | 2,5 m (Supremodo realçado) 5,0 m (modo normal) | 10 m (SWIR 20 m) | 5,8 m 23,5 m | |
| Resolução Espectral (nm) | 500-900 | 450-520 (az) 530-610 (vd) 620-690 (vm) 780-910 (IvP) 1570-1780 (SWIR) 10420-12800 (IvT) 2080-2350 (IvVm) | 500-800 | 450-520 (az) 520-590 (vd) 630-690 (vm) 770-890 (IvP) 510-730 (Pan) | 480-710 | 500-590 (vd) 510-630 (vm) 790-890 (IvP) 1580-1750 (IvVm) | 430-470 (az) 500-590 (vd) 610-690 (vm) 780-890 (IvP) 1580-1750 (SWIR) | 500-760 | 520-590 (vd) 620-680 (vm) 770-890 (IvP) 1550-1700 (IvVm) |
| Tamanho da cena ou Faixa imageada | 185 x 185 km ² | | 27 km | 113 km | 60 x 60 km ² | | 23 x 23 km ² 70 x 70 km ² | | |
| Altura da órbita | 704 km | | 778 km | | 832 km | | 822 km | | |
| Empresa / Instituição | Digital Globe EUA | | | | GeoEye (Orbimage & Space Imaging) EUA | | | | |
| Sistema | QuickBird 2 (Lançamento 2001) | | WorldView 1 (Lançamento 2007) | | WorldView II (Lançamento 2008) | | IKONOS-II (Space Imaging) (Lançamento 1999) | | |
| Modo | Pan (11 bits) | MS (11 bits) | Pan (11 bits) | MS (11 bits) | Pan (11 bits) | MS (11 bits) | Pan (11 bits) | MS (11 bits) | |
| Resolução Geométrica | 0,61 m | 2,44 m | 0,46 m (nadir) 0,51 m (off nadir) | 0,46 m (nadir) 0,52 m (off nadir) | 1,8 m (nadir) 2,4 m (off nadir) | 1 m | 1 m | 0,41 m 1,64 m | |
| Resolução Espectral (nm) | 450-900 | 450-520 (az) 520-600 (vd) 630-690 (vm) 780-900 (IvP) | 400-900 | 450-800 | 400-460 (coastal) 450-510 (az) 510-590 (vd) 585-625 (am) 630-690 (vm) 705-745 (vm edge) 770-895 (IvP 1) 860-1040 (IvP 2) | 450-900 | 450-520 (az) 520-600 (vd) 630-690 (vm) 780-900 (IvP) | 450-900 | 450-520 (az) 520-600 (vd) 625-695 (vm) 780-900 (IvP) |
| Tamanho da cena ou Faixa imageada | 16,5 x 16,5 km ² | | 16 km | 16,4 km | 11 x 11 km ² | | 8 x 8 km ² | | |
| Altura da órbita | 450 km | | 450 km | | 770 km | | 470 km | | |
| | | | 681 km | | 681 km | | 684 km | | |

Obs: Pan: pancromático; MS: multiespectral; IvP: infravermelho próximo; IvM: infravermelho médio; IvT: infravermelho termal; SWIR: short wavelength infrared; az: azul; vd: verde; vm: vermelho; am: amarelo.

Tabela 3: Principais missões de satélites: em operação e projetos futuros
Fonte: Adaptado de Ehlers (2007)

A relação de resolução e escala do produto cartográfico tem muita importância na identificação de feições no terreno e na conseqüente possibilidade de definir quais as maiores escalas possíveis de serem obtidas. Levando-se em consideração os principais sistemas de satélites comerciais e a relação existente entre suas resoluções espaciais (no terreno) e as escalas cartográficas mais comumente utilizadas, a tabela 4 apresenta as relações resolução no terreno/escala propostas por Konecny e Schiewe, (1996) e pela International Hydrographic Organization, (2005).

| Satélite / Sensor | Resolução Espacial | Escala |
|-------------------|--------------------|--------------------------|
| QuickBird | 0,7 m | 1 : 3.500 |
| IKONOS | 1 m | 1 : 5.000 |
| | 4 m | 1 : 20.000 |
| SPOT 3 e 4 (PAN) | 10 m | 1 : 50.000 |
| SPOT 3 e 4 (XS) | 20 m | 1 : 50.000 – 1 : 100.000 |
| SPOT 5 (PAN) | 2,5 m | 1 : 10.000 |
| | 5,0 m | 1 : 25.000 |
| LANDSAT 7 (ETM) | 15 m | 1 : 75.000 |
| LANDSAT (TM) | 30 m | 1 : 100.000 |
| CBERS | 20 m | 1 : 50.000 – 1 : 100.000 |

Tabela 4: Proposta de relação entre a resolução espacial (no terreno) e a escala.
Fonte: Konecny e Schiewe (1996) e International Hydrographic Organization (2005).

CAPÍTULO 5: SISTEMAS SENSORES E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os sistemas sensores podem ser agrupados em três categorias: câmeras fotográficas, sensores eletrônicos passivos e sensores eletrônicos ativos (RADAR - Radio Detection and Ranging, LIDAR - Light Detection and Ranging e SONAR - Sounding Navigation and Ranging). A resolução e a cobertura dos sistemas de sensoriamento remoto variam conforme a tecnologia e a plataforma.

A detecção da energia eletromagnética pode ser feita fotograficamente ou eletronicamente. O processo de fotografia²⁰ usa reações químicas sobre uma superfície de filme foto-sensível, ou seja, sensível à luz, para detectar a variação de energia dentro de uma cena. Os sistemas fotográficos oferecem vantagens, tais como: são relativamente simples e de custo baixo, além de propiciarem um alto grau de detalhamento espacial e integridade geométrica. Os sensores eletrônicos captam um sinal elétrico que corresponde às variações de energia na cena original. Um exemplo familiar de um sensor eletrônico é a câmera de vídeo. Embora muitas vezes mais complexo e oneroso do que o sistema fotográfico, os sensores eletrônicos oferecem as vantagens de uma larga faixa espectral de sensibilidade com potencial superior para calibração, e permite armazenar e transmitir dados eletronicamente.

Os sensores eletrônicos realizam medidas em diferentes intervalos do espectro eletromagnético, e podem fazê-lo de diferentes maneiras. Quanto à fonte de energia são classificados em passivos e ativos. O sensor passivo mede a radiação solar refletida pela superfície terrestre e também é capaz de medir a radiação termal da Terra. Por sua vez, o sensor ativo mede a radiação relativa à faixa das microondas,

²⁰ No sensoriamento remoto, o termo 'fotografia' é reservado exclusivamente para imagens que são detectadas e gravadas em filme. O termo mais genérico 'imagem' é usado para qualquer representação pictorial de dado de imagem. Portanto, uma gravação pictorial proveniente de um scanner termal (um sensor eletrônico) pode ser chamada de 'imagem termal', mas não de 'fotografia termal', porque o filme não é o mecanismo de detecção original da imagem. Isto nos permite concluir que o termo imagem é relativo a qualquer produto pictorial, e que toda fotografia é uma imagem, entretanto, nem toda imagem é uma fotografia.

que são emitidas pelo próprio sistema sensor. O que se mede é a intensidade do retorno desta energia depois de refletida na superfície terrestre.

Os sistemas sensores são caracterizados por sua resolução, que é a habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou entre objetos próximos espacialmente.

A resolução é classificada em espacial, espectral, radiométrica e temporal. Ao se selecionar uma imagem, essas quatro componentes da resolução devem ser consideradas. As componentes da resolução são:

- **Resolução espacial:** mede a menor separação angular ou linear entre dois objetos. Corresponde à capacidade dos sensores de detectarem objetos de diferentes dimensões e formas. Por exemplo, um sistema sensor que possui uma resolução espacial de 30 metros, significa que objetos distanciados entre si menos de 30 metros não são, em geral, discriminados pelo sistema. Portanto, quanto menor (numericamente) a resolução espacial do sistema, maior será o poder de resolução desse sistema. Em sensoriamento remoto a resolução espacial de uma imagem é dada em função do campo de visada do sensor – IFOV (Instantaneous Field of View), que define a área abrangida pela imagem. Em termos práticos, atribui-se a unidade de medida de distância sobre o terreno – GSD (Ground Sample Distance.) em função do ângulo de abertura do IFOV e da altitude do sensor. A resolução espacial de um sensor é uma indicação de quão bem este sensor pode discriminar detalhes espaciais.
- **Resolução espectral:** mede a largura das faixas espectrais e da sensibilidade do sistema sensor em distinguir entre dois níveis de intensidade do sinal de retorno. Ela corresponde ao número e ao intervalo das bandas espectrais medidas pelo sistema sensor. A posição no espectro eletromagnético, largura e número de bandas espectrais determina o grau com que alvos individualizados (espécies vegetais, plantações, tipos de rochas, etc.) podem ser discriminados em uma imagem multiespectral²¹.

²¹ Uma imagem multiespectral consiste em imagens de um mesmo objeto, tomadas com diferentes comprimentos de ondas eletromagnéticas, ou seja, a informação é coletada simultaneamente em várias bandas do espectro eletromagnético.

Além disso, o uso de imageamento multiespectral conduz a um grau mais apurado de poder de discriminação do que a utilização de uma única banda espectral. Tome-se como exemplo um sistema sensor que opera na faixa de 0,4 a 0,5 μm . Este sensor tem uma resolução espectral maior que um sensor que opera na faixa de 0,4 a 0,6 μm . Isto porque ele será capaz de registrar pequenas variações no comportamento espectral em regiões mais estreitas do espectro eletromagnético.

- **Resolução radiométrica:** refere-se ao número de níveis de quantização digital usado para expressar o dado coletado por um sensor. No geral, quanto maior o número de níveis de quantização, maior a quantidade de detalhes nas informações coletadas pelo sensor. É expressa em termos de “*bits*” necessários para se representar o intervalo de intensidade da reflectância disponível na cena imageada. Corresponde, portanto, à quantidade de níveis de cinza²² ou níveis digitais com os quais a imagem é representada. Ela depende da sensibilidade do sistema sensor. Por exemplo, um sensor com 6 *bits* de resolução radiométrica apresenta 64 possíveis níveis de quantização, enquanto que um sensor com 8 *bits* apresenta 256²³.
- **Resolução temporal:** refere-se à capacidade do sistema sensor de voltar a imagear uma mesma região da superfície terrestre. Ela é quantificada pelo intervalo de tempo mínimo entre diferentes aquisições.

As diferenças em termo de resoluções espaciais e espectrais entre as fotografias e as imagens são o motivo para serem usados diferentes métodos de interpretação, e um dos fatores que influenciam a escolha entre um sistema e outro. Nas fotografias aéreas a resolução espectral é considerada ruim, porque o filme registra de maneira integrada a radiação refletida de uma ampla faixa espectral, dificultando a diferenciação dos objetos pela análise de suas reflectâncias, expressas em níveis de cinza nas fotografias preto e branco. Em contrapartida, os sensores fotográficos possuem ótima resolução espacial, geralmente da ordem de 1 a 3 metros, o que possibilita maior

²² O termo nível de cinza refere-se a uma medida escalar de intensidade que varia do preto às diferentes tonalidades de cinzas, e finalmente ao branco. Maiores detalhes em Gonzales e Woods, (2000).

²³ Sensor com 6 bits de resolução radiométrica: $2^6 = 64$; sensor com 8 bits de resolução radiométrica: $2^8 = 256$. Os níveis de cinza são representados em uma base binária, i.é, base 2. Maiores detalhes em Mather, (2004), capítulo 3.

precisão de análise dos atributos da forma, tamanho e textura dos objetos, auxiliados, ainda, de uma visão tridimensional estereoscópica. Nas imagens multiespectrais, é a resolução espectral, isto é, o número de bandas por região espectral que é muito boa, permitindo que os objetos possam ser identificados ou discriminados por meio de suas diferenças de reflectância. Como ainda é muito oneroso operar de alturas orbitais com sistemas sensores que tenham conjuntamente altas resoluções espaciais (1 a 3 metros) e espectrais (mais de 100 bandas), tem sido mais comum optar por um ou por outro sistema sensor. Embora sensores orbitais pancromáticos²⁴ com 1 metro ou menos de resolução espacial já se encontrem em operação, há ainda certa preferência pelos sistemas sensores que operam simultaneamente em diferentes regiões do espectro eletromagnético, gerando imagens em diferentes bandas espectrais. Nesse caso, a opção é por valorizar os atributos das propriedades espectrais dos objetos, sobre os espaciais. Por essa razão, a análise ou a interpretação das imagens dos objetos registradas por um sensor imageador multiespectral, obrigatoriamente exige do intérprete conhecimentos sobre como os alvos se comportam espectralmente ao longo dos diversos intervalos de comprimento de onda da radiação eletromagnética: visível, infravermelho, termal e microondas.

A terceira geração de satélites teve início a partir dos anos 90, com o desenvolvimento de sensores de resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal mais apuradas. São os denominados satélites de resolução métrica, como por exemplo, o IKONOS II, o QuickBird e algumas missões futuras (vide tabela 3). Esse desenvolvimento foi possível graças ao final da Guerra Fria e, conseqüentemente, pelo relaxamento das severas legislações governamentais sobre a soberania dos Estados envolvidos no sensoriamento remoto.

As imagens de satélite de alta resolução estão hoje em dia enfrentando uma competição com as imagens (fotografias) aéreas. Apenas os aspectos econômicos e a disponibilidade das imagens estão influenciando a decisão de usar os diferentes tipos de imagem. A tendência para as imagens com alto poder de resolução (com menores GSD) é contínua e crescente, e novos satélites estão sendo anunciados. Todavia, devido aos elevados custos de implementação, a maioria dos sistemas é usada para aplicações militares e governamentais, uma vez que sem os contratos militares e com os órgãos governamentais as companhias privadas não poderiam sobreviver.

²⁴ Sensível a todas as cores do prisma, bem como ao infravermelho e ao ultravioleta.

C **APÍTULO 6: INTERPRETAÇÃO VISUAL DE** **IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Ao se observar fotografias aéreas e imagens espaciais, podem ser vistos vários objetos de diferentes tamanhos e formas. Alguns desses objetos podem ser prontamente identificados, enquanto que outros não, dependendo do grau de percepção individual e experiência do intérprete. Quando é possível identificar o que se está observando na imagem e comunicar esta informação a outrem, o que se está fazendo é a interpretação visual da imagem.

Algumas décadas atrás a interpretação visual de imagens restringia-se basicamente a fotografias aéreas, pois as imagens de satélite possuíam baixo poder de resolução espacial, o que tornava muito limitada qualquer interpretação visual. No entanto, atualmente, as habilidades essenciais que um fotointérprete aplica em fotografias em papel podem ser igualmente aplicadas para imagens digitais oriundas de sensoriamento remoto orbital. Segundo Em virtude dessas mudanças o título fotointérprete, a rigor aplicável apenas a fotografias, torna-se restritivo, embora ainda utilizado informalmente. Sugere-se outras designações, com analista de imagens ou intérprete de imagens. Muito embora as análises automatizadas de imagens tenham evoluído muito em sofisticação, elas devem ser usadas conjuntamente com a análise humana.

As fotografias aéreas e as imagens orbitais contêm detalhes das características da superfície terrestre na data de sua aquisição. Um analista de imagens examina sistematicamente as imagens e, freqüentemente, outros materiais de apoio como mapas e relatórios de observação de campo. Baseado nesses estudos conjuntos é que uma interpretação visual é feita. O sucesso de uma análise de imagem varia de acordo com o treinamento e experiência do analista, com a natureza dos objetos ou fenômenos a serem interpretados, e com a qualidade das imagens utilizadas. Além disso, é importante que o intérprete possua um completo entendimento do fenômeno que está sendo estudado, bem como conheça a região geográfica objeto do estudo.

