

## SUMÁRIO

### Parte 1

<b>SENSOR MODIS</b>	<b>1</b>
<b>HISTÓRICO E DESCRIÇÃO</b>	<b>3</b>
1.1 Introdução	3
1.2 Terra – Primeira Plataforma do EOS	5
1.3 Aqua – Segunda Plataforma do EOS	6
1.4 Instrumentos e configuração da plataforma Terra	8
1.5 Instrumentos e configuração da plataforma Aqua	10
1.6 O sensor MODIS: descrição e especificações técnicas	11
1.7 EOSDIS - Earth Observing System Data and Information System	16
1.8 Política de dados, <i>downlink</i> e estações de recepção	17
1.9 Visão geral sobre os produtos MODIS	18
Considerações finais	21
<b>PRODUTOS PARA ECOSISTEMAS TERRESTRES - MODLAND</b>	<b>23</b>
2.1 Introdução	23
2.2 Produtos relacionados ao balanço de energia	24
2.3 Produtos Relacionados à Vegetação	28
2.4 Produtos Relacionados à Cobertura Terrestre	30
Considerações finais	35
<b>PRODUTOS PARA OCEANO - MOCEAN</b>	<b>37</b>
3.1 Introdução	37
3.2 Produtos padrão MODIS	38
3.3 Especificações dos formatos dos produtos MODOCEAN	44
3.4 Cor do oceano	48
3.5 Fluorescência	50
3.6 Temperatura da superfície do mar	50
Considerações finais	52
Agradecimentos	52
<b>PRODUTOS PARA ATMOSFERA - MODIS ATMOSPHERE</b>	<b>53</b>
4.1 Introdução	53
4.2 Informação sobre objetos atmosféricos em imagens	57
4.3 Interação Terra-atmosfera com a radiação	59
4.4 Canais MODIS no espectro solar	62
4.5 Canais MODIS no infravermelho termal	66
4.6 Produtos MODIS operacionais	68
Considerações finais	69
Agradecimentos	69

<b>PRÉ - PROCESSAMENTO</b>	<b>71</b>
5.1 Introdução	71
5.2 Níveis de processamento	71
5.3 Efeito <i>Bowtie</i>	72
5.4 <i>Tiles x granules</i>	75
5.5 Utilitários	75
5.6 <i>Download</i> dos produtos	77
5.7 Identificação dos produtos	79
5.8 Conversão de 16 para 8 bits	79
5.9 Recepção na estação de Cuiabá	80
Considerações finais	82
<b>O FUTURO DO MODIS NO SISTEMA DE OBSERVAÇÃO DA TERRA</b>	<b>83</b>
6.1 Introdução	83
6.2 A plataforma NPP e o sensor VIIRS	83
6.3 O programa NPOESS	86
Considerações finais	89
Referências Bibliográficas	90
<b>Parte 2</b>	
<b>APLICAÇÕES AMBIENTAIS</b>	<b>95</b>
Aplicações na Agricultura	97
<b>ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA SOJA: ESTUDO DE CASO NO RIO GRANDE DO SUL</b>	<b>99</b>
7.1 Introdução	99
7.2 Modelo agrometeorológico	100
Considerações finais	110
<b>CLASSIFICAÇÃO DE SOJA PELO MÉTODO DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTA ESPECTRO-TEMPORAL</b>	<b>111</b>
8.1 Introdução	111
8.2 Área de estudo	112
8.3 Mapa de referência	112
8.4 Seleção das imagens MODIS	113
8.5 O método <i>Spectral-Temporal Response Surface - STRS</i>	114
Considerações finais	121
<b>ÍNDICE DE VEGETAÇÃO PARA ESTIMATIVA DE ÁREA PLANTADA COM ARROZ IRRIGADO</b>	<b>123</b>
9.1 Introdução	123
9.2 Cultivo do arroz irrigado	124
9.3 Área de estudo	125
9.4 Mapa de referência	126
9.5 Imagens NDVI e EVI	126
Considerações finais	131

