



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Osny Ferreira da Silva

**ANÁLISE DE IMAGENS MULTITEMPORAIS DO SENSOR TM LANDSAT-5 DA
VEGETAÇÃO DO CERRADO, UTILIZANDO TÉCNICAS DE NDVI, NO
PARQUE NACIONAL DAS EMAS - GOIÁS**

Goiânia, 2014

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Osny Ferreira da Silva

ANÁLISE DE IMAGENS MULTITEMPORAIS DO SENSOR TM LANDSAT-5 DA
VEGETAÇÃO DO CERRADO, UTILIZANDO TÉCNICAS DE NDVI, NO
PARQUE NACIONAL DAS EMAS - GOIÁS

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Modelagem de Sistemas Ambientais

Orientador: Prof. Dr. Cidney Rodrigues Valente

Goiânia, 2014

Si389a Silva, Osny Ferreira da.

Análise de imagens multitemporais do sensor TM Landsat-5 da vegetação do Cerrado, utilizando técnicas de NDVI, no Parque Nacional das Emas – Goiás / Osny Ferreira da Silva. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2014.
95 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Cidney Rodrigues Valente.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Sensoriamento remoto – modelagem de sistemas ambientais. 2. Cerrado – fisionomias da vegetação. 3. Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI) – Parque Nacional das Emas – Mineiros – GO. I. Valente, Cidney Rodrigues. (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 526.982

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Osny Ferreira da Silva

ANÁLISE DE IMAGENS MULTITEMPORAIS DO SENSOR TM LANDSAT-5 DA
VEGETAÇÃO DO CERRADO, UTILIZANDO TÉCNICAS DE NDVI, NO
PARQUE NACIONAL DAS EMAS - GOIÁS

Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em
Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG
(PPGTPS - IFG) - Dissertação de Mestrado
Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de
Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa:
Modelagem de Sistemas Ambientais

Prof. Dr. Sidney Rodrigues Valente, IFG

Prof.^ª Dra. Warde Antonieta da Fonseca-Zang, IFG

Prof. Dr. Manuel Eduardo Ferreira, UFG

Aprovado em: ___/___/___

Dedicatória

Dedico esta dissertação aos meus filhos Brunna, Bianca e Giovani pelo apoio incondicional e constante incentivo.

Dedico aos meus pais José e Alice, sempre em minhas lembranças, pelo apoio espiritual.

Dedico também ao meu orientador Prof. Dr. Sidney Rodrigues Valente, pela confiança, paciência, incentivo, amizade e excelente orientação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos professores do Mestrado de Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, pelos conhecimentos compartilhados.

Agradeço de forma especial, ao Professor Dr. Cidney Rodrigues Valente, pela orientação, confiança, paciência e ensinamentos durante o desenvolvimento da pesquisa de Mestrado.

Agradeço à Professora Dra. Maria Carolina da Cruz Miranda e ao Professor Dr. Aldo Muro Junior, pelas críticas e sugestões apresentadas no exame de qualificação, que muito me nortearam no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço à Professora Dra. Warde Antonieta da Fonseca Zang, por aceitar fazer parte da banca num momento definitivo do mestrado.

Agradeço à Leila Ninon, secretária do Mestrado de Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, pela amizade e enorme boa vontade para ajudar nas questões burocráticas nesses anos de pesquisa.

Agradeço aos meus professores da graduação em Tecnologia em Geoprocessamento do IFG, pela base de conhecimentos com eles adquirida, em especial aos Professores: Dr. Giovanni de Araújo Boggione, Dr. Nilson Clementino Ferreira, Dr. Nilton Ricetti Xavier de Nazareno.

Agradeço ao Instituto Federal de Goiás (IFG), através da Coordenação do Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, pela disponibilização dos recursos necessários a execução desta pesquisa.

Agradeço ainda aos funcionários do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) lotados no Parque Nacional das Emas, pelas informações, pela presteza e pelo inestimável apoio na realização dos trabalhos de campo.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.” Madre Teresa de Calcutá.

Título: Análise de imagens multitemporais do sensor TM Landsat-5 da vegetação do Cerrado, utilizando técnicas de NDVI, no Parque Nacional das Emas – Goiás.

Autor: Osny Ferreira da Silva

Orientador: Prof. Dr. Cidney Rodrigues Valente

RESUMO

A área de estudo é o Parque Nacional das Emas (PNE), com área de 1.318,64 km², que constitui uma unidade de conservação brasileira de proteção integral à natureza, localizada no município de Mineiros, na região sudoeste do estado de Goiás. O objetivo principal desta pesquisa foi identificar e mapear as fisionomias vegetacionais do Cerrado com a utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto. Foi utilizado o *software* de processamento digital de imagens *ENVI*TM para a geração de imagens Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI), e posteriormente as mesmas foram classificadas para a identificação das diversas fisionomias do Cerrado, através de suas respostas espectrais registradas nas imagens do sensor TM do satélite Landsat-5. Para a correta interpretação de imagens no bioma Cerrado, foi considerada a divisão climática nas estações seca e chuvosa e a frequência das ocorrências de queimadas no PNE. Esses fatores alteram o padrão de resposta espectral da vegetação nativa, dificultando a interpretação com a utilização de uma única imagem. Este estudo utilizou um conjunto de imagens do sensor TM dos anos de 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011, obtidas sempre nos meses da estação seca, entre junho e setembro. As cinco imagens recortadas nos limites da área de estudo passaram pelos processos de conversão dos números digitais em valores reais de reflectância espectral, correção atmosférica pela técnica de subtração do *pixel* escuro (DOS) e cálculo das imagens NDVI. Com a utilização do *software Matlab*TM foi elaborado um programa para geração de uma nova imagem NDVI, onde os valores de reflectância de cada *pixel* são representados pelos valores das medianas dos cinco *pixels* de mesma posição de cada imagem. A imagem NDVI resultante foi classificada por processo de fatiamento em intervalos de valores de índice para identificação e mapeamento das fitofisionomias encontradas no PNE. Estes intervalos foram estabelecidos com o auxílio de interpretações visuais do NDVI e de composições RGB das bandas originais. Foram identificadas as fitofisionomias: Campo Limpo (0,450 a 0,509), Campo Cerrado (0,510 a 0,599), Cerrado *Stricto Sensu* (0,600 a 0,769), Cerradão e Floresta de Galeria (0,770 a 1,000). Os valores entre -0,900 e 0,449 foram classificados como solo sem cobertura vegetal. Apoiado em informações integradas dentro de um sistema de informações geográficas (SIG) construído no *software ArcGIS*TM, foram estabelecidas as interações dessas fitofisionomias do PNE com aspectos abióticos da região, como o solo, o relevo e a geomorfologia.

PALAVRAS-CHAVE: CERRADO. PARQUE NACIONAL DAS EMAS. NDVI. SENSORIAMENTO REMOTO.

Title: Analysis of the multi-temporal Landsat-5 TM sensor imagery of Cerrado vegetation, using NDVI techniques, in the Emas National Park - Goiás.

Author: Osny Ferreira da Silva

Adviser: Prof. Dr. Cidney Rodrigues Valente

ABSTRACT

The studied area is the Emas National Park (ENP), with an area of 1,318.64 km², it is a Brazilian unit of conservation with an integrated protection of nature, located in the city of Mineiros in the southwestern region of the state of Goiás. The main objective of this research was to identify and describe the Cerrado phytophysionomies using the Remote Sensing techniques. The digital image processing software ENVI was used to generate Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) images, which were subsequently classified for the identification of diverse Cerrado physiognomies, through their spectral responses recorded in the TM sensor images of the Landsat-5 satellite. For the correct interpretation of images in the Cerrado biome, the climate division in the dry and rainy seasons and the frequency of fire occurrences in the ENP were considered. These factors alter the pattern of spectral response of the native vegetation, making it difficult to interpret using of a single image. This study used a set of TM sensor images of the years 2007, 2008, 2009, 2010 and 2011, always obtained in the months of the dry season, between June and September. The five images cut in the limits of the studied area went through the processes of converting digital numbers to actual values of spectral reflectance, atmospheric correction by the technique of subtracting the dark pixel (DOS) and the calculation of NDVI images. Using the Matlab software, a program was designed to generate a new NDVI image, in which the reflectance values of each pixel are represented by the median values of the five pixels of the same position in each image. The resulting NDVI image was classified by the slicing process at intervals of index values for identification and mapping of phytophysionomies found at the ENP. These intervals were established with the aid of visual interpretations of the NDVI and the RGB compositions of the original bands. The vegetation types were identified: Cerrado grassland (from 0.450 to 0.509), Shrub Cerrado (from 0.510 to 0.599), Wooded Cerrado (from 0.600 to 0.769), Cerrado woodland and Gallery forest (from 0.770 to 1.000). Values between -0.900 and 0.449 were classified as bare soil. Supported by information integrated within a geographic information system (GIS) elaborated on the ArcGIS software, the interactions of these ENP phytophysionomies with abiotic aspects of the region, such as soil, topography and geomorphology were established.

KEY-WORDS: Cerrado, Emas National Park, NDVI, remote sensing.

Lista de Figuras

Figura 1 - Distribuição da área do bioma Cerrado no território brasileiro.....	21
Figura 2 - Mapa de localização do Parque Nacional das Emas.....	22
Figura 3 - Características geológicas e pedológicas do PNE	24
Figura 4 - Mapa Geomorfológico do PNE.	25
Figura 5 - Temperaturas médias mensais de 2007 a 2011.....	27
Figura 6 - Precipitação pluviométrica média anual no PNE de 2007 a 2011	28
Figura 7 - Média de Precipitação pluviométrica de 2007 a 2011	28
Figura 8 - Quantidade de dias de Precipitação pluviométrica de 2007 a 2011.. ..	29
Figura 9 - Médias mensais da umidade relativa do ar de 2007 a 2011	29
Figura 10 - Mapa da rede de drenagem do PNE	30
Figura 11 - Espectro Eletromagnético.	34
Figura 12 - Processo de captação de imagens	35
Figura 13 - Processo de formação de imagens	35
Figura 14 - Representação matemática de uma imagem	36
Figura 15 - Representação de uma imagem digital	37
Figura 16 - Representação computacional de uma imagem	37
Figura 17 - Assinatura espectral de alvos.....	38
Figura 18 - Representação de uma imagem de Sensoriamento Remoto.	39
Figura 19 - Resoluções de imagens de Sensoriamento Remoto.....	40
Figura 20 - IFOV - Campo de visada instantâneo.....	41
Figura 21 - Imagens do Sensor ETM+ Landsat-7 do município de Aruanã-GO.	41
Figura 22 - Bandas espectrais do sensor ETM+ Landsat-7 do município de Cristalina-GO ...	42
Figura 23 - Imagem em diferentes resoluções radiométricas	43
Figura 24 - Movimento relativo entre o satélite e a Terra.....	47
Figura 25 - Bandas TM e curvas espectrais dos principais alvos.....	48
Figura 26 - Composições coloridas de bandas do sensor TM Landsat-5.....	49
Figura 27 - Comportamento espectral da vegetação no infravermelho próximo e visível.....	54
Figura 28 - Sistema de Informações Geográficas.....	56
Figura 29 - Elementos da representação vetorial.....	55
Figura 30 - Representação de um Modelo Digital do Terreno (MDT)	56
Figura 31 - Sinal de radar transmitido e recebido pela missão SRTM.....	57
Figura 32 - Imagem SRTM da região do PNE	58
Figura 33 - Fluxograma das atividades da metodologia da pesquisa.	61

Figura 34 - Exemplo das cenas TM Landsat-5.....	63
Figura 35 - Preparação das cenas de estudo	64
Figura 36 - Queima e regeneração da vegetação de Cerrado	65
Figura 37 - Imagens NDVI de 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 e NDVI mediana.....	66
Figura 38 - Esquema de criação da imagem NDVI processada.	67
Figura 39 - Linhas de código de programa <i>MATLAB</i> TM	67
Figura 40 - Reamostragem da imagem SRTM.....	69
Figura 41 - Mapa de localização dos pontos do trabalho de campo em outubro de 2013.....	70
Figura 42 - Banco de Dados Geográfico (BDG).....	71
Figura 43 - Fotografias integradas no Banco de Dados Geográficos do SIG.....	72
Figura 44 - Composições coloridas da imagem TM Landsat-5 de 30/08/2011.....	74
Figura 45 - Classificação da Imagem NDVI mediana do PNE.	75
Figura 46 - Feições da fisionomia do Campo Limpo	76
Figura 47 - Vegetação de gramíneas (capim flecha).	77
Figura 48 - Vegetação de Campo Limpo em solos de composição diferente.....	78
Figura 49 - Aspectos fisionômicos do Campo Cerrado.....	79
Figura 50 - Aspectos fisionômicos do Cerrado <i>Strictu Sensu</i>	79
Figura 51 - Aspectos de ocorrências do Cerradão.....	80
Figura 52 - Floresta de Galeria ao longo do rio Formoso.	81
Figura 53 - Relação entre o relevo e o Cerrado do PNE	82
Figura 54 - Modelagem do relevo do PNE.....	83
Figura 55 - Geomorfologia e Relevo do PNE	84
Figura 56 - Imagem NDVI processada.....	86
Figura 57 - Mapa de Classificação das fisionomias da vegetação de PNE	87
Figura 58 - Mapa da Classificação integrado ao relevo.	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Intervalos do EEM utilizados em Sensoriamento Remoto.....	34
Quadro 2 - Exemplos de quantidades de NC.....	43
Quadro 3 - Principais características do Landsat 5.....	45
Quadro 4 - Fontes de informações vetoriais.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AP: Antes do Presente
- Bit: *Binary digit*
- BDG: Banco de Dados Geográfico
- C: Centígrados
- DOS: *Dark Object Subtraction*
- EEM: Espectro Eletromagnético
- ERTS: *Earth Resources Technology Satellite*
- ETM+: *Enhanced Thematic Mapper Plus*
- GLCF: *Global Land Cover Facility*
- GPS: *Global Positioning System*
- IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis
- IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- ICMBio: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
- INMET: Instituto Nacional de Meteorologia
- INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- Ma: Milhões de anos
- MDT: Modelo Digital do Terreno
- MB: Megabyte
- MMA: Ministério do Meio Ambiente
- NASA: *National Aeronautics and Space Administration*
- NC: Nível de Cinza
- NIR: *Near Infra-Red*
- ND: Número Digital
- NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
- PDI: Processamento Digital de Imagens
- PNE: Parque Nacional das Emas
- TM: *Thematic Mapper*
- REM: radiação eletromagnética
- RPPN: Reserva Particular do Patrimônio Natural
- RGB: *Red, Green, Blue*
- SIEG: Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás
- SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*
- SWIR: *Short-Wavelength Infrared*

- TIRS (*Thermal Infrared Sensor*)
- USGS: *United States Geological Survey*
- UTM: *Universal Transversa de Mercator*
- WGS: *World Geodetic System*
- μm : micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA CERRADO.....	20
3.1.1	Localização Geográfica.....	20
3.1.2	Caracterização da área de estudo	22
3.1.3	Geologia e Solo	23
3.1.4	Geomorfologia	25
3.1.5	Clima	26
3.1.5.1	Temperatura.....	27
3.1.5.2	Precipitação Pluviométrica.....	28
3.1.5.3	Umidade relativa do ar	29
3.1.6	Rede de drenagem	30
3.1.7	Fauna	30
3.1.8	Adaptação ao fogo.....	31
3.1.9	Fisionomias Vegetacionais do Cerrado.....	32
3.2	SENSORIAMENTO REMOTO	33
3.2.1	Espectro eletromagnético	33
3.2.1.1	Intervalos do Espectro eletromagnético utilizados em Sensoriamento Remoto	34
3.2.2	Processo de formação de imagens digitais.....	35
3.2.3	Anatomia das imagens digitais.....	36
3.2.4	Comportamento espectral.....	38
3.2.5	Imagens de Sensoriamento Remoto	39
3.2.5.1	Resolução Espacial.....	40
3.2.5.2	Resolução Espectral.....	42
3.2.5.3	Resolução Radiométrica.....	43
3.2.5.4	Resolução Temporal.....	44

3.2.6	Satélites de Sensoriamento Remoto	44
3.2.6.1	Satélite Landsat	44
3.2.7	Processamento digital de imagens.....	45
3.2.7.1	Correção geométrica.....	46
3.2.7.2	Recorte de imagens.....	47
3.2.7.3	Mosaico	47
3.2.7.4	Composição colorida	48
3.2.7.5	Distorções radiométricas	49
3.2.7.6	Correção atmosférica.....	51
3.2.7.7	Índice de vegetação	53
3.2.8	Sistema de informação geográfica	55
3.2.9	Representação do relevo.....	56
3.2.9.1	Modelo Digital do Terreno (MDT)	56
3.2.9.2	Dados SRTM.....	57
4	DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	59
4.1	MATERIAIS.....	59
4.1.1	Dados de satélite.....	59
4.1.2	Bases cartográficas	59
4.1.3	Informações meteorológicas	60
4.1.4	Equipamentos	60
4.1.5	Programas computacionais.....	60
4.2	METODOLOGIA	60
4.2.1	Aquisição de dados e informações	61
4.2.2	Transformações geométricas.....	62
4.2.3	Preparação da cena de estudo.....	63
4.2.4	Transformações radiométricas	64
4.2.5	Processamento das imagens NDVI	65
4.2.6	Classificação digital e visual da imagem NDVI	68
4.2.7	Adequação de dados vetoriais	68
4.2.8	Reamostragem da imagem SRTM	69
4.2.9	Pesquisa de campo	69
4.2.10	Integração dos dados de campo e Sensoriamento Remoto	71

5	RESULTADOS	73
5.1	INTERPRETAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES RGB	73
5.2	CLASSIFICAÇÃO DAS FISIONOMIAS VEGETAIS DO PNE.....	74
5.2.1	Campo Limpo.....	76
5.2.2	Campo Cerrado	78
5.2.3	Cerrado <i>Stricto Sensu</i>	79
5.2.4	Cerradão	80
5.2.5	Floresta de Galeria	81
5.3	INTEGRAÇÃO DE DADOS	82
6	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	85
7	CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

O bioma Cerrado ocupa uma área de 2.036.448 km², representando 23,92% do território continental brasileiro. O bioma apresenta 8,1% de seu território legalmente protegido por unidades de conservação; desse total, 2,9% são unidades de conservação de proteção integral e 5,2% de unidades de conservação de uso sustentável, incluindo 0,05% em RPPNs (Reserva Particular do Patrimônio Natural) (MMA, 2011).

Até a inauguração de Brasília, no início da década de 1960, o Cerrado permaneceu quase intocado, apresentando até então um baixo nível de degradação ambiental e ecológica. Porém, com a abertura de novas estradas, com aumento populacional e principalmente pela expansão da fronteira agrícola, iniciou-se um processo de ocupação das áreas de Cerrado, baseado em desmatamentos, na destruição de ecossistemas, degradação do solo e na contaminação dos recursos hídricos. Essa ocupação aconteceu de forma desordenada, substituindo a vegetação nativa, inicialmente por pastagens e mais recentemente pelas monoculturas da soja e cana-de-açúcar, provocando a redução da vegetação nativa, chegando a níveis quantitativos próximos à extinção, além da elevada utilização dos recursos hídricos para a irrigação, causando enormes prejuízos à biodiversidade do bioma (MORAIS, 2005).

Um dos principais desafios na conservação do Cerrado está em demonstrar a importância que a biodiversidade desempenha no funcionamento dos ecossistemas. O conhecimento sobre a biodiversidade e suas implicações nas alterações no uso da terra, é fundamental para a compatibilização da conservação ambiental com um desenvolvimento verdadeiramente sustentável. No passado, a falta de conhecimento e as incertezas sobre os principais fatores que causavam o desmatamento no Cerrado, prejudicaram sua conservação e manejo (KLINK e MACHADO, 2005).

O Cerrado detém cerca de 5% da biodiversidade do planeta e um terço da biodiversidade brasileira, e essa biodiversidade encontra-se altamente ameaçada pela degradação dos solos e pela redução das áreas de vegetação nativa, que ainda conta com a introdução de gramíneas exóticas ao bioma (KLINK e MACHADO, 2005).

A frequente ocorrência de fogo nas áreas de vegetação nativa vem provocando grandes prejuízos à fauna e a flora do bioma. Embora o Cerrado seja um ecossistema naturalmente adaptado ao fogo, a utilização de queimadas para a abertura de novas áreas para agricultura e para formação de pastagens causa grandes prejuízos ao bioma (SILVA e ANACLETO, 2005).

A vegetação do Cerrado é caracterizada por um conjunto complexo de formações vegetais com aspectos e fisionomias variáveis. Essas formações podem ser divididas em três grupos: 1) campestre: onde predominam as espécies herbáceas e algumas arbustivas, sem a

presença de árvores; 2) savânica: onde são encontradas áreas com árvores e arbustos espalhadas sobre um estrato de gramíneas, porém sem a formação de um dossel contínuo; 3) florestal: onde predominam espécies arbóreas de grande porte com a formação de dossel contínuo ou descontínuo (IBGE, 2012; WALTER, 2006).

Dentre os diversos sistemas de classificação de formas de vegetação encontrados na literatura, destaca-se o sistema de classificação voltado exclusivamente à distinção e descrição da vegetação do Cerrado desenvolvido por Ribeiro e Walter. Nesse sistema, as formações campestres encontradas no Cerrado brasileiro são subdivididas em Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre; as formações savânicas em Cerrado *Stricto Sensu*, Parque Cerrado, Palmeiral e Vereda; e as formações florestais em Mata Ciliar, Floresta de Galeria, Mata Seca e Cerradão (IBGE, 2012).

Devido à sua localização geográfica centralizada no território brasileiro, o Cerrado se conecta a quase todos os biomas nacionais, como a Amazônia, a Mata Atlântica, a Caatinga e ao Pantanal, constituindo áreas de transição com esses biomas e representando um ponto de equilíbrio entre as diversas paisagens brasileiras (SHUVARTZ e ANTUNES, 2005).

Outrossim, pela sua localização no Planalto Central, o bioma se destaca pela fundamental importância para o abastecimento de água do país, captando águas pluviais que abastecem as nascentes dos principais rios que formam as bacias do Amazonas, Tocantins, Parnaíba, São Francisco, Paraná e Paraguai. Também pelos imensos aquíferos nele encontrados, entre estes o Aquífero Guarani, o Cerrado é fundamental para a manutenção do equilíbrio hidrológico e hidrogeológico no Brasil (MMA, 2006).

O Cerrado possui um regime climático sazonal, apresentando poucas variações de um ano para outro. O período úmido ocorre entre os meses de outubro a março, e normalmente são quentes e chuvosos. O período frio e seco se concentra entre os meses de abril a setembro.

Cerca de 94,5% da área total do Cerrado situa-se entre 300 e 900 metros acima do nível do mar, sendo que apenas 5,5% ultrapassam a altitude de 900 metros. Apesar do relevo variado, predominam os amplos planaltos (VALENTE, 2005).

No solo predominam os Latossolos e suas variações, principalmente os Latossolos Vermelho e Vermelho-amarelo que são porosos, permeáveis, bem drenados e muito lixiviados (VALENTE, 2005).

A capacidade de retenção de água dos latossolos é relativamente baixa. Em sua textura predomina a fração areia, seguida pela argila e por último o silte. Os solos são predominantemente arenosos, areno-argilosos, argilo-arenosos ou, eventualmente, argilosos (WALTER, 2006).

Dessa forma, Parque Nacional das Emas (PNE) foi escolhido para o estudo por ser uma unidade de conservação federal que apresenta quase todas as fisionomias vegetais do Cerrado, sendo uma das maiores e mais representativas reservas de vegetação nativa deste bioma. É reconhecido pela UNESCO como um patrimônio natural da humanidade. Porém, a sua integridade física e biológica encontra-se altamente ameaçada pelas ocorrências de queimadas e pela forma desarticulada de ocupação de seu entorno (IBAMA, 2004).

A geologia da região do PNE integra a Bacia do Paraná. Essa bacia sedimentar, intracratônica ou sinéclise, evoluiu sobre a Plataforma Sul-Americana e sua formação teve início há cerca de 400 milhões de anos, no Período Devoniano, terminando no Cretáceo, cerca de 65 milhões de anos atrás. Sua evolução se deu por fases de subsidência e soerguimento com erosão associada, no transcorrer das quais a sedimentação se processou em sub-bacias. O registro estratigráfico da Bacia do Paraná compreende um pacote sedimentar-magmático com uma espessura total máxima em torno dos 7 mil metros (MILANI et al., 2007).

O PNE exerce influência em três grandes bacias hidrográficas brasileiras. A rede hidrográfica do parque tem como componentes principais, os rios Jacuba e Formoso, que se unem fora do parque, formando o rio Corrente, que desemboca no rio Paranaíba, afluente do rio Paraná. Próximas às divisas dos estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, já na área externa ao parque, localizam-se as nascentes dos rios Araguaia, da bacia Araguaia/Tocantins e Taquari, da bacia do rio Paraguai.

As ferramentas de Sensoriamento Remoto podem ser utilizadas para os mais variados tipos de estudos ambientais e ecológicos, como a avaliação e mapeamento da dinâmica de uso do solo, e a identificação de padrões de fisionomias da vegetação. Essas ferramentas podem ainda identificar os padrões de comportamento espectral dessas fisionomias, através do estudo das interações da vegetação com a radiação eletromagnética, especialmente nos comprimentos de onda nas regiões do visível e infravermelho próximo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Objetivo geral deste estudo foi analisar e mapear as diversas fisionomias vegetais do Cerrado existentes no Parque Nacional das Emas - Goiás, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto, através de imagens multitemporais do sensor TM Landsat-5.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo foram:

- Identificar as diversas fisionomias vegetais do Cerrado utilizando a técnica de classificação do Índice da Diferença de Vegetação Normalizado (NDVI), no período entre 2007 e 2011;
- Analisar as interferências das ocorrências de queimadas na classificação digital das imagens NDVI;
- Estabelecer a relação entre as fisionomias vegetais da área de estudo com as condições abióticas, tais como o solo, relevo e a geomorfologia;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO BIOMA CERRADO

Apesar de divergentes definições na literatura, o Cerrado pode ser definido como uma formação vegetal tipo savana. Apresenta um complexo vegetacional que possui relações ecológicas e fisionômicas com as savanas da África, Austrália, sudeste da Ásia e Américas Central e do Sul, todas em latitudes e climas tropicais (WALTER, 2006).

As savanas são ecossistemas que resultam, essencialmente, de interações entre a disponibilidade de água e de nutrientes no solo. A intensa sazonalidade da disponibilidade de água e a baixa fertilidade geral do solo, combinadas com a ocorrência de fogo, por causas naturais ou antrópicas, são denominadores comuns para todas as áreas de savanas tropicais. Interações complexas entre esses fatores produziram uma ampla gama de tipos de vegetação nas savanas (GOLDSTEIN e SARMIENTO, 1987).

Os solos de baixa fertilidade das savanas selecionam espécies com baixa exigência nutricional, com baixo potencial de crescimento e de espécies altamente eficientes no aproveitamento dos poucos recursos de nutrientes no solo (por exemplo: através do desenvolvimento de uma forte relação raiz / parte aérea da planta). Estas características constituem a base da competitividade por *habitat* e evolução das espécies vegetais das savanas (GOLDSTEIN e SARMIENTO, 1987).

A ocorrência de queimadas em savanas é um fenômeno amplamente estudado e tem importância na evolução e manutenção desses ecossistemas, agindo como importante força seletiva sobre os organismos (FROST e ROBERTSON, 1987).

Áreas com diferentes frequências de queimada e tempo desde a última queima são caracterizadas por distintas alterações na composição de espécies e de estrutura da vegetação (CASTANO-MENESES e PALACIOS-VARGAS, 2003).

3.1.1 Localização Geográfica

O bioma Cerrado possui uma área de 2.036.448 km² (MMA, 2011) e corta o território brasileiro diagonalmente no sentido nordeste-sudoeste, ocupando grande parte na região central do país, se estendendo desde o litoral nordeste do estado do Piauí até o norte do estado do Paraná, existindo ainda alguns enclaves isolados na Amazônia, na Caatinga e na Mata Atlântica. Devido a sua posição geográfica centralizada no território brasileiro, limita-se com quase todos os biomas brasileiros, à exceção dos Pampas e os sistemas costeiros (AGUIAR, MACHADO e MARINHO-FILHO, 2004).

A área nuclear do Cerrado engloba todo o estado de Goiás, o Distrito Federal e parte dos estados da Bahia, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Piauí, São Paulo e Tocantins (Figura 1).

Os enclaves isolados de Cerrado em outros biomas são remanescentes de um processo dinâmico e histórico de expansão e contração das áreas de Cerrado, provocado por alterações climáticas ocorridas no passado. Em tempos mais frios e secos, as áreas de Cerrado avançaram sobre as áreas de florestas, e em tempos mais quentes e úmidos, as áreas de florestas avançaram sobre o Cerrado (AGUIAR, MACHADO e MARINHO-FILHO, 2004). Essas áreas estão localizadas nos estados do Amapá, Roraima, Amazonas, Pará, na Bahia e no Paraná (Figura 1).

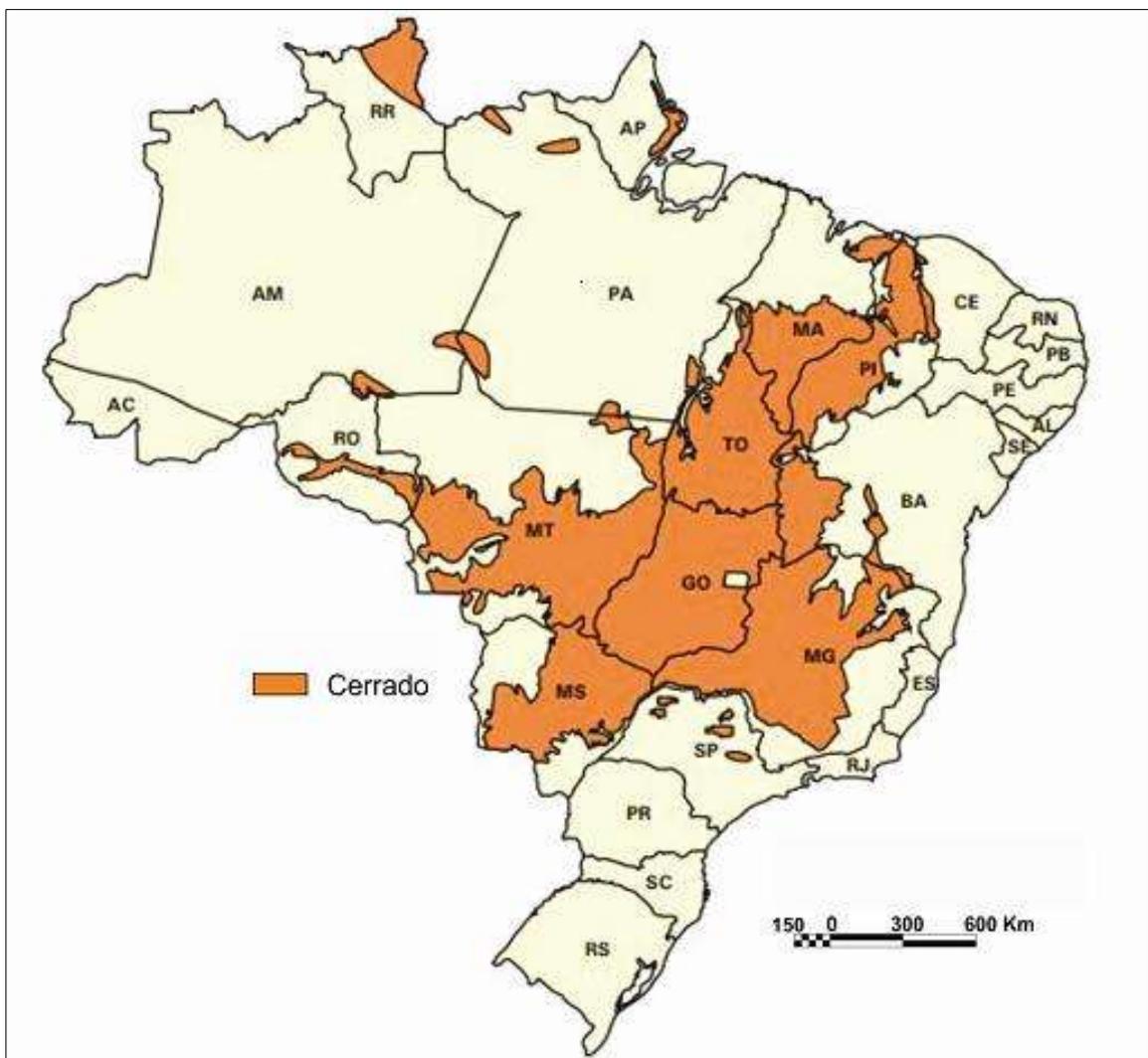


Figura 1 - Distribuição da área do bioma Cerrado no território brasileiro. Fonte: FILHO et al. (2002).

3.1.2 Caracterização da área de estudo

Foi selecionado o Parque Nacional das Emas (PNE), uma área de 1.329,41 km² (ICMBIO, 2013), localizada na região nuclear do Cerrado, nos municípios de Mineiros e Chapadão do Céu, no estado de Goiás, e Costa Rica no estado do Mato Grosso do Sul, entre as latitudes -17°51' e -18°21' e longitudes -52°44' e -53°08' (Figura 2).