O procedimento de análise de imagens requer o conhecimento de oito elementos de interpretação de imagens que formam a estrutura para o entendimento do significado de uma imagem:

- **Forma:** refere-se aos contornos da feição. Algumas feições possuem contornos característicos que indicam suas identidades ou funções. É importante notar que a forma, como observada em imagens aéreas, depende da perspectiva com que foi adquirida. As formas de objetos vistos de cima (produtos de sensoriamento remoto) diferem grandemente das formas observadas ao nível do solo. Da mesma maneira, a perspectiva vista de cima introduz o efeito de escala, ou seja, essas imagens permitem que sejam observadas grandes feições. De outra maneira não seria possível perceber o tamanho real dessas feições por meio da perspectiva normal de um ser humano. A figura 42 ilustra um estádio de futebol, que por sua forma peculiar (contornos característicos), é de fácil identificação visual.



Figura 42: Imagem de satélite: estádio de futebol, São Paulo, SP.
Fonte: Google Earth

- **Tamanho:** refere-se as dimensões da feição, tanto em termos absolutos como relativos. O tamanho relativo é determinado pela comparação do objeto com outras feições familiares que podem estar por perto. Geralmente o tamanho relativo é suficiente para designar um objeto como pertencente a uma classe geral de feições (por exemplo: um veículo). O tamanho absoluto, por sua vez,

refere-se ao uso da imagem para fazer medições em unidades de extensão, geralmente para designar um objeto como pertencente a uma classe específica (por exemplo: um automóvel marca X modelo Y), ou para cálculos de distâncias, volumes ou áreas.

- **Cor e Tonalidade:** refere-se ao brilho médio de uma área, ou no caso de radiação na faixa do visível ou radiação infravermelha da imagem é a coloração dominante na região. Ao se observar a tonalidade nas imagens de sensoriamento remoto deve-se notar que ela depende da natureza da superfície imageada e dos ângulos de observação e iluminação. A tonalidade relaciona-se com a intensidade de energia eletromagnética refletida por um tipo de feição na superfície da Terra, em um determinado comprimento de onda do espectro eletromagnético. Ou seja, a tonalidade está estreitamente ligada com o comportamento espectral das diferentes coberturas da superfície terrestre. Em produtos de sensoriamento remoto as diferentes quantidades de energia refletida pelos alvos estão associadas a tons ou níveis de cinza. Quanto mais energia um alvo reflete, mais energia é captada pelo sensor, e o alvo será associado a um tom de cinza claro. Caso contrário, se o alvo presente na superfície terrestre reflete pouca energia, o sensor capta pouca energia e esse alvo será associado a tons escuros de cinza. Porém, o olho humano é mais sensível a cor do que a tons de cinza. Em análises desempenhadas por seres humanos, em contraposição às análises automatizadas, a motivação para o uso de cores é que o olho humano é capaz de discernir milhares de tons e intensidades de cores, enquanto que pode discernir apenas duas dúzias de tons ou níveis de cinza. Devido à estrutura do olho humano todas as cores são vistas como combinações variáveis das três cores primárias em fonte de luz ou cores-luz²⁵: vermelho, verde e azul (essas cores formam o sistema RGB, do idioma inglês red - vermelho, green - verde e blue - azul). Por síntese denominada aditiva essas cores produzem o branco, ou seja., a mistura das três cores-luz primárias em intensidades corretas produz a luz branca (figura 43).

²⁵ Cores-luz são as que provêm de uma fonte luminosa direta. São elas que iluminam nossas vidas, como a luz do Sol, a de uma vela, a de uma lâmpada ou a de uma descarga elétrica. Sua tríade é constituída pelo vermelho, verde e azul. Maiores detalhes em Pedrosa, (2003).

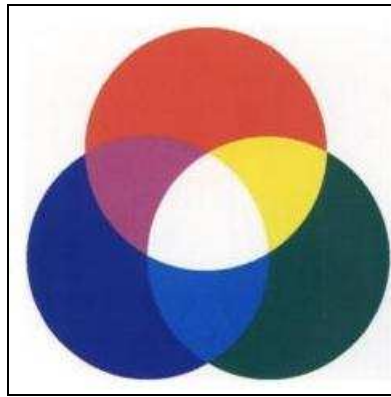


Figura 43: Cores-luz primárias.
Fonte: Pedrosa (2003), p.29.

Portanto, para facilitar a interpretação visual dos dados de sensoriamento remoto são associadas cores aos tons de cinza, conforme pode ser percebido na figura 44, que é uma imagem do sensor TM do satélite LANDSAT do encontro das águas dos rios Solimões (azul) e Negro (preto) formando o rio Amazonas..



Figura 44: Imagem LANDSAT TM.
Fonte: SAUSEN (2007).

- **Textura:** refere-se à variação de tonalidade sobre a superfície ou à aparente rugosidade ou suavidade de um alvo em uma imagem de sensoriamento remoto. A textura em uma imagem é percebida por meio de micro-sombras provenientes de pequenas irregularidades na superfície. Por exemplo, o pavimento de boa qualidade aparece com uma textura suave porque as irregularidades são tão pequenas que não são capazes de criar sombras perceptíveis nas escalas de trabalho normalmente usadas. Uma floresta, por outro lado, é caracterizada por uma textura rugosa, criada por micro-sombras das folhas e galhos que formam um padrão rústico alternando trechos claros e escuros (CAMPBELL, 2005). A

figura 45 evidencia a textura em uma imagem de uma região agrícola. A textura possibilita a distinção entre as respostas espectrais de variadas plantações. Textura suave (escura) indica a plantação de alfafa pronta para a colheita. Texturas mais rugosas indicam padrões de plantação e o uso de maquinário agrícola para cultivar e colher as lavouras. Padrões manchados indicam variação em termos de drenagem e padrões de umidade no interior das plantações.

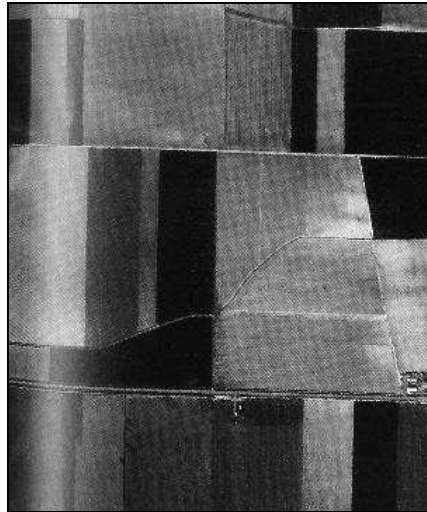


Figura 45: Textura em uma imagem de região agrícola.
Fonte: Campbell (2005), p. 263.

- **Sombra:** refere-se às grandes sombras que revelam os contornos de um alvo projetado sobre uma superfície plana. A natureza da sombra está intrinsecamente ligada à natureza do objeto, ângulo de iluminação, perspectiva e declividade da superfície do terreno. Por exemplo, uma sombra que se projeta em uma superfície com grande grau de declividade ascendente ou descendente aparecerá mais longa ou mais curta do que uma sombra que se projeta em uma superfície plana. Do mesmo modo, o ângulo de incidência dos raios solares provoca diferentes sombras, ou seja, baixos ângulos de incidência de raios solares criam sombras longas, e altos ângulos Sol na posição vertical, por volta do meio dia criam sombras curtas. A figura 46 é uma imagem do satélite IKONOS que ilustra a sombra do Obelisco em Washington, EUA. A sombra do monumento destaca-se na imagem, encobrindo qualquer alvo “embaixo” dela. O tamanho e a inclinação da sombra fornecem indícios sobre o horário e a época do ano em que a imagem foi adquirida.

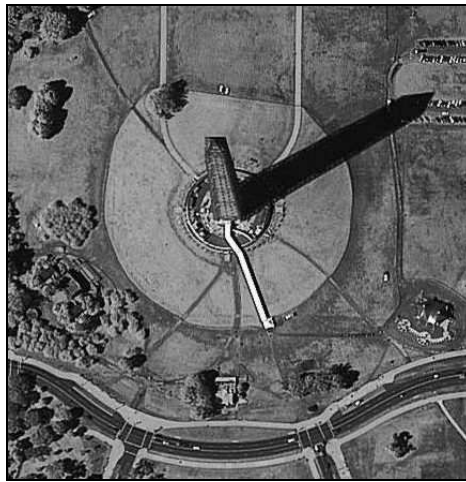


Figura 46: Imagem IKONOS do Obelisco em Washington, EUA.

Fonte: http://www.geog.ucsb.edu/~jeff/115a/lectures/elements_aids_and_techniques.html

De um modo geral, o relevo sempre provoca uma sombra do lado oposto a incidência solar, fazendo com que estas áreas apresentem tonalidades escuras na imagem, dificultando assim a caracterização dos alvos que estão “atrás” das sombras na superfície terrestre. A figura 47 traz uma imagem do satélite sino-brasileiro CBERS, que apresenta nuvens em branco e as sombras das nuvens em preto. As sombras confundem-se com a tonalidade preta da água do açude que se localiza na porção inferior da imagem.



Figura 47: Imagem CBERS.

Fonte: Sausen, 2007.

- **Posicionamento:** refere-se à posição do alvo no que se refere à topografia e à drenagem. Muitas feições, devido à suas funções inerentes, devem ocupar específicas posições topográficas. Por exemplo, caixas d’água e redes de telecomunicação, tais como antenas de microondas e de telefonia celular, são posicionadas nas mais altas posições topográficas. Redes de tratamento de esgoto são posicionadas nas mais baixas cotas topográficas. Usinas de energia

térmica ou nuclear (comum nos EUA, porém quase que inexistentes no Brasil), são posicionadas nas proximidades de corpos d'água, para que se tenha fonte de água para o resfriamento dos equipamentos das usinas. A história da interpretação visual de imagens é caracterizada por muitos exemplos em que o posicionamento contribuiu para uma identificação bem sucedida de redes de serviços de funções desconhecidas.

- **Associação:** refere-se às diferentes inter-relações espaciais entre feições, geralmente devido a conexões funcionais entre os componentes em questão. Por exemplo, um grande estacionamento lotado de veículos é associado com grandes shoppings centers ou hipermercados, e no mais das vezes são particulares indicadores para a interpretação visual desses alvos. A figura 48 mostra como a associação pode ser usada como um elemento de interpretação de imagens, no caso de um shopping center, que pode ser identificado pela associação com grandes áreas de estacionamento de veículos ao redor do agrupamento de grandes edifícios.



Figura 48: Elementos de interpretação de imagens: associação.
Fonte: Campbell (2005), p. 264.

- **Padrão:** refere-se ao arranjo espacial de feições em particular. Exemplos típicos incluem os pomares, onde as árvores são alinhadas em filas, e o posicionamento sistemático de lápides em cemitérios. Este conceito indica que um alvo apresenta uma organização peculiar que o distingue de todos os outros. Em estudos de bacias de drenagem o padrão de drenagem é um elemento importante, pois ele está associado ao tipo de solo, rocha e estrutura geológica

na área de estudo, como mostra a figura 49. Trata-se de uma imagem do sensor AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer), que utiliza plataformas aéreas para aquisição das imagens. Nesta imagem pode-se identificar dois padrões de drenagem diferentes.

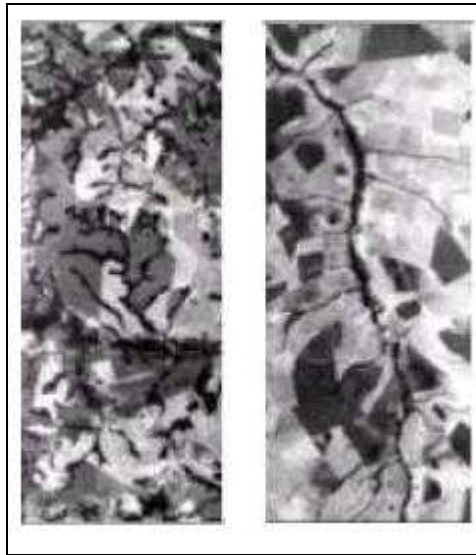


Figura 49: Elementos de interpretação de imagens: padrão.
Fonte: Sausen (2007).

As técnicas de análise de imagens aplica os elementos de interpretação de imagens de uma maneira que auxilie o intérprete extrair informações úteis da imagem. A classificação de imagens, muitas vezes, designa objetos em classes baseando-se nos elementos de interpretação de imagens. Frequentemente, a distinção é feita de acordo com três níveis de confiança e precisão:

- A detecção é a determinação da presença ou ausência de uma feição.
- O reconhecimento implica que o intérprete pode deduzir um conhecimento mais específico da feição em questão, que pode então ser designada em uma categoria particular.
- A identificação significa que o intérprete pode colocar a feição em uma classe minuciosamente definida.

Embora haja uma demanda crescente por processos automáticos de classificação, grande parte de suas aplicações necessita das técnicas de interpretação visual da

imagem, seja como produto final ou para seleção de amostras de treinamento para extração de informações.

A interpretação visual de imagens proporciona acesso a uma ampla gama de informações, incluindo: uso do solo, sistemas de transporte, agricultura, hidrografia e análise de vegetação.

C APÍTULO 7: PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO

O processamento digital de imagens envolve a manipulação e interpretação de imagens digitais com o auxílio de um computador. O processamento digital de imagens teve o seu início na década de 1960 no Jet Propulsion Laboratory – JPL da NASA, sediado em Pasadena, na Grande Los Angeles, com o objetivo específico de obter o máximo de informações das imagens enviadas de volta à Terra pelas espaçonaves não tripuladas de exploração lunar e planetária. No entanto, não foi antes do lançamento do satélite LANDSAT 1, em 1972, que os dados de imagens digitais tornaram-se amplamente disponíveis para aplicações de sensoriamento remoto. Naquela época não apenas a teoria e a prática do processamento digital de imagens estavam engatinhando, como também o custo dos computadores era demasiado alto e a eficiência computacional bastante limitada comparando-se com os padrões atuais. Atualmente, os custos diminuíram consideravelmente, a eficiência computacional aumentou dramaticamente e as fontes de dados de imagens digitais é bastante variada.

O interesse em métodos de processamento de imagens digitais advém de duas áreas principais de aplicação: melhoria de informação visual para a interpretação humana e o processamento de dados de cenas para percepção automática através de máquinas.

O processamento digital de imagens é uma área extremamente ampla, e que muitas vezes envolve procedimentos que podem ser matematicamente muito complexos. Portanto, o objetivo aqui é introduzir os princípios básicos do processamento digital de imagens sem entrar no mérito dos detalhados e complexos procedimentos matemáticos, que estão muito bem apresentados em Gonzáles e Woods (2000).

Imagem digital é definida como uma matriz bidimensional de números inteiros que corresponde a medidas discretas de radiância espectral de uma área. Cada ponto dessa matriz é denominado “*picture element*” ou abreviadamente *pixel*.

O processamento de imagens consiste em uma série de procedimentos para a produção de novas imagens a partir da imagem pré-existente. Isto envolve todas as operações aplicáveis a qualquer tipo de imagem, e.g., imagens brutas adquiridas a partir de sensores remotos; imagens contaminadas por ruído, tal como nuvens e sombras; imagens distorcidas pelo mal funcionamento do sensor, instabilidade da plataforma em que o sensor está embarcado, etc. O propósito geral do processamento de imagem é preparar o dado de imagem para que este possa ser melhor utilizado nas etapas subseqüentes de interpretação e extração de informações.