<b>AValiação DO IAF PARA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL</b>	<b>133</b>
10.1 Introdução	133
10.2 Cálculo do IAF do MODIS	134
10.3 Mapa temático da soja	135
10.4 Perfil temporal do NDVI	136
10.5 Imagens IAF do MODIS	137
10.6 Mapa global de bioma	140
10.7 Comprovação em anos-safras subseqüentes	140
Considerações finais	143
<b>DETECÇÃO DE GEADA EM LAVOURAS DE CAFÉ</b>	<b>145</b>
11.1 Introdução	145
11.2 Imagens e dados de campo	146
11.3 NDVI para avaliação do vigor vegetativo	147
Considerações finais	151
Referências Bibliográficas	152
<b>APLICAÇÕES NO MEIO AMBIENTE</b>	<b>157</b>
<b>CLASSIFICAÇÃO ESPECTRO-TEMPORAL DE FORMAÇÕES VEGETAIS</b>	<b>159</b>
12.1 Introdução	159
12.2 Imagens MODIS	160
12.3 Modelo linear de mistura espectral	161
12.4 Seleção das datas e do índice de vegetação	162
12.5 Segmentação	164
12.6 Classificação	165
Considerações finais	171
Agradecimentos	171
<b>MONITORAMENTO DA PAISAGEM DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO</b>	<b>173</b>
13.1 Introdução	173
13.2 Área de estudo	174
13.3 Séries temporais do MODIS como produtos de investigação	174
13.4 Conceituação básica de análise harmônica para tratar dados sensorizados	175
13.5 Conjugação da série temporal EVI, análise harmônica e sua resultante metodológica	177
Considerações finais	182
Agradecimentos	182
<b>MONITORAMENTO DA COBERTURA TERRESTRE: FENOLOGIA E ALTERAÇÕES ANTRÓPICAS</b>	<b>185</b>
14.1 Introdução	185
14.2 Dados do sensor MODIS	186
14.3 Resposta fenológica	187
14.4 Alterações antrópicas: desflorestamento e queimadas	197
Considerações finais	205
Agradecimentos	205

<b>MODELAGEM DA IRRADIÂNCIA SOLAR INCIDENTE</b>	<b>207</b>
15.1 Introdução	207
15.2 Especificações do produto albedo (MOD43B3)	208
15.3 Albedo "Blue-Sky" a partir do produto MOD43B3	209
15.4 Aplicação do produto MOD43B3 na modelagem da irradiância solar sob condições de céu claro	210
15.5 Irradiância direta ( $\Phi_g$ )	211
15.6 Irradiância difusa ( $\Phi_{dc}$ )	212
15.7 Irradiância direta e difusa refletida da vizinhança do terreno	213
15.8 Refletância de nuvens	214
15.9 Aplicação do produto MOD43B3 na modelagem da irradiância solar sob condições de céu nublado	214
15.10 Produto MOD43B3 versus dados do sensor ETM+ do Landsat-7	215
15.11 Modelagem da irradiância solar sobre a Serra da Mantiqueira	215
Considerações finais	219
<b>AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR NA AMAZÔNIA</b>	<b>221</b>
16.1 Introdução	221
16.2 Estratégia amostral para a coleta de dados no campo	222
16.3 Geração das superfícies contínuas de LAI	225
16.4 Avaliação do LAI do produto MOD15A2	227
Considerações finais	236
Agradecimentos	236
<b>AVALIAÇÃO DO PRODUTO FPAR PARA A FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA</b>	<b>237</b>
17.1 Introdução	237
17.2 Medições de campo	238
17.3 Produto FPAR	242
17.4 Comparação entre estimativas da FPAR baseadas em medições de campo e sensoriamento remoto	245
Considerações finais	247
Referências Bibliográficas	248
<b>APLICAÇÕES NA HIDROSFERA</b>	<b>253</b>
<b>MONITORAMENTO DE ÁREAS ALAGÁVEIS</b>	<b>255</b>
18.1 Introdução	255
18.2 Estudo da dinâmica das comunidades de macrófitas na várzea amazônica.	257
18.3 Mapeamento de habitats de áreas alagáveis na planície do rio Amazonas	261
Considerações finais	263
<b>SISTEMAS AQUÁTICOS CONTINENTAIS</b>	<b>265</b>
19.1 Introdução	265
19.2 Contribuição das imagens MODIS no estudo de sistemas aquáticos continentais	266
19.3 Informações úteis extraídas de imagens MODIS	270
Considerações finais	275

