

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**USO DE IMAGENS LANDSAT E CBERS NO
MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO
NA REGIÃO DE PRIMAVERA DO LESTE – MT**

KAROLEY LIMA CUNHA

ORIENTADOR: SHOZO SHIRAIWA

CUIABÁ, JUNHO DE 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**USO DE IMAGENS LANDSAT E CBERS NO
MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À EROSÃO
NA REGIÃO DE PRIMAVERA DO LESTE – MT**

KAROLEY LIMA CUNHA

*Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Física Ambiental.*

ORIENTADOR: SHOZO SHIRAIWA

CUIABÁ, JUNHO DE 2009

Cunha, Karoley Lima

Uso de imagens dos satélites Landsat E CBERS no mapeamento da suscetibilidade à erosão na região de Primavera do Leste – MT / Karoley Lima Cunha. – Cuiabá, MT, 2009/ Instituto de Física. 63 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, 2009

Orientador: Shozo Shiraiwa

Bibliografia:

1. Classificação de imagens. 2. Erosão. 3. Planalto dos Guimarães. I. Título. II. Cuiabá - Instituto de Ciências Exatas e da Terra.

CDU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

**Título: USO DE IMAGENS LANDSAT E CBERS NO MAPEAMENTO DA
SUSCETIBILIDADE À EROSÃO NA REGIÃO DE PRIMAVERA DO LESTE
– MT**

Autor: KAROLEY LIMA CUNHA

Dissertação defendida e aprovada em 19 de junho de 2009, pela comissão julgadora:

Shozo Shiraiwa
(IF - UFMT - Orientador)

Peter Zeilhofer
(ICHS - UFMT - Examinador interno)

Antônio Brandt Vecchiato
(ICET – UFMT - Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Dedico especialmente à minha querida Mãe,
que já não está mais entre nós, mas sei que
onde quer que esteja está olhando por mim.

AGRADECIMENTOS

- Ao Prof. Shozo Shiraiwa, pela orientação, condução e apoio na realização deste trabalho;
- Ao Prof. José de Souza Nogueira, pelo apoio e incentivo ao longo desta Pós-Graduação;
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento com seus ensinamentos;
- A toda a minha família pela compreensão, incentivo e assistência, especialmente ao meu querido Pai e meu irmão Jovino;
- A minha querida irmã Terezinha e família, pela atenção, carinho, assistência e por me dar forças para continuar a caminhada sempre;
- A Diego e sua família, que mesmo longe me deram carinho e apoio nas horas difíceis;
- A minha grande amiga Fernanda, por estar presente em minha vida especialmente ao longo deste mestrado nas horas boas e ruins e pela ajuda neste trabalho;
- Aos amigos que ganhei durante esses dois anos de Pós, especialmente Bernardo, que não me ajudou neste trabalho, mas me proporcionou muitas e boas risadas e tornou minha vida mais leve nos dias difíceis;
- Ao amigo Tiago, que sempre me ajudou com sua vasta sabedoria em SIG's e pelas caronas;
- Aos meus amigos de Minas Gerais, que mesmo longe me deram muito apoio e carinho;
- Aos funcionários do Programa de Pós-Graduação pela atenção;
- À Universidade Federal de Mato Grosso, pelo ensino e por me receber nesta instituição;
- A CAPES, pelo financiamento.

Sê

*“Se não puderes ser um pinheiro, no topo
de uma colina,*

*Sê um arbusto no vale, mas sê
o melhor arbusto à margem do regato.*

*Sê um ramo, se não puderes ser uma
árvore.*

*Se não puderes ser um ramo, sê um pouco
de relva e dá alegria a algum caminho.*

*Se não puderes ser uma estrada, sê apenas
uma senda,*

Se não puderes ser o Sol, sê uma estrela.

*Não é pelo tamanho que terás êxito ou
fracasso...*

Mas sê o melhor no que quer que sejas.”