Algumas técnicas de processamento digital modificam o valor de cada *pixel* independentemente do valor dos *pixels* vizinhos e são chamadas operações pontuais. Outras levam em consideração os *pixels* vizinhos e são chamadas operações locais.

A idéia central atrás do processamento digital de imagens é bastante simples. A imagem digital é introduzida *pixel a pixel* no computador. O computador é programado para inserir esses dados em uma equação ou série de equações, e então armazena os resultados dos cálculos de cada pixel. Esses resultados formam uma nova imagem digital que pode ser visualizada ou gravada em um formato pictorial ou pode ser mais tarde novamente manipulada por programas adicionais. As possíveis formas de manipulação de dados de imagens digitais são literalmente infinitas. No entanto, teoricamente todos esses possíveis procedimentos podem ser categorizados em um ou mais dos sete grandes tipos de operações assistidas por computador:

- Retificação e restauração da imagem;
- Realce na imagem;
- Classificação de imagens;
- Fusão de dados e integração com SIG;
- Análise de imagens hiperespectrais;
- Modelagem biofísica;
- Transmissão e compressão de imagens.

7.1 RETIFICAÇÃO E RESTAURAÇÃO DA IMAGEM

Essas operações têm como objetivo corrigir as distorções ou degradações da imagem, para criar uma representação mais fidedigna da cena original. Este procedimento, caracteristicamente, envolve o processamento inicial da imagem bruta para corrigir distorções geométricas, para calibrar o dado radiometricamente, e para eliminar ruídos presentes na imagem. Portanto, a natureza de qualquer processo particular de restauração de imagem é altamente dependente das características do sensor usado na aquisição da imagem, e em qual tipo de plataforma ele está instalado. Os procedimentos de retificação e restauração de imagens são freqüentemente denominados de operações de pré-processamento, porque normalmente precedem futuras manipulações e análises da imagem para que se extraiam as informações pertinentes. Os principais procedimentos para se realizar a retificação e restauração das imagens são: correção geométrica, correção radiométrica e remoção de ruído.

7.1.1 CORREÇÃO GEOMÉTRICA

A correção geométrica é o processo no qual as coordenadas geográficas de cada *pixel* são determinadas dentro de um nível de precisão e exatidão condizentes com a aplicação pretendida. O objetivo é gerar uma imagem que tenha a integridade geométrica de um mapa, sem as distorções causadas pelo processo de aquisição da imagem e devidas aos seguintes fatores: variações na altitude, atitude²⁶ e velocidade do satélite ou aeronave, distorção panorâmica, curvatura da Terra, rotação da Terra, refração atmosférica, deslocamento de relevo, e variações na velocidade de varredura do sensor.

As distorções geométricas podem ser sistemáticas e não sistemáticas. As sistemáticas são bem conhecidas e podem ser corrigidas pela aplicação de fórmulas matemáticas, já as não sistemáticas são corrigidas por reamostragem (vizinho mais próximo, interpolação bilinear e convolução cúbica), através do uso de pontos de controle no terreno, que podem ser obtidos por GPS (Global Positioning System) ou por extração

²⁶ Atitude de um satélite ou de uma aeronave é a sua orientação no espaço medida em relação a uma referência pré-fixada, como a Terra, o Sol, as estrelas, etc. É caracterizada por três ângulos e por suas velocidades de rotação (angulares), medidos em relação a este referencial.

de pontos de um mapa topográfico. Maiores detalhes sobre correção geométrica de imagens digitais podem ser encontrados em Petrie (2005);

7.1.2 CORREÇÃO RADIOMÉTRICA

Esse procedimento é necessário, principalmente, em imagens de uma mesma localidade, porém adquiridas em datas diferentes, e que por esse motivo estão sujeitas a variações quanto ao grau de iluminação e da ação de diferentes condições atmosféricas. O objetivo é corrigir as distorções introduzidas pelos seguintes fatores: variações de iluminação da cena devido a diferentes ângulos de iluminação solar (geração de mosaicos), condições atmosféricas (neblina) que produzem espalhamento. Maiores detalhes em Lillesand *et al.* (2004).

7.1.3 REMOÇÃO DE RUÍDO

Ruído²⁷ é qualquer perturbação na imagem devido a limitações no sensoriamento, na digitalização do sinal ou no procedimento de gravação dos dados. O ruído pode tanto degradar a imagem como também mascarar totalmente a verdadeira informação radiométrica contida na imagem digital. Os ruídos podem ser decorrentes de variações na resposta de detectores individuais (bandeamento ou “stripping”), que acarretam na perda de linhas ou *pixels*. Maiores detalhes em Lillesand *et al.* (2004).

²⁷ Definição de ruído: para que um objeto real tenha sua imagem armazenada em um computador, um sistema precisa ser capaz de efetuar duas etapas: capturar a imagem e transmiti-la para o computador. É relativamente comum que, em alguma das duas etapas, haja uma falha, acrescentando à imagem desejada uma outra, periódica, de período pequeno. Analisando tal imagem como um sinal, o fato de ser periódica e com período pequeno sugere que a mesma tenha alguns valores muito grandes para frequências altas. Essas frequências altas, total ou parcialmente dominantes, são chamadas ruído. (Fonte: <http://www.visgraf.impa.br/Courses/ip00/proj/Deconv/ruído.htm>).

7.2 REALCE DA IMAGEM

São procedimentos que visam melhorar a visualização ou a gravação do dado para posterior interpretação visual. Normalmente o realce de imagens envolve técnicas para aumentar a diferenciação visual entre alvos em uma cena. O objetivo é criar novas imagens a partir da imagem original para ampliar a quantidade de informação que pode ser interpretada visualmente na imagem. Os procedimentos de realce de imagem mais comumente aplicados são: manipulação de contraste, manipulação das características espaciais e manipulação de múltiplas imagens (bandas).

7.2.1 MANIPULAÇÃO DE CONTRASTE

Contraste entre dois pontos é definido como a razão entre os seus níveis de cinza, e a manipulação do contraste consiste numa transferência radiométrica em cada *pixel*, com o objetivo de aumentar a discriminação visual entre os objetos presentes na imagem. Destacam-se como procedimentos de manipulação de contraste: limiar de nível de cinza, fatiamento, esticamento do contraste (stretch) e equalização do histograma.

7.2.1.1 LIMIAR DE NÍVEL DE CINZA

Procedimento usado para segmentar uma imagem de entrada em duas classes: uma para os *pixels* com valores abaixo de um limiar de nível de cinza definido pelo analista e uma para *pixels* com valores superiores a esse limiar.

A limiarização é computacionalmente simples e utiliza uma determinada faixa de intensidade de cinza para identificar os *pixels*. O resultado é uma imagem binarizada, atribuindo-se a todos os *pixels* com nível de cinza dentro dessa faixa de intensidade como pertencentes ao objeto, e todos os *pixels* com nível de cinza fora dessa faixa como não pertencentes ao objeto.

A operação de segmentação por meio do método de limiarização é baseada na utilização do histograma. O histograma é simplesmente um conjunto de números, indicando o percentual de *pixels* naquela imagem que apresentam um determinado

nível de cinza. Estes valores são normalmente representados por um gráfico de barras que fornece, para cada nível de cinza o número (ou o percentual) de *pixels* correspondentes na imagem.

7.2.1.2 FATIAMENTO

É uma forma de aumento de contraste cuja operação consiste simplesmente em realçar os pixels cujas intensidades se situam dentro de um intervalo específico (fatia), isto é, entre um máximo e um mínimo. Consiste na divisão do intervalo total de níveis de cinza de determinadas fatias (ou classes de cores). O fatiamento de níveis de cinza é considerado a forma mais simples de classificação, de modo que é aplicado apenas a uma única banda espectral. De acordo com o critério de determinação dos intervalos de níveis de cinza, pode-se obter fatiamento normal, equidistribuição e arco-íris. No fatiamento normal as fatias são definidas de modo que o intervalo entre cada faixa seja constante, já no fatiamento equidistribuição o intervalo de níveis de cinza é dividido de modo que cada faixa contenha o mesmo número de pontos, e no fatiamento arco-íris é o mapeamento de um tom de cinza para uma determinada cor. Baseia-se no fato de que variações de cores são muito mais visíveis ao olho humano do que variações de tons de cinza. O mapeamento global desses níveis para o espaço de cor segue a seqüência do arco-íris.

7.2.1.3 ESTICAMENTO DO CONTRASTE (STRETCH)

Neste procedimento o realce na imagem é implementado por meio do esticamento do histograma, ou seja, uma operação de normalização usando valores desejados de máximo e de mínimo. Como os satélites são geralmente projetados para imagearem todo o globo terrestre (desertos, oceanos, gelo, neve, florestas, áreas urbanizadas, etc.), para analisar uma área específica normalmente é preciso fazer um esticamento de contraste para que a imagem fique visível. O que ocorre no esticamento de contraste é uma mudança linear dos valores dos níveis de cinza menores e maiores que aparecem na cena específica e proporcionalmente nos demais *pixels*, conforme a figura 50. A operação de stretch mapeia o menor tom de cinza encontrado na imagem e atribui a ele o valor 0 e o maior tom de cinza o valor 255 (no caso de imagem de 8

bits, ou seja $2^8 = 256$, tem-se, portanto, 256 tons de cinza, sendo 0 o preto e 255 o branco).

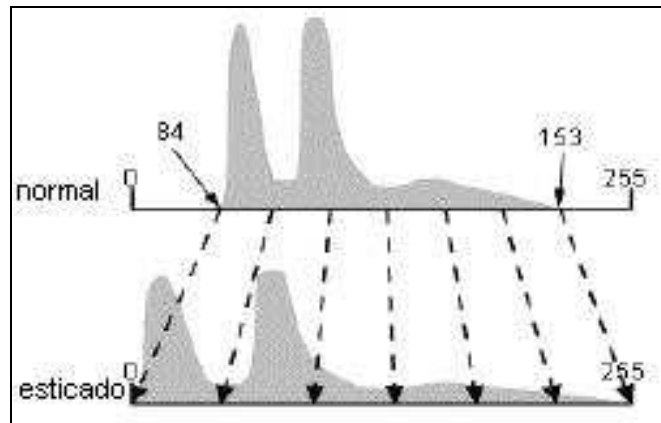


Figura 50: Esticamento linear de contraste.
Fonte: Batista e Dias, 2005.

7.2.1.4 *EQUALIZAÇÃO DO HISTOGRAMA*

A equalização tem o objetivo de realçar a imagem, aproximando o histograma da imagem original para um histograma uniforme, ou seja, todos os níveis de cinza devem aparecer na imagem com a mesma frequência. Para tanto, utiliza-se o histograma original, calcula-se o seu histograma acumulado e este é usado como função de intensidade. É uma maneira de manipulação de histograma que reduz automaticamente o contraste em áreas muito claras ou muito escuras, numa imagem. Expande também os níveis de cinza ao longo de todo intervalo. Consiste em uma transformação não-linear que considera a distribuição acumulativa da imagem original, para gerar uma imagem resultante, cujo histograma será aproximadamente uniforme.

A figura 51 mostra como se verifica a equalização de um histograma:

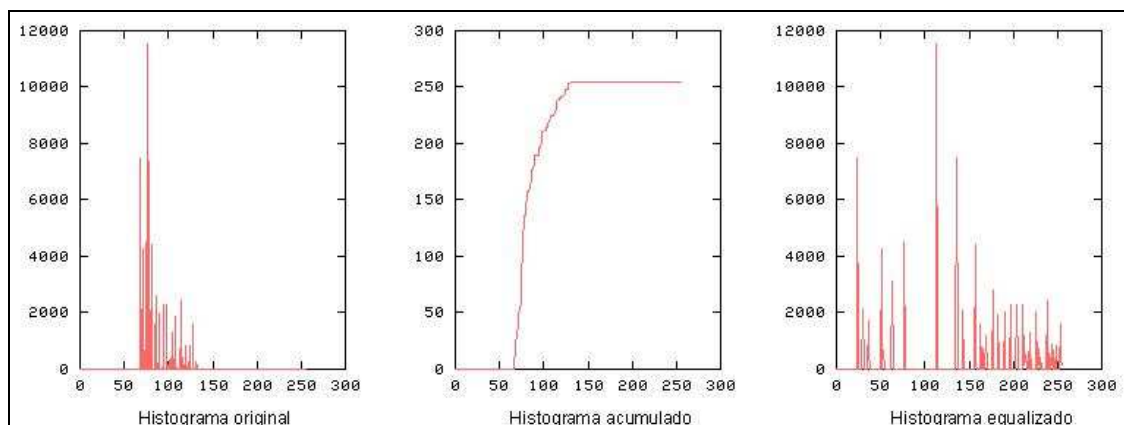


Figura 51: Equalização do histograma

Fonte: http://calhau.dca.fee.unicamp.br/wiki/index.php/IA365I:Cap%C3%ADtulo_3

Na prática, a obtenção de um histograma perfeitamente uniforme não é possível devido à natureza das imagens digitais de sensoriamento remoto, cujos *pixels* assumem somente valores discretos. A figura 52 mostra uma imagem antes e depois da operação de equalização do histograma.

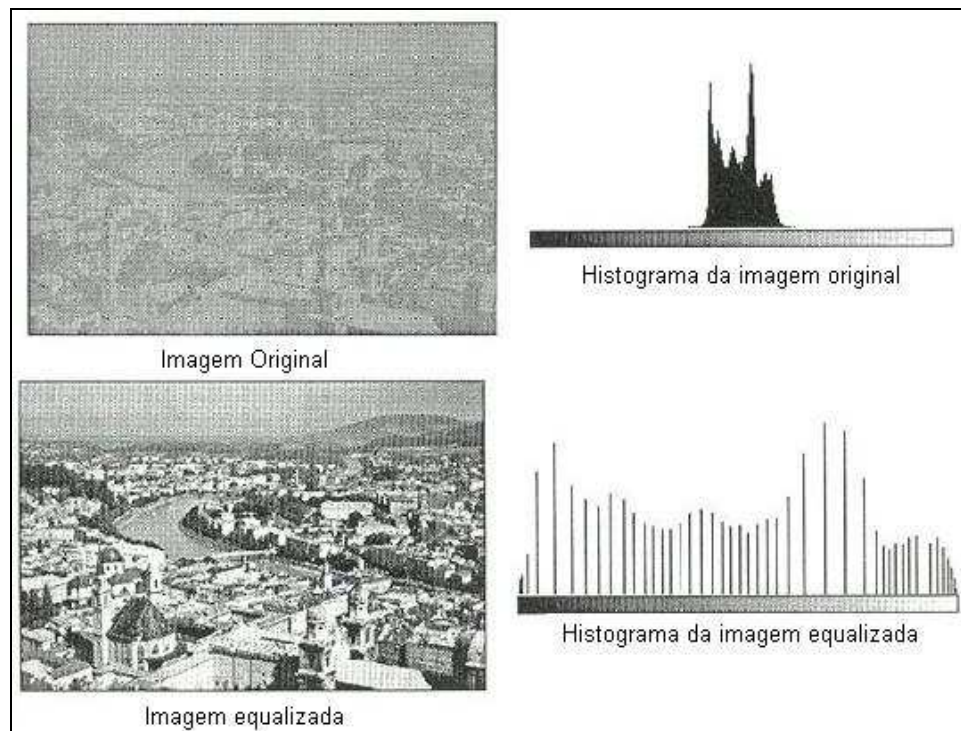


Figura 52: Equalização de uma imagem
 Fonte: <http://atlas.ucpel.tche.br/~vbastos/equa.htm>

7.2.2 MANIPULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESPACIAIS

Consiste na transformação dos valores dos *pixels* de uma imagem, considerando a vizinhança na qual o *pixel* está inserido. Este procedimento pode ser efetuado por meio da filtragem espacial, (procedimento que opera no domínio espacial de uma imagem), e da análise de Fourier (que atua no domínio das freqüências que compõem a imagem).