<b>ESTIMATIVA DA PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA OCEÂNICA</b>	<b>277</b>
20.1 Introdução	277
20.2 Sensoriamento remoto da cor do oceano	279
20.3 Curvas de luz – fotossíntese	280
20.4 Modelos de produtividade primária oceânica por satélite	283
20.5 Exemplos de aplicação	285
Considerações finais	290
Referências Bibliográficas	291
<b>APLICAÇÕES NA ATMOSFERA</b>	<b>295</b>
<b>INFERÊNCIA DE AEROSSÓIS</b>	<b>297</b>
21.1 Introdução	297
21.2 Princípios físicos da detecção de aerossóis pelo MODIS sobre o continente	298
21.3 Validação do produto de aerossóis sobre continentes e oceanos	307
21.4 Produtos de aerossóis do MODIS	308
Considerações finais	315
Agradecimentos	315
<b>INFERÊNCIA DE PERFIS ATMOSFÉRICOS</b>	<b>317</b>
22.1 Introdução	317
22.2 Sondagem atmosférica: histórico	318
22.3 Perfis atmosféricos utilizando o sensor MODIS	321
22.4 Modelo Estatístico	323
22.5 Exemplos de sondagens MODIS	325
Considerações finais	328
<b>RECUPERAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E RADIATIVAS DE NUVENS</b>	<b>329</b>
23.1 Introdução	329
23.2 Vapor d'água atmosférico	330
23.3 Formação e características das nuvens	331
23.4 Características das nuvens determinadas por sensores remotos	333
23.5 Produtos MODIS de nuvens	337
23.6 Máscara de nuvens	338
23.7 Pressão e temperatura de topo das nuvens	340
23.8 Fase termodinâmica das nuvens	341
Considerações finais	345
Referências Bibliográficas	346
<b>APLICAÇÕES SÓCIO-ECONÔMICAS</b>	<b>351</b>
<b>EPIDEMIOLOGIA E SAÚDE PÚBLICA</b>	<b>353</b>
24.1 Introdução	353
24.2 Satélites ambientais para estudos relacionados à saúde	
das populações: impacto social e econômico das epidemias	354
24.3 Exemplos de aplicações dos satélites ambientais para estudos epidemiológicos	355

24.4 Aplicações do MODIS em estudos epidemiológicos	360
Considerações finais	362
<b>FISCALIZAÇÃO DO SEGURO AGRÍCOLA</b>	<b>363</b>
25.1 Introdução	363
25.2 Geoinformação e sensoriamento remoto	364
25.3 Imagens MODIS	364
25.4 Exemplo de um projeto de fiscalização do seguro agrícola	365
Considerações finais	373
<b>MONITORAMENTO DA COLHEITA DA CANA</b>	<b>375</b>
26.1 Introdução	375
26.2 Produto MODIS	376
Considerações Finais	382
Referências Bibliográficas	383
<b>PROJETOS OPERACIONAIS</b>	<b>387</b>
<b>DESFLORESTAMENTO NA AMAZÔNIA - SISTEMA DETER</b>	<b>389</b>
27.1 Introdução	389
27.2 Desenvolvimento do projeto	390
27.3 Área de atuação	390
27.4 Geração da máscara de desflorestamento	391
27.5 Seleção das imagens	392
27.6 Classificação	393
27.7 Detecção de novos desflorestamentos	396
27.8 Interface para o usuário	399
Considerações finais	401
<b>ESTIMATIVA QUINZENAL DE ÁREAS QUEIMADAS</b>	<b>403</b>
28.1 Introdução	403
28.2 Identificação de áreas queimadas nas imagens MODIS	404
28.3 Quantificação de áreas queimadas utilizando dados do sensor MODIS	409
28.4 Testes preliminares de validação	411
28.5 Interface para os usuários	413
Considerações finais	415
Referências Bibliográficas	416
<b>Lista de Siglas e Símbolos</b>	<b>419</b>
<b>Índice</b>	<b>425</b>

## PREFÁCIO

É uma grande satisfação escrever o prefácio deste livro pelo fato de ter tido a oportunidade de participar, por convite da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), do Painel de Revisores que em outubro de 1988 selecionou os instrumentos do EOS (*Earth Observing System*) dentre os quais o MODIS (*Medium-Resolution Imaging Spectroradiometer*) que acabou sendo o principal sensor. O MODIS foi concebido por uma equipe de cientistas interdisciplinares com vasta experiência na operação e utilização de dados de sensores orbitais para o monitoramento global. Esta equipe trabalhou por cerca de 10 anos e definiu os requerimentos para a coleta, calibração e processamento dos dados, além de especificar os dados e produtos para contribuir ao entendimento dos processos de mudanças globais a partir da observação feita por satélites ambientais. O conceito inovador do MODIS gerou uma nova família de dados de satélites, incluindo não apenas dados de nível 1, mas também dados de níveis mais altos que após sofrerem uma série de calibrações são transformados em variáveis com significado físico, como refletância, índice de área foliar, temperatura da superfície, etc.