O acesso ao PNE, a partir de Goiânia, se dá pela rodovia BR-060 até a cidade de Jataí. Desta, o acesso pode se dar por duas vias: pela GO-184, até Serranópolis, seguindo pela GO-302 até Chapadão do Céu e dali até o PNE, ou pela BR-364, que é a via de ligação a outras capitais do País, até a cidade de Mineiros, e seguindo pela BR-359/GO-341.

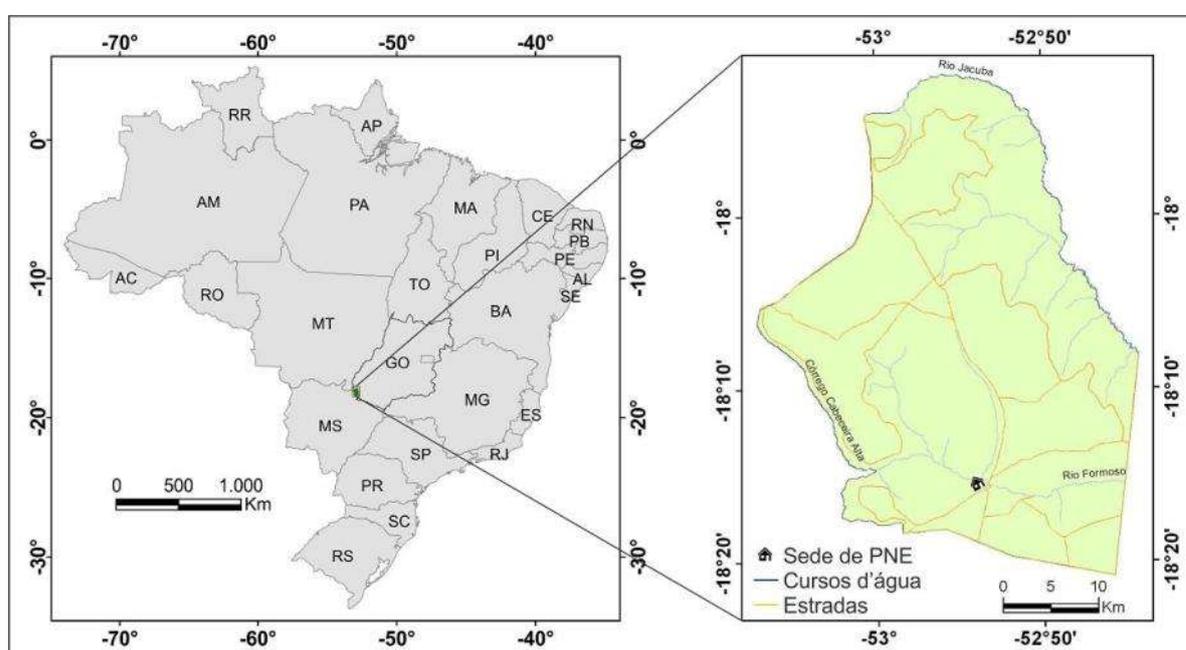


Figura 2 - Mapa de localização do Parque Nacional das Emas.

O Parque Nacional das Emas possui essa denominação devido à grande quantidade de emas (*Rhea americana*) que lá habitavam. Representa uma das maiores áreas protegidas do bioma Cerrado e guarda em seu interior amostras significativas da flora e fauna silvestres, apresentando uma grande diversidade e representatividade do bioma Cerrado. O PNE possui as principais fitofisionomias encontradas no Cerrado. A fauna abriga diversas espécies endêmicas e serve como refúgio a diversas outras espécies. É reconhecido pela UNESCO como um patrimônio natural da humanidade. Porém, a sua integridade física e biológica encontra-se altamente ameaçada pela forma desarticulada de ocupação de seu entorno (IBAMA, 2004).

O PNE foi criado pelo Decreto Federal nº 49.874 em 11 de janeiro de 1961, pelo então Presidente da República Juscelino Kubitschek, nos estados de Goiás e Mato Grosso (hoje Mato Grosso do Sul), nas regiões das nascentes e cursos superiores dos rios Correntes, Aporé,

Sucuri e seus tributários, abrangendo áreas devolutas, bem como áreas de domínio privado. Em 1972, foi assinado o Decreto nº 70.375, revogando o Decreto nº 49.874, em virtude da indefinição de alguns de seus limites (ICMBIO, 2013). Esse último decreto definiu os limites atuais do parque.

3.1.3 Geologia e Solo

A geologia da região do PNE está representada por sedimentos e rochas vulcânicas associadas à bacia sedimentar do Paraná. Maior detalhe da geologia da Bacia do Paraná pode ser visto em MILANI (1997); PENA et al. (1975); SCHERER (2002).

A estratigrafia do PNE é formada por sedimentos do Cretáceo até o Holoceno, compartimentados nas seguintes unidades litoestratigráficas (Figura 3a).

- **Depósitos Aluvionares:** São sedimentos inconsolidados constituídos por conglomerados, areias, siltes e argilas que foram depositados ao longo dos rios Formoso e Jacuba e seus afluentes, evoluídos entre 0,01 milhões de anos (Ma) atrás até os dias atuais.
- **Cobertura Detrito-Lateríticas:** São detritos superficiais compostos por fragmentos de rochas cimentados por óxido de ferro ou alumínio, desenvolvidos durante os períodos Terciário/Quaternário. É comum a presença de concreções ou psolitos de ferro na superfície. Estas coberturas superficiais estão ligadas a determinadas formas de transportes, elaboradas por agentes morfogenéticos sob uma determinada condição climática, presente nos diferentes compartimentos topográficos.
- **Formação Cachoeirinha:** É constituída por uma extensa cobertura inconsolidada de areia, arenito e argilito. Esta formação é atribuída ao Plioceno (6,3-1,8 Ma) da Era Cenozoico.
- **Formação Vale do Rio do Peixe (Grupo Bauru):** Arenitos muito finos a finos, maciços ou estratificados, intercalados com lamitos. A parte superior da Formação Rio do Peixe possui intercalações de rochas vulcânicas alcalinas (FERNANDES e COIMBRA, 2000). A bacia Bauru evoluiu durante o Cretáceo Superior (\pm 100 Ma). Os solos desenvolvidos compreendem os Argissolos Vermelho-Amarelo câmbico, textura arenosa média.

Os solos podem ser ácidos devido à própria pobreza em bases do material de origem (rochas), ou a processos de formação que favorecem a remoção ou lavagem de elementos

básicos (lixiviação) como K, Ca, Mg, Na e outros. A origem da acidez do solo é causada principalmente por lavagem de Ca e Mg do solo pela água da chuva ou irrigação, remoção dos nutrientes pelas colheitas e utilização da maioria dos fertilizantes químicos.

Dependendo do tipo de rocha e relevo, os solos podem ter elevado conteúdo de Al, Fe e Mn que se concentram na superfície, formando agregados psolíticos ou coberturas detrito-lateríticas (Figura 3b).

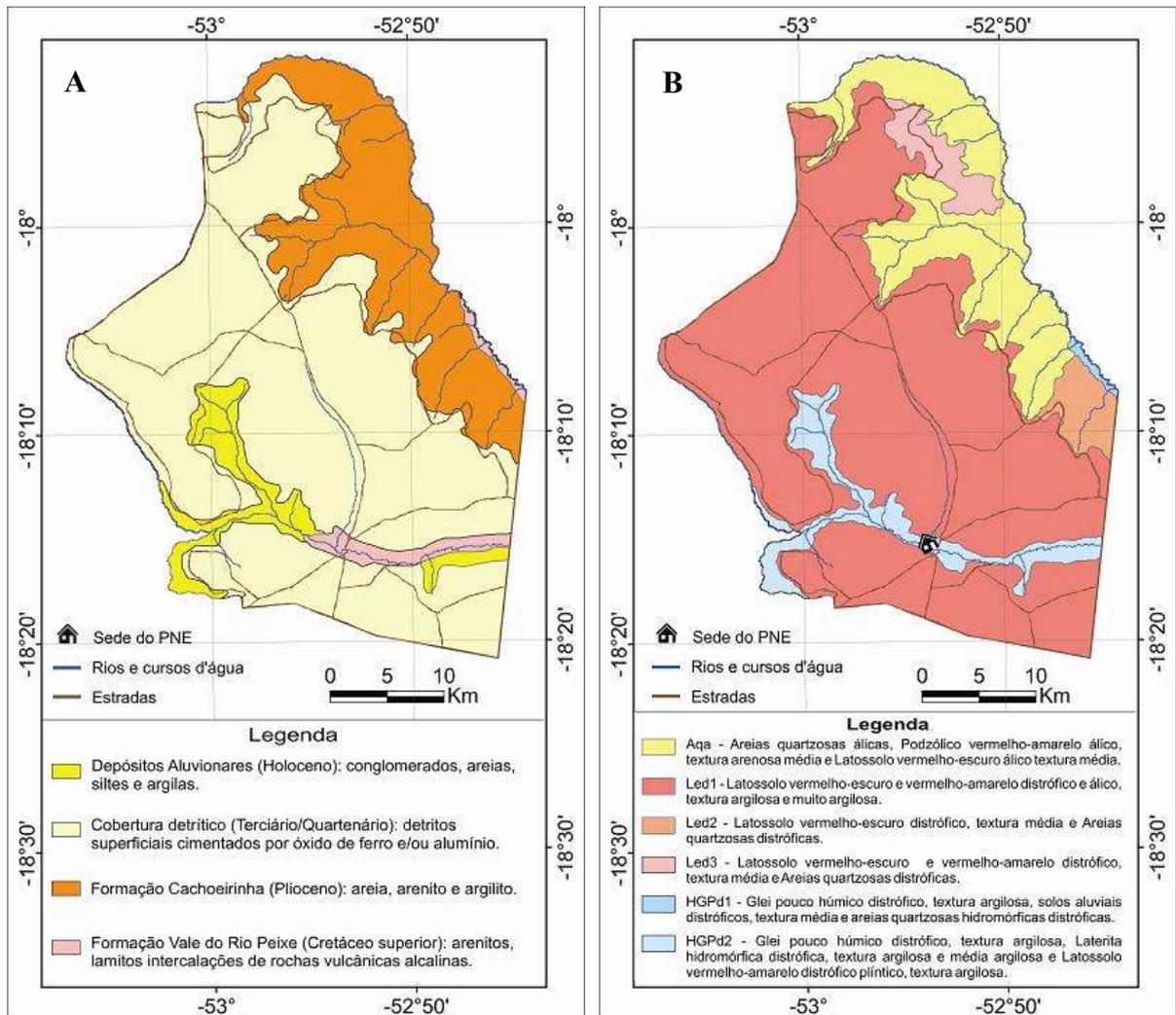


Figura 3 - Características geológicas e pedológicas do PNE. Em (a), Mapa Geológico (PENA et al., 1975). Em (b), Mapa de Solos (RadamBrasil).

A área do parque é formada por uma superfície aplainada, onde se desenvolvem latossolos vermelhos argilosos a latossolos claros arenosos ocupados por fisionomias vegetais pouco densas, como o Campo Limpo e o Campo Cerrado, comportando algumas áreas de acumulação inundáveis, marcantes na rede de drenagem. São vales rasos de fundo plano e vertentes suaves, ocasionalmente retomadas pela erosão, onde ocorrem solos hidromórficos ocupados por veredas (IBAMA, 2004).

3.1.4 Geomorfologia

As sequências similares de feições de terras caracterizam as savanas em cada continente, representando a evolução geomorfológica da paisagem, sob a influência das interações de mudanças nas condições climáticas e dos eventos geológicos. A história geomorfológica é a chave para compreender os padrões de vegetação das savanas. Quatro unidades solo-vegetação principais: campo, savana-parque, savana arborizada e savana com árvores baixas e arbustos, são sucessoras às vastas planícies desenvolvidas durante o Pleistoceno e destruídas pelas mudanças induzidas pelas circunstâncias erosionais do Quaternário (COLE, 1986 *apud* WALTER, 2006).

Dentro de cada unidade solo-vegetação ocorrem associações menores, refletindo diferenças no microclima, relevo, solo, textura e *status* mineral (WALTER, 2006).

O entorno do Parque é marcado por feições de erosão remontante, características das bordas dos chapadões (Figura 4):

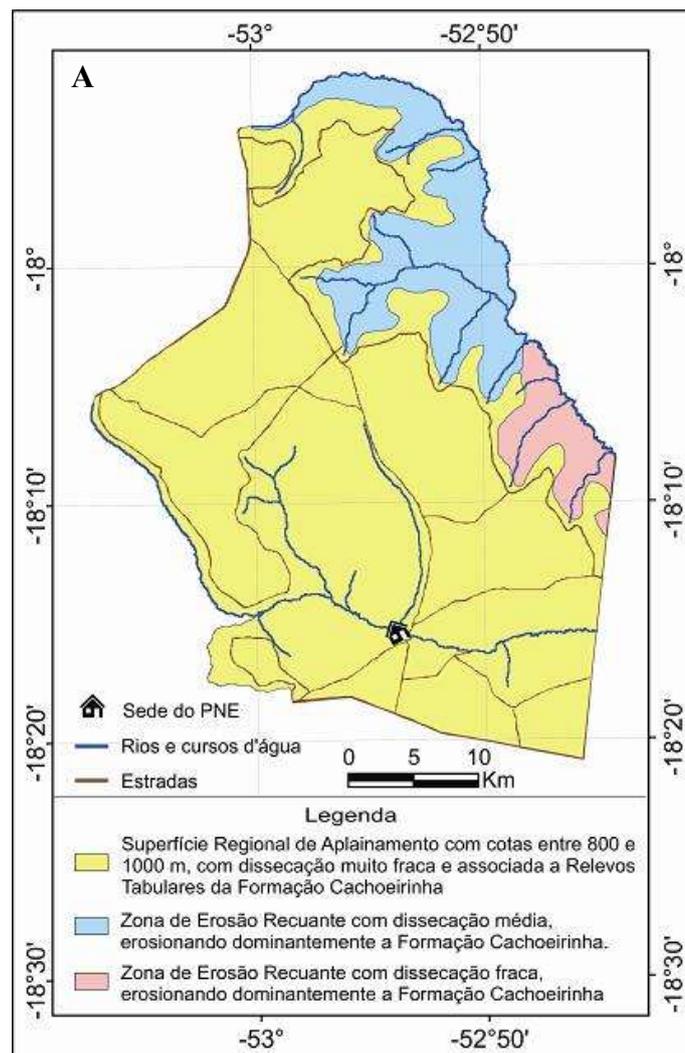


Figura 4 - Mapa Geomorfológico do PNE.

Fonte: (LATRUBESSE e CARVALHO, 2006).

- A noroeste destacam-se as cabeceiras do rio Araguaia, profundamente escavadas em zonas fraturadas nos arenitos Botucatu;
- A leste e a oeste ocorrem relevos dissecados, estabelecidos sobre arenitos Botucatu e basaltos Serra Geral, onde se desenvolvem latossolos e terras roxas;
- Na parte oeste, o limite é assinalado por escarpas pronunciadas, que fazem contato direto entre o compartimento elevado e o compartimento rebaixado do planalto. Nesse trecho, o relevo torna-se mais acentuado, comportando micropatamares, junto a formas convexas e aguçadas, esculpidas sobre arenitos friáveis do Grupo Bauru.

A superfície plana do PNE é constituída sobre sedimentos cretácicos da Bacia do Paraná e sedimentos detrítico-lateríticos terciários, onde se desenvolvem latossolos ocupados por fisionomias vegetais campestres que comportam algumas áreas de acumulação inundáveis às margens do Rio Formoso. São vales rasos de fundo plano e vertentes suaves, ocasionalmente retomadas pela erosão holocênica, onde ocorrem solos hidromórficos ocupados por veredas. A densidade da rede de drenagem é baixa devido ao substrato arenoso permeável. Na porção leste do parque, abrigando o Rio Jacuba e seus afluentes, os rios têm leitos muito encaixados, condicionados a fraturas do substrato, podendo atingir os basaltos impermeáveis subjacentes (IBAMA, 2004).

3.1.5 Clima

A região do PNE caracteriza-se pelo clima tropical, onde está incluída a quase totalidade do bioma Cerrado, com um clima quente, variando de úmido a semiárido, com até cinco meses de seca. O clima local se enquadra segundo a classificação de Köppen no tipo AW, como tropical chuvoso de savana com inverno seco, característico dos climas úmidos tropicais com duas estações bem definidas, uma seca no inverno e outra úmida no verão. Dois sistemas de circulação interferem no clima na região: o Sistema de Correntes Perturbadas de Oeste, representado pelas linhas de instabilidade tropical que ocasionam tempo instável no verão e o Sistema de Correntes Perturbadas de Sul, que invadem a região no inverno com bastante frequência, provocando chuvas de um a três dias com volumes pouco significantes, representados pelas frentes polares (IBAMA, 2004).

A distribuição concentrada das chuvas exerce influência direta sobre a vegetação do bioma. O clima também tem influência temporal na origem dessa vegetação, pois as chuvas,

ao longo do tempo geológico, intemperizam as rochas e lixiviam os solos, deixando-os pobres em nutrientes essenciais para o desenvolvimento da vegetação.

Para a caracterização climática do PNE, foram utilizados dados da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) OMM:43464, situada no município de Jataí, Goiás, na latitude $-17^{\circ} 52' 48''$ e longitude $-51^{\circ} 42' 36''$, a uma distância aproximada de 130 km do centro do PNE.

Foram coletadas informações meteorológicas relativas às médias diárias das temperaturas, informações pluviométricas e umidade relativa do ar, referentes aos anos de 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011.

3.1.5.1 Temperatura

A temperatura média anual é de $22,7^{\circ}\text{C}$. Os meses de setembro a março apresentam as temperaturas médias mais elevadas do ano, em torno de 24°C . As temperaturas mais baixas, em torno de 10°C , ocorrem entre os meses de maio a julho (Figura 5). Foram registradas temperaturas médias absolutas com mínima de $9,78^{\circ}\text{C}$ em julho de 2008 e máxima de $35,7^{\circ}\text{C}$ em setembro de 2010.

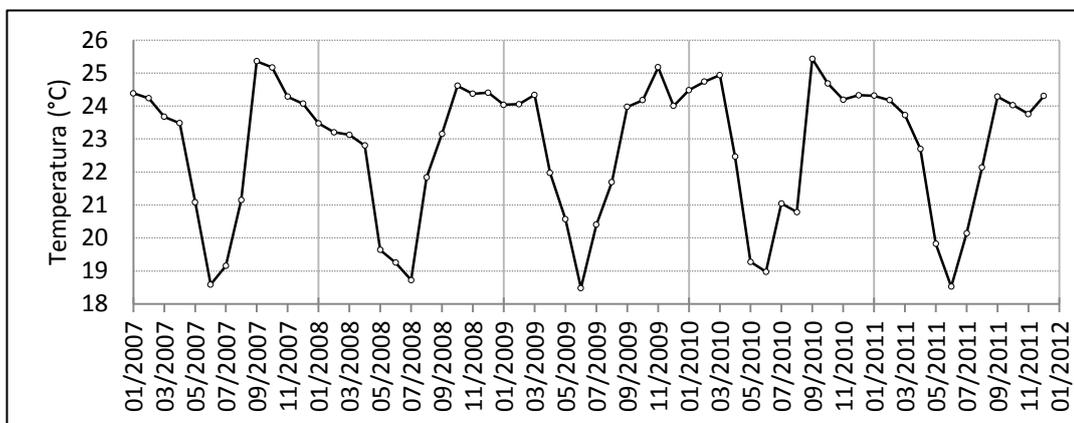


Figura 5 - Temperaturas médias mensais de 2007 a 2011.

As temperaturas médias mais elevadas do ano, em torno de 24°C , ocorrem no início da primavera, nos meses de setembro e outubro, e se estendem por todo o verão, até o mês de março, apresentando máxima de 34°C e mínima de 17°C .

Temperaturas médias mais amenas caracterizam as estações outono e inverno, em torno de 20°C . A temperatura média do mês mais frio, junho, é de $18,8^{\circ}\text{C}$, não sendo rara a ocorrência de temperaturas mínimas absolutas inferiores a esse valor, podendo atingir menos de 10°C .

Nesse período outono-inverno ocorrem com frequência temperaturas baixas em razão da invasão do ar polar (IBAMA, 2004).

3.1.5.2 Precipitação Pluviométrica

A precipitação pluviométrica no PNE apresenta uma sazonalidade tipicamente tropical. Durante o ano ocorre uma grande variação no volume de chuva, os volumes máximos ocorrem no verão, com médias mensais acima de 300 mm, e os volumes mínimos ocorrem no inverno, com médias mensais abaixo de 9 mm. O volume anual pode variar entre 1400 e 1900 mm, apresentando média de cerca de 1600 mm (Figura 6). Nos meses de inverno esse volume é de aproximadamente 27 mm.

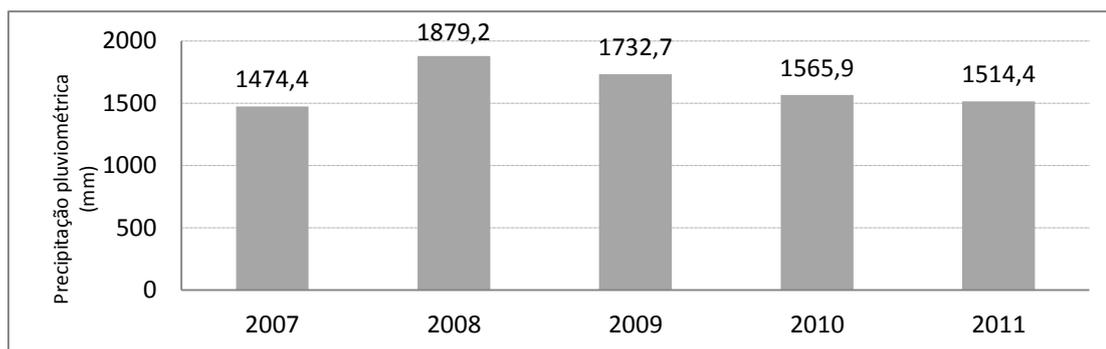


Figura 6 - Precipitação pluviométrica média anual no PNE de 2007 a 2011.

Cerca de 93% do volume total anual de chuva ocorre de outubro a abril. O inverno é totalmente seco e a estiagem chega a durar cinco meses, quando podem ocorrer raras chuvas no início ou final da estação. Os meses de julho e agosto é o período mais crítico no ano, quando a precipitação pode chegar a 0 mm. A Figura 7 mostra as médias mensais de precipitação pluviométrica para a região do PNE.

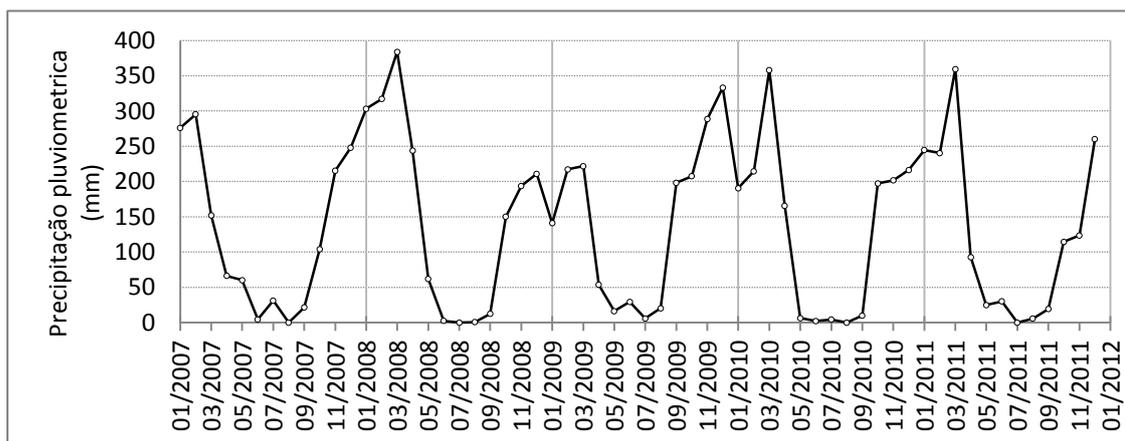


Figura 7 - Média de Precipitação pluviométrica de 2007 a 2011.

A quantidade de dias de chuva no período de 2007 a 2011 mostra pequenas variações de um ano para outro (Figura 8). No intervalo de cinco meses, de maio a setembro, as ocorrências de chuva acontecem em média abaixo de 15 dias, chegando ao extremo de

apenas 4 dias nesse intervalo. A região do PNE apresenta uma média anual de 139 dias de chuva, como o mínimo de 103 e o máximo de 187 dias.

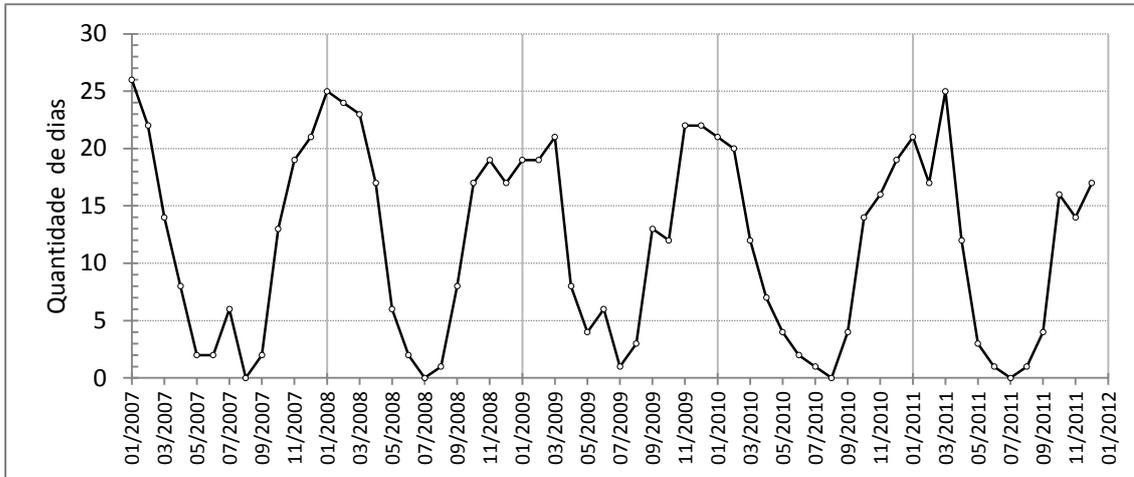


Figura 8 - Quantidade de dias de Precipitação pluviométrica de 2007 a 2011.

3.1.5.3 Umidade relativa do ar

O perfil da umidade relativa do ar na região do PNE (Figura 9) mostra variações no decorrer do ano, apresentando valores percentuais que refletem a alternância dos períodos seco e chuvoso. O intervalo de outubro a abril é o período que apresenta as maiores médias de umidade relativa do ar, variando entre 66 e 82%. A partir de maio esses percentuais vão decrescendo, atingindo valores mínimos próximos a 36% nos meses de agosto e setembro.

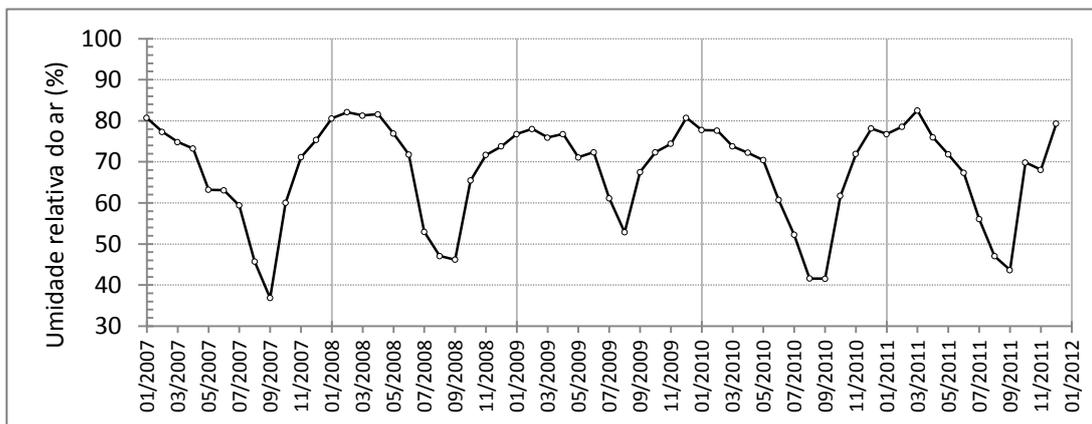


Figura 9 - Médias mensais da umidade relativa do ar de 2007 a 2011.

Esse comportamento é determinado pela elevada disponibilidade energética e hídrica que ocorrem no verão, causada pela presença das linhas de instabilidade tropical e pelas altas taxas de evapotranspiração. O distanciamento entre a Terra e o Sol no Hemisfério sul que ocorre no inverno, a continentalidade e a predominância de massas de ar frio de origem polar, reduz a umidade relativa do ar na região (IBAMA, 2004).

3.1.6 Rede de drenagem

O PNE está localizado em um divisor de águas, com sua porção noroeste fazendo parte da bacia do rio Araguaia e o restante da sua extensão pertencente à bacia do rio Paraná. A hidrografia do PNE é composta pelos rios Formoso e Jacuba, cujas nascentes localizam-se no interior do Parque e deságuam no rio Corrente (Figura 10). Estes rios são pertencentes à sub-bacia do Paranaíba e à bacia do Paraná. Com direção predominante oeste-leste, o rio Formoso tem o córrego Cabeceira Alta como sua nascente principal, recebendo diversos outros córregos que, juntos, compõem 60% da drenagem da área do parque, até encontrar-se com o rio Jacuba, que corre no sentido norte-leste, e tem sua cabeceira mestra situada no extremo norte do parque (IBAMA, 2004).

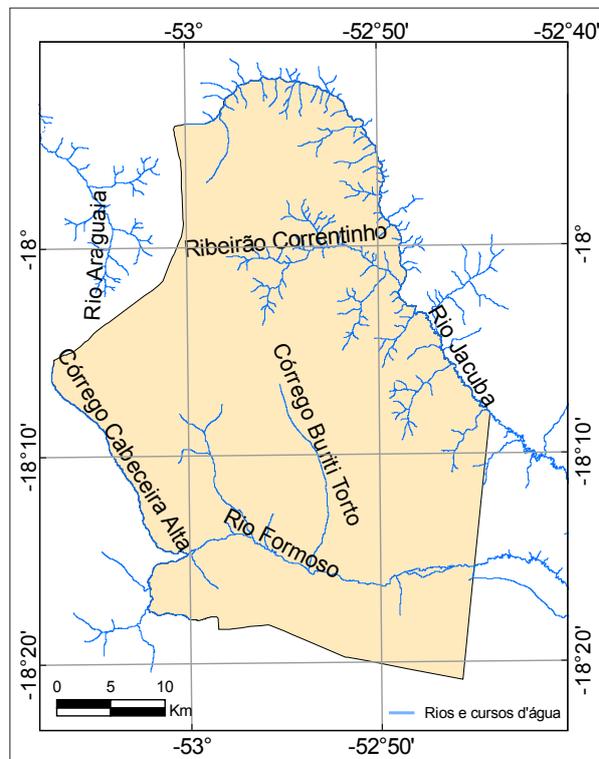


Figura 10 - Mapa da rede de drenagem do PNE.
Fonte: IBGE (2013).

3.1.7 Fauna

RODRIGUES et al. (2002) registraram a existência de 85 espécies de mamíferos nativos do PNE, com 26,5% das espécies ocupando ambientes campestres e de cerrados típicos, 19,2% habitando as formações florestais e 54,2% em ambos os ambientes. As espécies de mamíferos de maior porte conseguem transitar entre o parque e os fragmentos de Cerrado em seu entorno, funcionando como corredores ecológicos, ligando a região do parque a outras áreas ainda preservadas.

As principais e mais representativas espécies de mamíferos encontradas no parque são: a capivara (*Hydrochaeris hydrochaeris*), o tamanduá-bandeira (*Myrmecophaga trydactyla*), o lobo-guará (*Chrysocyon brachyurus*), a onça-pintada (*Panthera onca*) e o veado-campeiro (*Ozotoceros bezoarticus*). Treze espécies de mamíferos encontram-se na lista de animais ameaçados de extinção, como o tatu-canastra (*Priadontes maximus*), o tamanduá-mirim (*Tamandua letridactyla*) e a jaguatirica (*Leopardus pardalis*) (RODRIGUES et al., 2002).

Segundo o IBAMA (2004), são registradas 331 espécie de aves na região do entorno do PNE, sendo 47 delas detectadas exclusivamente nas regiões externas ao parque. As principais são: a ema (*Rhea americana*), a coruja-buraqueira (*Speotyto cunicularia*), a arara-azul (*Anodorhynchus hyacinthinus*), o bem-te-vi (*Pitangus sulphuratus*) e inúmeras espécies de beija-flores (família *Trochilidae*) e pica-paus (família *Picidae*).

São encontradas ainda uma grande diversidade de espécies de cobras, como a jiboia (*Boa constrictor*), a sucuri (*Eunectes murinus*), a cascavel (*Crotalus durissus*), a jararacuçu (*Bothrops moojeni*) e a falsa-coral (*Simophis rhinostoma*) (IBAMA, 2004).

Dentre as espécies de lagartos, são encontradas espécies como o teiú (*Tupinambis duseni*), o calango-roseta (*Hoplocercus spinosus*) e inúmeras espécies de calangos. O parque possui ainda uma rica variedade de espécies de anfíbios, como rãs, sapos e pererecas.