7.2.2.1 FILTRAGEM ESPACIAL

As imagens de sensoriamento remoto possuem limites entre áreas com diferentes respostas em relação à energia eletromagnética. Esses limites podem ser, por exemplo, entre diferentes coberturas do terreno (solo, vegetação, rios, etc.), ou podem

ainda representar o contato entre áreas com diferentes condições de iluminação. Os limites são representados pelos diferentes níveis de cinza que os *pixels* assumem em uma imagem. Limites que variam abruptamente são conhecidos como bordas, e geralmente ocupam áreas pequenas e estreitas na imagem e são chamados de feições de alta frequência. São exemplos de feições de alta frequência os limites entre diferentes plantações, entre áreas sombreadas e iluminadas, redes de transportes (malha urbana, rodovias, ferrovias), redes de drenagem, estruturas geológicas (falhas, fraturas) e outras.

Por sua vez, os limites graduais que variam mais uniformemente com a distância e, portanto, menos nítidos, são chamados de feições de baixa frequência. Exemplos de feições de baixa frequência são dados por áreas monotonamente uniformes nas imagens, tais como uma grande área de monocultura em terreno plano. A noção de alta ou baixa frequência é uma função da escala da imagem, ou seja, ao se diminuir a escala, a frequência de um determinado alvo tende a se tornar maior e vice-versa. As imagens de sensoriamento remoto apresentam uma gama de frequências, das baixas, passando pelas médias e chegando até às altas frequências. A grande mistura de frequências nas imagens dificulta a interpretação de feições com frequências específicas, e para contornar essa restrição e melhorar a aparência da distribuição espacial das informações, são utilizadas as técnicas de filtragem espacial de frequências, que consistem em realçar seletivamente as feições de alta, média ou baixa frequências que compõem as imagens de sensoriamento remoto.

Portanto, fica claro que as bordas não podem ser detectadas a partir da análise isolada do nível de cinza de um único *pixel*, mas sim pela diferença entre as intensidades de *pixels* vizinhos. A filtragem espacial é fundamentalmente uma operação de área ou de vizinhança. O processo utilizado para realizar a filtragem espacial é a convolução. A filtragem espacial por convolução utiliza máscaras ou janelas espaciais para o processamento das imagens, alterando a distribuição espacial de frequências da imagem original, objetivando-se assim melhor discernir bordas, feições lineares de determinadas direções e padrões de textura. São utilizados algoritmos que usam o deslocamento das máscaras com dimensões ímpares (3 x 3, 5 x 5, etc.), por todos os *pixels* da imagem original, aplicando-se um cálculo matemático que utiliza os números digitais (níveis de cinza) de todos os pixels sob a janela e os valores contidos na janela, substituindo o pixel central da imagem original pelo novo valor calculado.

A figura 53 ilustra como atua um filtro espacial de convolução com janela móvel em uma imagem. A e B são respectivamente as imagens de entrada e saída, e M é a máscara ou janela de dimensões 3 x 3 *pixels*. A janela móvel opera da seguinte maneira: primeiramente posiciona-se a janela sobre o canto superior esquerdo da imagem, multiplicando-se cada valor de nível de cinza das 9 celas desta pelo respectivo valor das 9 celas da janela. Em seguida substitui-se o valor do *pixel* central dessa área da imagem (no caso, o *pixel* da 2ª linha/2ª coluna) pela soma desses nove valores, encontrando-se então o novo valor do *pixel* correspondente da imagem de saída. O próximo passo é mover a janela um *pixel* ao longo da linha e fazer novamente essa mesma operação, encontrando-se então o valor do *pixel* correspondente à 2ª linha/3ª coluna da imagem de saída. Essa operação é feita *pixel a pixel* para a imagem toda, sempre recalculando o novo valor do *pixel* em função dos seus 8 vizinhos mais próximos, no caso da janela ter uma dimensão de 3 x 3, ou dos seus 24 vizinhos mais próximos no caso de uma janela 5 x 5.

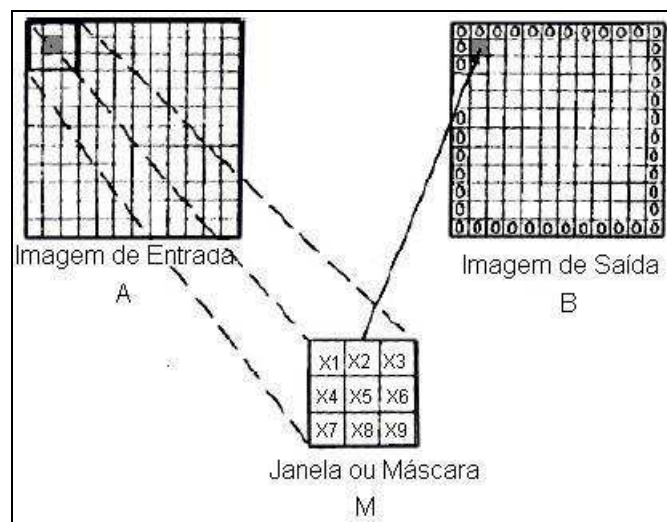


Figura 53: Filtragem espacial: convolução.
Fonte: Crósta (1993), p. 79.

A imagem de saída produzida pela filtragem possui os valores dos pixels situados nas suas bordas iguais a zero. Isso se deve ao chamado efeito de bordas, provocado pelo fato de que a primeira posição da janela móvel em que a máscara pode ser aplicada, no caso de uma máscara 3 x 3, é o segundo pixel da segunda coluna. O mesmo ocorre em todas as bordas da imagem, cujos valores de intensidade são substituídos por zero. Perceba-se que no caso de uma máscara 5 x 5 as bordas teriam duas linhas e duas colunas com valores iguais a zero.

Dentre os filtros utilizados na filtragem espacial por convolução os mais comumente utilizados segundo são:

- a. Os filtros de passa baixas (também denominados de filtros de suavização): esse nome advém do fato de que esses filtros eliminam as altas frequências da imagem, deixando “passar” apenas as baixas frequências. A maior utilização dos filtros passa baixas é na remoção de ruídos eletrônicos, comuns em imagens de sensoriamento remoto.
- b. Os filtros de passa altas (também chamados de filtros de realce de bordas): eliminam as feições de baixa frequência, deixando apenas as de alta frequência, normalmente expressas por bordas ou limites entre áreas de diferentes valores de nível de cinza.
- c. Os filtros direcionais: são um tipo especial de filtro passa altas, que possuem a característica de realçar bordas em direções pré-determinadas.
- d. Filtros de convolução: destinados a remover o ruído nas imagens.

7.2.2.2 ANÁLISE DE FOURIER

Nesta abordagem, uma imagem é separada de acordo com seus vários componentes de frequência espacial, por meio da aplicação de uma operação matemática conhecida como transformada de Fourier, que atua no domínio da frequência e é uma transformação bidimensional. A análise de Fourier, também denominada de análise harmônica, tem como objetivo aproximar uma combinação de séries de senos e cossenos (séries de Fourier), e estimar os coeficientes associados às diferentes frequências.

Uma aplicação para a transformada de Fourier é a análise de imagens e remoção de ruídos que se apresentam em uma forma padronizada dentro da imagem. Por meio da transformada de Fourier constrói-se um diagrama que permite analisar os padrões encontrados na imagem, e com a transformada inversa é possível isolar e visualizar somente estes padrões da imagem. A descrição quantitativa de como a transformada

de Fourier é formulada está além do escopo desta discussão, detalhes sobre a transformada de Fourier podem ser encontrados em Marques Filho e Vieira Neto (1999), Gonzáles e Woods (2000) e em Sartori Neto *et al.* (2005).

7.2.3 MANIPULAÇÃO DE MÚLTIPLAS IMAGENS (BANDAS)

Neste tipo de procedimento pode-se realizar operações matemáticas entre as diferentes bandas espectrais, análise por componentes principais, análise por componentes canônicas e transformação do modelo RGB (Red – Green – Blue) para o modelo IHS (Intensity – Hue – Saturation).

7.2.3.1 OPERAÇÕES MATEMÁTICAS ENTRE AS DIFERENTES BANDAS ESPECTRAIS

Essas operações podem ser razão, adição ou subtração. A razão, por exemplo, é a divisão de um pixel de uma imagem por aqueles de outra imagem, e tem demonstrado ser um dos mais úteis métodos simples de processamento de imagens, pois essa operação freqüentemente realça variações espectrais sutis, difíceis de serem detectadas na imagem original. Outro efeito da razão entre imagens é a redução dos efeitos topográficos devido à iluminação desigual de áreas da imagem causada por diferentes inclinações da fonte de radiação.

A adição de bandas é outra operação matemática comumente usada. É um realce onde os *pixels* de uma imagem são adicionados aos *pixels* correspondentes de outra. À semelhança de outros realces que envolvem múltiplas imagens, além de realçar sutis diferenças espectrais, ele reduz a dimensionalidade dos dados a serem interpretados para proporções mais fáceis de manipular.

A subtração de uma imagem por outra de uma mesma cena significa que a variação de tom na imagem resultante indicará as diferenças entre as duas imagens. Isto fornece o potencial para detecção de mudanças caso as duas imagens sejam tomadas em datas diferentes. Na prática, porém, muitas das diferenças detectadas entre duas imagens são o resultado de variações no ângulo de inclinação e orientação solar e de níveis de

iluminação. Assim sendo, devem ser feitas tentativas para eliminar essas variações de maneira que mudanças na cobertura do terreno possam ser de fato detectadas.

Um exemplo de operações matemáticas entre múltiplas imagens é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), muito usado para aumentar o contraste entre o solo e a vegetação, utilizando a razão entre as bandas referentes ao vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP), o objetivo é avaliar se o alvo que está sendo observado é vegetação verde viva ou não.

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V}$$

7.2.3.2 COMPONENTES PRINCIPAIS

Imagens multiespectrais geralmente exibem alta correlação entre as bandas espectrais, ou seja, são similares visual e numericamente. Esta correlação advém do efeito de sombras resultantes da topografia, da sobreposição das janelas espectrais²⁸ entre bandas adjacentes e do próprio comportamento espectral dos objetos.

Portanto, a redundância entre os componentes dessas imagens pode ser significativa, e desta forma a análise das bandas espectrais individuais pode ser ineficiente. A transformação para componentes principais produz um novo conjunto de imagens que não são correlacionáveis entre si e são ordenadas de tal maneira que cada componente tem a variância²⁹ menor do que a componente anterior. A geração de componentes principais é uma técnica de realce que reduz ou remove a redundância espectral por meio de um novo conjunto de imagens, cujas bandas individuais apresentam informações não disponíveis em outras bandas. No novo conjunto de imagens cada valor de *pixel* é uma combinação linear dos valores originais. O número de componentes principais é igual ao número de bandas espectrais utilizadas e são

²⁸ Escalas dos comprimentos de onda.

²⁹ Na teoria da probabilidade e na estatística a variância de uma variável aleatória é uma medida de sua dispersão estatística, indicando quão longe os seus valores se encontram do valor esperado. Ou seja, é uma medida de dispersão dos valores de uma variável em torno de sua média, dada pela soma dos quadrados dos desvios em relação à média, dividida pelo número de observações:

$$s^2 = \frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2,$$

Onde \bar{x} é a média da amostra. Quanto maior a variância, maior a dispersão dos dados.

ordenadas de acordo com o decréscimo da variância de nível de cinza. A primeira componente principal tem a maior variância (maior contraste) e a última, a menor variância.

A aplicação da técnica de realce por meio da geração de componentes principais é particularmente apropriada quando, a princípio, pouca informação a respeito da imagem está disponível.

7.2.3.3 COMPONENTES CANÔNICAS

O uso das componentes canônicas é uma técnica apropriada para se fazer uma análise discriminante múltipla (separabilidade), quando se conhece de antemão as informações sobre as feições que serão separadas. A análise de componentes canônicas busca posicionar um sistema de eixos de forma que a variância interna e entre as classes seja minimizada e maximizada, respectivamente. Essa propriedade é a diferença básica entre a análise por componentes canônicas e a análise por componentes principais, pois esta última não se preocupa com a variância interna das classes. A exemplo das componentes principais, as componentes canônicas podem ser usadas para classificação de imagens. As imagens geradas pelas componentes canônicas não apenas melhoram a eficiência da classificação, mas também podem melhorar a acurácia da classificação pela identificação de características, devido ao aumento da separabilidade espectral entre as classes.

7.2.3.4 TRANSFORMAÇÃO DO MODELO RGB PARA O MODELO IHS

No modelo de cores RGB cada cor é representada na sua componente espectral primária vermelho (red), verde (green) e azul (blue), e é baseado no sistema cartesiano de coordenadas. O subespaço de cores forma um cubo, conforme se observa na figura 54 que ilustra o cubo de cores RGB. Os pontos ao longo da diagonal principal têm valores de cinza normalizados, a partir do preto na origem (0,0,0) na direção do branco (1,1,1).

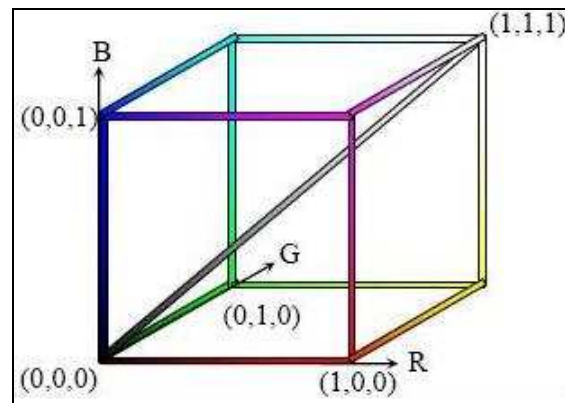


Figura 54: Modelo RGB.
Fonte: Lima *et al.* (2005)

O modelo IHS (Intensity, Hue, Saturation) é uma representação da cor muito útil em sensoriamento remoto por duas razões principais: primeiro porque a componente intensidade (I) pode ser desvinculada da informação de cor de uma imagem (matiz e saturação), segundo porque as componentes de matiz (H) e saturação (S) estão intimamente relacionadas com o processo pelo qual os seres humanos percebem a cor. Esses atributos tornam o modelo IHS ideal para o desenvolvimento de algoritmos de processamento de imagens baseados nas propriedades sensoriais da cor percebida pelo sistema visual humano. Neste modelo as características usadas para distinguir uma cor de outra são suas componentes de intensidade, matiz ou tonalidade e saturação, conforme ilustrado na figura 55.

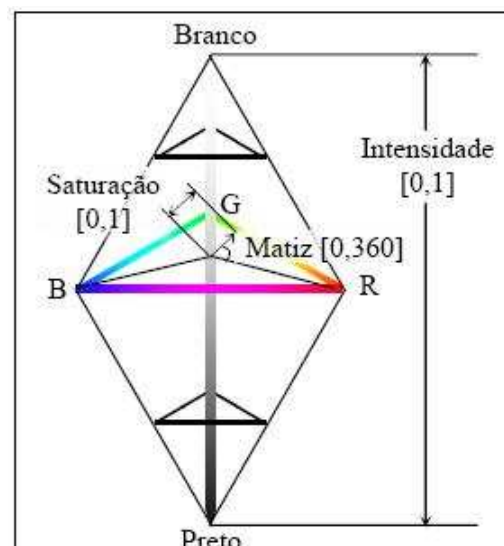


Figura 55: Modelo IHS.
Fonte: Lima *et al.* (2005)

A componente intensidade personifica a noção de intensidade de luz e representa a componente acromática da cor; o matiz é um atributo relacionado ao comprimento de onda dominante em uma mistura de faixas de luz, ou seja, o matiz representa a cor

dominante percebida por um observador; e a saturação, por sua vez, refere-se à pureza relativa ou quantidade de luz branca misturada com a cor dominante. As cores do espectro puro são completamente saturadas, sendo que o grau de saturação é inversamente proporcional à quantidade de luz branca que foi acrescida. Matiz e saturação, juntas, formam a cromaticidade de uma cor, de modo que esta pode ser completamente caracterizada pelo seu brilho (ou intensidade, a componente acromática) e pela sua cromaticidade (uma combinação de matiz e saturação). A transformação ou conversão entre estes modelos de cores é uma técnica de processamento digital de imagens que proporciona um maior controle sobre os realces de cores.