Desde 1988, uma equipe brasileira esteve intimamente envolvida num Projeto de Pesquisa Interdisciplinar do programa EOS para a análise de mudanças na Amazônia, estudando padrões e processos do Bioma Amazônia. Assim, no Brasil foram desenvolvidas diversas aplicações antecipadas das imagens do MODIS, incluindo simulações com base nas imagens dos sensores AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e TM (*Thematic Mapper*). Diversos autores desse livro tiveram a oportunidade de participar como membros colaboradores da equipe de cientistas desse projeto adquirindo conhecimento e experiência com os dados MODIS antes mesmo do lançamento da primeira plataforma do EOS em 18 de dezembro de 1999. Cabe ressaltar que desde abril de 2004 uma estação de recepção em Cuiabá, MT, recebe os dados MODIS brutos das passagens das plataformas do EOS (Terra e Aqua) sobre o Brasil. Dessa forma, a experiência brasileira com os dados MODIS vai desde a recepção, o armazenamento, o processamento de imagens e a geração de produtos, até as mais diversas aplicações em estudos ambientais.

Este livro está dirigido principalmente à comunidade de usuários de sensoriamento remoto, meteorologia por satélite e ciências ambientais em geral. Ele pretende transmitir a experiência que o Brasil adquiriu com os dados MODIS, de forma didática e em língua portuguesa, com exemplos concretos de utilização desses dados em diversas áreas de aplicações ambientais.

Após apresentar uma descrição detalhada sobre o *Sensor MODIS* e seus produtos, este livro traz ao leitor exemplos de *Aplicações Ambientais* no Brasil para cada grande área temática. Essa narrativa inicia-se com um capítulo que apresenta o histórico e a descrição das plataformas do EOS e do sensor MODIS. Os capítulos seguintes apresentam os produtos para ecossistemas terrestres (MODLAND), produtos para oceano (MOCEAN) e produtos para atmosfera (MODIS Atmosphere). Estes últimos incluem uma ampla discussão sobre estudos atmosféricos, que se beneficiam das duas passagens diárias de cada uma das plataformas do EOS. Na

seqüência, e antes de descrever as aplicações temáticas, há um capítulo de pré-processamento e outro que apresenta o futuro do MODIS e seu substituto VIIRS no sistema de observação da Terra.

Escrito por um grupo de pesquisadores com experiência multidisciplinar significativa, esse livro expõe exemplos de aplicações na *Agricultura* envolvendo a estimativa da produtividade agrícola da soja, com um estudo de caso no Rio Grande do Sul; a classificação de soja pelo método de superfícies de resposta espectro-temporal; o uso de índices de vegetação para estimativa de área plantada com arroz irrigado; a avaliação do índice de área foliar (IAF) para soja; e, a detecção de geada em lavouras de café.

O livro ainda aborda diversas aplicações para o estudo do *Meio Ambiente* que envolvem a classificação espectro-temporal de formações vegetais, o monitoramento da paisagem de unidades de conservação, o monitoramento da cobertura terrestre em função de sua fenologia e alterações antrópicas, a modelagem da irradiância solar incidente, a avaliação do IAF na Amazônia, e a estimativa da fração da radiação fotossinteticamente ativa (FPAR) para a floresta tropical Amazônica.

Em seguida são apresentados capítulos dedicados às aplicações na *Hidrosfera*, incluindo o monitoramento de áreas alagáveis, o estudo de sistemas aquáticos continentais e a estimativa da produtividade primária oceânica, assim como capítulos voltados para aplicações na *Atmosfera* envolvendo a estimativa de aerossóis, a inferência de perfis atmosféricos, e a recuperação de propriedades físicas e radiativas de nuvens.

Mais uma vez, a experiência dos autores desse livro é ressaltada ao serem apresentados capítulos específicos sobre aplicações *Sócio-Econômicas*. Tais capítulos incluem o uso dos dados MODIS em epidemiologia e saúde pública; fiscalização do seguro agrícola; e monitoramento da colheita da cana.

Finalmente, o livro apresenta dois *Projetos Operacionais* desenvolvidos pelo INPE, em cooperação com diversos outros órgãos, nos quais o MODIS tem importância fundamental. Os projetos descritos são “Desflorestamento na Amazônia – DETER”, e “Estimativa quinzenal de áreas queimadas - PROARCO”.

Complementando o esforço didático deste livro, é apresentada uma ampla bibliografia selecionada e agrupada por assunto temático. Sem dúvida, esta é uma obra histórica e de referência para o desenvolvimento do sensoriamento remoto no Brasil e foi uma grande honra escrever o seu prefácio.