Pela sua riqueza faunística, o PNE é uma das mais importantes unidades de conservação para a preservação de mamíferos do Cerrado. Foi incluído pelo Ministério do Meio Ambiente, no programa de Ações prioritárias para Conservação da Biodiversidade do Cerrado e Pantanal, como área de importância biológica extremamente alta e representa uma área estratégica do Corredor Ecológico Cerrado/Pantanal (RODRIGUES et al., 2002).

3.1.8 Adaptação ao fogo

O fogo é um elemento essencial para o Cerrado. As áreas de vegetação onde ocorrem queimadas periódicas são mais ricas em espécies do que as áreas onde o fogo é suprimido por longo período de tempo. O fogo é responsável pela germinação e quebra de dormência de sementes e pela manutenção da característica de tortuosidade dos galhos das árvores. No entanto, ainda faltam dados suficientes para se determinar a periodicidade ideal para a ocorrência de fogo no bioma (SILVA e ANACLETO, 2005).

Queimadas ocorrem na região com frequência histórica e mesmo os eventos severos de fogo, durante vários anos, não chegam a destruir esta vegetação (WALTER, 2006).

Há registros de fogo no Cerrado desde o final do Pleistoceno, há 32.400 AP (MIRANDA, BUSTAMANTE e MIRANDA, 2002).

Para que o fogo possa exercer efeitos significativos sobre as fisionomias do Cerrado, EITEN (1972) sugeriu que seria necessária a ocorrência de eventos diários e sucessivos no período de 1 a 2 anos.

De uma forma geral, o fogo de curta duração produz um impacto positivo na produção primária do estrato herbáceo das fisionomias mais abertas de Cerrado. São necessários aproximadamente dezoito meses após a queima para que o estrato herbáceo alcance as proporções equivalentes aos da área não queimada (BATMANIAN, 1983; HARIDASAN, 2000).

O estrato rasteiro da vegetação se recompõe de forma diferenciada, dependendo da época da queima. A recuperação ocorre de forma mais lenta nas áreas queimadas no início da estação seca, quando comparadas àquelas áreas queimadas no final da estação seca, indicando forte relação com o regime de chuvas (MIRANDA et al., 2004)

3.1.9 Fisionomias Vegetacionais do Cerrado

A nomenclatura dos sistemas de classificação vegetal pode variar conforme o autor que a propõe e com o seu país de origem, que sempre procuram uma designação mais regionalista, sem levar em conta as fisionomias ecológicas semelhante em outras partes do planeta, mesmo quando se propõe a serem universais (VELOSO, RANGEL-FILHO e LIMA, 1991).

Padronizar a nomenclatura dos tipos fitofisionômicos encontrados no Cerrado tem sido uma tarefa difícil, pois diferentes autores adotam critérios distintos, baseados em princípios ou origens diferenciadas (SANO e ALMEIDA, 1998).

Diversos sistemas de classificação da vegetação do cerrado são apresentados por autores como: (CAVALCANTI, 1995), (EMBRAPA, 1999), (RIBEIRO et al., 1983), (RIBEIRO e WALTER, 1998), (EITEN, 1972), (FELFILI, 1995), (OLIVEIRA-FILHO et al., 1989), (COUTINHO, 1978) e (IBGE, 2012).

Adotou-se no presente estudo a classificação regional utilizando o índice de vegetação para a classificação das fitofisionomias do bioma Cerrado, através de técnicas de sensoriamento remoto, dentre os quais os abordados por HUETE et al. (2002) e VALENTE, LATRUBESSE e FERREIRA (2013).

A classificação do bioma Cerrado adotada nesta pesquisa inclui as seguintes fitofisionomias: Campo Limpo, Campo Cerrado, Cerrado *Stricto Sensu*, Cerradão e Floresta de Galeria.

3.2 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto é um conjunto de técnicas que tem como finalidade básica a obtenção de informações sobre alvos na superfície terrestre (objetos, áreas, fenômenos), através do registro da interação da radiação eletromagnética com esses alvos. É realizado por sensores remotos (sem contato direto com os alvos estudados), geralmente embarcados a bordo de plataformas orbitais, satélites ou aviões e também pode ser realizado a nível de campo (MOREIRA, 2007).

As informações são transmitidas do alvo para o sensor por meio da Radiação Eletromagnética (REM), por ser esta a única forma de energia capaz de se propagar pela atmosfera ou também pelo vácuo.

Essas informações podem ser utilizadas para mapeamento, avaliação ou monitoramento de recursos naturais terrestres. Os dados amostrais coletados em campo podem ser utilizados para validar as informações extraídas por sensoriamento remoto e avaliar a precisão dos resultados finais.

3.2.1 Espectro eletromagnético

Quando Isaac Newton (1643-1727) investigou a natureza da luz branca em 1664, concluiu que ela é composta de diferentes cores, e que a passagem de luz branca através de um prisma forma um espectro de arco-íris. Newton demonstrou o espectro visível, que varia do vermelho numa extremidade, ao violeta na outra. Mais tarde, o astrônomo Friedrich Wilhelm Herschel (1728-1822) demonstrou a existência de Radiação Eletromagnética (REM) com comprimentos de onda além daqueles do espectro visível, as quais ele denominou de infravermelho (IV), ou seja, além do vermelho. Posteriormente, verificou-se que REM, também existe para além da extremidade violeta do espectro visível, e a esta forma de radiação foi dado o nome de ultravioleta. Outras formas de REM, como raios-X e ondas de rádio, foram descobertas mais tarde, sendo que todos os tipos de radiação se deslocam à velocidade da luz em forma de onda, e que podem propagar através do vácuo. O Sol é a principal fonte da REM que atinge a Terra e é produzida a partir de reações termonucleares em seu núcleo (MATHER, 2004).

O Espectro eletromagnético (EEM) consiste na representação dos diferentes tipos de REM, organizadas segundo as suas frequências ou comprimentos de onda (λ), grandezas inversamente proporcionais. O EEM é dividido em faixas espectrais ou bandas cujas

denominações estão relacionadas com a forma com que as radiações podem ser produzidas ou detectadas, e é representado na Figura 11.

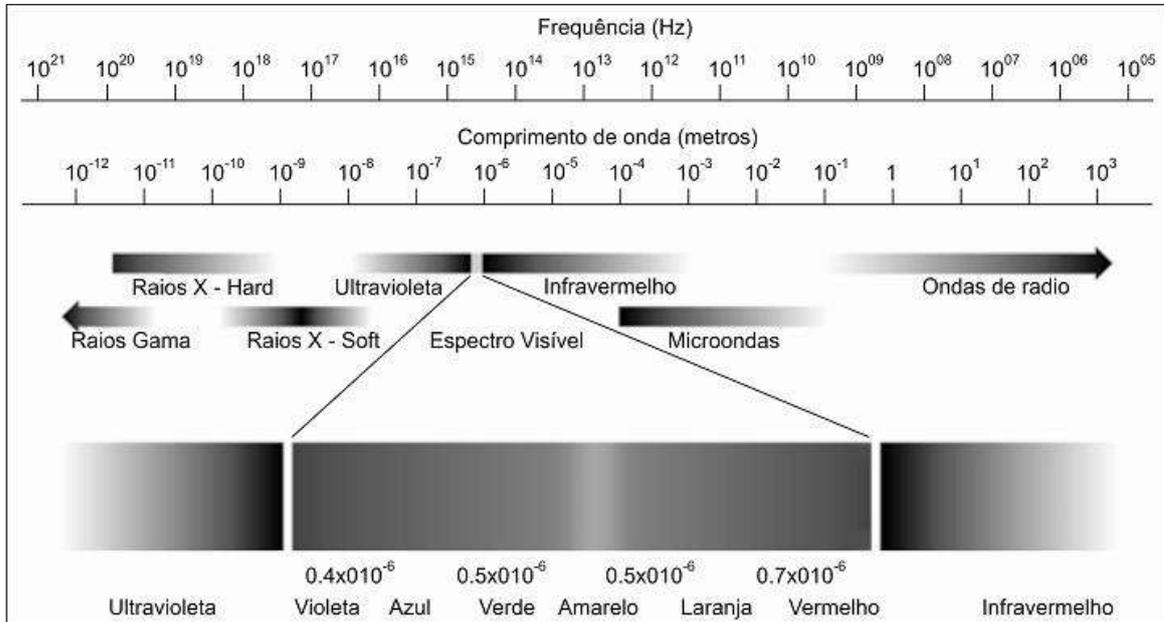


Figura 11 - Espectro Eletromagnético. Adaptado de GONZALEZ e WOODS (2002).

3.2.1.1 Intervalos do Espectro Eletromagnético utilizados em Sensoriamento Remoto

O Quadro 1 apresenta os intervalos de comprimentos de onda (λ) de cada tipo de REM utilizadas em Sensoriamento Remoto, incluindo algumas subdivisões, sendo que o intervalo das microondas é utilizado pelos satélites com sensores ativos (radar) e os demais pelos satélites com sensores passivos (óticos) (MOREIRA, 2007).

Quadro 1 - Intervalos do EEM utilizados em Sensoriamento Remoto.

Designação		Comprimento de onda (λ)
Microondas		1,0mm a 1,0m
Infravermelho	IV distante	3,000 μ m a 1,0mm
	IV médio	1,100 μ m a 3,000 μ m
	IV próximo	0,700 μ m a 1,100 μ m
Visível	Vermelho	0,620 μ m a 0,700 μ m
	Verde	0,500 μ m a 0,578 μ m
	Azul	0,390 μ m a 0,500 μ m

Todos os materiais da superfície da terra, sejam naturais ou artificiais com temperatura superior a zero absoluto (0° K), podem emitir, refletir, transmitir ou absorver seletivamente radiação eletromagnética (REM). Porém, para o Sensoriamento Remoto ótico a radiação solar é a principal fonte de dados (NOVO, 2010).

3.2.2 Processo de formação de imagens digitais

Uma imagem pode ser definida como o resultado da interação entre uma fonte de iluminação e um objeto que a reflete, transmite ou absorve parte da energia proveniente desta fonte, conforme Figura 12. Um sensor de imagem transforma a energia incidente em um sinal elétrico proporcional à energia luminosa captada utilizando filtros para seleccionar o tipo de sinal a ser registrado (GONZALEZ e WOODS, 2002).

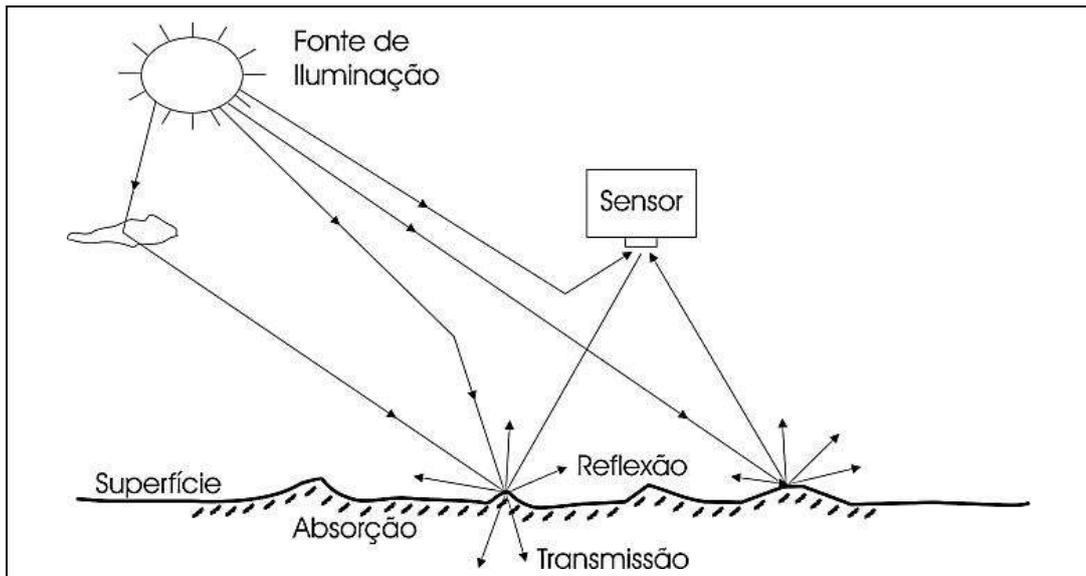


Figura 12 - Processo de captura de imagens. Fonte: Adaptado de GONZALEZ e WOODS (2002).

Usualmente são utilizados sensores matriciais, por exemplo, câmaras digitais com sensores CCD (*Charge Coupled Device*). A Figura 13 ilustra o processo de formação de imagens digitais.

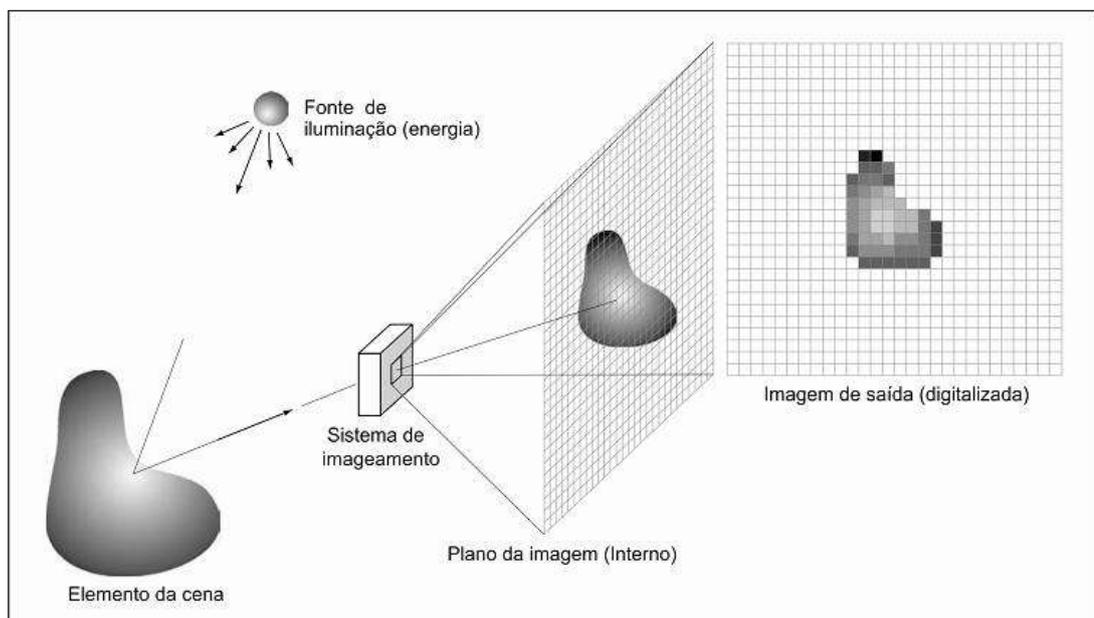


Figura 13 - Processo de formação de imagens. Fonte: Adaptado de GONZALEZ e WOODS (2002).

3.2.3 Anatomia das imagens digitais

Segundo GONZALEZ e WOODS (2002), uma imagem digital monocromática pode ser descrita como uma função bidimensional $f(x, y)$ de intensidade luminosa (Figura 14), onde (x, y) são coordenadas espaciais do ponto, e f é um valor proporcional ao brilho e representa o Nível de Cinza (NC), também denominado como Número Digital (ND). O valor de $f(x, y)$ corresponde à parte da intensidade luminosa $i(x, y)$, que é captada pelo sensor após a interação com o objeto, ou seja, a reflectância $r(x, y)$, conforme Equação 3.1.

$$f(x, y) = (x, y)r(x, y) \quad \text{Equação 3.1}$$

Sendo:

$$0 < i(x, y) < \infty \quad 0 < r(x, y) < 1 \quad 0 < f(x, y) < \infty$$

$$f(x, y) \approx \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix}$$

Figura 14 - Representação matemática de uma imagem. Fonte: GONZALEZ e WOODS (2002).

A função representada pela Equação 3.1, também pode ser vista como uma superfície no espaço, onde para cada ponto de coordenada $f(x, y)$ é atribuído um valor numérico para z (GONZALEZ e WOODS, 2002).

Uma imagem digital pode ser representada por uma matriz de $M \times N$ elementos de valores de amplitude, distribuídos em L níveis inteiros de cinza, normalmente expressos como uma potência de 2 ($L=2^k$), onde cada elemento da matriz corresponde a um *pixel* (*picture element*). Esta divisão do plano xy em uma grade denomina-se amostragem (GONZALEZ e WOODS, 2002).

O NC de cada *pixel* varia do preto (valor mínimo) ao branco (valor máximo), e representa a intensidade da energia eletromagnética (refletida ou emitida) medida pelo sensor. Sendo os valores mínimo e máximo, determinados de acordo com as características radiométricas do sensor.

Em ambiente computacional, cada elemento desta matriz tem sua localização definida em um sistema de coordenadas organizadas em linhas e colunas, representadas,

respectivamente por "x" e "y". Por convenção, a origem da grade (0,0) é sempre no seu canto superior esquerdo (GONZALEZ e WOODS, 2002), conforme as Figuras 15a e 15b.

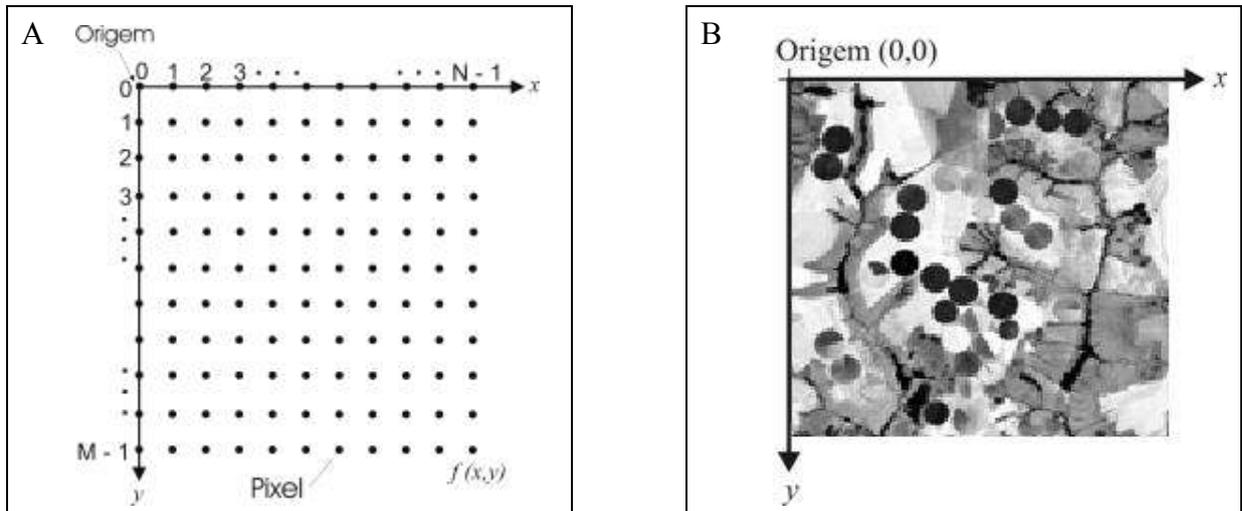


Figura 15 - Representação de uma imagem digital. Fonte: Adaptado de GONZALEZ e WOODS (2002). Em (a), Sistema de coordenadas de imagens. Em (b), Imagem em um sistema de coordenadas.

A Figura 16 mostra uma imagem monocromática e parte de sua correspondente matriz numérica, representando a forma pela qual essa imagem é utilizada no processamento digital de imagens.

A imagem que é projetada num sensor é uma imagem contínua, que pode tomar qualquer valor de amplitude, em qualquer ponto de sua área. A transformação em uma imagem digital implica considerar apenas um conjunto discreto de amplitudes num conjunto discreto de pontos (*pixels*).

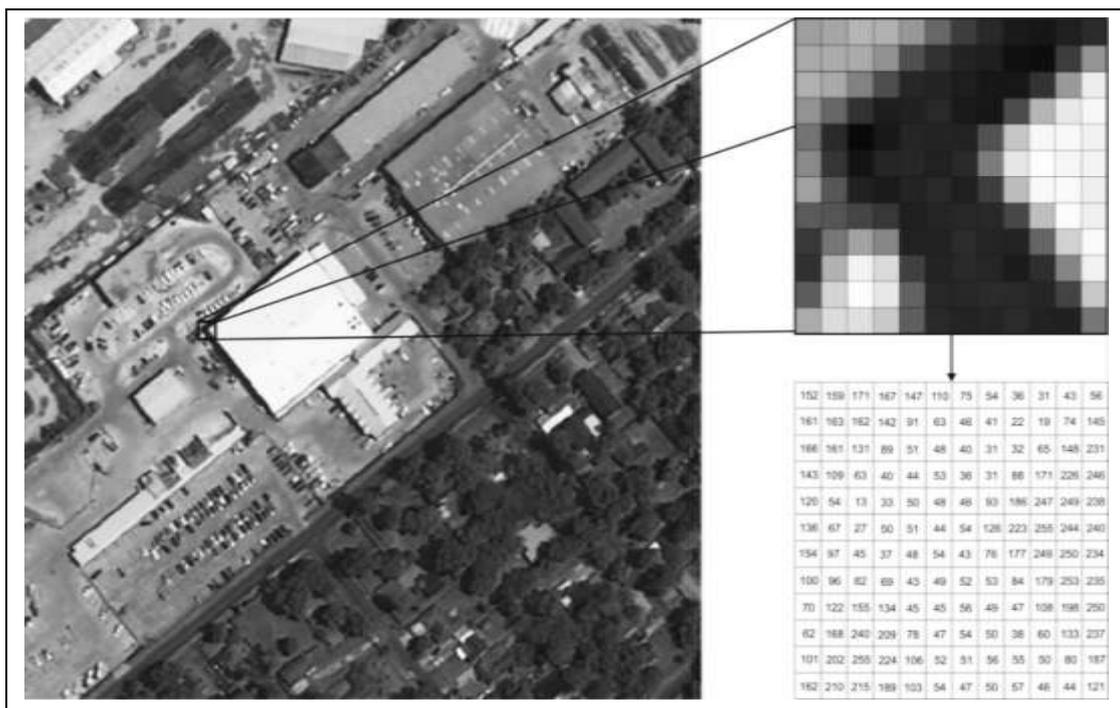


Figura 16 - Representação computacional de uma imagem.

3.2.4 Comportamento espectral

O sol emite radiação para Terra em forma de ondas eletromagnéticas que interagem com os alvos terrestres, como o solo, vegetação, água e outros, ocorrendo simultaneamente os processos de absorção, reflexão e transmissão. Dependendo das características físicas e químicas desses alvos, os três processos ocorrem com intensidades diferentes em diferentes regiões do espectro, determinando o seu comportamento espectral. Os métodos de sensoriamento remoto podem determinar a natureza dos alvos, com base no fato de que diferentes materiais são caracterizados por reflectâncias próprias em cada banda do espectro (MATHER, 2004).

O registro gráfico da reflectância ao longo do EEM fornece uma curva que descreve as propriedades radiométricas de um determinado alvo. E cada material possui uma curva típica denominada assinatura espectral e que constitui um padrão para identificação dos alvos de estudo por sensoriamento remoto (Figura 17) (IBGE, 2001).

As assinaturas espectrais da Figura 17 mostram as formas típicas dos materiais apresentados refletirem a REM sobre eles incidentes. Não podem ser generalizadas, uma vez que não foram fornecidas informações adicionais (condições geométricas e dos próprios alvos) adotadas quando foram elaboradas. Servem somente de base para formar uma ideia da reflexão destes alvos (NOVO, 2010).

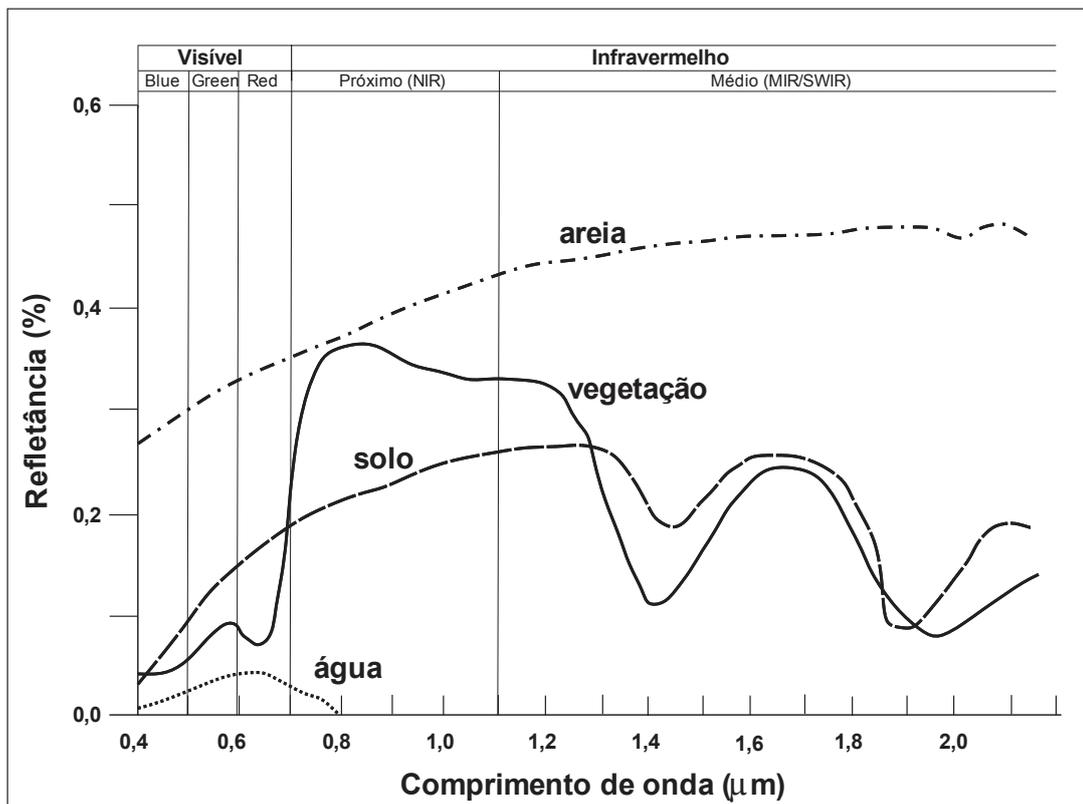


Figura 17 - Assinatura espectral de alvos. Fonte: Adaptado de NOVO (2010).

Sensores eletrônicos a bordo de satélites detectam a energia eletromagnética refletida e ou emitida pelos alvos terrestres, medem a quantidade e a converte para um número digital (ND) ou nível de cinza (NC). O sensor remoto é capaz de detectar e registrar essa energia refletida pelos alvos, apresentando seus registros em forma de dígitos, gráficos ou imagens (MOREIRA, 2007).

3.2.5 Imagens de Sensoriamento Remoto

As imagens produzidas pelos sensores eletrônicos dos satélites de Sensoriamento Remoto são constituídas de um conjunto de bandas individuais, cada uma registrando a intensidade da energia refletida pelos objetos da superfície terrestre em diferentes faixas do EEM. Devido a essa característica, são denominadas como imagens multiespectrais ou hiperespectrais, dependendo da quantidade de bandas geradas.

A intensidade da energia refletida pelos objetos determina a sua representação nas imagens em diferentes NC. A Figura 18 ilustra a representação de uma imagem de Sensoriamento Remoto onde são registradas as intensidades da energia recebida por um *pixel* e o NC de cada uma das sete bandas individuais.

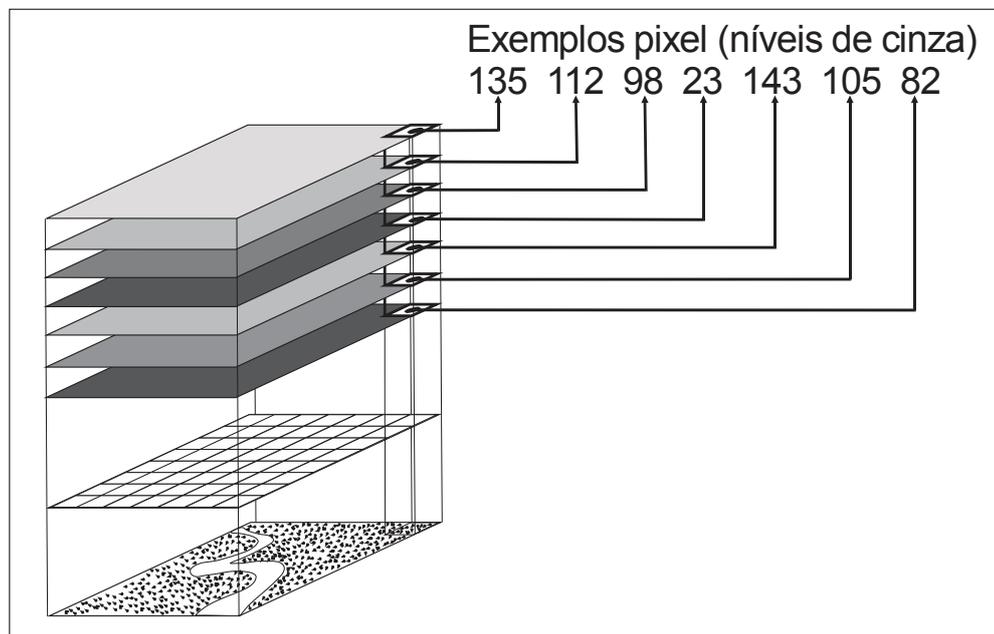


Figura 18 - Representação de uma imagem de Sensoriamento Remoto.

Cada sensor é projetado para fornecer dados em um determinado nível de detalhamento, que é determinado pelas suas resoluções espacial, espectral e radiométrica, ilustradas na Figura 19.

Nas imagens de Sensoriamento Remoto, o NC corresponde à média da intensidade da energia eletromagnética refletida ou emitida pelos diferentes materiais presentes na área da

superfície terrestre representada pelo *pixel*. Para um mesmo sensor remoto, cada *pixel* representa sempre uma área com as mesmas dimensões na superfície terrestre, que é a função da resolução espacial do sensor (MOREIRA, 2007)

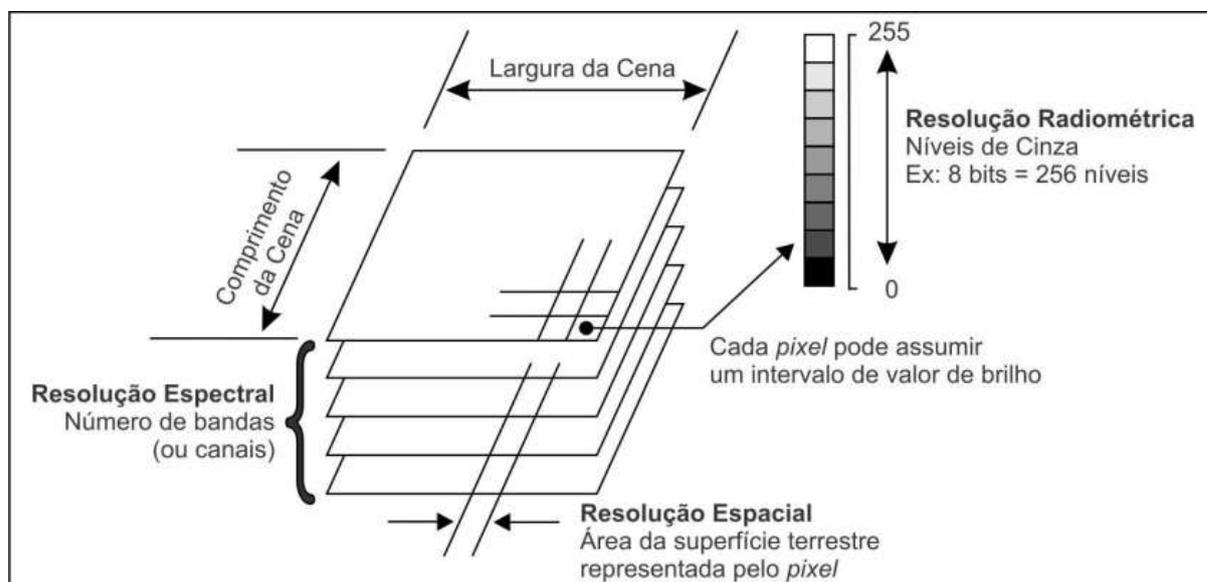


Figura 19 - Resoluções de imagens de Sensoriamento Remoto.

Outra importante característica do sensor é a sua resolução temporal que identifica o intervalo de tempo para se obter nova imagem da mesma área. Essas resoluções são detalhadas nos tópicos seguintes.

3.2.5.1 Resolução Espacial

Os sensores dos satélites de Sensoriamento Remoto são projetados para fornecer dados a um determinado nível de detalhe espacial. A resolução espacial de uma imagem pode ser definida como a habilidade de um sensor em distinguir pequenos detalhes, pois quanto melhor a resolução de um sistema sensor mais detalhes de uma imagem serão visíveis para o analista humano (IBGE, 2001; NOVO, 2010).

A resolução espacial nominal de um sensor pode ser descrita como a área determinada pela projeção de um detector, sobre superfície terrestre a uma dada altitude, num certo instante de tempo. Esta área é determinada pela altitude do sistema sensor a bordo do satélite e outros parâmetros como o IFOV (*Instantaneous Field Of View*). O IFOV pode ser medido em relação ao ângulo de incidência (IFOV angular) ou em relação a uma distância no terreno (IFOV linear) (BOGGIONE, 2004) (Figura 20).

Entretanto, a resolução espacial não estabelece o tamanho do menor objeto que pode ser detectado na imagem. Objetos menores que a resolução espacial podem ser percebidos nas

imagens, embora não possam ser observados com boa definição e somente com informações adicionais, podem ser identificados com precisão (NOVO, 2010).