Dentre as vantagens da utilização de operações de realce no modelo de cores IHS pode-se citar a habilidade de variar cada componente independentemente, sem afetar os outros.

7.3 CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM

O sensoriamento remoto, desde o seu surgimento, visou empregar procedimentos automatizados de reconhecimento de padrões e extração de informação. Técnicas de classificação de imagens de sensoriamento remoto, hoje tidas como tradicionais, desenvolvidas nas décadas de 1970, 1980 e 1990, utilizam informações extraídas dos *pixels* (chamada classificação *pixel a pixel*). Esta metodologia se desenvolveu numa época onde as resoluções dos sensores atingiam alguns metros (por exemplo, o satélite francês SPOT com resolução espacial de 10 metros, e a série de satélites norte-americanos LANDSAT com 30 metros de resolução espacial), e poucas bandas espectrais.

As inovações tecnológicas utilizadas permitiram avanços nas resoluções espacial, espectral, radiométrica e temporal. Em função dessa melhoria uma maior riqueza de detalhes das feições presentes na superfície terrestre pode ser visualizada nas imagens de satélite. Percebe-se que o poder de discriminação entre alvos aumenta quando se utiliza um maior número de faixas espectrais e, aliado ao fato dessas faixas serem mais estreitas, há uma redução bastante considerável da informação redundante entre diferentes faixas ou bandas. Com o aumento da resolução radiométrica os detalhes são mais preservados, notadamente em áreas urbanas. Por sua vez, a melhora do poder de resolução espacial propicia uma melhor discriminação dos objetos presentes na cena, além de contribuir para a redução do problema da mistura espectral dos pixels.

Com o advento de sensores de alta resolução espacial tornou-se possível a detecção de feições urbanas a partir de imagens de satélite, porém a acurácia do processo de classificação de imagens deixou a desejar. A principal causa é a alta variação espectral que ocorre no cenário urbano quando observado em uma imagem com pixels de 1 metro, o que implica na alta variância dos elementos internos a cada classe (intraclasses). Ocorre também a alta variação de dados interclasses, devido à semelhança espectral entre pixels de classes diferentes (confusão espectral, como por exemplo, telha cerâmica e solo exposto, rua suja com cimento e lajes de concreto, etc). Em função da melhoria da resolução espacial, pode haver um aumento da variabilidade interna, ou seja, do ruído interno dentro das classes de cobertura do solo. Como

resultado, os classificadores tradicionais, baseados apenas nas informações espectrais dos *pixels* têm seus desempenhos reduzidos.

Em virtude dessas intercorrências, surgiram as técnicas de classificação de imagens por orientação a objetos, que consideram não apenas as informações espectrais dos *pixels*, mas o contexto e a geometria dos objetos. Além da informação espectral pura, as imagens por orientação a objetos são caracterizadas por um número adicional de informações, tais como as relativas à textura e forma. A possibilidade de extrair informações das imagens por orientação a objetos em qualquer escala escolhida é uma importante característica em termos de operações práticas: a resolução da imagem por orientação a objetos pode ser adaptada para a solução do problema específico que se tem em mãos. A introdução, (no processo de interpretação e classificação da imagem), de informações provenientes do conhecimento do analista sobre as feições representadas na imagem para compor as regras de decisão (para se compor a classificação), tem mostrado uma melhoria significativa na discriminação de alvos urbanos.

A base de conhecimento passa então a ser utilizada para apoiar a criação das regras e das estratégias de classificação nas imagens, sobretudo no ambiente urbano. Essa modelagem vai além do emprego de informações numéricas extraídas dos elementos. Relacionamento entre elementos vizinhos e sua interação no ambiente urbano passam a ter papel importante e decisivo. A classificação de imagens, que tradicionalmente visa discriminar classes de cobertura do solo, passa também a inferir sobre o uso do solo. No entanto, vale ressaltar que o modelo classificatório baseado em informações contextuais é, mais do que nunca, um processo supervisionado e, como tal, é altamente dependente de um analista.

Classificação de imagens é o processamento no qual decisões quantitativas são tomadas com base nas informações presentes na imagem, através do agrupamento de *pixels* ou regiões da imagem em classes que representem diferentes padrões de cobertura do solo, visando como saída o mapeamento temático extraído da imagem.

A classificação de imagens é definida em função do padrão de processamento dos dados, ou seja, reconhecimento do padrão espectral, espacial ou temporal, recorrendo, respectivamente, a análises da reflectância dos *pixels* nas diferentes bandas, análises

da relação espacial entre os *pixels* e a análise das diferenças entre duas ou mais cenas tomadas em épocas diferentes.

O objetivo geral da classificação de imagens multiespectrais é categorizar automaticamente todos os *pixels* pertencentes à uma imagem dentro de classes ou temas de cobertura do solo, gerar mapas ou imagens temáticas e servir como fonte de dados para um sistema de informações geográficas (SIG).

Em geral, dados multiespectrais são usados para fazer a classificação e, além deles, os padrões espectrais presentes dentro dos dados para cada pixel são usados como a base numérica para a categorização. A base conceitual para classificação de imagens reside no fato de que classes de cobertura terrestre diferentes possuem propriedades de reflectância diferentes. Ocorre, porém, que muitas classes de cobertura terrestre têm propriedades de reflectância que se assemelham ou até mesmo se sobrepõem, dificultando a separação e classificação das mesmas. A maioria dos métodos de classificação avalia a semelhança de padrões espectrais usando alguma medida de distância entre os *pixels* do espaço espectral.

Atualmente, como anteriormente enfatizado, o procedimento de classificação de imagens de sensoriamento pode ser realizado por meio de duas principais abordagens: a abordagem *pixel a pixel* e a orientada a objetos. A maioria das técnicas disponíveis de classificação (abordagem *pixel a pixel*) se baseiam apenas no agrupamento de valores de intensidade espectral, representados pelos níveis de cinza presentes na imagem. O conteúdo de informação de uma imagem de sensoriamento remoto se baseia tanto na intensidade (nível de cinza ou cor) de cada *pixel* individual, como no arranjo espacial dos *pixels* (textura e forma) e suas relações de vizinhança, como é o caso da abordagem orientada a objetos.

7.3.1 CLASSIFICAÇÃO PIXEL A PIXEL

Este processo de classificação de imagens pode ser desenvolvido através de métodos supervisionados, não supervisionados e híbridos:

7.3.1.1 CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA

Neste método o usuário identifica alguns dos *pixels* pertencentes às classes desejadas e deixa ao computador a tarefa de localizar todos os demais *pixels* pertencentes àquelas classes, baseado em alguma regra estatística (paramétrica) e/ou geométrica (não-paramétrica) pré-estabelecida. É esse o procedimento utilizado com maior frequência para análise quantitativa de dados de imagens de sensoriamento remoto.

A classificação supervisionada é desenvolvida com base em amostras de treinamento, ou seja, os *pixels* da imagem são classificados segundo regras. Em seguida esses *pixels* são comparados aos padrões de classes previamente obtidos em uma fase em que o operador as define.

A classificação supervisionada é informalmente definida como o processo no qual amostras de identidade conhecida são utilizadas para classificar *pixels* de identidade desconhecida. Nesse processo um analista identifica na imagem as classes de informação de seu interesse e separa regiões que melhor representem estas classes. Dentro dessas regiões, ele separa áreas de treinamento que contêm os *pixels* que serão usados como representantes da classe. A partir destes *pixels* são extraídas determinadas características das classes, que serão usadas para a classificação dos demais *pixels*.

Essa técnica de classificação, no entanto, exige do analista um controle sobre o processo, isto acarreta vantagens e desvantagens, como por exemplo, o analista tem condições de identificar possíveis imprecisões graves pela análise das áreas de treinamento; em contrapartida o analista impõe uma determinada estrutura de classificação aos dados, por meio da definição prévia das classes de informação. Mas estas classes podem não corresponder às classes reais existentes na cena imageada, ou não ser separáveis no espaço n-dimensional.

Os passos práticos essenciais para uma classificação supervisionada são:

- Decidir o conjunto de tipos de cobertura de solo ou classes de informação (área urbana, água, vegetação, etc.), dentro dos quais a imagem deverá ser

classificada. Esta decisão depende do tipo de aplicação prática que se deseja, e qual é a natureza e o tipo dos dados que se dispõem para as análises.

- Selecionar *pixels* como representantes de cada classe desejada. Esses *pixels* são os dados de treinamento. Os conjuntos de treinamento de cada classe podem ser estabelecidos utilizando visitas a campo, análise de mapas, fotografias aéreas ou até mesmo fotointerpretação de um produto colorido formado por dados da imagem. Parâmetros estatísticos multivariados (médias, desvios padrões, matrizes de covariância, matrizes de correlação, etc.) são calculados para cada conjunto de treinamento. Cada pixel, pertencente ou não aos conjuntos de treinamento, é então avaliado e designado como pertencente à classe que ele possua a maior probabilidade de ser membro. O objetivo do treinamento é definir um padrão de resposta espectral para cada classe a ser classificada na imagem a partir de estatísticas. É importante que as amostras usadas como conjunto de treinamento sejam bastante homogêneas e representem toda a variação possível dentro da classe. Quando são utilizadas técnicas estatísticas de classificação, as amostras de treinamento devem ser grandes o suficiente para que possa ser feita a estimativa das características espectrais da classe de interesse. A qualidade do processo de treinamento determina o sucesso do processo de classificação supervisionada.
- Calcular os parâmetros de determinado algoritmo, utilizando os dados de treinamento. Estes parâmetros podem ser as propriedades de probabilidade do modelo utilizado ou podem ser utilizados em equações que definirão as separações no espaço espectral. O conjunto de parâmetros de uma determinada classe é muitas vezes chamado de assinatura de tais classes.
- Utilizar o classificador treinado para nomear cada *pixel* da imagem dentro de um dos tipos desejados de cobertura terrestre (classes de informação), classificando toda a imagem.
- Produzir uma tabela sumarizada ou mapa temático (classe) que resuma os resultados da classificação. O mapa temático é na verdade uma imagem comum, formada por uma única banda, em cima da qual os pixels atribuídos a cada classe são exibidos em cores ou tons de cinza distintos. Normalmente, a

classificação é feita em cima de três ou mais bandas espectrais, fazendo uso do poder de discriminação adicional que elas oferecem.

Alguns dos algoritmos de classificação supervisionada mais utilizados são: o do paralelepípedo, o da distância mínima, o da máxima verossimilhança (MaxVer), classificador Mahalanobis, classificador em cascata, e função de adesão com graus de confiança. Maiores detalhes se encontram nas referências a seguir: Crósta, 1993; Jensen, 1996; Lillesand *et al.*, 2004; Campbell, 2005; Máximo e Fernandes, 2005.

Estes procedimentos podem ser aplicados a qualquer número de bandas. A figura 56 exemplifica o procedimento de classificação de imagem supervisionada:



Figura 56: Representação da classificação supervisionada.
Fonte: Noguchi, 2004.

7.3.1.2 CLASSIFICAÇÃO NÃO-SUPERVISIONADA

Este tipo de classificação é desenvolvido sem que o operador especifique os padrões que irão compor as classes. Com isso, são requeridos cálculos computacionais para definir os agrupamentos dos padrões espectrais similares. Fica a cargo do operador, basicamente, definir o rótulo das classes ou, quando necessário, o número de classes.

Essa classificação baseia-se no princípio de que o computador (na realidade, o *software* utilizado) é capaz de identificar por si só as classes dentro de um conjunto de dados.

Os classificadores não-supervisionados não baseiam a classificação em amostras de treinamento. Pelo contrário, esta família de classificadores envolve algoritmos que examinam os *pixels* “desconhecidos” de uma imagem e os agregam em um certo número de classes baseado nos agrupamentos naturais (*clusters*) presentes nos valores da imagem.

A premissa básica é que os valores dos *pixels* dentro de um dado tipo de cobertura devem estar perto uns dos outros, ou sejam, formam um agrupamento no espaço, enquanto que dados de classes diferentes estão, comparativamente, bem separados.

As classes resultantes da classificação não-supervisionada são classes espectrais, pois os *pixels* da imagem, como já enfatizado, são agrupados com base somente nos valores de nível de cinza da imagem (agrupamentos naturais), e a identidade das classes espectrais *a priori* não são conhecidas pelo analista.

Este procedimento de classificação utiliza determinado algoritmo, conforme alguns critérios definidos, para determinar o número e localização das classes espectrais. O analista identifica essas classes *a posteriori*, analisando as assinaturas espectrais para determinar o que cada classe é ou representa, podendo ser necessária a verificação através de dados de referência disponíveis que poderiam incluir mapas e visitas a campo.

Esse tipo de classificação é a opção mais adequada quando a área investigada é desconhecida, ou quando suas características não estão bem definidas. Muitas vezes, o usuário das imagens desconhece a quantidade de agrupamentos espectrais presentes na imagem, bem como o valor de dispersão interna ou de distância entre grupos. Assim sendo, a classificação não supervisionada pode ser útil também para determinar a composição da classe espectral dos dados antes da análise detalhada pela utilização de métodos de classificação supervisionada, sendo possível avaliar a potencialidade de discriminação das classes.

Alguns dos algoritmos estatísticos de classificação não supervisionada mais conhecidos são o do k-médias (*k-means*), o do líder, e o da busca pelo pico do histograma.

A figura 57 ilustra o procedimento da classificação não-supervisionada:

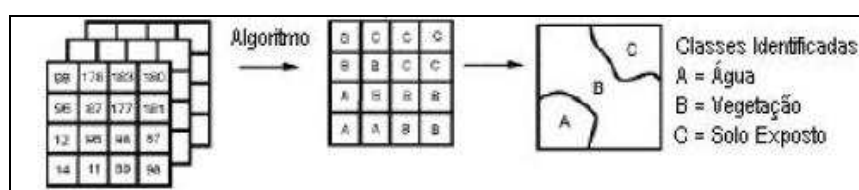


Figura 57: Representação da classificação não-supervisionada.
Fonte: Noguchi, 2004.

7.3.1.3 CLASSIFICAÇÃO HÍBRIDA

Trata-se da utilização conjunta das duas formas de classificação inicialmente descritas: a supervisionada e a não supervisionada. Normalmente, a utilização de um processo de classificação inicial não supervisionado, favorece a obtenção de informações a respeito dos dados, que serão posteriormente utilizados em procedimentos de classificação supervisionada mais elaborados. Técnicas de classificação híbridas podem, portanto, ser consideradas relativamente mais eficientes e confiáveis do que técnicas de classificação, supervisionada ou não supervisionada, utilizadas isoladamente.

Os modelos tradicionais de classificação de imagens recorrem à análise dos valores (números digitais) dos *pixels* nas bandas espectrais utilizadas. Independente do classificador adotado, as diferentes respostas espectrais atribuídas aos *pixels* nas diferentes bandas são, em geral, analisadas em conjunto (ou apenas as bandas espectrais mais representativas) utilizando o espaço multidimensional de atributos.