**Getulio Teixeira Batista**  
Prof. Dr. do Departamento de Ciências Agrárias  
da Universidade de Taubaté  
Membro do Comitê de Seleção da Equipe do MODIS  
Ex-Investigador Principal do EOS

## **The MODIS sensor and its environmental applications in Brazil**

### **FOREWORD**

*It is a great pleasure to write this foreword due to the fact that in 1988 I was invited by NASA (National Aeronautics and Space Administration) to participate in the Review Panel that selected the EOS (Earth Observing System) MODIS (MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer) Instrument Team. The MODIS sensor is the most important EOS instrument and was conceived by an interdisciplinary team of scientists with vast experience in the operation and use of orbital data for global monitoring. This team worked for about 10 years to define the requirements for data acquisition, calibration and processing, in addition to specifying the data processing levels and products to contribute to the understanding of global change processes based on observations from environmental satellites. The innovative concept of MODIS generated a new family of satellites data that includes not only level 1, but also higher levels that are calibrated and transformed into products with physical meaning, such as surface reflectance, leaf area index, surface temperature, etc.*

*Since 1988, a Brazilian team was intimately involved in the EOS program with an Interdisciplinary Research Project to study the bio-hydrological patterns and processes of the Amazonian Bioma. Thus, several anticipated applications of the MODIS data were developed in Brazil, including simulations based on AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) and TM (Thematic Mapper) imagery. Several authors of this book had the opportunity to participate as collaborating members of the MODIS Scientific Team acquiring knowledge and experience with the MODIS data even before the launching of the first platform of EOS on December 18, 1999. I would like to emphasize that since April, 2004, a receiving station, in Cuiabá, MT, Brazil, receives raw MODIS data from both EOS platforms (Terra and Aqua). Therefore, the Brazilian experience with MODIS data includes not only the reception, the archiving, the processing of images and the generation of products, but mostly expertise in environmental studies.*

*This book is directed to the remote sensing, to the satellite meteorology and environmental sciences communities. It intends to transmit the experience that Brazilian scientists acquired with the use of MODIS data, in a didactic way, written in Portuguese language, showing examples of data use in several areas of environmental applications.*

*After presenting a detailed description of the MODIS sensor and its products, this book brings to the reader examples of environmental applications in Brazil covering several thematic areas. It begins with a chapter that presents the description of the EOS platforms and of the MODIS sensor. The chapters that follow present the products for terrestrial ecosystems (MODLAND), products for ocean (MOCEAN) and products for atmosphere (MODIS Atmosphere). The atmosphere chapters include a wide discussion on atmospheric studies that can benefit from the two daily passes (morning and afternoon) of the two EOS platforms. In the*

*sequence, and before describing the thematic applications, there is a chapter that discusses data pre-processing and another one that presents the future of the MODIS sensor and its follow on in the Earth Observing System, the VIIRS.*

*Written by a group of scientists with significant multidisciplinary experience, this book has examples of applications in Agriculture involving the estimate of soybean yield, with a case study in Rio Grande do Sul State; the classification of soybean area using the spectral-temporal response surface method; the use of vegetation index for the estimate of area planted with irrigated rice; the assessment of the leaf area index (LAI) for soybeans; and frost detection in areas of coffee plantations.*

*The book has several examples of applications for environmental studies that involve the spectral-temporal classification of vegetation covers, the monitoring of landscape conservation units, the monitoring of land cover due to seasonal and human changes, the modeling of incident solar radiation, the evaluation of LAI in the Amazônia, and the estimate of the fraction of the photosynthetically active radiation (FPAR) in the Amazonian tropical forest.*

*Chapters dedicated to Hydrosphere applications, including the monitoring of flooded areas, the study of continental aquatic systems and the estimate of the oceanic primary productivity follow, as well as, chapters on applications for the Atmosphere, involving the estimate of aerosols, the inference of atmospheric profiles, and the recovery of physical and radioactive properties of clouds.*

*The experience of the authors is demonstrated once again when specific chapters discussing socioeconomic applications of MODIS data are presented. Such chapters include the use of MODIS data in epidemiology and public health; crop insurance; and monitoring of sugarcane harvest.*

*Finally, the book presents two operational projects developed by INPE, in cooperation with other institutions in which MODIS has fundamental importance. The described projects are “Deforestation in the Amazon - DETER”, and “Estimate of Burned Areas - PROARCO”.*

*Complementing the didactic effort of this book, a bibliographical reference, selected by thematic subject, is presented. With no doubt, this is a historical piece of work and constitutes a reference for the remote sensing development in Brazil and, therefore, it was a great honor for me to write this foreword.*

**Getulio Teixeira Batista**

*Prof. Dr. of the Department of Agrarian Sciences  
of the University of Taubaté  
Member of the Review Panel of the MODIS Team  
Former Principal Investigator of EOS*