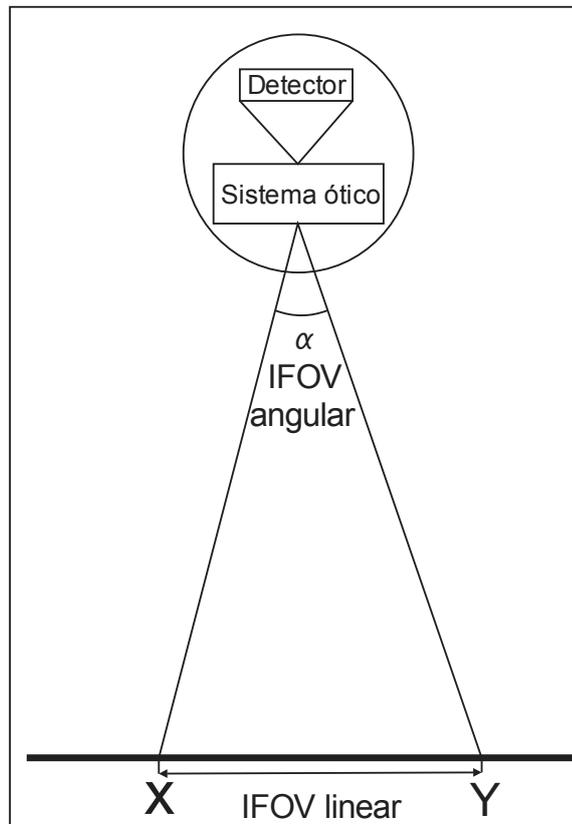


Figura 20 - IFOV - Campo de visada instantâneo.

Na Figura 21 podem ser observadas imagens da mesma área geográfica, captadas em diversas resoluções espaciais.



Figura 21 - Imagens do Sensor ETM+ Landsat-7 do município de Aruanã-Goiás, em diferentes resoluções espaciais. Em (a), Banda Pancromática com 15 metros. Em (b), Bandas Multiespectrais com 30 metros. Em (c), Banda Termal com 60 metros. Fonte: Nasa (2013).

3.2.5.2 Resolução Espectral

A resolução espectral é um conceito relacionado às imagens multiespectrais de Sensoriamento Remoto. É definida pela largura do intervalo de comprimento de onda coberto em cada banda e também pelo número de bandas espectrais para os quais o sensor é sensível. Quanto maior o número de bandas e menor a largura do intervalo, melhor é a resolução espectral de um sensor. Sendo que, cada intervalo do espectro ao qual o sensor é sensível define uma banda espectral.

Os satélites imageadores de Sensoriamento Remoto são projetados para captar imagens em diferentes faixas do EEM. A Figura 22 mostra o exemplo de uma imagem multiespectral do sensor ETM+ Landsat7, captada em oito faixas espectrais distintas.

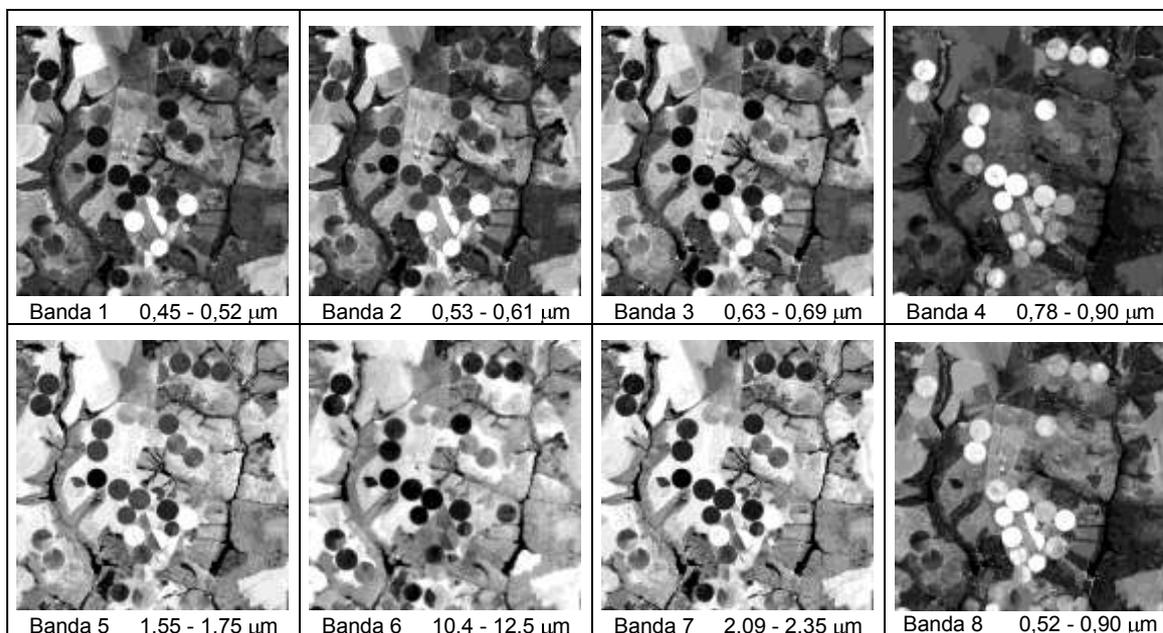


Figura 22 - Bandas espectrais do sensor ETM+ Landsat-7 do município de Cristalina-Goiás. Fonte: Nasa (2013).

Quanto maior o número e mais estreitas forem às bandas individualmente, mais informações se têm sobre a distribuição da energia refletida pela cena e melhor será a resolução espectral, isto é, a curva de resposta espectral de cada alvo pode ser conhecida em maiores detalhes.

O constante aperfeiçoamento dos sensores remotos permitiu a geração e utilização de dados com resoluções espectrais extremamente elevadas, denominados como dados hiperespectrais. Esses dados consistem de observações coletadas simultaneamente em um acentuado número de bandas espectrais extremamente estreitas nas regiões do visível e infravermelho, a exemplo de sensor AVIRIS com 224 bandas.

3.2.5.3 Resolução Radiométrica

A resolução radiométrica define a sensibilidade do sensor para diferenciar um sinal e gravar o fluxo radiante (emitido ou refletivo). É denominada pela quantidade de *bits* destinado armazenar as informações de um *pixel*, ou seja, define o intervalo de NC, mínimo e máximo que um *pixel* poderá assumir. Quanto maior a quantidade de *bits*, maior será o intervalo de NC e maior a resolução radiométrica (NOVO, 2010).

O Quadro 2 mostra alguns exemplos desta relação. Calcula-se o valor do NC em função do número de dígitos binários (*bits*) utilizados na definição de uma imagem.

Quadro 2 - Exemplos de quantidades de NC.

Nº de <i>bits</i>	Quantidade de NC
1	$2^1 = 2$ (preto e branco)
2	$2^2 = 4$
8	$2^8 = 256$ (1 <i>byte</i>).
11	$2^{11} = 2.048$
16	$2^{16} = 65.536$

A resolução radiométrica está diretamente relacionada com o tamanho dos arquivos de imagem. Para imagens com resolução de 8 *bits*, cada *pixel* é armazenado em um *byte*, imagens com resolução de 16 *bits* em dois *bytes*, e assim sucessivamente. Uma única banda de uma cena inteira do sensor TM do Landsat-5 (6200 linhas por 6600 colunas) resulta em um arquivo de aproximadamente 51 *Megabytes* (MB). A mesma cena do satélite Landsat-8 com resolução radiométrica de 16 *bits*, resulta em um arquivo de aproximadamente 120 MB.

A Figura 23 mostra uma imagem em três diferentes resoluções radiométricas. Neste exemplo pode ser observado um maior nível de detalhamento da imagem quanto maior é a resolução radiométrica.

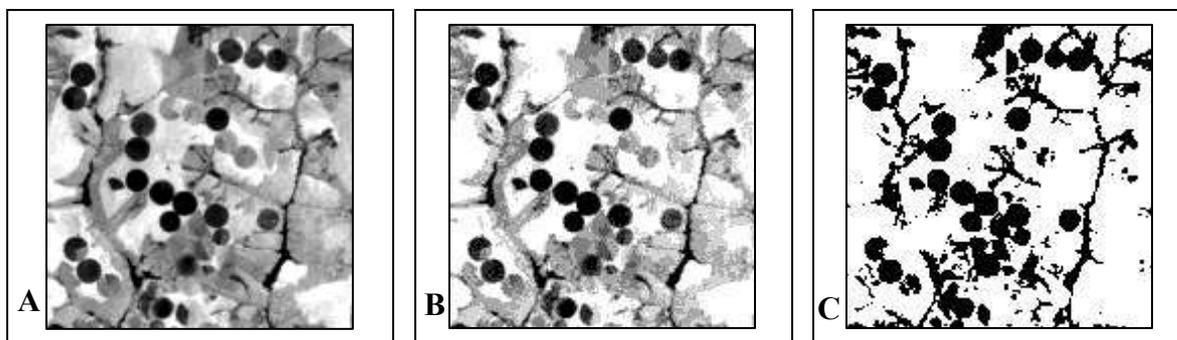


Figura 23 - Imagem do município de Cristalina-Goiás em diferentes resoluções radiométricas. Em (a), Imagem de 8 bits - 256 NC. Em (b), Imagem de 4 bits - 16 NC. Em (c), Imagem de 1 bit - 2 NC. Fonte: Nasa (2013).

3.2.5.4 Resolução Temporal

A resolução temporal indica o intervalo de tempo em dias que o sensor é capaz de obter imagens de uma mesma área geográfica da superfície terrestre. Também pode ser referida como periodicidade ou repetitividade. Quando a tomada de cena é realizada verticalmente abaixo de sensor, ou seja, no nadir, é denominada como periodicidade. No entanto, existem sensores com capacidade de imageamento fora da posição do nadir, na posição lateral, formando um certo ângulo com a vertical, o que diminui o intervalo de tempo para a revisita da mesma área da superfície terrestre. Esta capacidade é referida como repetitividade (IBGE, 2001).

3.2.6 Satélites de Sensoriamento Remoto

O uso de satélites artificiais voltados para o estudo dos recursos naturais terrestres, teve início na década de 1970, quando foi colocado em órbita o primeiro engenho com capacidade de coletar dados sobre os recursos naturais renováveis e não-renováveis da superfície do planeta. Esses satélites são classificados como satélites de observação da Terra. O primeiro satélite dessa categoria foi lançado no início no ano de 1972, quando os norte-americanos colocaram em órbita o satélite Earth-1, posteriormente rebatizado por Landsat-1 (MOREIRA, 2007).

Após o lançamento desse primeiro satélite, vários outros, com sistemas sensores cada vez mais aprimorados, foram desenvolvidos e colocados na órbita da Terra. Na mesma concepção do Landsat-1, até os dias atuais, foram colocados em órbita mais seis satélites Landsat.

3.2.6.1 Satélite Landsat

A série Landsat (*Land Remote Sensing Satellite*), iniciou em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1 (Landsat-1). Ela teve sequência com os Landsat 2, 3, 4, 5, 7 e 8. O principal objetivo do sistema Landsat foi o mapeamento multispectral em alta resolução da superfície da Terra. É o sistema orbital mais utilizado no mapeamento da dinâmica espaço-temporal do uso das terras e em todas as aplicações decorrentes. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) recebe de forma contínua imagens de todo o território nacional, desde os anos setenta, constituindo num enorme e único acervo de dados sobre o país.

Dessa série o satélite mais ativo foi o Landsat 5 que operou ininterruptamente de março/1984 a novembro/2011, e carregava a bordo o sensor TM (*Thematic Mapper*) que

gerou imagens de uma faixa de 170 km no sentido norte-sul, por 183 km a leste-oeste, com resolução radiométrica de 8 *bits*, resolução temporal de 16 dias e era composto por 7 bandas espectrais (NASA, 2013), suas principais características são descritas no Quadro 3.

Quadro 3 - Principais características do Landsat 5

	Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (m)
<i>Thematic Mapper (TM)</i>	<i>1 - Blue</i>	0.45 - 0.52	30
	<i>2 - Green</i>	0.52 - 0.60	30
	<i>3 - Red</i>	0.63 - 0.69	30
	<i>4 - NIR</i>	0.76 - 0.90	30
	<i>5 - SWIR 1</i>	1.55 - 1.75	30
	<i>6 - Thermal</i>	10.40 -12.50	120
	<i>7 - SWIR 2</i>	2.08 - 2.35	30

Para a continuidade o programa, a NASA lançou o Landsat 8 em dezembro de 2013, possibilitando o cruzamento de dados de mais de 40 anos, permitindo análises de séries temporais de grande importância para os mais diversos tipos de aplicações.

O Landsat-8 apresenta dois novos sensores: o sensor multiespectral OLI e o sensor termal TIRS, ambos apresentando melhorias na resolução espectral quando comparadas aos sensores como o TM e ETM+. Duas novas bandas espectrais foram adicionadas: a *new coastal* (banda 1), projetada especificamente para o estudo das zonas costeiras, e uma nova banda na faixa do infravermelho médio (banda 9), específica para a detecção de nuvens *cirrus*. Foi adicionada também, uma banda de Garantia de Qualidade (Banda QA), que fornece informações sobre a presença de nuvens, água e neve nas imagens. O sensor termal TIRS gera duas bandas espectrais na faixa espectral do infravermelho distante, no intervalo antes coberto por uma única banda nos sensores TM e ETM+. Algumas bandas apresentam estreitamento na faixa de cobertura espectral, principalmente as bandas do infravermelho. Essas adições provocaram mudanças nos intervalos espectrais dos canais de todas as bandas (USGS, 2013).

A melhoria na resolução radiométrica é outra inovação significativa do Landsat-8, ambos os sensores proporcionam um melhor desempenho radiométrico, quantificando a REM captada, em uma faixa dinâmica de 12 bits (4096 níveis de cinza), possibilitando uma melhor caracterização radiométrica dos alvos da imagem (USGS, 2013).

3.2.7 Processamento digital de imagens

Com o aumento da quantidade de satélites em órbita da Terra, a partir da década de 1980, ocorreu um incremento expressivo do volume de dados coletados, tornando praticamente impossível o tratamento desses dados por métodos convencionais de interpretação visual. Isso foi o grande estímulo para o desenvolvimento de métodos de processamento digital de imagens (PDI), tendo em vista as limitações impostas ao analista, na utilização de técnicas de interpretação visual, usualmente, empregadas no início da era orbital para produtos aerofotográficos e imagens (MOREIRA, 2007).

O avanço tecnológico na área da informática, que possibilitou o aumento na capacidade de processamento e armazenamento de dados e a evolução dos sistemas operacionais, foi outro fator que contribuiu significativamente para o desenvolvimento de métodos de processamento de imagens orbitais.

O processamento digital de imagens (PDI) tem como objetivo principal a extração de informações de alvos terrestres, por meio da separação em classes temáticas, de forma automática de todos os *pixels* contidos em determinada cena, com base nas diferenças de NC ou da reflectância aparente. O PDI compõe-se de um conjunto de técnicas computacionais para a análise e a manipulação de imagens, com a finalidade de identificar e extrair informações sobre objetos do mundo real, transformando as informações radiométricas nelas contidas possibilitando a sua correta interpretação. Nos tópicos seguintes são apresentadas as principais técnicas de PDI utilizadas neste estudo.

3.2.7.1 Correção geométrica

Correções geométricas são necessárias nas imagens de satélite devido a distorções introduzidas durante o processo de aquisição das imagens. Uma das principais distorções é causada pelo movimento relativo entre a Terra e o satélite, enquanto a Terra gira de leste para oeste, o satélite gira de norte para o sul (Figura 24). Outras fontes de distorções importantes são a curvatura da Terra e os erros que são causados pela visada fora do nadir, que provocam distorções no tamanho dos *pixels*. A Correção geométrica corrige essas distorções e ajusta a imagem a um sistema pré-estabelecido de coordenadas e efetua a transformação dos dados de sensoriamento remoto. As coordenadas dos *pixels* de uma imagem são associadas a um sistema de projeção cartográfica (MATHER, 2004).

Existem duas técnicas para corrigir os vários tipos de distorção geométrica de uma imagem digital de sensoriamento remoto. A primeira técnica modela a natureza e a magnitude das fontes de distorção e utiliza esses modelos para estabelecer uma fórmula de correção. Porém, esta técnica só é eficaz quando os tipos de distorção são bem caracterizados. A segunda técnica também denominada mapeamento direto, estabelece uma relação matemática entre as coordenadas de imagem (linha e coluna) e as coordenadas geográficas (latitude e longitude). A vantagem da segunda técnica é não precisar conhecer as fontes e os tipos de distorção causados pelo sensor (RICHARDS e JIA, 2006).

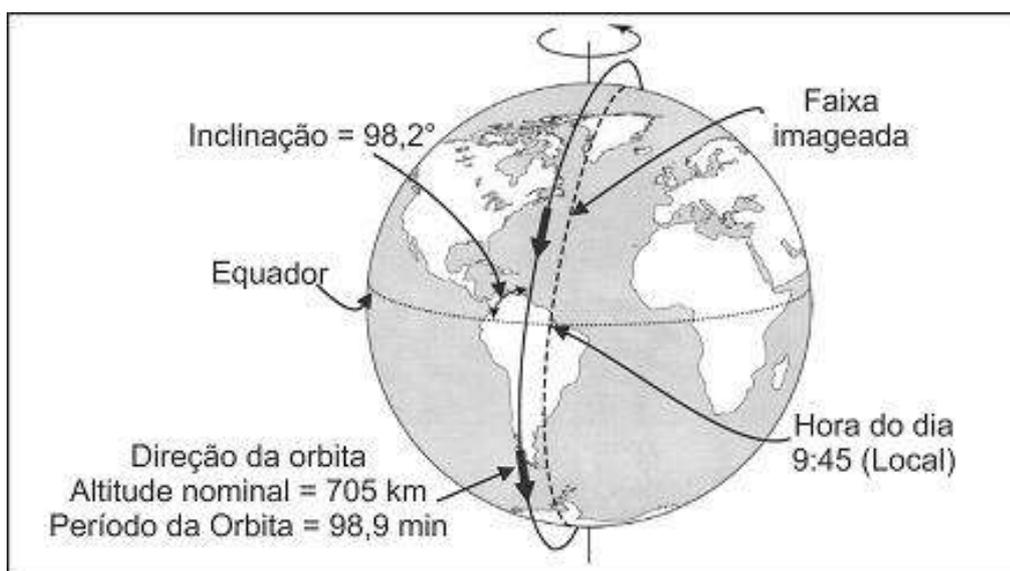


Figura 24 - Movimento relativo entre o satélite e a Terra. Adaptado de MATHER (2004).

3.2.7.2 Recorte de imagens

O recorte da imagem consiste em delimitar a região de estudo (por exemplo, um limite municipal) através do uso de uma máscara. Os *pixels* da imagem que não fazem parte da região de estudo, passam a ser desconsiderados a partir desse procedimento.

3.2.7.3 Mosaico

A operação de mosaico é necessária quando a área em estudo está localizada em duas ou mais cenas do satélite e o estudo requer que se juntem essas cenas em um só arquivo de imagem. A junção de duas ou mais imagens exige um trabalho de ajustamento geométrico e de equalização da tonalidade radiométrica das imagens para evitar discontinuidades e deve ser efetuado por meio do uso da técnica de equalização de histogramas, que agrupa duas ou mais imagens considerando-se uma delas como sendo a imagem referência. Essa técnica está disponível nos principais *softwares* de processamento digital de imagens.

3.2.7.4 Composição colorida

Bandas de imagens multiespectrais de satélite podem ser combinadas com a finalidade de melhorar a interpretação dos padrões tonais e de textura das imagens. Diferentes composições coloridas podem destacar nessas imagens, alvos de interesse de acordo com o estudo desejado.

Os equipamentos para visualização das imagens, como os monitores de vídeo, utilizam o sistema de cores RGB (*Red, Green, Blue*) baseado nas cores primárias. Nesse sistema somente três bandas de cada vez podem ser visualizadas (MOREIRA, 2007).

A Figura 25 mostra a relação entre as curvas espectrais dos principais alvos do Sensoriamento Remoto, com as bandas que compõem uma imagem multiespectral TM Landsat-5 (exceto a banda 6). Essa relação determina as cores que representarão os alvos nas composições no sistema de cores RGB.

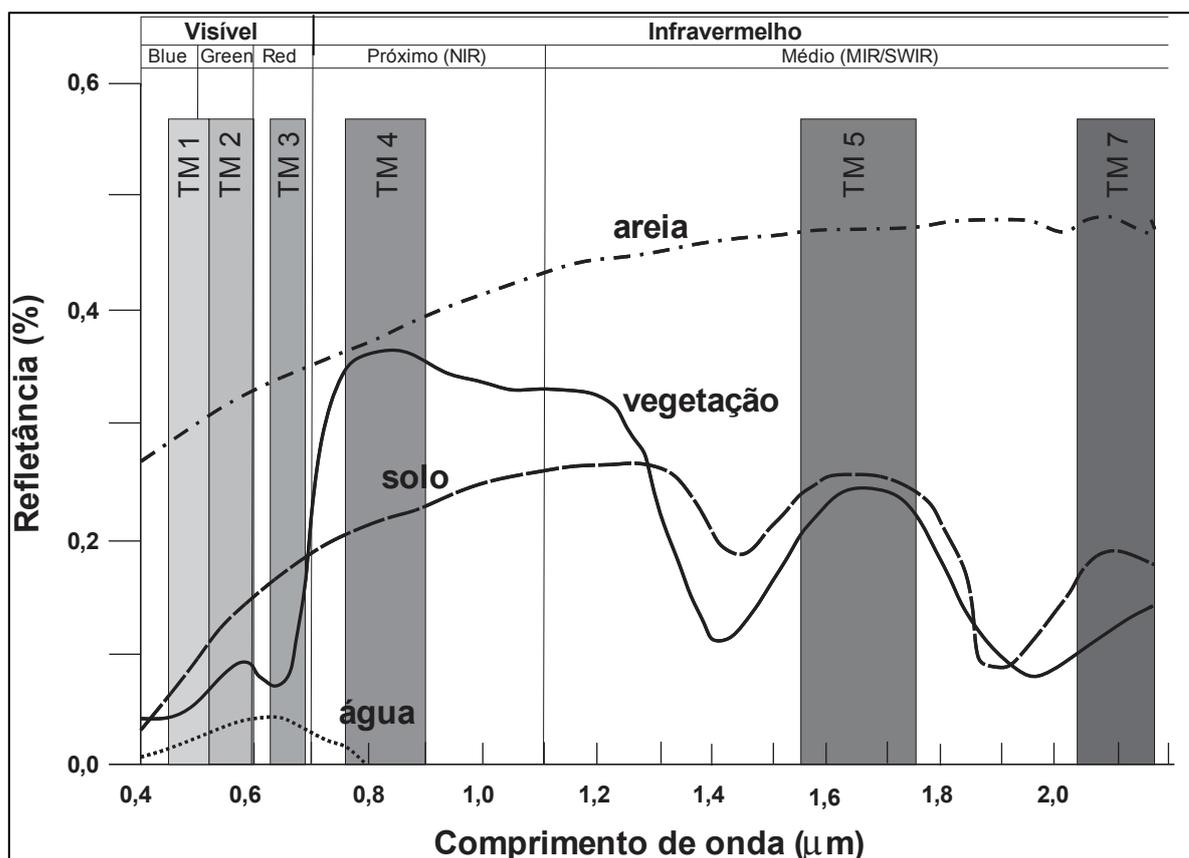


Figura 25 - Bandas TM e curvas espectrais dos principais alvos do Sensoriamento Remoto.
Fonte: Adaptado de NOVO (2010).

Essas composições são nomeadas de acordo com a sequência de números de banda associadas aos três canais de cores (R, G e B). Numa composição RGB-342, a banda 3 (vermelho) foi associada ao canal R, a banda 4 (infravermelho próximo) no canal G e a banda 2 (verde) no canal B.

A Figura 26 mostra duas composições coloridas da mesma cena. A Figura 26a mostra a cena em composição natural RGB-321, mais próxima da percepção da visão humana, enquanto que a Figura 26b mostra a composição RGB-345 em falsa cor, evidenciando em tons de verde, a vegetação com maior vigor, e em tons de magenta a vegetação seca.

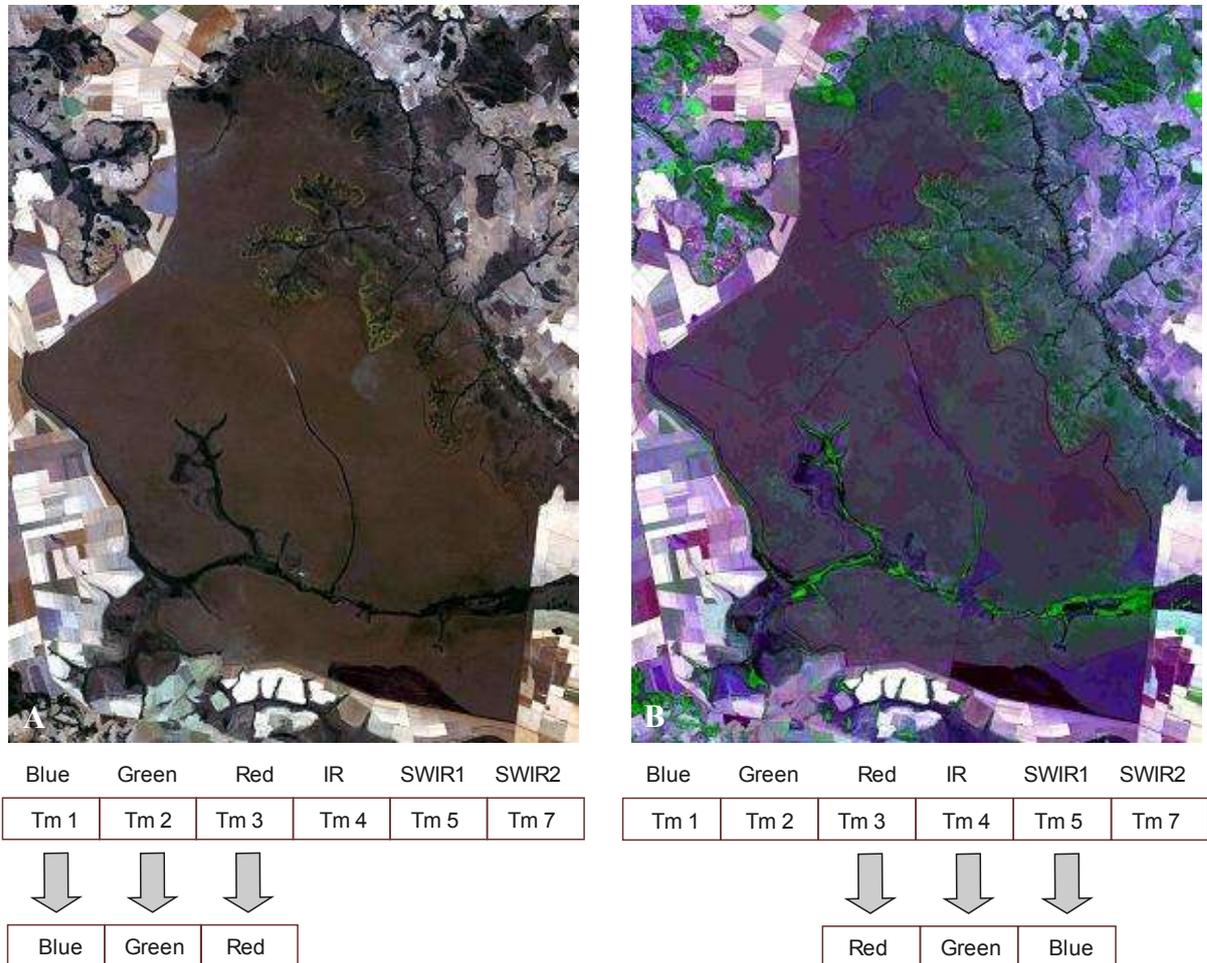


Figura 26 - Composições coloridas de bandas do sensor TM Landsat-5. Em (a), RGB-321 em cor natural. Em (b), RGB-345 em falsa cor.

3.2.7.5 Distorções radiométricas

Os dados das imagens de sensoriamento remoto representam valores de intensidade de energia eletromagnética refletida pelos objetos. O sensor detecta a radiação refletida pelos objetos e produz um sinal eletrônico proporcional à radiação incidente. Esse sinal eletrônico é convertido em um número digital (ND) e atribuído a cada *pixel* da imagem. Os ND são representações de valores de radiância correspondentes à área imageada. Cada *pixel* da imagem contém um ND inteiro que representa a radiância média da área correspondente (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Os ND variam de acordo com a calibração do sensor. Cada banda espectral do sensor possui um detector com determinadas amplitudes de radiância. Portanto, a comparação direta de ND de diferentes bandas pode ocasionar erros. Mesmo que o *pixel* tenha o mesmo valor em duas ou mais bandas, ele poderá estar representando níveis de radiância muito diferentes. Além disso, os efeitos atmosféricos no momento da aquisição da imagem também interferem na radiação detectada pelo sensor, impossibilitando a comparação direta de ND de diferentes datas (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Um estudo multiespectral ou multitemporal necessita que os ND sejam convertidos para parâmetros físicos como a reflectância. A conversão do ND em reflectância permite a caracterização espectral do objeto em estudo. Essa conversão visa normalizar as condições de aquisição das imagens, assim, as variações nos valores das imagens correspondem às variações nas propriedades de reflectância do objeto. Essa transformação permite a comparação de dados de imagens de diferentes bandas ou sensores (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

A conversão dos ND para valores físicos de reflectância exige conhecimento das características dos sensores e das condições atmosféricas do momento da aquisição da imagem. Os parâmetros de calibração radiométrica do sensor permitem transformar os ND em valores de radiância e reflectância. Esses parâmetros são definidos antes do lançamento do satélite e não são atualizados, o que dificulta a determinação de valores precisos. Além dos parâmetros de calibração, é preciso obter um modelo atmosférico que relacione a radiância detectada pelo sensor com a radiância real dos objetos na superfície. Devido à dificuldade de se obter a calibração precisa e algoritmos necessários à correção, outros métodos são utilizados como a utilização dos valores de radiância e reflectância aparente (MENESES e NETTO, 2001).

Cada sensor tem a capacidade de registrar um valor de radiância espectral máxima (L_{\max}) e mínima (L_{\min}). Esses valores permitem a conversão do ND em radiância aparente (L_0), isto é, o brilho medido em nível orbital, não é necessariamente o brilho do objeto observado (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010). A conversão é feita pela da Equação 3.2.

$$L_0 \lambda = L_{\min\lambda} + L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda} * QCAL / QCAL_{\max} \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde: $L_0(\lambda)$ = radiância aparente
 $L_{\min\lambda}$ = radiância espectral mínima
 $L_{\max\lambda}$ = radiância espectral máxima
 $Qcal$ = número digital a ser convertido
 $Qcal_{\max}$ = número digital máximo (depende do sensor)

Os valores em radiância aparente já podem ser comparados, mas por depender da intensidade de radiação proveniente da fonte, não é o valor mais apropriado para analisar as propriedades espectrais do objeto (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010). É possível, então converter a radiância aparente em reflectância aparente, conforme a equação 3.3.

$$\rho_a = \frac{\pi * L_0 \lambda * d^2}{E_{sun} \lambda * \cos \theta}$$
Equação 3.3

onde: ρ_a = reflectância aparente
 $L_0(\lambda)$ = radiância aparente
 d = distância Sol - Terra em unidades astronômicas
 $E_{sun}(\lambda)$ = irradiância média do sol no topo da atmosfera
 θ = ângulo solar zenital

Os valores de reflectância aparente permitem realizar operações aritméticas e comparar dados de imagens diferentes. Porém, não permitem caracterizar a reflectância espectral de um objeto na superfície, já que os valores aparentes incluem os efeitos da atmosfera. Para se obter a reflectância de superfície é preciso corrigir o espalhamento atmosférico da imagem.

3.2.7.6 Correção atmosférica

A atmosfera interfere na resposta espectral de cada alvo captado pelo sensor. Ela pode causar o espalhamento ou a absorção da luz, sendo o espalhamento o principal efeito. A diminuição ou aumento do brilho e a presença de névoa, com perda de nitidez são as principais evidências desses efeitos sobre a imagem (LATORRE et al., 2002).

Essa interferência da atmosfera dificulta a distinção das feições na imagem, portanto, é importante minimizá-la. A correção dessas interferências se faz necessária principalmente quando se pretende comparar imagens de diferentes períodos, consequentemente, adquiridas sob diferentes condições atmosféricas. É importante atenuar o efeito da atmosfera no valor dos *pixels* de cada imagem, a fim de torná-los comparáveis.

O espalhamento atmosférico é a difusão imprevisível da radiação pelas partículas da atmosfera, sem que haja mudança no comprimento de onda. Ele se difere em seletivo e não-seletivo. No caso do espalhamento seletivo, existem dois modelos: Rayleigh e Mie.

O espalhamento Rayleigh é causado por moléculas de gases que compõem a atmosfera. São partículas menores que o comprimento de onda incidente (λ). Seu efeito é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda, isto é, sua intensidade é maior nas regiões do EEM com menor comprimento de ondas e diminui à quarta potência do comprimento de onda para as outras regiões do espectro (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

O espalhamento Mie é causado por partículas de fumaça ou poeira com diâmetro maior ou igual ao comprimento de onda incidente. Seu efeito é inversamente proporcional à primeira potência do comprimento de onda. Ele também afeta mais as regiões do EEM com menor comprimento de onda, mas não tão intensamente como o espalhamento Rayleigh (CHAVEZ, 1988).