Os esquemas de classificação por *pixel* visam identificar a classe de cada *pixel* na imagem por meio de comparações do vetor n-dimensional de dados de cada elemento com o padrão de cada classe. Embora a classificação estatística seja o procedimento convencional mais utilizado para a análise de imagens, constituindo-se um processo de análise dos *pixels* de forma isolada, ele apresenta a limitação da análise pontual ser baseada unicamente em atributos espectrais. Muitas das feições presentes no cenário urbano, como ruas, edificações e estacionamentos podem possuir respostas espectrais similares, devido à composição do material. Ademais, os *pixels* dessas imagens podem conter informações de diversas classes, ou seja, são os denominados *pixels* mistos. Como consequência, o emprego de técnicas baseadas somente nas informações pontuais dos *pixels* promove classes espacialmente descontínuas.

É inegável que a introdução das imagens de alta resolução reduziu o problema dos “pixels mistos”, porém como ressaltado anteriormente, isto acarretou um grande aumento da variabilidade e o ruído interno dentro de classes quase homogêneas. Para As concepções convencionais de classificação de imagem encontram-se próximas de seus limites, sendo seus principais problemas a alta homogeneidade interclasses e a alta heterogeneidade intraclasses. A adoção de classificadores *pixel a pixel*, além de

apresentar problemas devido à natureza do procedimento para imagens de alta resolução espacial, não favorece a tendência atual de integração entre o sensoriamento remoto e SIG.

7.3.2 CLASSIFICAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

Na abordagem orientada a objetos, um problema ou aplicação é representado por uma coleção de objetos que possuem características próprias e interagem entre si. Na classificação os objetos com a mesma estrutura de dados (atributos) e com o mesmo comportamento (operações) são agrupados em uma classe. Uma classe é uma abstração que descreve propriedades importantes para uma aplicação e ignora o restante. Qualquer escolha de classes é arbitrária e depende da aplicação. Cada classe descreve um conjunto possivelmente infinito de objetos individuais. Cada objeto é dito ser uma instância de sua classe. Cada instância da classe tem seu próprio valor para cada atributo, mas compartilha os nomes de atributos e operações com outras instâncias da mesma classe. A figura 58 mostra duas classes e alguns de seus respectivos objetos representativos de instâncias. Um objeto contém uma referência implícita à sua própria classe; ele “sabe que tipo de coisa ele é”.



Figura58: Objetos e classes.
Fonte: Rumbaugh *et al.* (1994)

Porém, para a definição propriamente dita de classificação de imagens orientada a objetos é necessário antes introduzir os conceitos relativos a modelagem por objetos.

7.3.2.1 *TÉCNICA DE MODELAGEM DE OBJETOS*

Uma modelagem orientada a objetos consiste na construção de um modelo de um domínio da aplicação e na posterior adição a este dos detalhes de implementação durante o projeto de um sistema. Essa abordagem é chamada de Técnica de Modelagem de Objetos (TMO), e possui as seguintes etapas:

- **Análise:** partindo do enunciado do problema, o analista constrói um modelo da situação do mundo real. Modelo este que mostra apenas as propriedades relevantes presentes no mundo real.
- **Projeto do sistema:** o projetista de sistemas toma decisões de alto nível relativamente à arquitetura geral. Durante o andamento do projeto, o sistema-alvo é organizado em subsistemas baseados tanto na estrutura da análise como na arquitetura proposta.
- **Projeto dos objetos:** o projetista de objetos constrói um modelo de projeto baseado no modelo de análise, mas contendo detalhes de implementação. O enfoque do projeto de objetos são as estruturas de dados e os algoritmos necessários à implementação de cada classe.
- **Implementação:** as classes de objetos e os relacionamentos desenvolvidos durante o projeto de objetos são, por fim, traduzidos para uma determinada implementação em uma linguagem de programação, em um banco de dados ou em hardware.

A metodologia TMO faz uso de três tipos de modelos para descrever um sistema: o modelo de objetos, que descreve os objetos do sistema e seus relacionamentos; o modelo dinâmico, que descreve as interações entre os objetos do sistema; e o modelo funcional, que descreve as transformações de dados do sistema. A descrição completa de um sistema exige todos os três modelos. O desenvolvimento orientado a objetos inverte a metodologia precedente baseada em funções. Naquelas metodologias, a ênfase principal repousa na especificação e decomposição da funcionalidade do sistema. Em contraste, a abordagem orientada a objetos preocupa-se primeiro em identificar os objetos contidos no domínio da aplicação e depois em estabelecer os

procedimentos relativos a eles. Por esse motivo um *software* orientado a objetos mantém-se melhor à medida que os requisitos evoluem, por se apoiar na própria estrutura fundamental do domínio da aplicação, ao invés de apoiar-se nos requisitos funcionais de um único sistema.

Existem diversas características fundamentando a tecnologia orientada a objetos. Embora essas características não sejam exclusivas dos sistemas orientados a objetos, elas são especialmente bem amparadas nesses sistemas.

Os objetos já existentes são utilizados para produzir novos objetos, tornando essa metodologia mais poderosa que as metodologias tradicionais de desenvolvimento de sistemas. Fundamentalmente o que se deseja com esta metodologia são basicamente duas características: reutilização do código e modularidade de escrita (LEITE e RAHAL JÚNIOR, 2002).

Um modelo não será puramente orientado a objetos na falta de qualquer um de seus quatro conceitos básicos, a saber: abstração, encapsulamento, polimorfismo e hierarquia ou herança. Modelos que utilizam alguns dos conceitos de orientação a objetos são chamados de modelos híbridos de orientação a objetos ou modelos baseados em objetos.

Os conceitos básicos dos modelos O-O (orientados a objetos) são a seguir descritos:

- a. **Abstração:** consiste na concentração nos aspectos essenciais, próprios, de uma entidade e em ignorar suas propriedades acidentais. No desenvolvimento de sistemas, isso significa concentrar-se no que um objeto é e faz, antes de decidir como ele deve ser implementado. O uso da abstração preserva a liberdade de se tomar decisões evitando, tanto quanto possível, comprometimentos prematuros com detalhes. O uso da abstração durante a análise significa lidar apenas com conceitos do domínio da aplicação, e não ter de tomar decisões sobre o projeto e a implementação antes do problema ser compreendido. Nesse contexto, a abstração refere-se à capacidade de modelar o mundo real, e por outro lado, pode-se considerá-la como um mecanismo pelo qual restringimos o universo de análise e as variáveis e constantes que compõem esse

universo, desprezando os dados que não interessam para a análise. É possível demonstrar o uso de abstração facilmente, quando se imagina uma mesa. Esta mesa imaginária provavelmente não será igual a outras imaginadas por outras pessoas, mas o que importa é que todos as pessoas que imaginaram uma mesa colocaram nela as informações necessárias para a sua função (de ser uma mesa). Não importa se a mesa é de três pés ou quatro, ou se o tampão é de vidro, madeira ou mármore. O que importa é que a imagem idealizada pelas pessoas é de uma mesa, e que esta tenha as informações necessárias para cumprir sua função.

- b. Encapsulamento: também chamado de ocultamento de informações. Consiste na separação dos aspectos externos de um objeto, acessíveis por outros objetos, dos detalhes internos da implementação daquele objeto, que ficam ocultos dos demais objetos. O encapsulamento impede que um programa se torne tão interdependente que uma pequena modificação possa causar grandes efeitos de propagação. A implementação de um objeto pode ser modificada sem que isso afete as aplicações que o utilizam. Pode-se modificar a implementação de um objeto para melhorar o desempenho, eliminar um erro, consolidar um código ou para transferências. O encapsulamento é a base de toda a abordagem da programação orientada a objetos; isto porque contribui fundamentalmente para diminuir os malefícios causados pela interferência externa sobre os dados. Partindo desse princípio, toda e qualquer transação feita com esses dados só pode ser feita através de procedimentos colocados "dentro" desse objeto, pelo envio de mensagens. Desta maneira, dizemos que um dado está encapsulado quando envolvido por código de forma que só é visível na rotina onde foi criado; o mesmo acontece com uma rotina, que sendo encapsulada, tem suas operações internas invisíveis às outras rotinas. É possível visualizar a utilidade do encapsulamento pensando em um vídeo cassete, onde há os botões de liga-desliga, para frente, para trás, etc. Estes botões executam uma série de operações existentes no aparelho, que são executadas pelos componentes existentes dentro do aparelho (transistores, cabos, motores, etc.). Não interessa ao operador saber

como é o funcionamento interno do equipamento; esta informação só é relevante para os projetistas do aparelho. As informações pertinentes ao usuário do equipamento são as existentes no meio externo (botões, controle remoto) que ativam as operações internas do equipamento. Desta maneira, o aparelho de vídeo cassete pode evoluir com os avanços tecnológicos, e as pessoas que o utilizam continuam sabendo utilizá-lo, sem a necessidade de um novo treinamento. Na área de *software* acontece o mesmo: as classes podem continuar evoluindo, com aumento de tecnologia, e os programas que utilizam essas classes continuam compatíveis. Isto ocorre porque para esses programas não interessa saber como é o funcionamento interno da classe e sim sua função, para que ele possa executar, ao passo em que ela evolui, novas funções colocadas à sua disposição.

- c. Polimorfismo: significa que a mesma operação pode atuar de modos diversos em classes diferentes. Uma operação é uma ação ou transformação que um objeto executa ou a que ele está sujeito. Uma implementação específica de uma operação por uma determinada classe é chamada método. Como um operador orientado a objetos é polimórfico, pode haver mais de um método para sua implementação. De maneira prática isto quer dizer que a operação mantém seu comportamento transparente para quaisquer tipos de argumentos; isto é, a mesma mensagem é enviada a objetos de classes distintas e eles poderão reagir de maneiras diferentes. Um método polimórfico é aquele que pode ser aplicado a várias classes de objetos sem que haja qualquer inconveniente. Um exemplo bem didático para o polimorfismo é dado por um simples moedor de carne. Esse equipamento tem a função de moer carne, produzindo carne moída para fazer bolinhos. Desse modo, não importa o tipo (classe) de carne alimentada; o resultado será sempre carne moída, não importa se de boi, de frango ou de qualquer outro tipo. As restrições impostas pelo processo estão no próprio objeto, definidas pelo seu fabricante e não pelo usuário do produto.
- d. Hierarquia ou herança: a herança da estrutura de dados e do seu comportamento permite que a estrutura comum seja compartilhada por

diversas subclasses semelhantes sem redundâncias. A herança é um mecanismo que, se for bem empregado, permite altos graus de reutilização de código. Do ponto de vista prático, pode ser entendido como sendo um conjunto de instâncias criadas a partir de um outro conjunto de instâncias com características semelhantes, e os elementos desse subconjunto herdam todas as características do conjunto original. A idéia é fornecer um mecanismo simples (mas muito poderoso) para que se definam novas classes a partir de uma pré-existente. Assim sendo, é dito que essas novas classes herdam todos os membros (propriedades + métodos) da classe-mãe. Isto torna o mecanismo de herança uma técnica muito eficiente para construir, organizar e reutilizar código. Por isso, nas linguagens que não suportam esse mecanismo, as classes são criadas como unidades independentes: cada uma com seus membros concebidos do zero (sem vínculo direto com outras classes), o que torna o processo mais demorado e com códigos, às vezes, redundantes. A herança possibilita a criação de uma nova classe de modo que essa classe (denominada subclasse, classe-filha ou classe derivada) herde todas as características da classe-mãe (denominada superclasse, classe base ou classe primitiva), podendo ainda, a classe-filha, possuir propriedades e métodos próprios. No processo de herança é possível imaginar um ser humano, que nasce com todas as características de um ser humano sadio. Agora, coloque-se nele uma roupa e um relógio. A roupa e o relógio não fazem parte do ser humano, mas quando se utiliza este ser, vestido e com um relógio, e realiza-se o processo de herança, é gerada uma cópia idêntica da matriz. Caso se coloque um sapato preto no ser humano original, a sua cópia também ficará calçada, e se a camisa do ser humano original for trocada, a sua cópia também receberá a nova camisa. Isto demonstra que a cópia continua vinculada à matriz de origem. É possível fazer quantas cópias se deseje da matriz original, e todas estas cópias manterão o seu vínculo. Pode-se, até, fazer cópias das cópias, mas o processo de modificação da matriz original implicará numa mudança em todas as outras que estão abaixo dela. Nunca uma modificação feita nas cópias altera a matriz de origem, e nunca se pode remover um item que tenha sido recebido por intermédio da herança, isto

quer dizer que nenhuma das cópias (humanas) poderá se dar ao luxo de não ter o relógio.

7.3.2.2 CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS ORIENTADAS A OBJETOS

Após a breve descrição a respeito da modelagem por objetos é possível definir o que é uma classificação de imagem orientada a objetos. Os classificadores de imagens orientados a objetos surgem como uma alternativa ao processo convencional de classificação pixel a pixel. Nesse tipo de classificação considera-se a delimitação de objetos homogêneos como base para o processamento posterior. A classificação passa a contar com informações extraídas desses objetos, como resposta espectral média, variância, dimensões, forma e textura. A classificação passa a ser influenciada não apenas pelas características dos objetos outrora definidas, mas também pelo contexto. As informações contextuais descrevem como um objeto de interesse pode ser afetado pelos objetos vizinhos. A classificação de imagens orientada por objetos tem como base um fluxo determinado de procedimentos, que se inicia, por exemplo, pelo emprego de técnicas de segmentação para a criação dos objetos. Definidos os objetos, extraem-se, indiretamente dos mesmos, informações espectrais e geométricas. Essa gama maior de informações passa a ser modelada considerando também informações contextuais, apoiando análises intra-objetos e interobjetos.

Portanto, conclui-se que classificação por objetos é aquela que utiliza, além das informações espectrais presentes nos *pixels* da imagem, as informações de contexto (dimensão, forma, textura, topologia) presentes nos objetos criados na imagem. A referência não é mais o *pixel*, mas sim o objeto (aglomerado de *pixels* com características semelhantes).

A utilização do conceito de objeto é peça chave neste tipo de análise de imagens, pois se parte do princípio de que a informação semântica necessária para a interpretação de uma imagem não está presente no pixel, e sim em objetos da imagem e nas relações existentes entre eles. Estes objetos são os segmentos, os quais são gerados a partir de um procedimento de segmentação.

Há ainda outras premissas importantes na análise orientada a objetos, a saber:

- A caracterização dos objetos da imagem não pode limitar-se apenas a atributos espectrais, pois estes muitas vezes não conseguem delimitar objetos complexos como, por exemplo, o telhado de uma casa que possui grande variedade espectral dentro dos seus limites. Por isso, é necessária também a utilização de outros atributos como: forma, tamanho, textura, padrão e contexto. Em outras palavras, é necessário inserir o conhecimento do analista no sistema de interpretação da imagem.
- Os objetos de interesse que serão extraídos de uma determinada cena podem estar associados a diferentes níveis de abstração (diferentes escalas), e estes níveis devem estar representados no sistema de análise. Assim, em uma cena de um ambiente intra-urbano, existem pequenas residências familiares que se relacionam a um nível mais detalhado de escala, e áreas industriais com grandes construções, que se relacionam a uma escala mais grosseira.
- A descrição do espaço de atributos de uma determinada classe pode ser imprecisa, o que introduz incertezas na associação de um objeto a determinada classe. Esta incerteza precisa ser modelada, pois ela é parte do resultado da classificação.