O espalhamento não seletivo é causado por partículas muito maiores que o comprimento de onda, com raio interno maior que $10\mu\text{m}$, como, por exemplo, gota de chuva. A intensidade desse tipo de espalhamento é a mesma em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético (CHAVEZ, 1988).

Para reduzir os efeitos da atmosfera na imagem, CHAVEZ (1988) criou um método conhecido como subtração do *pixel* escuro (DOS - *Dark Object Subtraction*). O método DOS parte do princípio de que existem alvos escuros na imagem que deveriam apresentar um ND muito baixo, por exemplo, sombra ou água limpa. Entretanto, o valor do *pixel* escuro é, geralmente, superior ao esperado devido ao espalhamento atmosférico. Subtrair os valores mínimos encontrados em cada banda da imagem pode superestimar a correção. Então, foi proposto um modelo para cálculo do espalhamento em cada banda, partindo do número digital de menor valor, encontrado na banda de menor comprimento de onda. Esse valor é utilizado para identificar a condição atmosférica na obtenção da imagem, o que determina o expoente do modelo de espalhamento relativo. Além de considerar os modelos de espalhamento Mie e Rayleigh, o modelo relativo considera outras condições atmosféricas mais próximas do real: muito limpa (λ^{-4}), limpa (λ^{-2}), moderada (λ^{-1}), com névoa ($\lambda^{-0,7}$) e com muita névoa ($\lambda^{-0,5}$). A correção pelo método DOS é feita através do cálculo de transformação do ND em valor de radiância para cada banda espectral. Esse cálculo depende dos valores máximos e mínimos de radiância, que variam de banda para banda, do ângulo de elevação solar e da distância Terra-sol, que variam de acordo com a data da imagem (GÜRTLER et al., 2005).

3.2.7.7 Índice de vegetação

A reflectância é a propriedade de um determinado objeto em refletir a REM sobre ele incidente e é expressa através dos chamados fatores de reflectância que podem variar de acordo com as características físicas, químicas e biológicas do objeto (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Nas imagens digitais a reflectância é medida para cada um dos detectores em uma determinada banda espectral. A medida desse fator de reflectância é representada individualmente para cada *pixel*, por um ND que é o resultado de uma discretização dessa reflectância em uma escala de NC, seja de 8 *bits* (2^8 ou 256 NC) ou 16 *bits* (2^{16} ou 65.536 NC), de acordo com a resolução radiométrica da imagem. Valores elevados de reflectância medidos para determinada banda produzirão um padrão claro dos objetos presentes nessa banda e valores baixos produzirão um padrão escuro na banda.

A quantidade de radiação absorvida pelos pigmentos contidos na folha é utilizada como fonte de energia no processo de fotossíntese e altera estruturas moleculares (fotoconversão) ou acelera reações (como a foto-oxidação das xantofilas). A energia refletida pelas folhas é afetada pelo conteúdo de água, senescência, posição nodal e condições de iluminação. As porções de energia absorvida, refletida ou transmitida, variam de acordo com a espécie ou com as condições ambientais em que a planta está submetida (MOREIRA, 2007).

A radiância na faixa espectral do vermelho exhibe uma relação inversa não-linear com a biomassa verde, enquanto a radiância na faixa do infravermelho próximo exhibe uma relação também não-linear, mas direta. Como mencionado anteriormente, a radiância refletida por um dossel, na região espectral do visível, resulta de um processo dominante de absorção, ocasionado pelos pigmentos fotossintetizantes. Assim, essa radiância refletida é inversamente proporcional à quantidade de clorofila (principalmente) presente no dossel, sendo, portanto, sensível à atividade fotossintética (PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

A biomassa verde reflete cerca de 50% da radiação no infravermelho próximo, e devido à intensa atividade fotossintética, grande parte da radiação visível é absorvida e apenas cerca de 8% é refletida (Figura 27a). Já a biomassa seca apresenta um aumento na absorção da radiação no infravermelho próximo (60%) e a atividade fotossintética é menos intensa, e por consequência a absorção de radiação visível é menor, refletindo cerca de 30% da radiação visível incidente (Figura 27b). O comportamento espectral nessas duas faixas permite a identificação da vegetação e qual o seu estado hídrico através da interpretação digital de imagens de Sensoriamento Remoto.

Explorando as características de uma imagem multiespectral e o comportamento espectral de determinados componentes da superfície terrestre, novas bandas podem ser geradas através de transformações radiométricas. Essas novas bandas podem realçar informações que não são muito visíveis nas bandas originais.

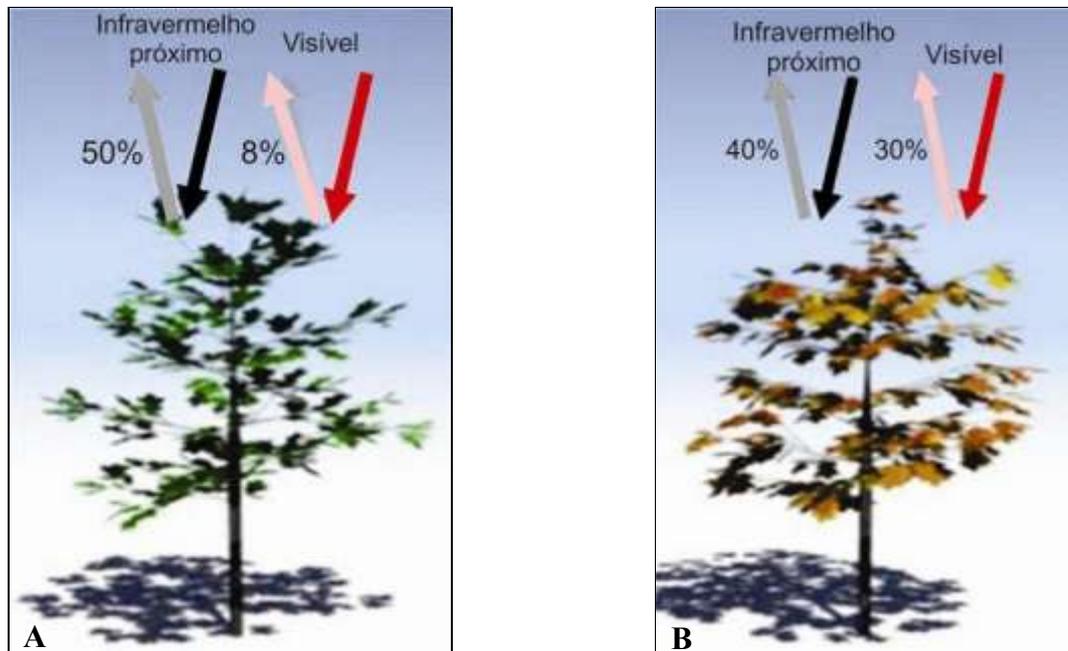


Figura 27 - Comportamento espectral da vegetação no infravermelho próximo e visível. Em (a), Vegetação com biomassa verde. Em (b), Vegetação com biomassa seca.

Para o estudo da vegetação, o índice de vegetação é uma das transformações radiométricas mais utilizadas. Esse índice está relacionado a parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como o índice de área foliar e biomassa (MENESES e NETTO, 2001; PONZONI e SHIMABUKURO, 2010).

Índices de Vegetação possuem uma extensa gama de aplicações. Várias equações foram desenvolvidas em diversos níveis de complexidades. O índice mais simples é o RVI (*Ratio Vegetation Index*), que é a razão direta entre a banda do infravermelho próximo com a banda do vermelho. O mais complexo é o PVI (*Perpendicular Vegetation Index*) que leva em conta a emissividade do solo. O índice mais utilizado é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), que é a normalização da razão entre as bandas do infravermelho próximo com a banda do vermelho, segundo a Equação 3.4.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Equação 3.4

onde: NIR = Banda do Infravermelho próximo
 RED = Banda do Vermelho

Os valores dos ND do NDVI são normalizados e variam entre -1 e 1 e para serem mostrados sob a forma de uma imagem, esses valores são escalonados entre 0 e 255 (8 bits). Os valores de ND mais elevados estão relacionados aos tons de cinzas mais claros da imagem e onde a vegetação se apresenta com maior vigor ou maior densidade de cobertura vegetal, ocorrendo o oposto com os valores de ND mais baixos, relacionados aos tons de cinza mais escuros da imagem.

O NDVI é um importante índice de vegetação porque permite o monitoramento de mudanças sazonais e interanuais no crescimento e atividade da vegetação, além de reduzir várias formas de ruídos presentes nas múltiplas bandas das imagens multitemporais, como a diferença nas condições de iluminação e algumas atenuações atmosféricas (JENSEN, 2004).

3.2.8 Sistema de informação geográfica

Sistemas de Informação geográfica (SIG) é a denominação dada para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e que recuperam a informação não apenas através de sua localização espacial, mas também através de informações alfanuméricas. E para que isto seja possível, a geometria e os atributos dos dados nele inseridos devem estar georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica (DAVIS e CÂMARA, 2001).

Os SIGs utilizam a representação vetorial em que a localização e a aparência gráfica de cada objeto são representadas por um ou mais pares de coordenadas, e se utilizam de três elementos gráficos: ponto, linha e polígono, conforme ilustra a Figura 28. Além das coordenadas, outros dados não-espaciais (atributos) podem ser arquivados para indicar de que tipo de elemento se está tratando (CÂMARA e MONTEIRO, 2001).

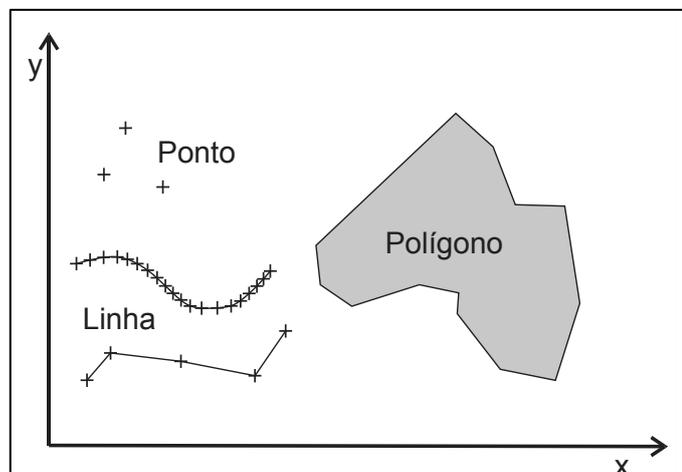


Figura 28 - Elementos da representação vetorial.
Fonte: CÂMARA E MONTEIRO (2001).

A Figura 29 ilustra o exemplo de um SIG, onde polígonos são associados a informações contidas em um banco de dados geográfico.

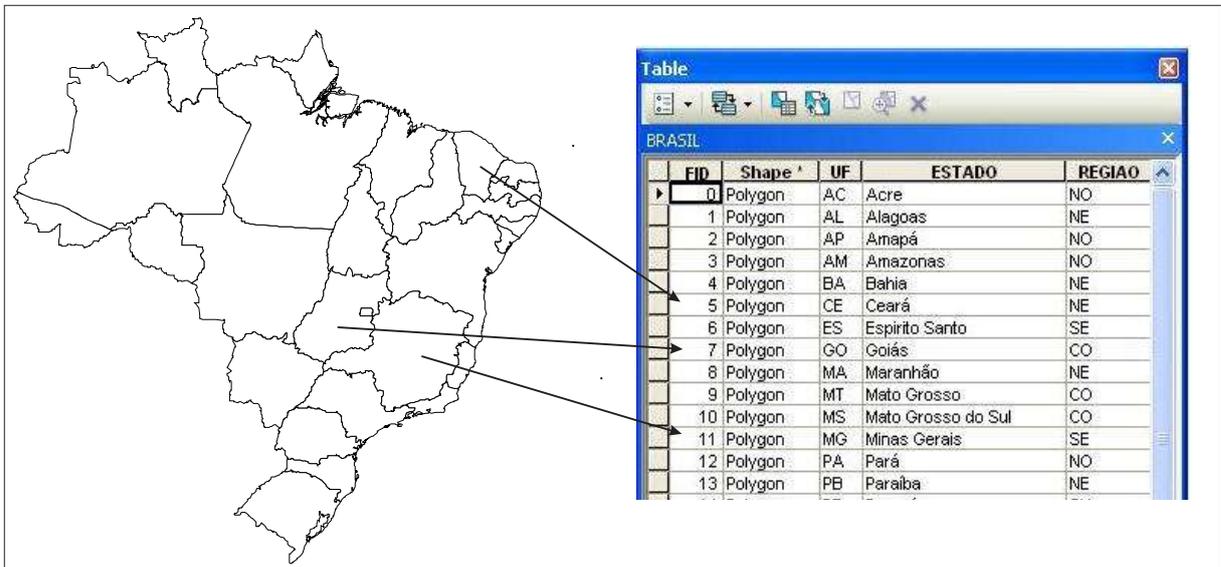


Figura 29 - Sistema de Informações Geográficas.

3.2.9 Representação do relevo

3.2.9.1 Modelo Digital do Terreno (MDT)

Um Modelo Digital de Terreno (MDT) é representação matemática da distribuição espacial de um fenômeno que ocorre em uma área da superfície terrestre (Figura 30). Esses modelos são construídos a partir de amostras do fenômeno, processadas de forma a criar modelos digitais que vão representar a variabilidade do fenômeno nessa área. Dados de relevo, informações geológicas, informações meteorológicas e dados geofísicos, são exemplos típicos de fenômenos representados por um MDT (FELGUEIRAS, 2001).

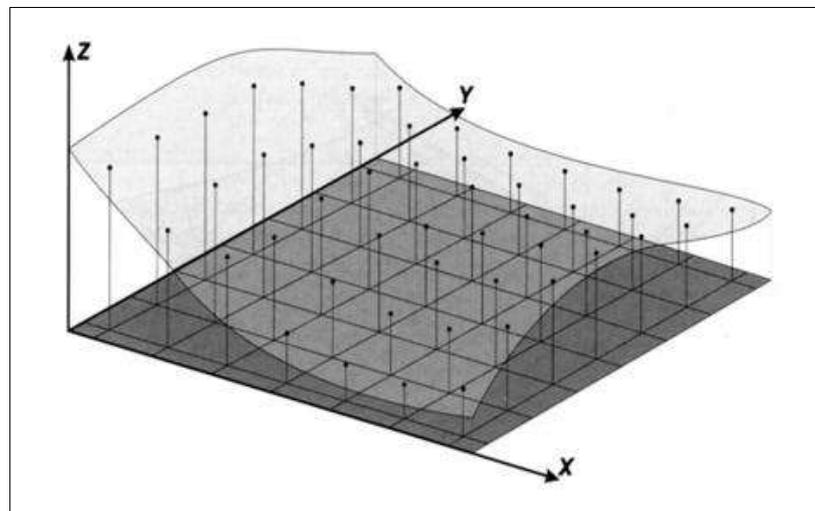


Figura 30 - Representação de um Modelo Digital do Terreno (MDT).
Fonte: FELGUEIRAS (2001).

No tratamento de dados de relevo, um MDT é uma representação computacional discreta de uma superfície contínua e representa um importante parâmetro no modelamento ambiental de Sistemas de Informações Geográficas que tenham o objetivo de caracterizar a paisagem e compreender o funcionamento de ecossistemas terrestres.

A partir de um MDT podem ser geradas imagens sombreadas ou em níveis de cinza, gerar mapas de declividade e exposição, gerar fatiamentos em intervalos desejados e perspectivas tridimensionais (ASPIAZÚ, ALVES e VALENTE, 1990)

3.2.9.2 Dados SRTM

O Radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) é um projeto internacional liderado pela Agência Nacional de Inteligência Geoespacial e pela NASA. Foi lançado em fevereiro de 2000 a bordo do ônibus espacial *Endeavour* (Figura 31). Representou uma missão espacial para obter um modelo digital do terreno da faixa da Terra entre as latitudes 56°S e 60°N, gerando uma base completa de cartas topográficas digitais de alta resolução. Durante 11 dias obteve dados de altimetria estereoscópica de 80% da superfície terrestre, gerando um Modelo Digital do Terreno (MDT) de grade retangular com resolução espacial de um arco segundo (30 metros) para os Estados Unidos e três arcos segundo (90 metros) para o restante do mundo, projetados para uma acurácia vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 metros, respectivamente, com 90% de confiança.

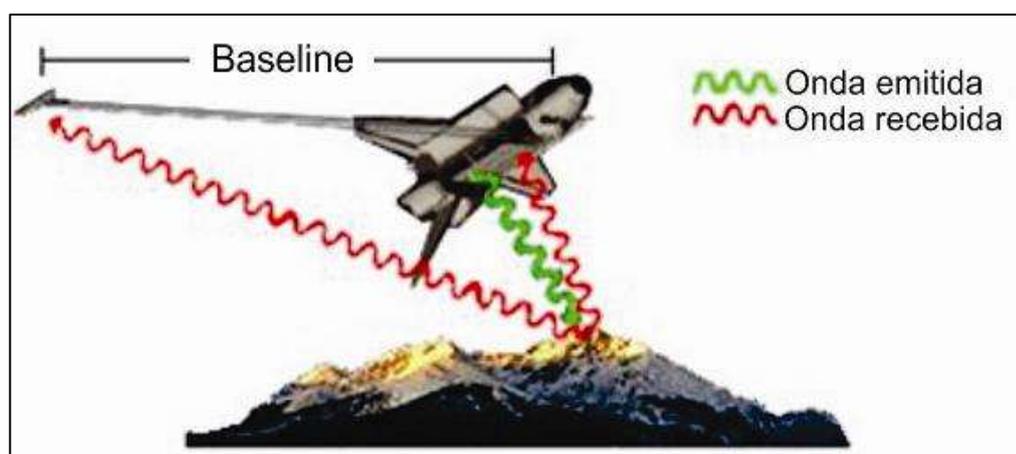


Figura 31 - Sinal de radar transmitido e recebido pela missão SRTM. Fonte: USGS (2013).

Os dados derivados do radar SRTM tem um vasto campo de aplicação e utilidade para as ciências da Terra. Esses dados auxiliam na delimitação automática de bacias hidrográficas, extração de níveis hipsométricos, curvas de nível, criação de perfis topográficos, simulação tridimensional do relevo, etc.

Na grade dos dados SRTM, os números assumidos pelos *pixels* representam o valor da cota (altitude) daquele ponto. A Figura 32 ilustra o exemplo de dados SRTM sob a forma de uma imagem, onde os pontos mais escuros representam as cotas mais baixas e os mais claros as cotas mais elevadas. Com esses dados é possível identificar processos e visualizar os mais variados tipos de feições e fenômenos geomorfológicos.

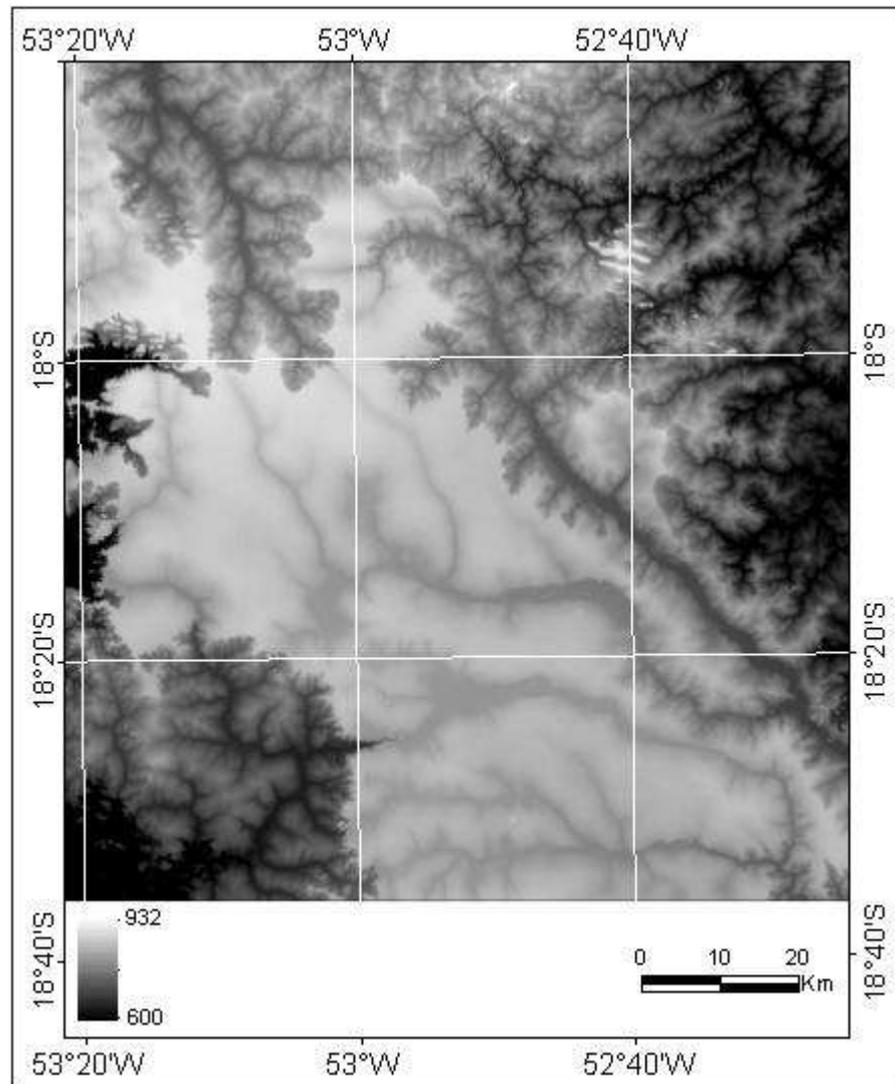


Figura 32 - Imagem SRTM da região do PNE. Fonte: USGS (2013).

4 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

4.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa em laboratório e em campo, foram utilizados os materiais, equipamentos, dados e ferramentas computacionais relacionadas nos tópicos seguintes.

4.1.1 Dados de satélite

Foram utilizadas imagens do sensor TM do satélite Landsat-5, pois o mesmo apresenta uma resolução espacial (30 metros) compatível com os objetivos propostos para o estudo, uma excelente qualidade radiométrica e dispõe de um grande acervo de imagens de fácil aquisição, que cobre o período de 1984 a 2011.

Foram obtidas um conjunto de cinco imagens dos anos de 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011 (cinco últimos anos de operação do satélite Landsat-5), sempre entre os meses de seca na região do Cerrado do PNE (junho, julho e agosto), garantindo condições climáticas semelhantes, conforme descrição abaixo:

- Cenas 224-072 e 224-073 dos dias 02/07/2007, 21/08/2008, 08/08/2009, 26/07/2010 e 30/08/2011 do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5 em formato geotiff, na projeção UTM, *datum* WGS 1984, com resolução espacial de 30 metros, resolução radiométrica de 8 *bits* e resolução espectral de 6 bandas.
- Cenas 224-072 e 224-073 do dia 17/05/2005 do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5 em formato geotiff, georreferenciadas e ortoretificadas, na projeção UTM, *datum* WGS 1984, com resolução espacial de 30 metros, resolução radiométrica de 8 *bits* e resolução espectral de 6 bandas.
- Cenas 224-072 e 224-073 do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolução espacial de 90 metros.

4.1.2 Bases cartográficas

- Arquivos vetoriais da área de estudo em formato *shapefile* com informações sobre os limites do PNE, infraestrutura do Parque, geomorfologia, solos, unidade de vegetação, rede de drenagem e geologia, adquiridos diretamente nos sítios do SIEG, IBGE, ICMBio e MMA.

4.1.3 Informações meteorológicas

- Informações meteorológicas da região do PNE sobre temperaturas mínima, máxima e média, precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar, obtidas no sítio do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

4.1.4 Equipamentos

- Microcomputador PC Intel core I5;
- Receptor Garmin GPSmap 62s;
- Máquina fotográfica digital Canon;

4.1.5 Programas computacionais

- *ENVI™ (Environment for Visualizing Images)*, versão 5.0, *software* para processamento digital de imagens;
- *ArcGIS™*, versão 10.0, *software* para tratamento de informações geográficas;
- *MATLAB™*, versão R2011b, *software* para processamento matemático;
- *Microsoft Word 10™* para edição de texto;
- *Microsoft Excel 10™* como planilha de calculo;

4.2 METODOLOGIA

O estudo foi dividido em etapas que são apresentadas de forma resumida no fluxograma de atividades na Figura 33.

Os processos são representados na Figura 33 por retângulos e se referem a procedimentos de busca de dados e informações necessárias ao estudo ou à aplicação de técnicas de geoprocessamento ou processamento digital de imagens.

Os paralelogramos são os resultados obtidos pela passagem de dados e produtos pelos processos descritos e se constituem basicamente de imagens, dados vetoriais e mapas temáticos processados.

A etapa final de caracterização da vegetação é constituída pela análise final dos resultados obtidos e da elaboração das conclusões do trabalho.

Todos os processos, dados e produtos processados descritos no fluxograma são detalhados nos tópicos seguintes.

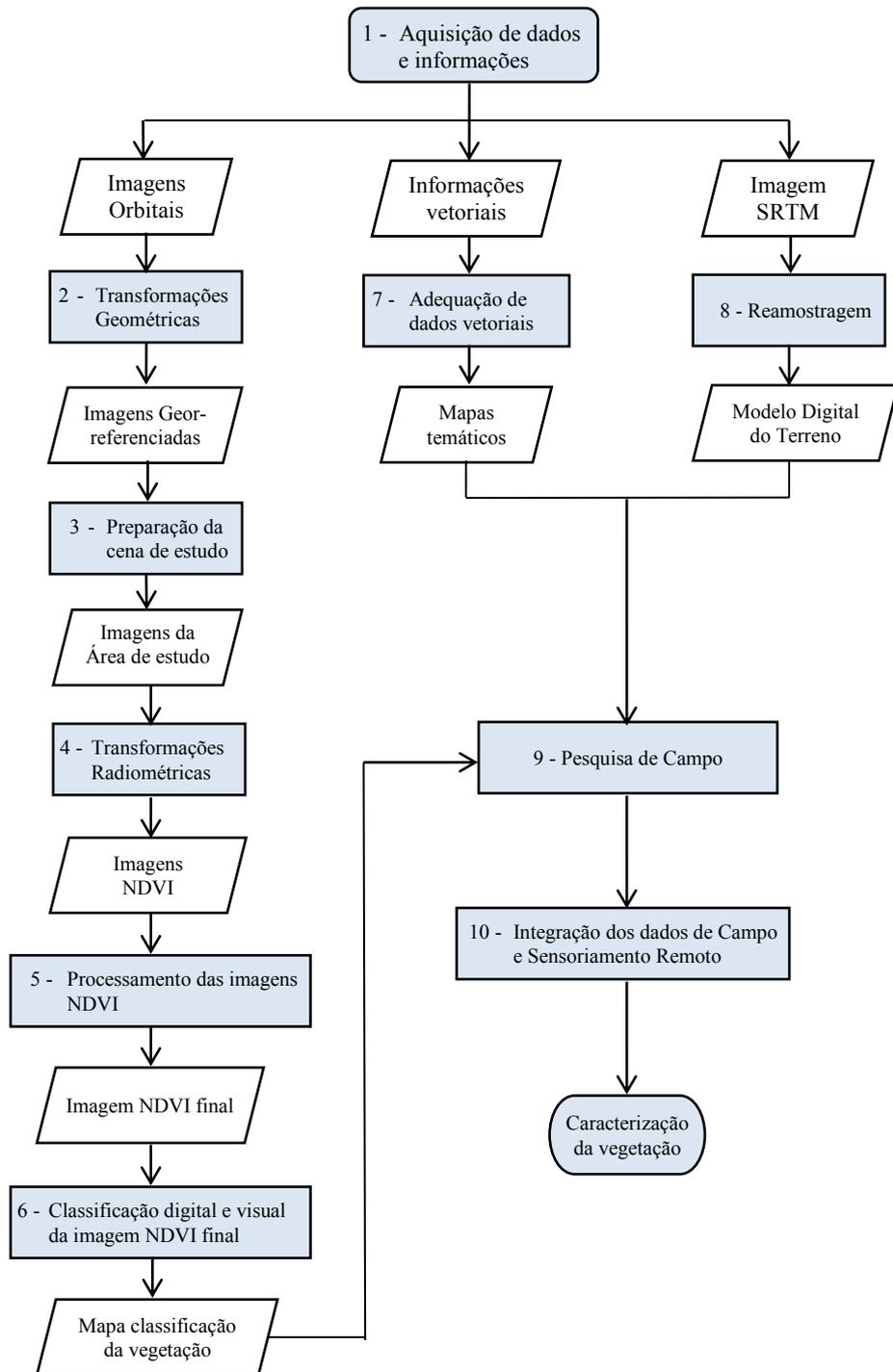


Figura 33 - Fluxograma das atividades da metodologia da pesquisa.

4.2.1 Aquisição de dados e informações

Os dados necessários para a pesquisa compreenderam-se em quatro categorias: imagens de satélite, dados SRTM, informações vetoriais e dados coletados em campo.

O conjunto de imagens TM Landsat-5 dos dias 02/07/2007, 21/08/2008, 08/08/2009, 26/07/2010 e 30/08/2011, foi adquirido diretamente do catálogo de imagens no sitio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2013).

A imagem de referência, georreferenciada e ortorretificada, do sensor TM Landsat-5 do dia 17/05/2005, foi adquirida no sítio da *Global Land Cover Facility - University of Maryland* (GLCF, 2005).

Os Dados SRTM foram adquiridos no sítio da *United States Geological Survey* (USGS, 2013).

As informações vetoriais, também denominados como arquivos *shapefiles*, foram adquiridas junto a órgãos governamentais federais e estaduais, listados no Quadro 3.

Quadro 4 - Fontes de informações vetoriais

<i>Shapefiles</i>	Fonte
Limites e Infraestrutura do PNE	(ICMBIO, 2013)
Divisão Política do Brasil	(IBGE, 2013)
Geomorfologia, Geologia, Solos e Hidrologia	(SIEG, 2013)
Unidade de vegetação, Biomas Brasileiros	(MMA, 2013)

Informações pluviométricas foram obtidas no sítio do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013) no formato de tabelas a serem trabalhadas em *software* de planilha de cálculo.

Os dados de campos compreenderam de observações feitas em pesquisa no local, realizada na área do PNE, dados de equipamento GPS, anotações, fotografias e informações fornecidas por funcionários do Instituto Chico Mendes (ICMBio), lotados na sede do PNE.

Todos os dados e informações coletados foram submetidos a tratamentos específicos, que serão detalhados nos tópicos seguintes, visando a sua adequação às necessidades deste estudo.

4.2.2 Transformações geométricas

O posicionamento geométrico (georreferenciamento ou registro) das imagens do sensor TM-Landsat-5, dos dias 02/07/2007, 21/08/2008, 08/08/2009, 26/07/2010 e 30/08/2011, foi corrigido tendo como base as imagens georreferenciadas e ortorretificadas TM-Landsat-5 de 17/05/2005, através da utilização do *software ENVI 5.0™*.

Foram coletados 16 pontos de controle nas imagens, apresentando um erro médio quadrático inferior a 0,5 *pixel*. O *pixel* é a menor unidade de análise na imagem, ou seja, como nas imagens TM Landsat-5 o tamanho da área representada pelo *pixel* é de 30x30 metros (resolução espacial), o erro foi menor que 15 metros no terreno, confirmando o bom ajuste geométrico das imagens e totalmente compatível com a escala de trabalho.

As imagens completas de cada uma das datas são compostas pelas cenas com orbitas/pontos 224-072 e 224-073, conforme mostra a Figura 34, onde as áreas destacadas em ambas as imagens mostram a região do PNE. Essas imagens formam um conjunto de 10 cenas com 6 bandas cada uma. Portanto, o produto de saída desse processo são 10 cenas completas, corrigidas geometricamente.

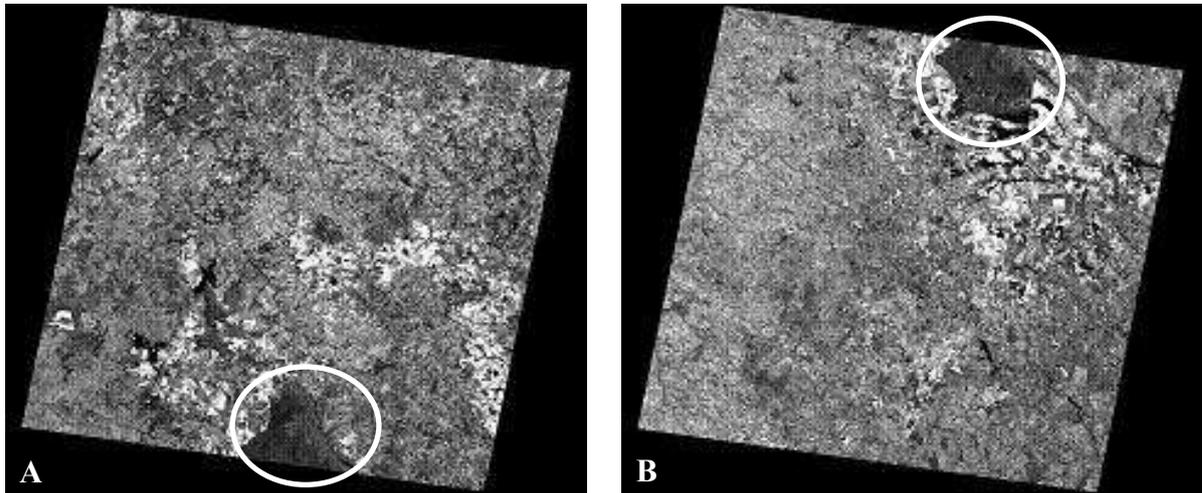


Figura 34 - Exemplo das cenas TM Landsat-5. Em (a), Imagem da orbita/ponto 224-072. Em (b), Imagem da orbita/ponto 224-073. Os círculos nas imagens correspondem à área do Parque Nacional das Emas (PNE).