A figura 59 ilustra o fluxo dos procedimentos básicos na classificação de imagens orientada a objetos:

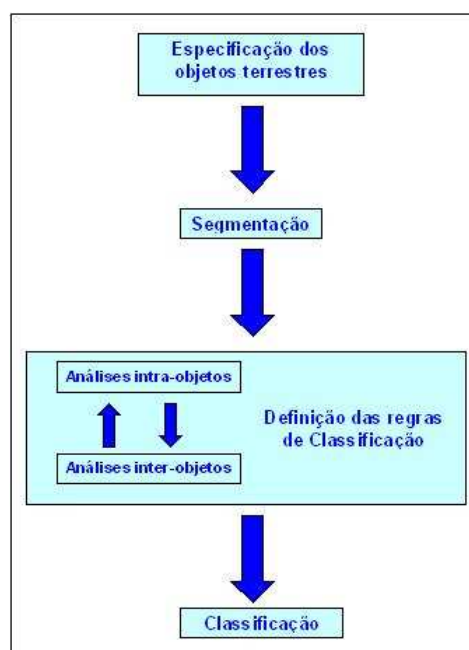


Figura 59: Fluxograma dos procedimentos adotados na classificação orientada a objetos
Fonte: Nóbrega (2007)

7.3.2.3 SEGMENTAÇÃO

O processo de segmentação tem por objetivo a criação de objetos significativos, i. e., a forma de cada objeto em questão deve ser representada idealmente por uma imagem em conformidade com este objeto. Esta forma, combinada ainda com propriedades derivadas de cor e textura, pode ser usada para inicialmente classificar a imagem por meio da classificação dos objetos gerados na imagem. Em consequência, as classes são organizadas dentro de uma hierarquia de classes. Cada classe pode apresentar sub- ou super-classes e portanto herdar suas propriedades de uma ou mais super-classes ou passá-las para suas sub-classes. Um número de pequenos objetos pode ser agregado para formar objetos maiores, construindo assim uma hierarquia semântica. Do mesmo modo, um objeto grande pode ser dividido em alguns objetos menores, e estão sujeitos às duas principais abordagens de análise de imagens: as abordagens “top-down” e “bottom-up”, para maiores detalhes ver Definiens, 2003 e Marangoz *et al.*, 2004.

A segmentação é a divisão da imagem em partes menores ou objetos de interesse, até que os mesmos sejam isolados. A automatização desse processo é considerada como uma das tarefas mais difíceis no processamento de imagens. Em algumas situações, como em aplicações industriais de inspeção, pode-se controlar o ambiente, minimizando possíveis problemas na imagem, uma vez que o ambiente é controlado. No entanto, em outras aplicações, como em imagens orbitais, não há controle sobre o ambiente natural, o que dificulta significativamente o processo.

Os algoritmos de segmentação de imagens digitais são usualmente baseados em duas propriedades: descontinuidade e similaridade. Na segmentação baseada em descontinuidade, a partição é baseada em alterações nos níveis da função da imagem, que são decorrentes das diversas situações na cena como, por exemplo, descontinuidade da normal das superfícies, descontinuidade em profundidade, descontinuidade na reflectância da superfície e descontinuidade de iluminação. A segmentação baseada em similaridade busca agrupar regiões com características semelhantes, como, por exemplo, texturas ou cores.

No contexto da segmentação por similaridade, as abordagens tradicionais dividem-se em dois grupos: (1) as que fazem uso da relação topológica dos elementos da imagem, como o crescimento de regiões, e (2) as que não fazem uso de informação topológica, caso típico da imposição de limiares (*thresholding*).

Um dos algoritmos mais populares para a segmentação pela análise da vizinhança dos *pixels* é o crescimento de regiões (*region growing*). A segmentação por crescimento de regiões agrupa os *pixels* pertencentes a uma determinada classe se o valor da diferença do nível de intensidade do *pixel* em questão para com o *pixel* vizinho de referência (denominado *pixel* semente) for menor que o valor pré-estabelecido. Embora o crescimento de regiões utilize limiares, vale ressaltar que a comparação do valor do *pixel* aos limiares leva em consideração a relação de vizinhança. Para cada *pixel* semente, são analisados seus vizinhos e, dentro das condições impostas pelo limiar, o *pixel* analisado passa a fazer parte do agrupamento em formação. O processo é executado iterativamente até que nenhum *pixel* vizinho ao segmento apresente valor de intensidade característico da categoria formada.

O processo de segmentação de imagens, particularmente para o sensoriamento remoto, vem ganhando proporções significativas pelo aumento de sua demanda como etapa que antecede o processo de classificação. O uso de segmentação de imagens como uma etapa anterior ao processo de classificação é uma forma de superar algumas das limitações apresentadas pelos classificadores convencionais *pixel a pixel*. Desta forma, os segmentos gerados são utilizados para auxiliar a seleção das amostras de treinamento, em especial para imagens de maior resolução espacial.

Depois de definidos os objetos (segmentação) e as hierarquias, o processo de classificação dos objetos é efetuado por meio de regras de decisão. Dois fatores devem ser levados em consideração neste processo: quais atributos serão utilizados para diferenciar cada classe e qual tipo de regra de decisão será adotada para cada classe.

7.4 FUSÃO DE DADOS COM SIG

O interesse no sensoriamento remoto urbano vem sendo recentemente revigorado pelo contínuo debate a respeito da fusão com dados de SIG, e também pelo advento de dados provenientes de sensores satelitais de alta resolução espacial. A união de dados de SIG e sensoriamento remoto assume um importante papel em muitas metodologias contemporâneas para análises espaciais, notadamente no ambiente urbano. Alguns exemplos sobre a fusão operacional de dados de SIG e de sensoriamento remoto nas cidades são: estimar mudanças da população, medir a verticalização e a densidade de edificações, calcular índices de qualidade de vida, e avaliar fluxo e circulação em sistemas de transporte. A fusão de dados de SIG com dados de satélites com sensores de alta resolução espacial no ambiente urbano permite a identificação individual de edificações residenciais e empresariais (comércio e indústria), com um grau razoável de delimitação espacial.

Estes procedimentos de fusão de dados são usados para combinar dados de imagens de uma determinada área geográfica com outros conjuntos de dados geográficos referentes à mesma área. Esses outros conjuntos de dados podem ser outras imagens do mesmo local, porém adquiridas em datas diferentes, imagens de outros sensores ou de outro sistema de sensoriamento remoto, ou ainda, outro tipo de dado geográfico, ou seja, dados provenientes de outras fontes de informações no contexto de um sistema de informação geográfica. Por exemplo, dados de imagem são freqüentemente combinados com informações sobre o solo, informações topográficas, sobre propriedade ou domínio, zoneamento, informações sobre tributação, etc.

Muitas aplicações de processamento digital de imagens são realçadas por meio da fusão do conjunto de dados que cobrem a mesma área geográfica. Essa fusão pode estar ou não inserida dentro de um ambiente SIG. Um exemplo bastante comum é a fusão de dados multiresolução de um mesmo sensor (fusão entre as várias bandas de um sensor); pode-se citar os procedimentos de fusão dos dados do sensor do satélite IKONOS II, por meio da combinação da banda pancromática com 1 metro de resolução espacial com os dados das bandas multispectrais com 4 metros de resolução espacial.

Pode-se ainda exemplificar o processo de fusão de dados com a combinação de dados de uma classificação automática da cobertura de solo com dados de erodibilidade do solo e informações sobre a declividade, em um ambiente SIG, para auxiliar no processo de mapeamento da erosão potencial do solo.

É bastante comum a utilização do dado raster (imagem) como um “pano de fundo” para a sobreposição dos dados vetoriais, como é ilustrado na figura a seguir. A imagem é o fundo necessário para a visualização e o entendimento dos dados vetoriais. No caso ilustrado pela figura 60, trata-se de uma imagem do satélite SPOT, do ano de 2002, com 2,5 metros de resolução espacial, de uma área do município de Osasco – SP, que serve como “pano de fundo” para os dados vetoriais referentes à rede viária do município. É possível perceber a qualidade do dado vetorial que se sobrepõe bastante bem à imagem.



Figura 60: Fusão de dados.
Fonte: Almeida (2006)

Portanto, há uma grande diversidade de forma e tipo de dados que podem ser combinados para caracterizar um procedimento de análise espacial.

7.5 ANÁLISE DE IMAGENS HIPERESPECTRAIS

Basicamente todos conceitos e princípios de processamento anteriormente discutidos para as imagens multiespectrais são válidos para as imagens hiperespectrais. No entanto, devido a natureza básica e ao imenso volume dos dados hiperespectrais, vários procedimentos de processamento de imagens tem sido desenvolvidos para analisar especificamente tais dados. Estas imagens possuem mais de 100 bandas, chegando a demandar mais de 140 MB de espaço de armazenamento (para a imagem bruta, sem os processamentos e correções). Devido ao grande volume de dados, a análise de imagens hiperespectrais demanda muitos recursos computacionais e ferramentas que mostrem informações relevantes para realizar qualquer tipo de estudo.

Os sensores hiperespectrais diferem dos sensores ópticos multiespectrais, pois a obtenção dos dados por meio dessa tecnologia é feita em um grande número de bandas estreitas, amostrando o espectro eletromagnético de maneira praticamente contínua na faixa de 400 – 2500 nm. O conceito operacional da tecnologia de aquisição de dados de sensoriamento remoto por meio de sensores hiperespectrais é ilustrado na figura 61

:

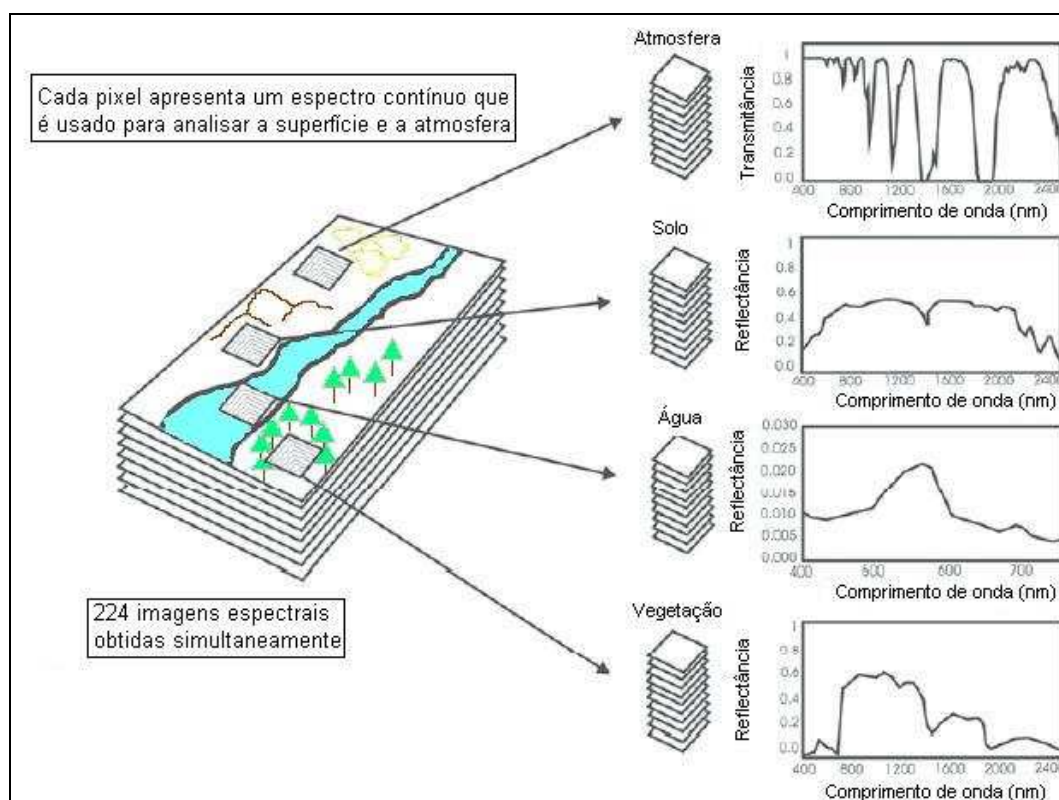


Figura 61: Concepção de Imagens Hiperespectrais
Fonte: Carvalho Júnior *et al.* (2002).

A maioria das técnicas usadas para analisar as imagens hiperespectrais é derivada do campo da espectroscopia³⁰, no qual a composição molecular de um material em particular está relacionada com os distintos padrões em que este material absorve e reflete a luz em determinados comprimentos de onda. Por este motivo, os sensores hiperespectrais são também chamados de espectrômetros imageadores.

O espectrômetro imageador pode produzir dados com resolução espectral suficiente para a identificação direta dos materiais, ao passo que as bandas mais largas dos sensores multiespectrais, como por exemplo, o LANDSAT TM, o SPOT e o IKONOS, não podem resolver essas diferenças espectrais diagnósticas. Assim, enquanto que o sistema de sensores multiespectrais pode apenas discriminar diferenças genéricas entre tipos de materiais, o espectrômetro imageador possibilita identificação do material, bem como a quantificação de sua abundância.

Também foi necessário desenvolver métodos específicos de correção atmosférica para imagens hiperespectrais, uma vez que grande parte da faixa espectral dos sensores hiperespectrais é afetada por gases atmosféricos, mascarando as variações espectrais mais sutis e cruciais para a identificação de um alvo. Os modelos de correção desenvolvidos para a espectrometria imageada buscam considerar a pronunciada variabilidade ao longo do tempo, espaço e altitude dos parâmetros atmosféricos. Desta forma, a correção baseia-se em um modelo distribuído (físico), ou seja, com variações de *pixel* para *pixel*.

Detalhes sobre os métodos para processamento e correção de imagens hiperespectrais podem ser encontrados em Latorre (2003) e Lillesand *et al.*, (2004).

³⁰ Conjunto de métodos para análise de substâncias, baseados na produção e interpretação de seus espectros de emissão ou absorção de radiações eletromagnéticas (p.ex., nas regiões do infravermelho, ultravioleta, raios X, visível)
(Fonte: Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa, versão on line.).

7.6 MODELAGEM BIOFÍSICA

O objetivo da modelagem biofísica é relacionar quantitativamente os dados digitais adquiridos e gravados por um sistema de sensoriamento remoto, com características biofísicas e fenômenos passíveis de serem mensurados na superfície terrestre. Por exemplo, dados de sensoriamento remoto podem ser usados para estimar vários parâmetros, tais como: estimativas da produção agrícola, estimativas da concentração de poluentes ou determinação da profundidade das águas. Do mesmo modo, os dados de sensoriamento remoto são freqüentemente usados em combinação com técnicas de SIG, para facilitar a modelagem do meio ambiente. A intenção que tem ao se aplicar essas operações é simular o funcionamento de um sistema ambiental de maneira explicitamente espacial e prever seu comportamento sob diferentes condições, tais como alterações climáticas globais.

Três abordagens básicas podem ser usadas para relacionar dados de sensoriamento remoto com variáveis biofísicas. A primeira delas é a modelagem física, onde o analista de dados tenta calcular matematicamente como e quanto os parâmetros intervenientes afetam as características radiométricas dos dados de sensoriamento remoto. Por exemplo, distância entre a Terra e o Sol, elevação solar, efeitos atmosféricos, etc. Alternativamente, a modelagem empírica pode ser empregada. Nesta abordagem a relação quantitativa entre os dados de sensoriamento remoto e os dados coletados diretamente da superfície terrestre (trabalhos de campo, por exemplo), é calibrada pelo cruzamento das informações das duas fontes de dados (e. g., medidas de campo sobre condições de desfolhamento de florestas precisamente ao mesmo tempo em que uma imagem de satélite é adquirida). Procedimentos de regressão estatística são freqüentemente usados nesses processos. A terceira abordagem para a modelagem biofísica é simplesmente empregar alguma combinação das técnicas físicas e empíricas (e. g., conversão dos números digitais, ou valores de nível de cinza dos pixels, para valores de radiância absoluta antes de relacionar esses valores com as medidas de campo). Maiores exemplos e explicações sobre a modelagem biofísica podem ser encontrados em Lillesand *et al.*, (2004).