4.2.3 Preparação da cena de estudo

Após o georreferenciamento, as imagens foram submetidas aos procedimentos de mosaico e recorte, com o objetivo de isolar a área de parque e eliminar as partes das imagens desnecessárias ao estudo. Ambos procedimentos foram executados com a utilização do *software ENVI 5.0™*.

No mosaico, duas ou mais cenas são unidas em uma só imagem, ressaltando a importância do correto georreferenciamento (registro), para que não ocorram discontinuidades geométricas nas imagens mosaicadas. Esse procedimento foi executado no *software ENVI 5.0™*, com a utilização da opção de balanceamento automático de contraste para minimizar as diferenças radiométricas existentes entre as duas cenas originais. A Figura 35a mostra o resultado da aplicação desse procedimento.

O recorte das imagens mosaicadas foi realizado, primeiramente, em uma área retangular em torno da área do PNE, mostrada na Figura 35b. Na sequência, com a utilização do arquivo vetorial (*shapefile*) dos limites da área do PNE, foi gerada uma máscara de recorte, que quando aplicada às cenas, gerou a imagem da Figura 35c.

Essa etapa gerou um conjunto de cinco imagens das diferentes datas do estudo, onde estão isolados exclusivamente os *pixels* referentes à área de estudo, e todos os procedimentos e análises das etapas seguintes foram realizados sobre esses cinco conjuntos de imagens.

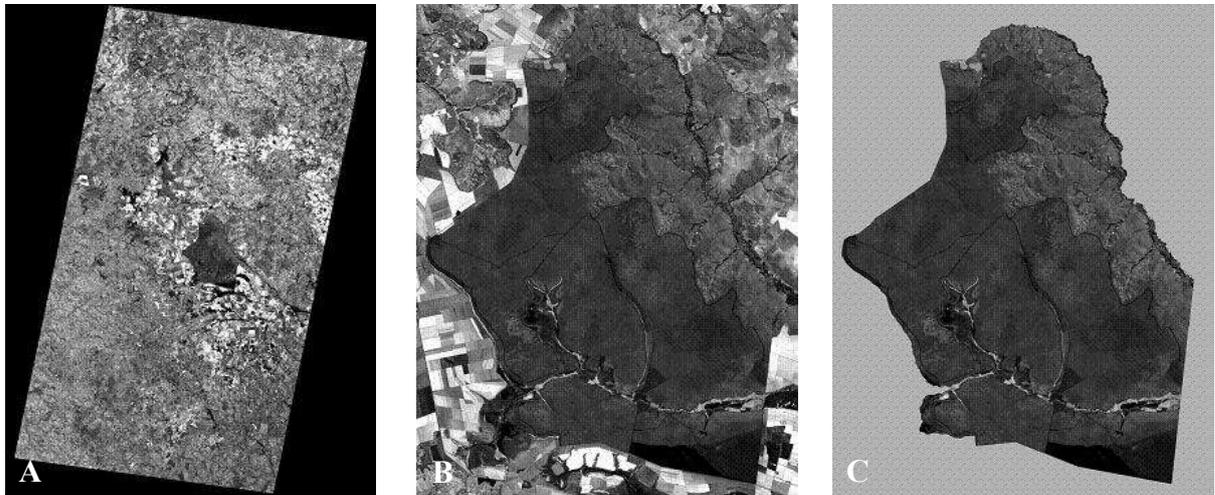


Figura 35 - Preparação das cenas de estudo. Em (a), Cenas mosaicadas. Em (b), Recorte retangular. Em (c), Recorte nos limites do PNE.

4.2.4 Transformações radiométricas

Nessa etapa foram realizados quatro procedimentos fundamentais para a consistência dos resultados finais: 1) Correção atmosférica; 2) Transformação dos ND das imagens em valores de reflectância; 3) Geração das cinco imagens NDVI; e 4) Extração da imagem mediana das imagens NDVI.

Os dois primeiros procedimentos dessa etapa foram realizados segundo a metodologia implementada por GÜRTLER et al. (2005) no artigo “Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT”.

Para a aplicação dessa metodologia em imagens TM Landsat-5 é necessário a obtenção da data da imagem, do ângulo de elevação solar no momento de sua aquisição e do histograma de frequência dos números digitais da banda com menor comprimento de onda (TM 1).

Nessa implementação, a correção atmosférica é realizada pela aplicação do método DOS (*Dark Object Subtraction*), também conhecido como método de subtração do *pixel* escuro, descrito em CHAVEZ (1988). Esse método aplica a correção atmosférica nas imagens, a partir da estimativa da interferência da atmosfera em cada banda espectral, transforma os ND em valores de radiância e em seguida valores de reflectância (GÜRTLER et al., 2005).

A aplicação dessa metodologia é realizada com a utilização de uma planilha de cálculo desenvolvida no *software Microsoft Excel 2000™*, onde se obtém os valores de ganho e *offset* para cada banda da imagem. Com a utilização do *software ENVI 5.0™*, foram realizadas operações matemáticas sobre cada banda da imagem, multiplicando pelo valor de ganho e somando com o valor de *offset*, calculados pela planilha, gerando cinco novos conjuntos de imagens expressas em valores físicos de reflectância e corrigidas da interferência atmosférica.

O conjunto das cinco novas imagens (mosaicos) passou então por nova operação aritmética no *software ENVI 5.0™*, aplicando a equação 3.4, para se obter as cinco imagens NDVI referentes as datas das cenas deste estudo.

4.2.5 Processamento das imagens NDVI

Durante este estudo foi observado que a frequente ocorrência de áreas queimadas e a rápida regeneração da vegetação do cerrado afetam significativamente as respostas espectrais registradas nas imagens de satélite, conseqüentemente, afetando o resultado das imagens NDVI e criando distorções na classificação.

As fotografias das Figura 36a e 36b, mostram a adaptação da vegetação do Cerrado às queimadas. A Figura 36a mostra uma faixa do terreno onde foi realizada uma queimada controlada há poucos dias. A Figura 36b mostra outra faixa do terreno queimada há cerca de dois anos, onde a vegetação regenerada apresenta maior vigor, quando comparada à vegetação seca não atingida por ocorrências de fogo.

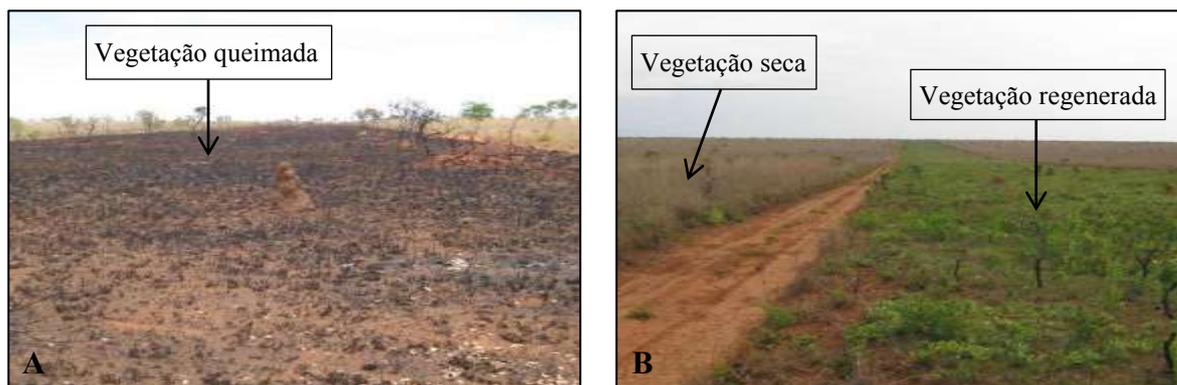


Figura 36 - Queima e regeneração da vegetação de Cerrado. Em (a), Vegetação queimada. Em (b), Vegetação regenerada.

A resposta espectral nas áreas com ocorrência de queimadas recentes é totalmente influenciada pelas cinzas e pelo solo exposto. Devido à inexistência momentânea da vegetação, o NDVI obterá resultado negativo ou próximo à zero.

As áreas de vegetação regenerada, devido a maior atividade fotossintética, vão produzir baixa reflectância na faixa do visível do EEM, aumentando consideravelmente o resultado do NDVI nessas áreas.

As Figuras 37a, 37b e 37d mostram áreas destacadas onde ocorreu a regeneração da vegetação; os tons de cinza mais claros indicam um valor de NDVI mais elevado que as áreas próximas (mais escuras). De forma oposta, as Figuras 37b, 37c e 37e destacam tons de cinza escuros (baixo valor de NDVI), indicando a ocorrência de queimadas recentes (menos de 30 dias) nesses locais.

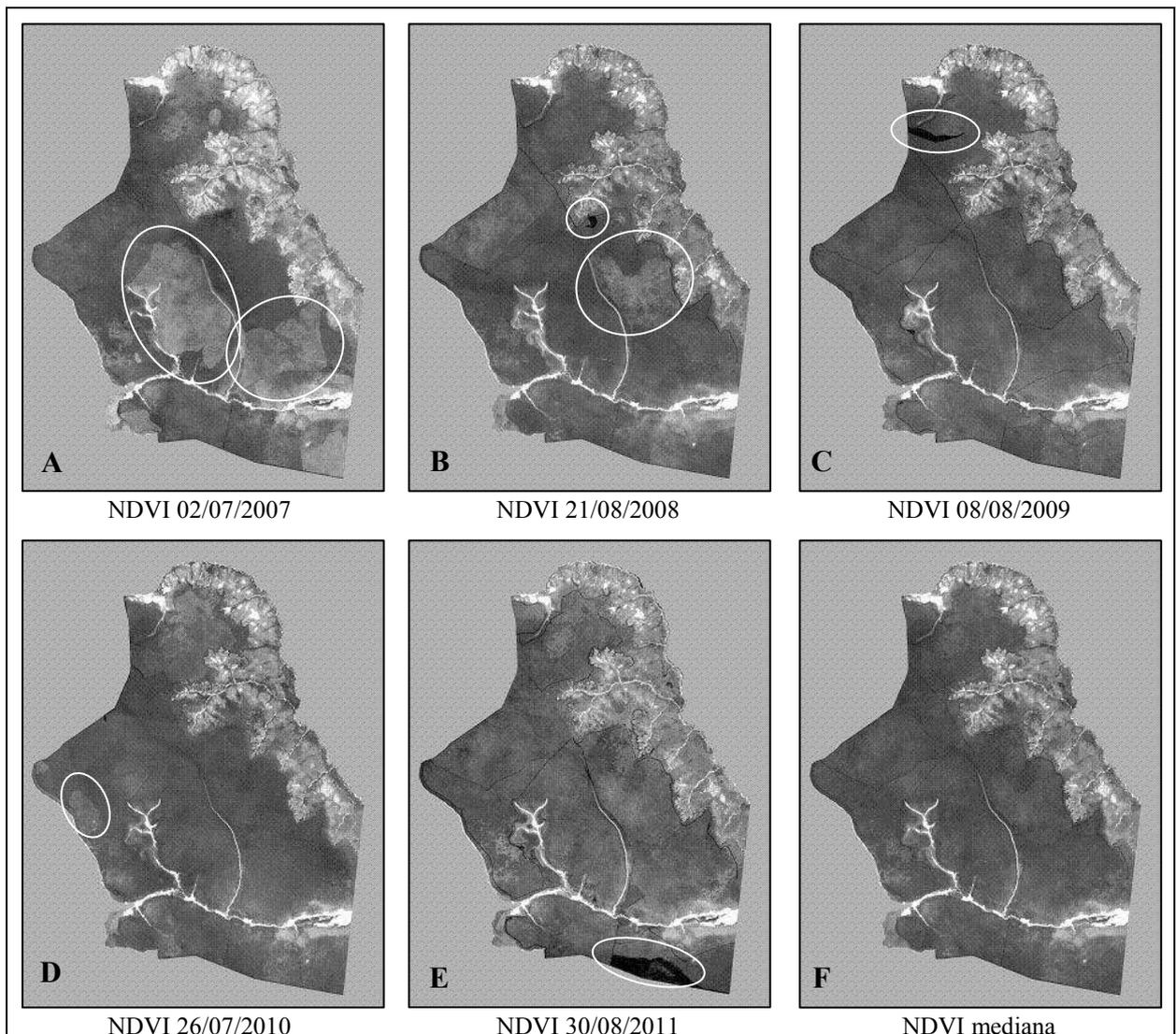


Figura 37 - Imagens NDVI de 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 e NDVI mediana.

Foi observado que esses dois fenômenos ocorrem continuamente na área do PNE de forma natural e que raramente uma imagem de satélite pode ser capturada sem uma dessas duas ocorrências.

Visando a minimização ou mesmo a eliminação dessas diferenças espectrais das imagens NDVI a serem analisadas e classificadas, foi elaborado um programa no *software*

*MATLAB*TM que percorre todos os *pixels* das imagens (colunas e linhas) e em cada uma dessas posições obtém, simultaneamente, o valor de *pixel* de cada uma das cinco imagens NDVI. Esses valores comporão um vetor de cinco elementos de onde será extraído o valor da mediana, que será atribuído ao valor de *pixel* de mesma posição em uma nova imagem NDVI. O esquema desse procedimento é ilustrado pelo exemplo da Figura 38.

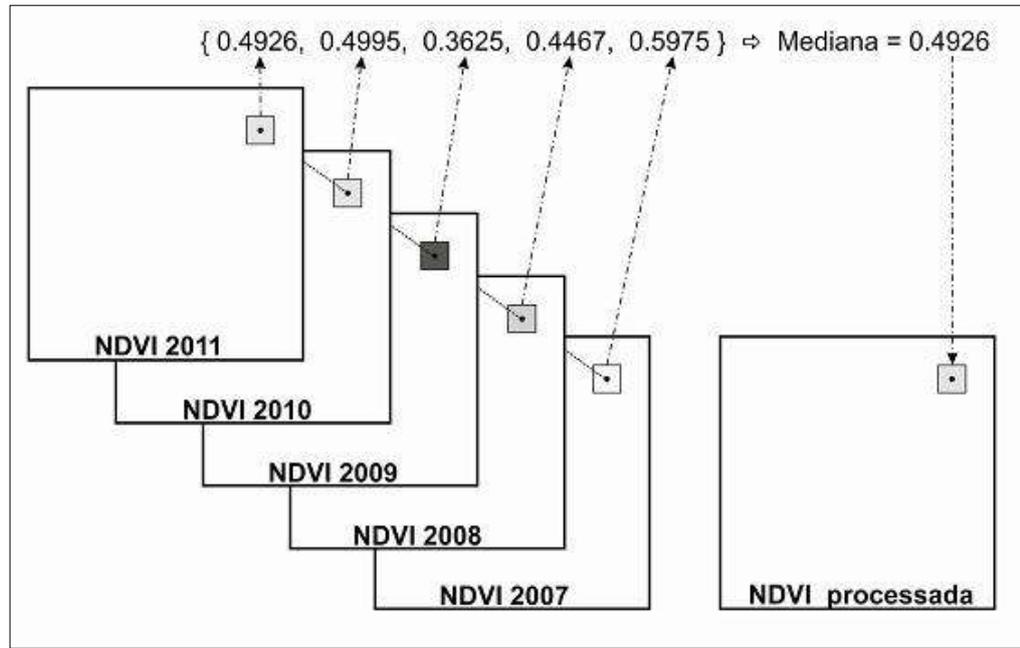


Figura 38 - Esquema de criação da imagem NDVI processada.

Este procedimento tende a eliminar valores extremos, sejam eles valores muito baixos devidos à ocorrência de queimadas ou valores mais elevados quando ocorre a regeneração da vegetação dessas mesmas áreas.

Essa nova imagem NDVI, mostrada na Figura 37f, é o resultado final desse procedimento e será utilizada nas etapas seguintes.

As linhas de código do programa *MATLAB*TM implementado para o processamento das imagens NDVI, são mostradas na Figura 39.

```
function [] = IVcalc()
    [iv1, R] = geotiffread('D:\NDVI-2007.tif');
    [iv2, R] = geotiffread('D:\NDVI-2008.tif');
    [iv3, R] = geotiffread('D:\NDVI-2009.tif');
    [iv4, R] = geotiffread('D:\NDVI-2010.tif');
    [iv5, R] = geotiffread('D:\NDVI-2011.tif');
    ivm = zeros(size(iv1), 'double');

    for L=1:(size(ivm,1));
        for C=1:(size(ivm,2));
            ivm(L,C) = median([iv1(L,C) iv2(L,C) iv3(L,C) iv4(L,C) iv5(L,C) ]);
        end
    end

    info = geotiffinfo('D:\NDVI-2009.tif');
    fn = ('D:\IV-calc.tif');
    geotiffwrite(fn, ivm, R, 'GeoKeyDirectoryTag',
        info.GeoTIFFTags.GeoKeyDirectoryTag);
```

Figura 39 - Linhas de código de programa *MATLAB*TM.

4.2.6 Classificação digital e visual da imagem NDVI

A imagem NDVI foi classificada por processo de fatiamento no *software ENVI 5.0™*, associando as diversas formações vegetacionais existentes no PNE a intervalos numéricos do NDVI, estabelecidos segundo interpretações visuais da imagem NDVI e de composições RGB das imagens TM.

Também foram considerados fatores abióticos peculiares à região do PNE, tais como o relevo, a geomorfologia, os solos, a geologia e a drenagem.

Ressalta-se a importância da experiência do intérprete para a análise visual da imagem NDVI e das composições coloridas. Nessa análise são considerados parâmetros como a textura, a forma e a tonalidade das imagens.

As associações entre as fisionomias de Cerrado com o relevo da área foram analisadas através Modelo Digital do Terreno (MDT) do PNE, gerado no *software ENVI 5.0™*, com a utilização da imagem do SRTM reamostrada para a resolução de 30 metros.

No MDT foi possível identificar em quais condições de relevo ocorrem determinadas formações de Cerrado. Identificou-se ainda em quais porções da área do PNE ocorrem os terrenos mais planos ou mais íngremes, quais as porções de áreas mais elevadas e quais as mais baixas.

Os demais fatores abióticos relacionados, foram analisados com a utilização de informações vetoriais que compuseram mapas elaborados com *software ArcGIS™*, o que permitiu realizar combinações sobrepostas entre essas informações com o MDT e com as imagens (NDVI e composições RGB).

4.2.7 Adequação de dados vetoriais

As informações vetoriais (*shapefile*) utilizadas neste estudo foram adquiridas diretamente em sítios internet como o do IBGE, MMA, ICMBio e SIEG, e todas foram originalmente elaboradas utilizando diferentes sistemas de projeção cartográfica e pequenas escalas (1:250.000 ou menores).

Todos os arquivos *shapefile* foram convertidos e padronizados para serem representados no sistema de projeção cartográfica *Universal Transversa de Mercator* (UTM) e *datum* WGS-84.

Os mapas geomorfológicos e geológicos foram utilizados nas suas escalas originais, pois a adequação não seria possível no escopo deste trabalho, sendo apenas recortadas na região em torno do PNE.

No entanto, os mapas de drenagem e dos limites do PNE foram sobrepostos à imagem da região do PNE no *software ArcGIS™*, sendo então recortados, editados e corrigidos para coincidirem com o que foi observado nas imagens. Como essa adequação foi realizada sobre imagens TM, com resolução espacial de 30 metros, a nova escala foi ampliada para 1:60.000.

4.2.8 Reamostragem da imagem SRTM

Originalmente, as imagens SRTM para as áreas fora do território dos Estados Unidos da América foram produzidas com uma resolução espacial de 90 metros. Para este estudo, visando a produção de um modelo Digital do Terreno (MDT) com uma grade mais fina e a melhoria na visualização do relevo da área de estudo, essa resolução espacial foi reamostrada para 30 metros (Figura 40).

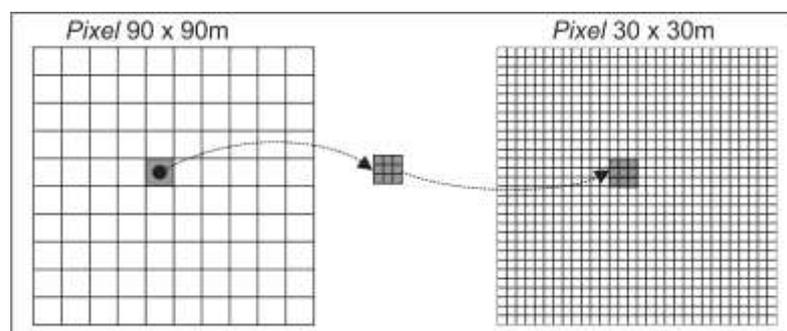


Figura 40 - Reamostragem da imagem SRTM.

Foi utilizada a reamostragem pelo vizinho mais próximo, que é um método de interpolação que apenas atribui o valor do nível de cinza de determinado pixel da imagem reamostrada ao pixel da imagem original que estiver mais próximo. A maior vantagem deste método de reamostragem é que ele não altera os valores radiométricos da imagem original. Essa operação foi realizada no *software ENVI 5.0™*.

4.2.9 Pesquisa de campo

Com o objetivo de aferição da interpretação visual realizada através das imagens de sensoriamento remoto e informações de SIG, foi realizada uma pesquisa de campo entre os dias 09 e 12 de outubro de 2013 no PNE, tendo como base a cidade de Chapadão do Céu, que se situa a uma distância de 28 quilômetros da entrada sul do parque.

Na sede do parque, junto aos técnicos do ICMBio que controlam e fiscalizam o acesso a sua área interna, foram obtidas informações de grande relevância para o estudo, como o plano de manejo do PNE; o mapa da infraestrutura com as demarcações dos caminhos internos do parque; informações sobre os tipos de vegetação, dentre outras informações.

Foram percorridos aproximadamente 330 quilômetros em estradas e caminhos internos do parque, sendo os pontos significativos fotografados e identificados pelas suas respectivas coordenadas geográficas com a utilização de equipamento receptor GPS (Garmin GPSmap 62s), que tem a precisão suficiente para estudos realizados com o uso de imagens de média-alta resolução espacial (30 metros), como as imagens Landsat.

Foram mapeados 39 pontos significativos, conforme mostra a Figura 41. Esses pontos foram selecionados de acordo com a classificação prévia do NDVI ou de acordo com as discrepâncias encontradas entre a vegetação encontrada no ponto e a sua interpretação visual. Além do registro fotográfico, esses pontos foram identificados pelas suas coordenadas geográficas e observados os seus atributos como: a altitude do ponto, o tipo de vegetação, a forma do relevo, o tipo de solo e geologia.

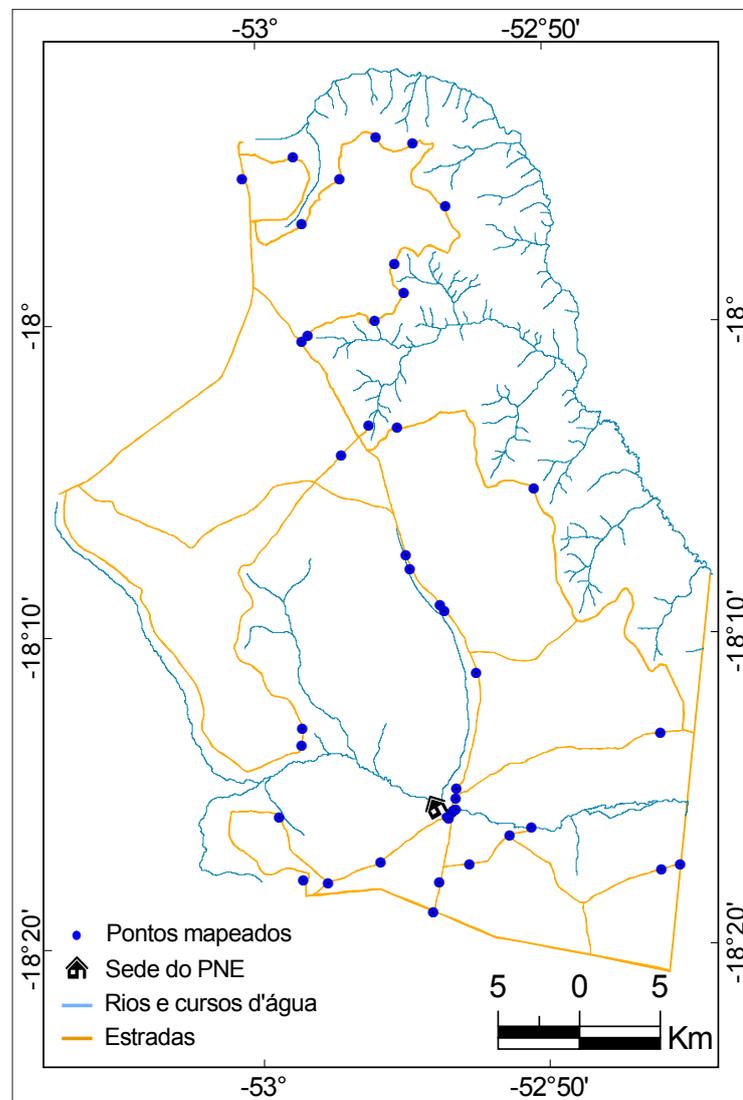


Figura 41 - Mapa de localização dos pontos do trabalho de campo realizado em outubro de 2013.

4.2.10 Integração dos dados de campo e Sensoriamento Remoto

Para a análise de forma eficiente, foi realizada a integração de todas as informações coletadas em um único Banco de Dados Geográfico (BDG), com a utilização do *software ArcGIS™*, formando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com os dados do PNE.

No BDG foram integradas as imagens de satélite, a imagem NDVI, a imagem SRTM, as informações vetoriais (limites do PNE, drenagem, geomorfologia, geologia, solos e mapa de aceiros), as fotografias capturadas em campo, além de informações textuais sobre os pontos mapeados.

No SIG as informações são dispostas em camadas (*layers*), permitindo a visualização individual ou integrada de uma ou mais camadas de forma simultânea, sejam essas camadas matriciais ou vetoriais. No exemplo da Figura 42, podem ser visualizadas, simultaneamente, o mapa das unidades estratigráficas do PNE integrado à rede de drenagem e estradas.

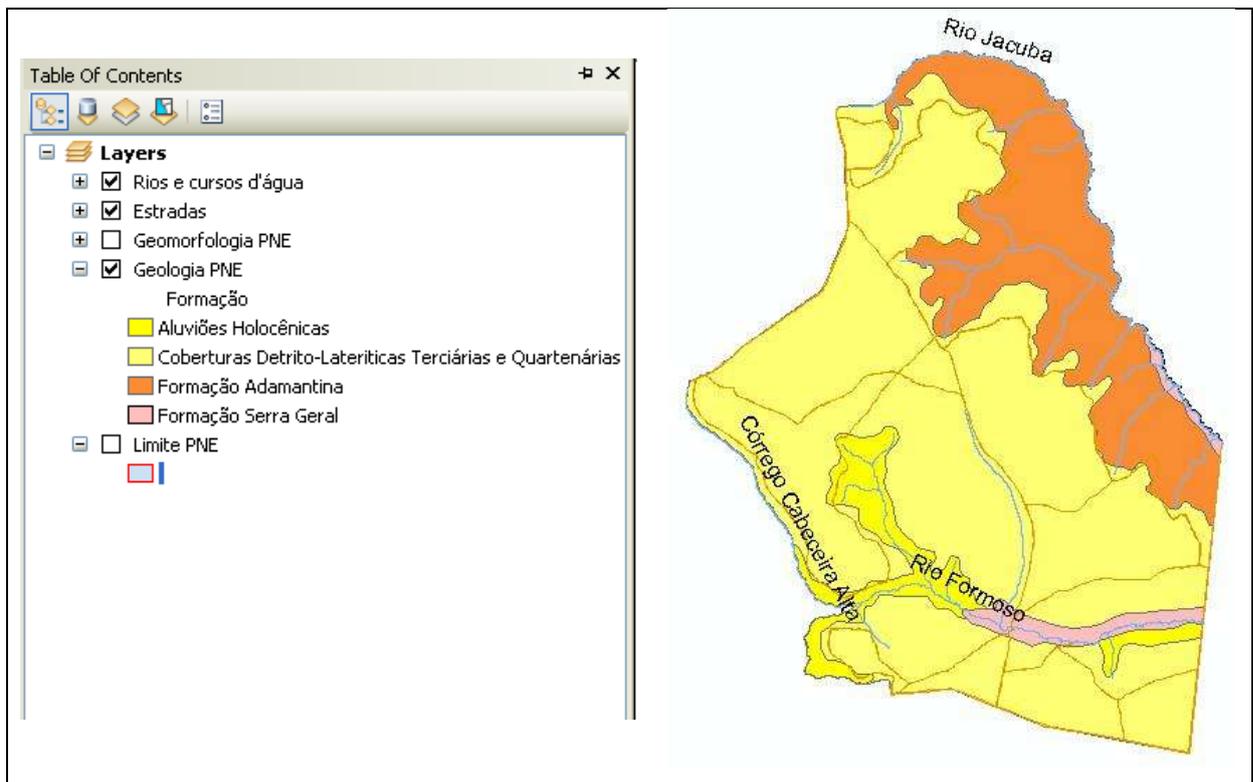


Figura 42 - Banco de Dados Geográfico (BDG). Neste exemplo é vista a integração das Unidades Estratigráficas com a rede de drenagem e estradas do PNE.

As informações de coordenadas geográficas e altitude dos pontos amostrados foram importadas para o BDG diretamente do equipamento receptor GPS, já as informações textuais, tais como o código do campo, o tipo de vegetação e as características do solo encontradas no ponto, foram inseridas manualmente.

As fotografias com coordenadas geográficas foram inseridas na forma de pontos, os quais, quando selecionados mostram as fotografias obtidas naquele ponto, conforme exemplifica a Figura 43, permitindo a associação imediata com as formas de vegetação interpretadas por uso das técnicas visuais e computacionais de sensoriamento remoto.

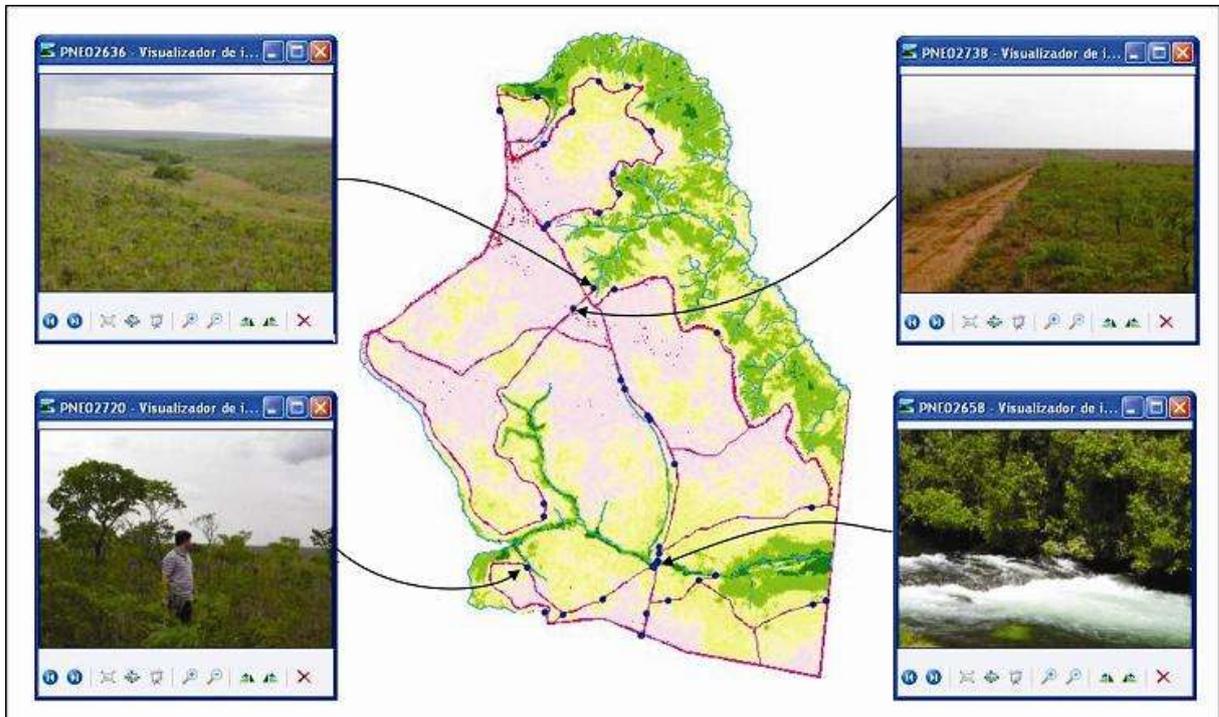


Figura 43 - Fotografias integradas no Banco de Dados Geográficos do SIG.

5 RESULTADOS

Este tópico apresenta os resultados obtidos de acordo com a metodologia mostrada no capítulo anterior. Descreve cada uma das fisionomias vegetacionais encontradas no PNE, e mostra a integração dos dados do estudo.

5.1 Interpretação das Composições RGB

A análise digital das composições RGB da Figura 44, mostra que 99,3% da área do PNE é coberta por algum tipo de vegetação. Na interpretação visual e na pesquisa de campo foram detectados que segmentos dos rios, em sua maior parte, apresentam-se encobertos pela vegetação em suas margens e nos pontos onde estão expostos, somente podem ser percebidos de forma indireta, pois ocorrem em faixas inferiores à resolução espacial das imagens do sensor TM Landsat-5 (30 metros). Fato semelhante ocorre nas centenas de quilômetros de solo sem cobertura vegetal das estradas e aceiros internos do parque, que em grande parte compreendem-se de duas faixas paralelas com aproximadamente 5 metros, separadas por outra faixa de vegetação, com cerca de 30 metros, onde periodicamente são realizadas queimadas controladas. Devido a essas dimensões, esses alvos causam apenas leves alterações nos valores de reflectância nos *pixels* onde são representados em relação aos *pixels* das áreas vizinhas com cobertura vegetal nativa.

A associação entre os padrões existentes nas imagens e a vegetação do campo foi realizada buscando diferenças fisionômicas. Conforme PONZONI e SHIMABUKURO (2010), espera-se que formações florestais, como o Cerradão e as Florestas de Galeria, devido ao seu porte e dossel, frequentemente dividido em dois ou mais estratos verticais, apresente tonalidade mais escura que as formações campestres nas bandas do visível (banda 3), devido a maior atividade fotossintética e tonalidades mais claras nas bandas do infravermelho próximo (banda 4), devido ao espalhamento múltiplo da REM por parte das folhas e ainda tons mais escuros na banda do infravermelho médio (banda 5), devido a maior quantidade de folhas contendo água em seu interior.

Na composição RGB-453, mostrada na Figura 44a, as formações florestais (Cerradão e Floresta de Galeria) apresentam cores avermelhadas, as formações campestres (Campo Limpo e Campo Cerrado) e savânicas (Cerrado *Stricto Sensu*) em tons de verde escuro. Nessa composição, a banda do infravermelho próximo (banda 4) foi associada ao canal R (*red*), evidenciando em tons de vermelho as áreas onde a atividade fotossintética é mais intensa. Nas demais formações vegetais, onde a taxa fotossintética é inferior e existe uma maior influência

do solo nas respostas espectrais do dossel herbáceo, ocorrem maiores valores de reflectância nas bandas infravermelho médio (banda 5) e do vermelho (banda 3), associadas respectivamente, aos canais G (*green*) e B (*blue*), mostrando essas áreas em tons de verde ou levemente azuladas.

Na composição RGB-345 (Figura 44b) as mesmas bandas foram associadas a diferentes canais. Essa nova composição complementou a interpretação visual, evidenciando diferenças não percebidas na composição RGB-453.

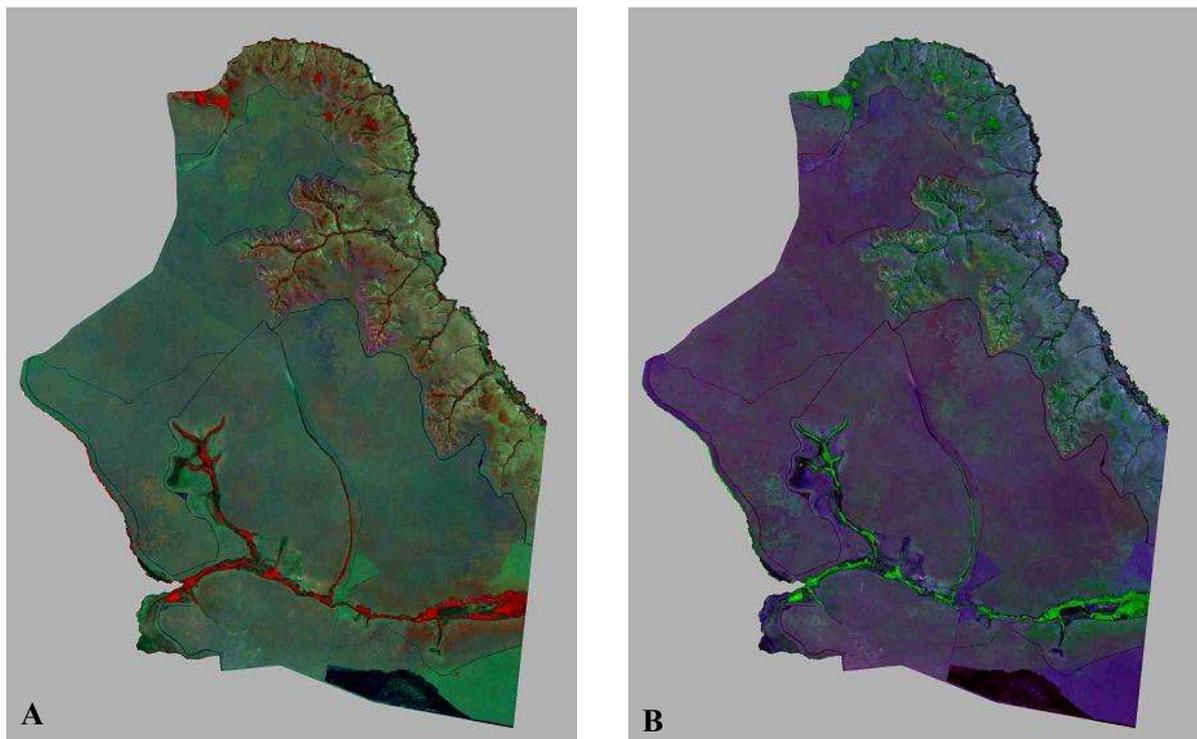


Figura 44 - Composições coloridas da imagem TM Landsat-5 de 30/08/2011. Em (a), Imagem RGB-453. Em (b), Imagem RGB-345.

5.2 Classificação das Fisionomias Vegetais do PNE

Comparando a imagem NDVI da Figura 45a com as composições RGB das Figuras 44a e 44b, observa-se uma forte correlação entre os tons de cinza mais claros (valores mais elevados de NDVI) e os tons avermelhados da composição RGB-345 ou esverdeados da composição RGB-453 (áreas com formações florestais). Essa correlação é totalmente consistente, pois os tons mais claros da imagem NDVI, representam as formações com maiores densidade e vigor da vegetação da cena estudada.

Na imagem NDVI mostrada na Figura 45a, as áreas mais claras possuem valores de NDVI mais elevados, acima de 0,769, associados às formações florestais, e ocupam 2,25% da área do parque. Valores intermediários, entre 0,510 e 0,769, são associados às formações

savânicas, ocupam 56,7% da área. Os valores entre 0,450 e 0,509, associados às formações campestres, ocupam 40,38% da área. Os poucos valores entre 0,000 e 0,449 foram associados a ocorrências de solo exposto (sem cobertura vegetal), representando 0,67% da área. Dentro da área do PNE não ocorreram valores negativos. A Figura 45b mostra o mapa temático das fisionomias do PNE, gerado pela classificação da imagem NDVI.

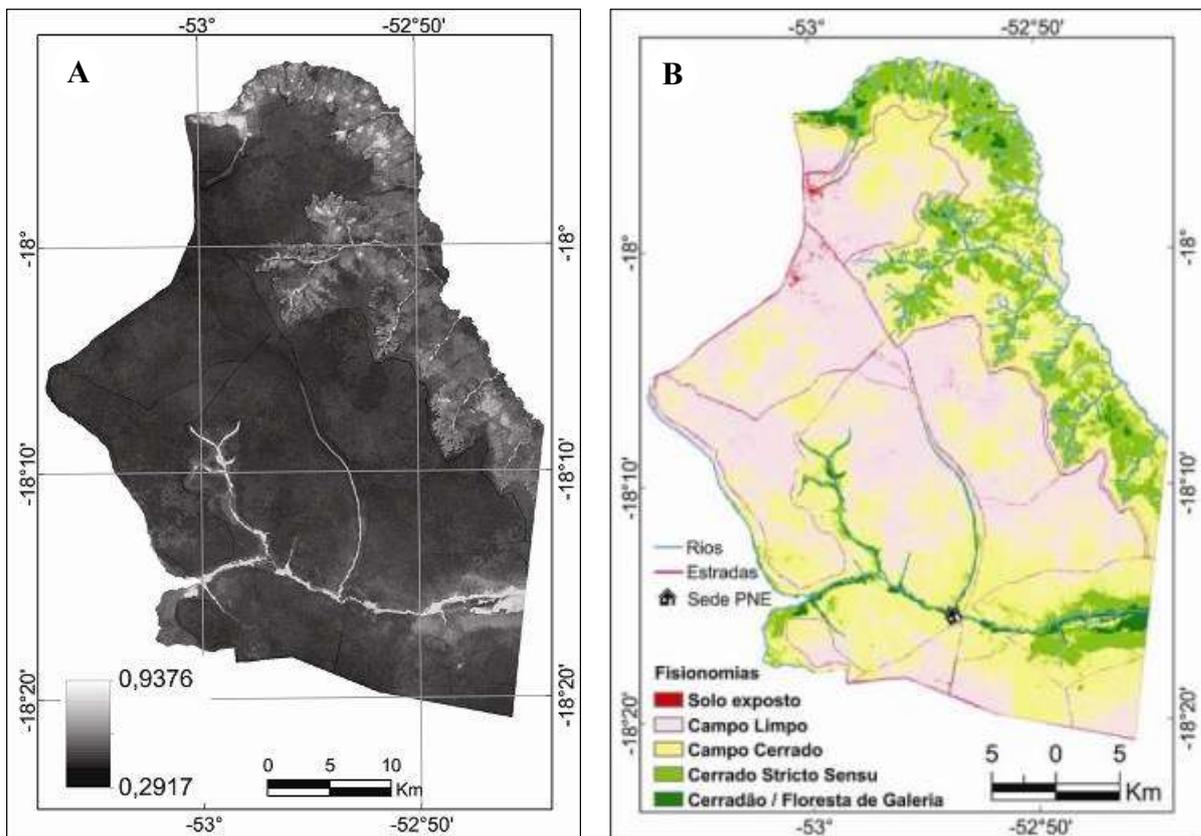


Figura 45 - Classificação da Imagem NDVI mediana do PNE. Em (a), Imagem NDVI. Em (b), Mapa Temático da Classificação.

O mapa temático da Figura 45b foi elaborado segundo os intervalos de valores de NDVI observados no estudo, mostrados na Tabela 1. Esse mapa possibilitou a localização visual, o dimensionamento da área total e percentual de cada tipo de formação vegetal detectada no PNE.

Tabela 1 - Intervalos do Fatiamento observados.

Intervalo	Fisionomia	Área ocupada	Área %
-0,900 a 0,449	Solo exposto	8.933.400 m ²	0,67 %
0,450 a 0,509	Campo Limpo	537.535.800 m ²	40,38 %
0,510 a 0,599	Campo Cerrado	571.960.800 m ²	42,97 %
0,600 a 0,769	Cerrado <i>Stricto Sensu</i>	182.771.100 m ²	13,73 %
0,770 a 1,000	Cerradão e Floresta de Galeria	29.981.700 m ²	2,25 %

5.2.1 Campo Limpo

Foi observado no trabalho de campo que nessa fisionomia predominam as espécies herbáceas e subarbustivas com densidade muito baixa de arbustos e ausência completa de indivíduos arbóreos, com destaque para as gramíneas que medem de 0,3 a 1 metro (Figura 46). Ocupa uma área de 537,53 km², o que representa 40,38% da área total do PNE, preferencialmente, ocorre nas porções planas e elevadas, em cotas superiores a 830 metros.

Nessa fisionomia pode ser notada a utilização de queimadas controladas, como forma de evitar a propagação do fogo por grandes áreas. As Figuras 46a e 46c mostram a vegetação com uma grande quantidade de gramínea seca ou morta, o que dificulta a sua renovação, formando combustível para futuras queimadas. Do outro lado, nas Figuras 46a e 46b, podem ser observadas a cor verde da vegetação, após a passagem do fogo controlado, evidenciando a regeneração natural da vegetação do Campo Limpo. O último grande incêndio no PNE ocorreu em agosto de 2010, quando cerca de 90% da área do Parque foi queimada, resultando na morte de inúmeros animais, principalmente o tamanduá e o tatu canastra, espécies em extinção.

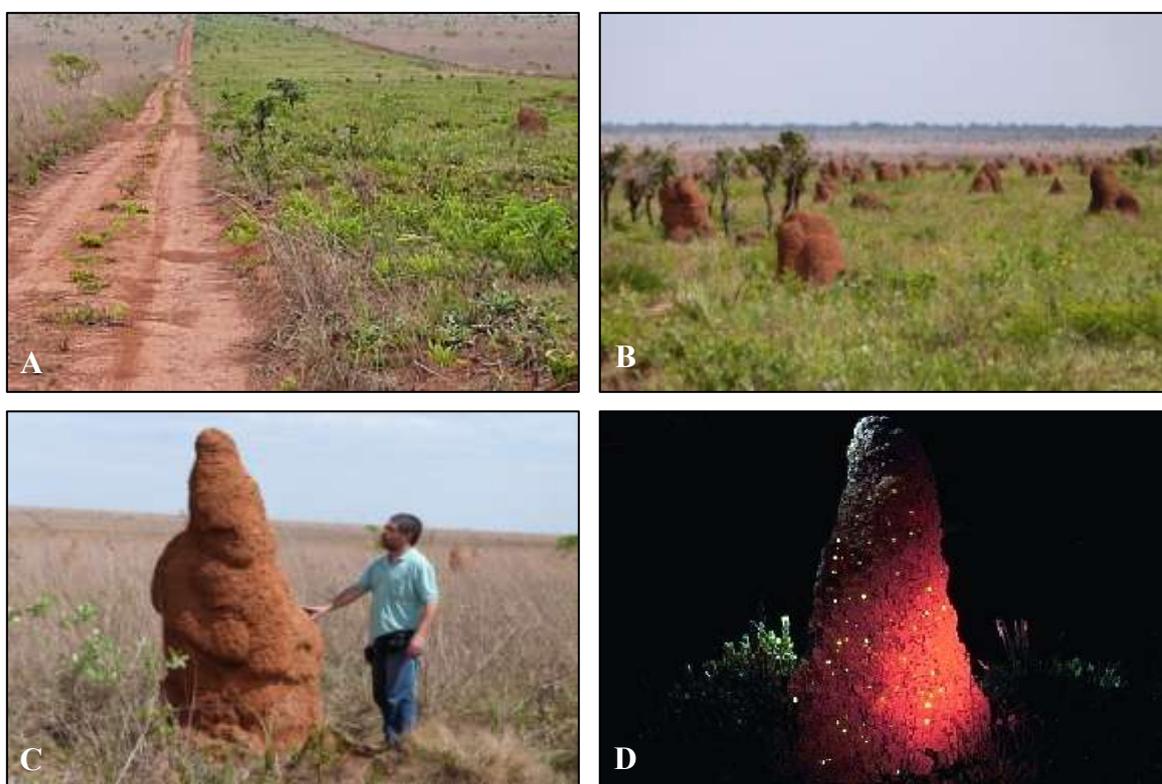


Figura 46 - Feições da fisionomia do Campo Limpo com predominância de gramíneas e raros arbustos. Em (a), Campo Limpo com rebrotamento após a queimada controlada. Em (b), Campo Limpo com murunduns (termiteiras). Em (c), Termiteiras que atingem até 2m de altura. Em (d), Termiteira com bioluminescência de larvas de vaga-lumes durante a noite.

Comumente, ocorrem a existência de termiteiras ou murundus, que são pequenas elevações de cupinzeiros que variam até 0,7 metros de diâmetro por 0,2 a 2,0 metros de altura, conforme mostram as Figuras 46b e 46c. Uma marca registrada do Parque Nacional das Emas é o fenômeno da bioluminescência dos vaga-lumes nas termiteiras (Figura 46d). Este fenômeno pode ser observado à noite, a partir da chegada do período de chuvas, entre os meses de outubro e dezembro, quando milhares de larvas de vaga-lumes emitem uma luz esverdeada para atrair suas presas.

Nas áreas das margens do rio Formoso e seus afluentes, com altitudes entre 710 e 830 metros, ocorre o Campo Limpo com áreas de várzea e vereda (Figuras 47a e 47b) que evolui sobre solos hidromórficos, inundados e saturados nos períodos de chuva. Solos como esses, por diversas vezes inibem o crescimento das fisionomias mais densas do bioma Cerrado, como o Cerradão e o Cerrado *Stricto Sensu*. Nessas condições, as formas vegetacionais com predominância de gramíneas, isto é, Campo Limpo e Campo Cerrado, são mais tolerantes a solos encharcados (VALENTE, LATRUBESSE e FERREIRA, 2013).

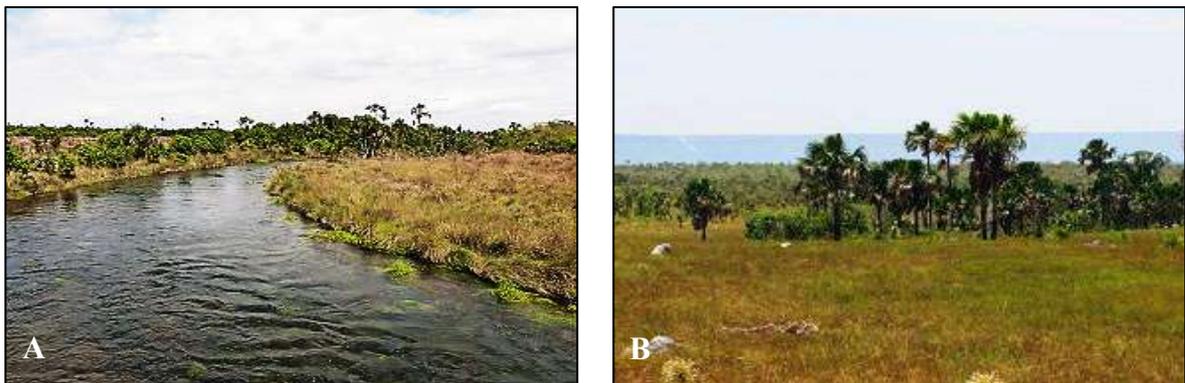


Figura 47 - Vegetação de gramíneas (capim flecha), denominadas de várzea e vereda, nas margens dos cursos de água. Em (a), Campo Limpo com várzea as margens do rio Formoso. Em (b), Campo Limpo de vereda com rebrotamento após a queimada.

A gramínea predominante é o capim-flecha (*Tristachya leiostachya*), que domina a paisagem durante a fase reprodutiva, pela alta densidade e altura que pode atingir 3 metros. A sudoeste do PNE ocorre uma área de campo limpo hiper-estacional que fica alagada na estação úmida, onde há o predomínio do capim-colchão (*Andropogon leucostachyus*). Porém, foram encontrados também espécies de capim exóticas ao bioma, como o capim gordura (*Melinis minutiflora*) e diversas espécies de gramínea do gênero *Brachiaria*.

Os latossolos do PNE são distróficos, lixiviados, bastante profundos, com textura variando de argilo-arenosos, areno-argilosos, arenosos de coloração vermelha, amarela e cinza-claro e, localmente, dedrito-lateríticos (Figura 48). Devido a intensa lixiviação de macronutrientes (Mg, N, Ca, P), esses solos são ácidos, pobres em nutrientes e bem drenados.

Essas características resultam em solos distróficos sem relação direta com a rocha mãe, tais como: basaltos, siltitos, argilitos, folhelhos e arenitos, bem como o tipo de fisionomia da vegetação do bioma Cerrado que cobre esses latossolos.



Figura 48 - Vegetação de Campo Limpo em solos de composição diferente. Em (a) e (c), Latossolo vermelho-escuro distrófico, textura argilosa. Em (b), Latossolo vermelho-escuro distrófico, textura arenosa. Em (d), Latossolo cinza-claro distrófico, textura argilosa.

5.2.2 Campo Cerrado

O Campo Cerrado, conforme observado na pesquisa de campo, é uma fisionomia com arbustos e árvores espalhados sobre uma densa cobertura de gramíneas. De uma forma geral, esta fisionomia está associada com as termiteiras ou murundus. Esta unidade é caracterizada por uma mistura de arbustos e árvores, com menos de 10% de cobertura de dossel que alcançam entre 3 a 10 metros de altura (Figuras 49a e 49b).

A cobertura de gramínea mais abundante nessa unidade é o capim-flecha (*Tristachya leiostachya*). Entre as espécies arbustivo-arbóreas, destacam-se são *Pouteria ramiflora*, *Mimosa amnis-atrici*, *Pouteria torta*, *Eremanthus erythropappus* e *Rourea induta* (IBAMA, 2004). Em locais mais bem drenados dessa formação, ocorre uma alta densidade de palmeiras, como *Allagoptera leucocalyx* e *Attalea geraensis* *Syagrus flexuosa*.

Esta unidade vegetacional cobre uma área de 571,96 km², o que representa 42,97% da área total do Parque. Ocorre preferencialmente nas áreas planas com altitudes superiores a 830 metros. A exemplo do Campo Limpo, o Campo Cerrado desenvolve-se também sobre latossolos de todas as texturas e colorações.



Figura 49 - Aspectos fisionômicos do Campo Cerrado. Em (a), Campo Cerrado com um casal de Emas. Em (b), Campo Cerrado com um casal de veado Campeiro.

5.2.3 Cerrado *Stricto Sensu*

Esta classe fisionômica ocupa uma área de 182,77 km², o que representa 13,73% da área total do Parque. Predominantemente, o Cerrado *Stricto Sensu* ocorre sobre um relevo plano com altitudes acima de 800 metros, onde permanece livre de inundações ou que é afetado por pequenos períodos de inundações.

Essa fisionomia é também denominada na literatura como Cerrado Típico. É uma formação savânica que tem como característica principal possuir uma camada arbórea descontínua que chega a atingir 10 metros de altura. Caracteriza-se pela presença de árvores inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas, com uma cobertura do dossel variando de 10 a 60%, espalhados entre gramíneas e árvores de pequeno porte, inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas e geralmente com evidências de queimadas (Figura 50).



Figura 50 - Aspectos fisionômicos do Cerrado *Stricto Sensu*.

Possui um estrato herbáceo-arbustivo bastante diversificado e denso, com a presença de algumas espécies que possuem órgãos subterrâneos perenes (xilopódios) que permitem a rebrota após queima ou corte. Entre as espécies arbustivo-arbóreas mais importantes estão *Anadenanthera falcata*, *Miconia albicans*, *Myrcia bellae* *Piptocarpha rotundifolia*, com alturas de até 10 metros (IBAMA, 2004).

Comumente, as folhas são rígidas e os troncos são recobertos por uma casca grossa antitérmica de cortiça, adaptada ao clima quente e seco e ao fogo. Entretanto, as espécies vegetais desta unidade não sofrem restrições hídricas durante a estação seca, devido ao sistema de raízes profundo. Algumas espécies são sempre verdes, enquanto outras são decíduas no período da estação seca.

O latossolo onde se desenvolve esta unidade é caracterizado por solos profundos, bem drenados, com textura preferencial areno-argiloso a argilo-arenoso de coloração que varia do vermelho ao amarelo claro, resultante do intemperismo de rochas basálticas e sedimentos pelíticos da Bacia do Paraná.

5.2.4 Cerradão

O Cerradão (Figura 51), também chamado de floresta xenomórfica, é um tipo de vegetação sempre verde, frequentemente relacionada à vegetação em “ilhas” (Figura 51a) espelhadas no relevo com cotas mais altas, na porção norte do PNE.

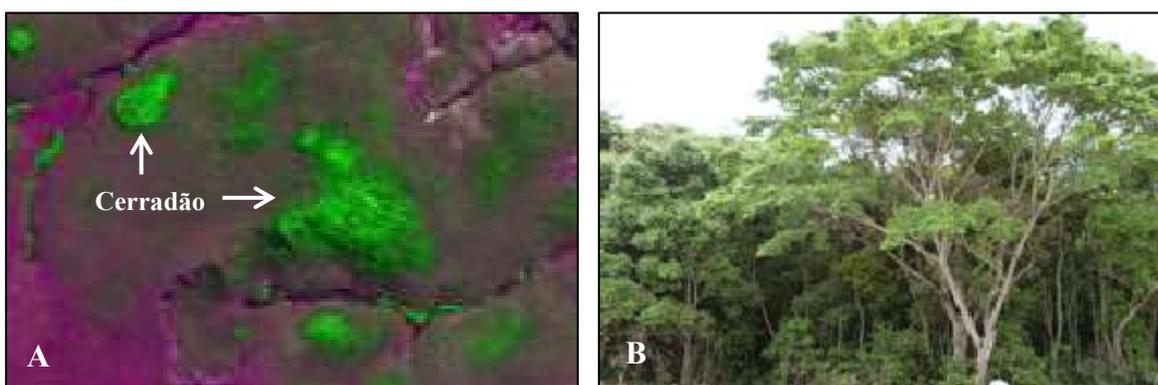


Figura 51 - Aspectos de ocorrências do Cerradão. Em (a), Cerradão com formas de “ilhas” em imagem RGB-345 do Landsat TM5. Em (b), Características da estrutura e fisionomia do Cerradão.

Esta unidade é caracterizada por uma expressiva quantidade de mistura de espécies do Cerrado. Sua estrutura e fisionomia são de uma floresta, com dossel fechado devido à alta densidade de árvores (70% em média), que atingem entre 15 e 18 metros de altura (Figura 51b).

Apresenta fisionomia geral perenifólia, apesar de algumas espécies apresentarem caducifólia em períodos curtos, durante a estação seca, tais como o pau-terra (*Qualea grandiflora Martius*) e o pequizeiro (*Caryocar brasiliense Cambess*).

Ocorrem em solos profundos e bem drenados, de média e baixa fertilidade, ligeiramente ácidos, geralmente Latossolos vermelho e vermelho-amarelo.

5.2.5 Floresta de Galeria

Junto com as formações de Cerradão, as Florestas de Galeria ocupam uma área de 29,98 km², o que representa 2,25% da área total do Parque.

Esta fisionomia é a formação florestal que ocorre ao longo dos cursos de água, ocupando os terraços das planícies quaternárias e apresenta com frequência um dossel emergente uniforme, compreendido entre as cotas 710 e 800 metros. O estrato arbóreo varia entre 20 e 30 metros de altura e cobertura do dossel em torno de 80 a 100%, com várias espécies endêmicas.

A Floresta de Galeria consiste de uma vegetação sempre verde que ocorre nas partes mais baixas e úmidas ao longo dos rios Jacuba, Formoso e seus tributários (Figura 52), onde existe grande disponibilidade de água para as raízes, suprimindo as necessidades das folhas o ano todo, não apresentando caducifólia na estação seca. Esta fisionomia faz uma transição brusca para as formações campestres (Campo Limpo e Campo Cerrado) e uma transição gradacional com o Cerradão e o Cerrado *Stricto Sensu*.



Figura 52 - Floresta de Galeria ao longo do rio Formoso.

Os solos são predominantemente gleissolos ou plintossolos. As dicotiledôneas predominam na Floresta de Galeria, destacando-se *Mauritia venifera* em solos do tipo gleissolos mal drenados.

Segundo FELFILI (1995), a biodiversidade da Floresta de Galeria é notável. O total de árvores da flora consiste de 93 espécies, 81 gêneros e 44 famílias. *Leguminosae*, *Myrtaceae* e *Rubiaceae* são as famílias mais ricas em número de espécies.

Este tipo fisionômico do Cerrado é um *habitat* de várias espécies de aves e mamíferos, a exemplo da onça suçuarana (*Puma concolor*) e o porco selvagem (*Tayassu pecari*).

5.3 Integração de dados

As diversas formações vegetais de Cerrado do PNE possuem fortes relações com o relevo e com a rede de drenagem (Figura 53). Nas áreas mais elevadas do PNE, com cotas superiores a 800 metros, predominam as fisionomias de Campo Limpo e Campo Cerrado. Conforme as altitudes diminuem, a disponibilidade hídrica aumenta com a proximidade da rede de drenagem. Consequentemente, cresce a densidade da vegetação como as formas savânicas (Cerrado *Stricto Sensu*) e florestais (Cerradão e Floresta de Galeria).

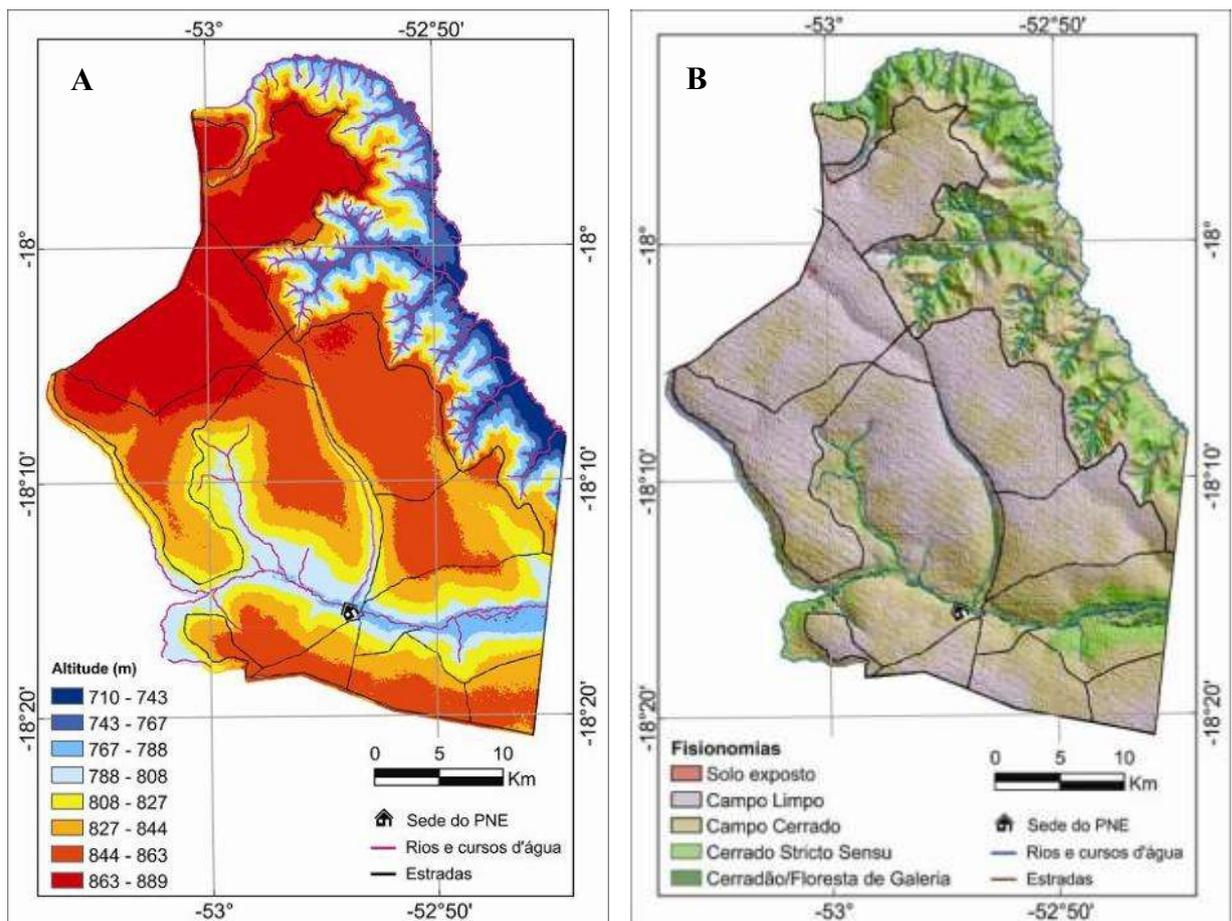


Figura 53 - Relação entre o relevo e o Cerrado do PNE. Em (a), Mapa hipsométrico. Em (b), Mapa das Fisionomias vegetacionais associado ao relevo.

A modelagem do relevo do PNE, integrada à imagem RGB-345 (Figura 54a) e também ao mapa de classificação (Figura 54b), evidencia visualmente essa relação morfovegetacional. Na Figura 54b, as cores rosa claro e alaranjado marcam, respectivamente, as áreas de Campo Limpo e Campo Cerrado. A cor verde claro, as formações de Cerrado *Stricto Sensu*, e a cor verde escuro correspondem às formações florestais do Cerradão e das Florestas de Galeria.