7.7 TRANSMISSÃO E COMPRESSÃO DE IMAGENS

O volume de dados coletados pelos atuais sistemas de sensoriamento remoto é extremamente grande. Em um futuro próximo, com o lançamento de novos satélites de observação da Terra pela iniciativa privada, com novos programas de satélites comerciais, o volume de dados tende a crescer ainda mais. O armazenamento, a transmissão, e a distribuição destes dados continuarão a requerer em imenso esforço computacional, mesmo com o contínuo e crescente desenvolvimento do poder computacional. Por esta razão, o tema de compressão de imagens vem atraindo grande atenção dentro da ciência da computação e da comunidade de sensoriamento remoto que trabalha com o processamento digital de imagens.

Os métodos tradicionais de transmissão de imagens geralmente fazem a transferência dos dados da imagem linha por linha. Caso a imagem seja grande essa transmissão se torna bastante demorada, em virtude da fragilidade das conexões da rede de trabalho. Em muitos casos o usuário irá preferir degradar a imagem, para uma versão de baixa resolução, para que a transmissão dos dados seja possível com relativa rapidez, e dependendo da aplicação a que destinam esses dados, esta pode ser uma solução satisfatória.

Uma outra saída para a transmissão de imagens é sua compressão, ou seja, a redução da dimensionalidade dos dados. As técnicas de compressão utilizam métodos estatísticos. Pode-se citar dois conjuntos de técnicas de compressão, o primeiro conjunto é constituído de transformações nos espaços dos atributos³¹, e o segundo utilizam medidas de distâncias.

No primeiro caso, o objetivo é reduzir a dimensão preservando ao máximo a representação de padrões e/ou a discriminação entre as classes caracterizadas pelos atributos. São utilizados os critérios do erro médio quadrático (componentes principais) ou entropia, bem como a transformada de Fourier, já discutidos em tópico anterior. No segundo caso, ou seja, medidas de distância, visa-se a redução da dimensão procurando minimizar a probabilidade de erro. Na realidade, os critérios fornecem

³¹ O espaço de atributos associa cada variável de um problema a um eixo de um espaço multidimensional.

limites inferiores e superiores para esta probabilidade. Lillesand *et al.*, (2004) discutem o assunto com maiores detalhes.

Porém, com a atual facilidade de acesso a diferentes tipos de tecnologias de *software* e *hardware* e com a diminuição dos seus custos, estes tipos de técnicas para selecionar atributos poderão vir a se tornar desnecessárias no decorrer dos próximos anos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. E. S. **Análise do índice de instalação de empresas no município de Osasco utilizando sistemas de informação geográfica e análise envoltória de dados – DEA**. 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado) - EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

ARONOFF, S. **Remote sensing for GIS managers**. 1.ed. Redlands, California: ESRI Press, 2005. 487 p.

BAATZ, M.; SCHÄPE, A. Object-oriented and multi-scale image analysis in semantic networks. In: **2nd International Symposium: Operationalization of Remote Sensing**, ITC, The Netherlands, 1999.

BALTSAVIAS, E. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.58, n.3-4, p. 129-151, 2004.

BATISTA, G. T.; DIAS, N. W. **Introdução ao sensoriamento remoto e processamento de imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2005, 54p. Disponível em:
<<http://eprint.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/ePrint@80/2005/04.01.14.06/doc/v1.pdf>>
Acesso em 12 de junho, 2007

BLASCHKE, T.; GLÄSSER, C.; LANG, S. Processamento de imagens num ambiente integrado SIG/sensoriamento remoto: Tendências e conseqüências. In: **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. Ed. BLASCHKE, T.; KUX, H. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 11-18.

BOOCH, G. **Object oriented design with applications**. Redwood City, California: Benjamin/Cummings Pub. Co., 1991, 580 p.

CÂMARA, G. **Vigiando o planeta de longe**. [Depoimento a Ubirajara Jr.]. Portal da Cidadania: Fala de ciência quem sabe, 2002. Disponível em:
<http://www.radiobras.gov.br/ct/falaciencia/2002/falaciencia_160802.htm> Acesso em: 03 de maio, 2007.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. 2 ed. New York: The Guilford Press, 1996, 622 p.

CAMPBELL, J. B. Visual interpretation of aerial imagery. In: **Remote sensing for GIS managers**. Ed. ARONOFF, S. 1.ed. Redlands, California: ESRI Press, 2005. p. 259-285.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise seqüencial da transformação por fração de ruído mínima. In: **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 20. n. 1, p 31-41, de Janeiro, 2002.

CASTLEMAN, K. R. **Digital image processing**. New Jersey: Prentice Hall, 1996, 667 p.

CRÓSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. ed. ver. Campinas: IG/UNICAMP, 1993. 170 p.

DEFINIENS. **eCognition: User Guide**, 2003, 48p. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com/down/ecognition>>

DAMASCENO, M.; LEITE, T. P. C.; FRERY, A. C.; ALMIRÓN, M.; MURACT, A. Análise multivariada de imagens hiperespectrais na plataforma R. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2007, Florianópolis. Anais, p. 5699-5706.

EHLERS, M. Sensoriamento remoto para usuários de SIG –Sistemas sensores e métodos: entre as exigências do usuário e a realidade. In: **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. Ed. BLASCHKE, T.; KUX, H. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 19-38.

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS – Satélite sino-brasileiro de recursos terrestres. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia. Anais, p. 915 - 922.

ESCOBAR, I. P.; OLIVEIRA, S. A. M.; LIMA, S. P. S.; PRADO, R. L.; FERREIRA, A. T. A. Reprocessamento digital das imagens SLAR geradas pelos projetos RADAM e RADAMBRASIL – projeto RADAM – D. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia. Anais, p. 4395-4397.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. 2005. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGBRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>

FONSECA FILHO, H.; QUINTANILHA, J. A. **Geoprocessamento**. São Paulo: EPUSP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003. 61 p. Apostila para disciplina de pós-graduação do Departamento de Engenharia de Transportes, PTR-5009 – Sensoriamento remoto: plataformas, sensores, produtos, evolução e tendências.

GARCIA, R. Novo satélite CBERS decola em setembro, diz ministro. **Folha de São Paulo**, Caderno Ciência. São Paulo, 14 de março de 2007.

GERKE, M. Scene analysis in urban areas using a knowledge-based interpretation system. In: **Photogrammetric computer vision ISPRS Commission III Symposium**, Grass, Austria, part B, p. 63-66, 2002.

GONG, P. Image Processing Methods. In: **Remote Sensing of Human Settlements: Manual of Remote Sensing**. Ed. RIDD, M. K.; HIPPLE, J. D. 3 ed. Bethesda, Maryland, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2006, p. 207-273.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de Imagens Digitais**. Trad. CESAR JUNIOR, R. M.; COSTA, L. F. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 2000, 509 p.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E., EDDINS, S. L. **Digital image processing using MATLAB**. New Jersey: Prentice Hall, 2004, 609 p.

HEIPKE, C.; PAKZAD, K.; WILLRICH, F.; PELED, A. Theme issue: Integration of geodata and imagery for automated refinement and update of spatial databases. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.58, n.3-4, p. 127-128, 2004.

HENNIG, T. A.; KRETSCH, J. L.; PESSAGNO, C. J.; SALAMONOWICZ, P. H.; STEIN, W. L. The shuttle radar topography mission. In: **Digital Earth Moving: First International Symposium, DEM 2001**. Manno, Switzerland, 2001, Proceedings, p.65-77.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas - SPRING** – Manual, 2007. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/index.html>> Acesso em 05/06/2007.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **Manual on hidrography**. Publication M-13. Chapter 6. 1. ed. Ed. International Hydrographic Bureau. Monaco. 2005. Disponível em: <<http://www.iho.shom.fr>>.Acessado em 24 de maio de 2007.

JACOBSEN, K. Use of very high resolution satellite imagery. In: **Tagung der polnische gesellschaft für photogrammetrie fernerkundung und GIS**, 2004, Warschau. Proceedings. Disponível em:
<http://www.ipi.uni-hannover.de/html/publikationen/2005/paper/jac_warschau_05.pdf>

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing**. 2 ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1996, 316 p.

KONECNY, G; SCHIEWE, J. Mapping from digital satellite image data with special reference to MOMS-02. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 51, n. 4, p. 173-181, 1996.

KRIES, W. V. Towards a new remote sensing order? In: **Space Police**, v.16, n.3, p. 163-166, 2000.

LATORRE, M. L.; CARVALHO, O. A.; SHIMABUKURO, Y. E. Uma abordagem geral sobre um modelo de correção atmosférica aplicado ao sensoriamento remoto hiperespectral. In **XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2003, Belo Horizonte. Anais, p. 1069-1076.

LEITE, M.; RAHAL JÚNIOR, N. A. S. Programação orientada ao objeto: uma abordagem didática. In: **InfoTec: A revista de informação e tecnologia**, Unicamp, 2002, disponível em:
<<http://www.ccuec.unicamp.br/revista/navegacao/infotec.html>>

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2004. 763 p.

LIMA, D. L.; BUENO, M. L.; GALO, T.; IMAI, N. N. Aplicação do modelo de cores IHS na detecção de plantas aquáticas imersas. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia. Anais, p. 4115-4122.

MARANGOZ, A. M.; ORUC, M.; BUYUKSALIH, G. Object-oriented image analysis and semantic network for extracting the roads and buildings from IKONOS pan-sharpened images. In: **XXth ISPRS Congress – International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, Istanbul, Turkey, 2004.

MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro: Brasport, 1999, 406 p.

MATHER, P. M. **Computer processing of remotely-sensed images: an introduction**. 3 ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2004

MÁXIMO, O. A.; FERNANDES, D. Classificação supervisionada de imagens SAR do SIVAM pré-filtradas. In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia, Anais, p. 4139-4146.

MENESES, P. R.; MADEIRA NETO, J. C. (orgs) Fundamentos de radiometria óptica espectral. In: **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2001. p. 15-40.

MENESES, P. R.; PONTARA, R. C. P.; SILVA, F. H. F.; MADEIRA NETO, J. C. Comportamento da reflectância espectral de filitos carbonosos mineralizados em ouro. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 11, p. 83-88, 2001.

MESEV, V. Fusion of point-based postal data with IKONOS imagery. In: **Information Fusion**, v. 8, n. 2, p. 157-167, 2007.

MONSERRAT FILHO, J. Por que não há uma convenção internacional sobre sensoriamento remoto? In: **X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2001, Foz do Iguaçu, Mesa redonda sobre "Sensoriamento Remoto e Direito Espacial".

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3ª ed. Viçosa: Editora Universidade Federal de Viçosa – UFV, 2005. 320p.

NARAYANAN, R. M.; SHEA, E. A. W. A multispectral system for contemporaneous field observations of natural surfaces. In: **IEEE Symposium on Combined Optical Microwave, Earth and Atmosphere Sensing**, 1993, Albuquerque, Novo Mexico, Proceedings, p 151-154.

NEUBERT, M.; MEINEL, G. Análise de dados do satélite IKONOS Baseada em segmentação: utilização do software de análise de dados eCognition para diferentes áreas testes. In: **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. Ed. BLASCHKE, T.; KUX, H. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 108-117, 2007.

NISHIDA, W. **Uma rede neural artificial para classificação de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto**. 1998. 90 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

NÓBREGA, R. A. A. **Detecção da malha viária na periferia urbana de São Paulo utilizando imagens de alta resolução espacial e classificação orientada a objetos**. 2007. 157 p. Tese (Doutorado) – EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NOGUCHI, M. T. G. **Um sistema baseado em regras fuzzy para classificação supervisionada de imagens multiespectrais de alta resolução**. 2004. 150 p. Dissertação (Mestrado) – UFPR – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.

PANTALEÃO, C. H. Z. **Contribuição à análise e classificação citogenética baseada no processamento digital de imagens e no enfoque lógico-combinatório**. 2003. 168p. Tese (Doutorado) – UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

PEDROSA, I. **O universo da cor**. 1 ed. São Paulo, Ed. Senac, 2003, 153p.

PENIDO, L. R. **Técnicas de sensoriamento remoto e SIG aplicadas ao planejamento de uma rodovia: Estudo de caso – trecho oeste do Rodoanel Metropolitano de São Paulo**. 1998. 119 p. Dissertação (Mestrado) – INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1998.

PETRIE, G. Rectification and georeferencing of optical imagery. In: **Remote sensing for GIS managers**. 1.ed. Redlands, California: ESRI Press, 2005. p. 421-453.

PINHO, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: O caso de São José dos Campos – SP**. 2005. 179 p. Dissertação (Mestrado) – INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.

QUINTANILHA, J. A. Notas de aula da disciplina **PTR 5003 – Fundamentos de Informações Espaciais** – Disciplina de Pós-Graduação – Departamento de Engenharia de Transportes – EPUSP – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, 2004.

QUINTANILHA, J. A.; LIMA, R. A. F.; HAMBURGER, D. S. Tópicos de sensoriamento remoto. In: **Programa de transferência de tecnologia GIS**, v. 3, apostila e CD-rom. Convênio EPUSP / SABESP, São Paulo, 1998.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. In: **ISPRS – Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p.241-262, 2003.

RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 4 ed. Berlin: Springer, 2006, 439p.

RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. In: Geoprocessamento, 1990, São Paulo. **Anais do Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento**. EPUSP, 1990, p 1-26.

RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro: Campus, 1994, 652p.

SARTORI NETO, A.; Soares, V. P.; LIMA, J. A. M.; RIBEIRO, C. A. A. S.; GRIFFITH, J. J. Análise de imagens termais AVHRR utilizando transformada de Fourier para determinação de padrões em vórtices e meandros” In: **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005, Goiânia, Anais, p. 3671-3678.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento remoto e suas aplicações para recursos naturais**. Apostila de sensoriamento remoto INPE. Disponível em: <<http://www.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>> Acessado em 29/05/2007.

SCHIEWE, J.; TUFTE, L. O potencial de procedimentos baseados em regiões para a avaliação integrada de dados de SIG e sensoriamento remoto. In: **Sensoriamento Remoto e SIG avançados**. Ed. BLASCHKE, T.; KUX, H. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. p. 56-65.

SHACKELFORD, A. K.; DAVIS, C. H. A combined fuzzy pixel-based and object-based approach for classification of high resolution multispectral data over urban areas. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 10, p. 2354-2363, 2003.

SILVA, D. C.; DALMOLIN, Q. Avaliação da resolução de imagens digitais para cadastro. In: **COBRAC 98 Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Florianópolis, 1998.

SOUSA JUNIOR, J. G. A. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 142 p. Dissertação (Mestrado) – ESALQ - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, M. L. O.; SCHULZ, W. Como manter um satélite orientado? In: **Terceira Escola do Espaço**, capítulo 5, Org. SERRA JR et al. INPE, 2001, disponível em: <<http://mtcm16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marciana/2005/01.06.10.39/doc/sumario.pdf>>. Acesso em 05/06/2007.

USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) – “Finished” products: US Geological Survey.** Disponível em: <<http://edc.usgs.gov/products/elevation/srtmbil.html>>. Acessado em 16 de maio de 2007.

WILLIAMSON, R. A. Developing the space shuttle. In: **Exploring the unknown: selected documents in the history of the US civil space program**, Volume IV: Accessing Space. Ed. LOGSDON, J. M. Washington, 1999, 712 p.