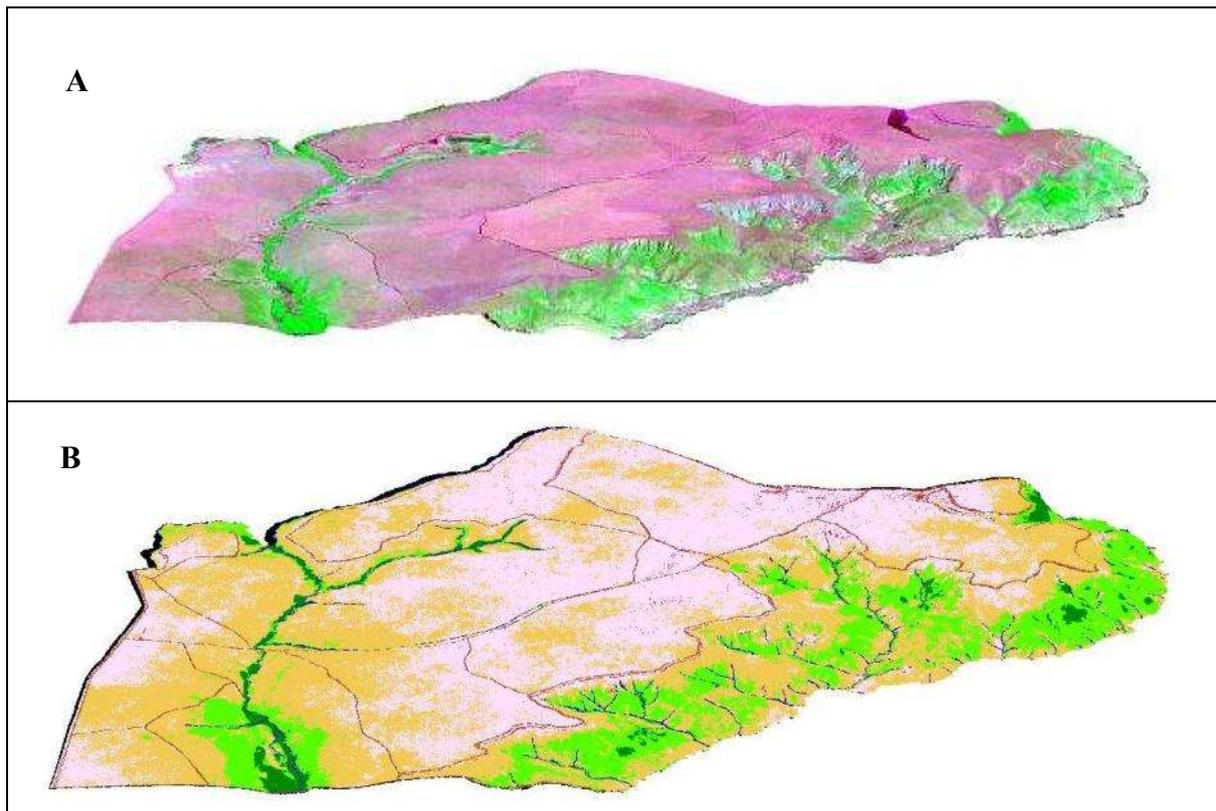


Figura 54 - Modelagem do relevo do PNE. Em (a), Imagem 3D associada à imagem RGB-345. Em (b), Imagem 3D associada ao Mapa de Classificação das Fisionomias do Cerrado.

A vegetação do PNE situa-se em grande parte sobre Latossolos vermelho-escuro e vermelho-amarelo distróficos, porosos, permeáveis, bem drenados, altamente lixiviados, pobre em nutrientes e pouco férteis, onde ocorrem principalmente as formações de Campo Limpo e Campo Cerrado.

Nas áreas com altitudes superiores a 800 metros, destacam-se os chapadões de topos aplainados ou suavemente dissecados, constituídos por sedimentos areno-argilosos, resultando em latossolos vermelhos-escuros com crostas ferruginosas de espessura variada, por vezes delimitados por ressaltos topográficos suaves, com desníveis de 20 a 40 metros, indicativos da espessura desses sedimentos. As cabeceiras de drenagens, situadas no interior e nas bordas

dos chapadões, delineiam anfiteatros escavados por erosão remontante. A erosão diferencial ressalta crostas ferruginosas nas rochas areníticas subjacentes (Figura 55).

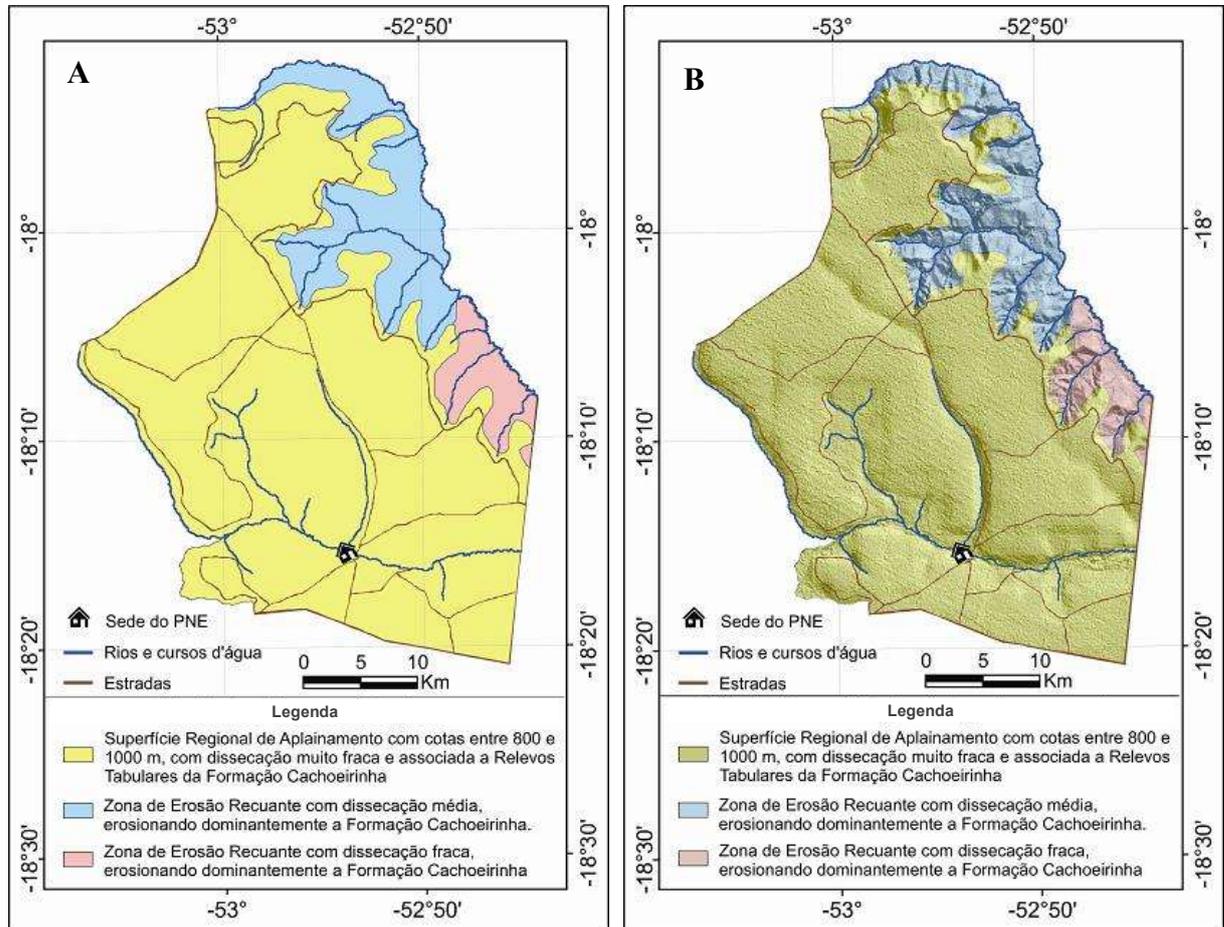


Figura 55 - Geomorfologia e Relevo do PNE. Em (a) Mapa das Unidades Geomorfológicas. Em (b), Unidades Geomorfológicas integradas com a imagem sombreada do relevo.

6 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

O uso de imagens de satélite para identificação de alvos na superfície terrestre requer a aplicação de técnicas de Processamento Digital de Imagens adequadas ao tipo de informação que se deseja extrair dessas imagens.

As imagens índice de vegetação são operações aritméticas realizadas entre bandas, e se baseiam nas diferentes respostas espectrais da vegetação nos intervalos do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

A geração de imagens NDVI somente pode se realizada após a conversão dos números digitais das imagens em valores físicos de reflectância. Essa conversão reduz as imagens a mesma escala radiométrica, tornando possível a comparação e a realização de operações aritméticas entre bandas do mesmo sensor ou mesmo a comparação direta de imagens multitemporais do mesmo sensor ou de diferentes sensores.

Outra operação necessária é a correção das interferências atmosféricas, inerentes ao processo de aquisição das imagens de satélite. Essa operação é realizada com a utilização de algoritmos que modulam matematicamente essas interferências, com o objetivo de diminuir ou mesmo eliminá-las.

A correção atmosférica pelo método DOS (*Dark Object Subtract*) foi de fundamental importância na qualidade do resultado obtido por este estudo. As imagens NDVI geradas após essa correção mostraram valores de índices semelhantes aos descritos na literatura e de acordo com as observações realizadas em campo.

No Cerrado é frequente a ocorrência de queimadas, que, diferente de outros biomas, possui uma adaptação natural ao fogo. Após a ocorrência de queimadas, a vegetação de áreas queimadas rapidamente se recompõe, voltando ao seu estado anterior, porém com um vigor maior que as áreas não queimadas. Esse fato faz com que áreas de mesmo tipo de formação vegetal apresentem respostas espectrais distintas, podendo conduzir a erros grosseiros de interpretação digital e visual das imagens.

Devido à quase impossibilidade de se obter imagens de satélite sem a ocorrência de áreas de vegetação queimada ou regenerada, este estudo utilizou um conjunto de imagens TM-Landsat-5 de cinco anos consecutivos (2007 a 2011), adquiridas sempre nos meses mais secos na região do Cerrado, entre junho e agosto.

Imagens de áreas do Cerrado em período de seca apresentam respostas espectrais distintas, de acordo com a quantidade de água e umidade disponível nas diversas fisionomias da vegetação, tornando viável a sua classificação. Nos períodos chuvosos, além da grande

incidência de nuvens nas imagens, o aumento da disponibilidade de água torna essas respostas espectrais muito semelhantes e de difícil distinção.

Foram geradas cinco imagens NDVI (2007 a 2011), cada uma contendo, em diferentes áreas, a ocorrência de vegetação queimada ou regenerada.

As imagens foram digitalmente sobrepostas e processadas para selecionar o valor mais representativo de cada *pixel* da nova imagem, eliminando os valores de *pixel* muito baixos das áreas queimadas e valores mais altos das áreas de vegetação regenerada. Esse processamento unificou essas imagens em uma nova imagem NDVI, onde essas ocorrências foram praticamente eliminadas (Figura 56).

Confrontando o mapa de classificação das fisionomias do PNE, gerado a partir da imagem NDVI processada (Figura 56), com as informações recolhidas em campo, não foram observadas discrepâncias de interpretação.

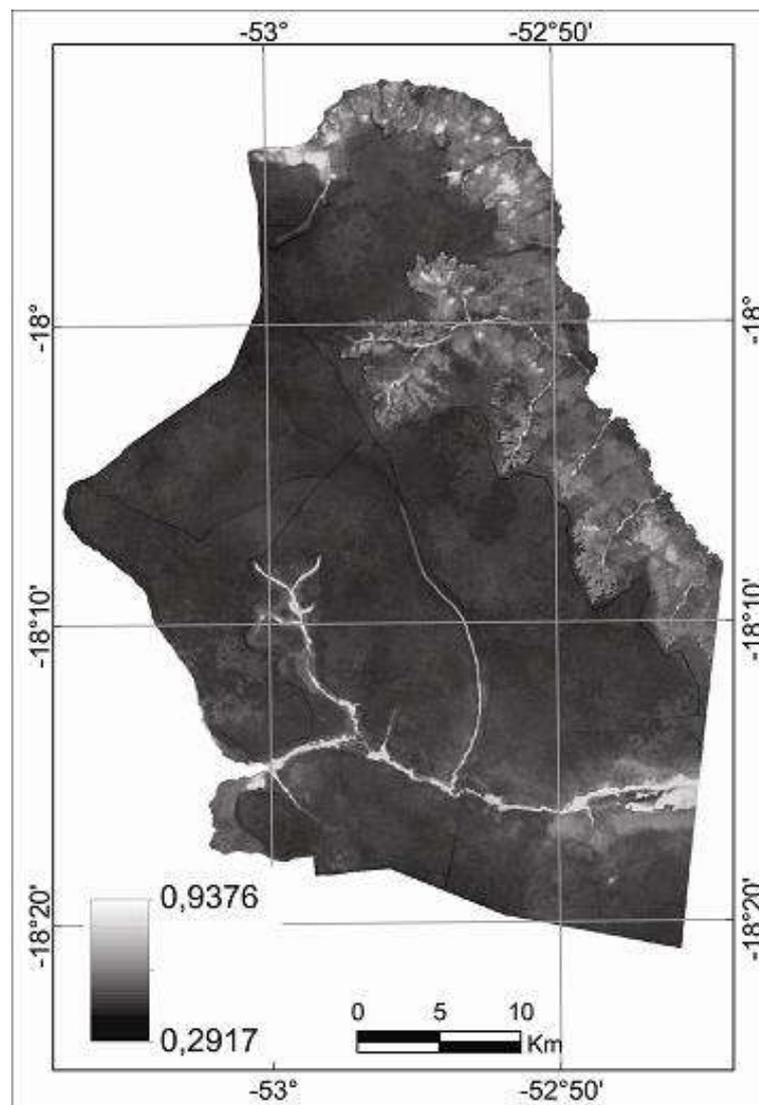


Figura 56 - Imagem NDVI mediana.

No mapa de classificação (Figura 57), as áreas de Campo Limpo foram identificadas em áreas planas e distantes da rede de drenagem. O Campo Cerrado foi identificado entre áreas de Campo Limpo e também nas áreas de transição para as formações mais densas de vegetação. O Cerrado *Stricto Sensu* ocorre em áreas de transição para as formações florestais ou próximas a pequenos cursos d'água. Devido às respostas espectrais semelhantes, não foi possível a separação espectral das formações florestais de Cerradão e Floresta de Galeria, que podem ser identificadas apenas pela proximidade de cursos d'água. Enquanto o Cerradão ocorre em pequenas áreas isoladas, a Floresta de Galeria ocorre sempre às margens de cursos d'água médios e grandes.

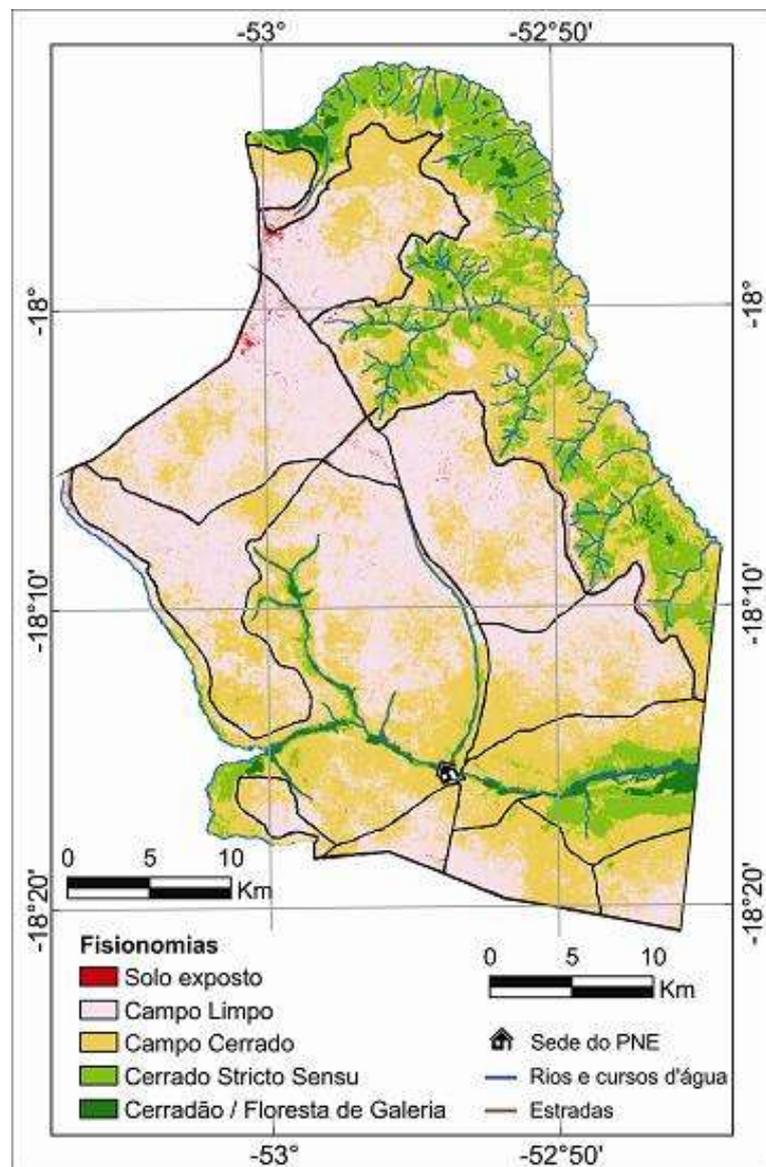


Figura 57 - Mapa de Classificação das fisionomias da vegetação de PNE.

De uma forma geral, nas áreas mais elevadas, com cotas entre 800 e 890 metros de altitude, predominam as fisionomias de Campo Limpo e Parque de Cerrado. Conforme as altitudes diminuem e a umidade da área aumenta com a proximidade da rede de drenagem, aumenta a densidade da vegetação, sendo encontradas as fisionomias de Cerrado *Stricto Sensu* e o Cerradão, e nas margens dos cursos d'água as Florestas de Galeria e alguns campos de várzea.

Destaca-se que a vegetação característica do Cerrado encontrada no PNE é bastante diversificada. Apresenta desde formações campestres abertas de Campo Limpo até formações florestais densas, como o Cerradão e a Floresta de Galeria (Figura 58). Possui ainda uma gama de associações intermediárias entre esses dois extremos fisionômicos, caracterizando a vegetação de Cerrado do PNE como um mosaico de formas fisionômicas.

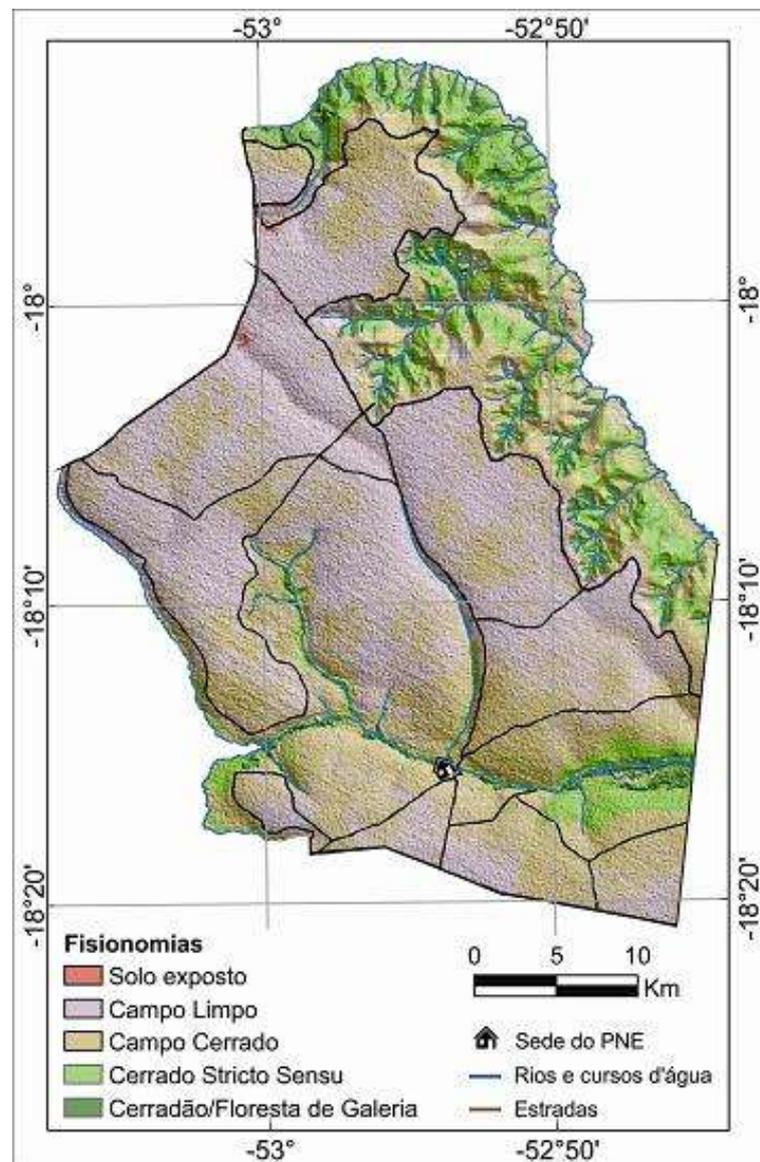


Figura 58 - Mapa da Classificação integrado ao relevo.

7 CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A intensa sazonalidade das chuvas e as frequentes ocorrências de queimadas dificultam o processo de classificação das fisionomias vegetais do Cerrado, utilizando imagens de satélite. Esses dois fatores afetam, significativamente, as respostas espectrais da vegetação do Cerrado, e podem conduzir o analista a erros na interpretação digital e visual. Entretanto, essa interferência pode ser minimizada com uso de imagens multitemporais, adquiridas pelo satélite em condições climáticas semelhantes.

Este estudo utilizou imagens do sensor TM Landsat-5, adquiridas nos períodos de seca na região do Cerrado, nos meses de junho, julho e agosto, dos anos de 2007, 2008, 2009, 2010 e 2011. Nesse período, devido à baixa disponibilidade de água nas formações mais abertas, essas fisionomias apresentam uma maior diferenciação espectral, permitindo a distinção com maior precisão das diversas formas de vegetação do Cerrado, melhorando a qualidade da interpretação digital.

O processamento digital das imagens NDVI geradas a partir das imagens multitemporais, realizado neste estudo, minimizou de forma eficiente o efeito causado pelas queimadas, e gerou uma única imagem NDVI, sobre a qual foi realizada a classificação digital e gerado o mapa de classificação das fisionomias do PNE.

O mapa de classificação, aliado à interpretação visual das composições coloridas das imagens TM Landsat-5 e as informações coletadas em campo, permitiu a distinção de cinco unidades fitofisionômicas no PNE: Floresta de Galeria, Cerradão, Cerrado *Stricto Sensu*, Campo Cerrado e Campo Limpo.

A análise integrada demonstrou que a distribuição espacial das fisionomias da vegetação é fortemente correlacionada com as unidades geomorfológicas (Superfície Regional de Aplainamento, Zona de Erosão Recuante e Planície Aluvial). De um modo geral, as fisionomias mapeadas estão em equilíbrio com os diferentes parâmetros biofísicos da área de estudo.

No PNE predominam as fisionomias abertas de Cerrado (Campo Limpo e Campo Cerrado), com cerca 83%, ocupando áreas aplainadas e mais elevadas da Superfície Regional de Aplainamento, entre cotas de 800 e 900 metros, principalmente sobre as coberturas superficiais Detrito-Lateríticas. Usualmente se situam sobre solos bem drenados (Latosolos

vermelho-escuro, vermelho-amarelo e cinza-amarelado distróficos e álicos), com textura arenosa e areno-argilosa e argilosa. As áreas de solos hidromórficos, como as várzeas e veredas, favorecem o desenvolvimento das fisionomias do Campo Limpo, que são mais tolerantes a essas condições biofísicas.

A fisionomia de Cerrado *Stricto Sensu* ocorre, predominantemente, nas Zonas de Erosão Recuantes, nas encostas das bacias dos rios Jacuba, onde desenvolve o latossolo vermelho-escuro álico e areias quartzosas álicas, derivados de sedimentos da formação Cachoeirinha. Ocorre também na porção leste do Parque, próximo ao rio Formoso, sobre a Superfície Regional de Aplainamento.

O Cerradão e a Floresta de Galeria, devido ao seu comportamento espectral semelhante, foram discriminados em uma única classe e aparecem associados à latossolo vermelho-escuro álico e areias quartzosas álicas, derivados de sedimentos da formação Cahoeirinha. A fisionomia de Floresta de Galeria está intimamente ligada à Planície Aluvial, ao longo da rede de drenagem que forma as bacias dos rios Jacuba e Formoso. De outra forma, o Cerradão ocorre na forma de “ilhas” associadas às Zonas de Erosão Recuantes, na margem direita do rio Jacuba.

Esse estudo demonstrou que o resultado da classificação por fatiamento dos valores do NDVI gerados a partir de imagens de média-alta resolução espacial, como as imagens TM Landsat-5, constitui técnica útil para o mapeamento dos padrões biogeográficos da vegetação do bioma Cerrado, em escala local e regional, de forma eficiente e com baixo custo operacional.

Foi constatado, que o PNE tem o seu entorno cercado por rodovias e plantações agrícolas, principalmente, soja, milho, sorgo, cana-de-açúcar e áreas de pastagem para a pecuária. Devido a essa proximidade, as sementes de várias espécies de gramíneas, como o capim-gordura, o capim braquiária e outras gramíneas exóticas ao bioma, são disseminadas pelo vento, e proliferam dentro do parque, alterando a paisagem e ameaçando espécies de gramíneas nativas que servem como alimento para indivíduos da fauna local.

Para uma melhor compreensão multidisciplinar e interdisciplinar das características do meio físico do PNE, fazem-se necessários estudos mais detalhados, na escala 1:50.000, em relação ao solo, geologia e geomorfologia, visando o entendimento dos padrões biogeográficos e das relações das unidades morfovegetacionais para o planejamento eficaz da proteção e gestão ambiental do Parque Nacional das Emas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. M. S.; MACHADO, R. B. e MARINHO-FILHO, J. A. Diversidade Biológica do Cerrado. In: AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. J. A. (Eds.). **Cerrado Ecologia e Caracterização**. 1^a. ed. Planaltina: Editora Embrapa Cerrados, 2004. p. 17–40.
- ASPIAZÚ, C.; ALVES, L. M. e VALENTE, O. F. Modelos Digitais de Terrenos: conceituação e importância. **Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo**, n. 21, p. 27–36, 1990.
- BATMANIAN, G. J. **Efeitos do fogo na produção primária e a acumulação de nutrientes no estrato rasteiro de um cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - UNB - Brasília. 1983.
- BOGGIONE, G. D. A. **Restauração de Imagens do Satélite Landsat-7**. Dissertação (Mestrado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - São José dos Campos. 2004.
- CÂMARA, G. e MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CASTANO-MENESES, G. e PALACIOS-VARGAS, J. G. Effects of fire and agricultural practices on neotropical ant communities. **Biodiversity and Conservation**, v. 12, p. 1913–1919, 2003.
- CAVALCANTI, L. F. **Caracterização fitofisionômica do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros-Goiás por meio de imagens TM/LANDSAT-5**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa - Viçosa. 1995.
- CHAVEZ, P. S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 24, n. 3, p. 459–479, 1988.
- COLE, M. M. **The Savannas: biogeography and Geobotany**. London: Academic Press, 1986. p. 438p
- COUTINHO, L. M. O conceito de cerrado. **Revista brasileira de Botânica**, v. 1, p. 17–23, 1978.
- DAVIS, C. e CÂMARA, G. Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: Inpe, 2001.
- EITEN, G. The cerrado vegetation of Brazil. **The Botanical Review**, v. 38, n. 2, p. 201–341, 1972.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999.

FELFILI, J. M. Diversity, structure and dynamics of a gallery forest in central Brazil. **Vegetatio**, v. 117, p. 1–15, 1995.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Eds.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. p. 345.

FERNANDES, L. A. e COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, p. 717–728, 2000.

FILHO, H. C.; GARAGORRY, F. L. e JÚNIOR, J. R. R. M. **Representação da Área do Cerrado por Municípios e Microrregiões Geográficas**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.

FROST, P. G. H. e ROBERTSON, F. The ecological effects of fire in savannas. In: WALKER, B. H. (Ed.). **Determinants of tropical savannas**. Miami: The International Union of Biological Sciences, 1987. p. 93–140.

GLCF. **Global Land Cover Facility**. Disponível em: <<http://glcf.umd.edu/research/portal/geocover/>>. Acesso em: 10 fev. 2013.

GOLDSTEIN, G. e SARMIENTO, G. Water relations of trees and grasses and their consequences for the structure of Savanna vegetation. In: WALKER, B. H. (Ed.). **Determinants of tropical savannas**. Miami: The International Union of Biological Sciences, 1987. p. 13–38.

GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. 2ª. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

GÜRTLER, S. et al. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens TM e ETM+ LANDSAT. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, p. 162–167, 2005.

HARIDASAN, M. Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, p. 54–64, 2000.

HUETE, A. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.

IBAMA. **Plano de Manejo do Parque Nacional das Emas**. Brasília, DF: [s.n.], 2004.

IBGE. **Introdução ao Processamento Digital de Imagens**. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2001.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 15 out. 2013.

ICMBIO. **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**. Disponível em: <www.icmbio.gov.br/portal/biodiversidade/unidades-de-conservacao/biomas-brasileiros/cerrado/unidades-de-conservacao-cerrado/2093-parna-das-emas.html>. Acesso em: 15 out. 2013.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2013.

INPE. **Catálogo de Imagens**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em: 12 out. 2013.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 2^a. ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2004.

KLINK, C. A. e MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, 2005.

LATORRE, M. et al. Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 153–178, 2002.

LATRUBESSE, E. e CARVALHO, T. M. **Geomorfologia do Estado de Goiás**. Goiânia: Superintendencia de Geologia e Mineração do Estado de Goiás, 2006.

MATHER, P. M. **Computer Processing of Remotely-Sensed Images, An Introduction**. 3rd. ed. Chichester, UK: Wiley-Blackwell, 2004. p. 350

MENESES, P. R. e NETTO, J. S. M. **Sensoriamento Remoto - Reflectância dos Alvos Naturais**. 1^a. ed. Brasília: Embrapa, 2001. p. 262

MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Porto Alegre. 1997.

MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.

MIRANDA, H. S. et al. Queimadas de Cerrado: caracterização e impactos. In: AGUIAR, L. M. S.; CAMARGO, A. J. A. (Eds.). **Cerrado ecologia e caracterização**. 1^a. ed. Planaltina: Editora Embrapa Cerrados, 2004. p. 69–123.

MIRANDA, H. S.; BUSTAMANTE, M. M. C. e MIRANDA, A. C. The Fire Factor. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (Eds.). **The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna**. New York, USA: Columbia University Press, 2002. p. 51–68.

MMA. **Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Bioma Cerrado**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Centro de Informação e Documentação, 2006. p. 56

MMA. **Unidades de Conservação por Bioma**. Brasília: MMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80112/0813_ConsolidadoBiomas.pdf>, 2011.

MMA. **Ministério do Meio Ambiente**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>. Acesso em: 10 out. 2013.

MORAIS, R. P. De. As Transformações Socioeconômicas e Ambientais no Cerrado. In: GUIMARÃES, L. D.; SILVA, M. A. D.; ANACLETO, T. C. (Eds.). **Natureza Viva: Cerrado**. 1. ed. Goiânia: Editora da UCG, 2005. p. 115–132.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3^a. ed. Viçosa: UFV - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

NASA. **Landsat Science**. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov>>. Acesso em: 9 out. 2013.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. 4^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

OLIVEIRA-FILHO, A. T. et al. Environmental factors affecting physiognomic and floristic variation in an area of cerrado in central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 5, p. 413, 1989.

PENA, G. S. et al. **Projeto Goiânia II Goiânia, CPRM, v. 1. - Relatório Final**. Goiânia: Convênio CPRM/DNPM, 1975.

PONZONI, F. J. e SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação**. 2010. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2010.

RIBEIRO, J. F. et al. Os principais tipos fisionômicos da região dos cerrados. **Boletim de Pesquisa EMBRAPA/CPAC**, v. 21, 1983.

RIBEIRO, J. F. e WALTER, B. M. T. Fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). **Cerrado: ambiente e flora**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1998. p. 151–199.

RICHARDS, J. A. e JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis**. 4th. ed. Canberra, Australia: Springer, 2006.

RODRIGUES, F. H. G. et al. Composição e caracterização da fauna de mamíferos do Parque Nacional das Emas, Goiás, Brasil. **Revista brasileira de Zoologia**, v. 19, n. 2, p. 589–600, 2002.

SANO, S. e ALMEIDA, S. P. **Cerrado: Ambiente e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC, 1998.

SCHERER, C. M. S. Preservation of aeolian genetic units by lava flows in the Lower Cretaceous of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentology**, p. 97–116, 2002.

SHUVARTZ, M. e ANTUNES, E. C. Cerrado: Unidades de Conservação Federais. In: GUIMARÃES, L. D.; SILVA, M. A. D. DA; ANACLETO, T. C. (Eds.). **Natureza Viva: Cerrado**. 1^a. ed. Goiânia: Editora da UCG, 2005. p. 133–152.

SIEG. **Sistema Estadual de Geoinformação**. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em: 12 out. 2013.

SILVA, M. A. D. e ANACLETO, T. C. S. O Fogo no Cerrado. In: GUIMARÃES, L. D.; SILVA, M. A. D. DA; ANACLETO, T. C. (Eds.). **Natureza Viva: Cerrado**. 1^a. ed. Goiânia: Editora da UCG, 2005. p. 93–112.

USGS. **U.S. Geological Survey's**. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 out. 2013.

VALENTE, C. R. Caracterização Geral e Composição Florística do Cerrado. In: GUIMARÃES, L. D.; SILVA, M. A. D.; ANACLETO, T. C. (Eds.). **Natureza Viva: Cerrado**. 1^a. ed. Goiânia: Editora da UCG, 2005. p. 19–44.

VALENTE, C. R.; LATRUBESSE, E. M. e FERREIRA, L. G. Relationships among vegetation, geomorphology and hydrology in the Bananal Island tropical wetlands, Araguaia River basin, Central Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 46, p. 150–160, 2013.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R. e LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1991.

WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado: síntese terminológica e relações florísticas**. Tese (Doutorado), Departamento de Ecologia, Instituto de Ciências Biológicas, UNB - Brasília. 2006.

Resumo do Currículo Lattes

Endereço para acessar: <http://lattes.cnpq.br/3317201856108911>

Possui graduação em Tecnologia em Geoprocessamento pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (2006). Atua principalmente nos seguintes temas: Sensoriamento Remoto, Processamento Digital de Imagens e Geoprocessamento. Professor substituto das disciplinas: Processamento Digital de Imagens e Sensoriamento Remoto do Curso Superior de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás entre os anos de 2009 a 2010. Mestrando em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa, Linha de Pesquisa: Modelagem de Sistemas Ambientais no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.