(Pablo Neruda)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Sistemas satélites	5
2.2 Satélite LANDSAT	7
2.3 Satélite CBERS.....	9
2.4 Missão SRTM	12
2.5 Outros satélites	13
2.6 Imagens digitais.....	15
2.7 Geoprocessamento, sensoriamento remoto e Sistemas de Informação Geográfica.....	17
2.8 Comportamento espectral de alvos.....	19
2.8.1 Características espectrais da vegetação.....	20
2.8.2 Características espectrais da água	21
2.8.3 Características espectrais do solo.....	21
2.9 O Processo erosivo.....	22
2.10 Fatores controladores da erosão	24
2.10.1 Topografia	25
2.10.2 Erodibilidade do solo	25
2.10.3 Vegetação e uso do solo	26
2.11 Tipos de erosão	28

3	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1	Localização e caracterização da área de estudo.....	31
3.1.1	Hidrografia	33
3.1.2	Geologia	33
3.1.3	Solos.....	34
3.1.3.1	Latossolos.....	34
3.1.3.2	Neossolos	35
3.1.3.3	Cambissolos	35
3.1.3.4	Oganossolos	35
3.1.3.5	Plintossolos	36
3.1.4	Unidades geomorfológicas.....	36
3.1.5	Unidades climáticas	38
3.1.6	Vegetação.....	39
3.2	Imagens e softwares utilizados.....	39
3.3	Visita de campo	41
3.4	Caracterização das classes temáticas	41
3.5	Técnicas de processamento digital de imagens.....	43
3.5.1	Pré-processamento	44
3.5.2	Técnicas de realce	44
3.6	Interpretação de imagens	45
3.7	Segmentação de imagens	47
3.8	Classificação de imagens	48
3.9	Verificação da precisão da classificação	50
3.10	Integração de dados para mapeamento da erosão.....	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Visita de campo	58
4.2	Pré-processamento das imagens	67
4.2.1	Georreferenciamento.....	67
4.2.2	Realce linear do contraste	67
4.3	Segmentação	73

4.4	Classificação das imagens.....	77
4.4.1	Classificação por regiões (supervisionada e não supervisionada)	77
4.4.1.1	Classificação Iseseg	77
4.4.1.2	Classificação Bhattacharya	81
4.4.1.3	Classificação Maxver	89
4.5	Suscetibilidade À erosão: análise da Erodibilidade, declividade e uso e cobertura do solo	96
5	CONCLUSÕES	109
6	BIBLIOGRAFIA.....	111
	ANEXOS	118

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Curva padrão da reflexão espectral do solo seco, vegetação e água clara (fonte: http://www.igeo.pt/gdr).	20
FIGURA 2: Localização da área de estudo.....	32
FIGURA 3: Trilha e pontos obtidos durante a visita de campo realizada nos dias 18 e 19/03/2009.	59
FIGURA 4: (A) Milho, (B) milho, (C) milho e (D) soja - culturas em estágio inicial.	60
FIGURA 5: (A) Milho sadio, (B) milho florido, (C) algodão sadio e (D) algodão florido - cultura sadia/madura.	61
FIGURA 6: (A) Milho seco e (B) soja seca - culturas secas, prontas para colheita. .	61
FIGURA 7: Solo exposto, após colheita da safra.	62
FIGURA 8: (A) Área de cerrado, (B) área alagada, (C) canais de drenagem, (D) pastagem, (E) Rio das Mortes e mata ciliar e (F) cerrado/mata ciliar.....	63
FIGURA 9: (A) e (B) Erosão à beira da MT 070, (C) erosão à beira de estrada, (D) (E) e (F) bacias de contenção à beira de estrada.	64
FIGURA10: (A) Erosão na cidade de Primavera do leste; (B) voçoroca na borda do Planalto, (E) voçoroca na borda do Planalto (D) canal de escoamento da água, (E) bacia de contenção na borda do planalto e (F) bacia de contenção ainda com água da chuva	66
FIGURA 11: Banda 3 (A e B), banda 4 (C e D) e banda 5 (E e F), Landsat/Maio ...	68
FIGURA 12: Composição RGB (Landsat/Maio) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B)) após a aplicação do realce.	68

FIGURA 13: Banda 3 (A e B), banda 4 (C e D) e banda 5 (E e F), da imagem Landsat/Agosto.	69
FIGURA 14: Composição colorida (Landsat/Agosto) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.	70
FIGURA 15: Bandas da imagem CBERS/Julho antes e depois do realce linear. Banda 2 (A e B), banda 3 (C e D) e banda 4 (E e F).....	71
FIGURA 16: Composição colorida RGB (CBERS/Julho) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.	72
FIGURA 17: Bandas da imagem CBERS/Agosto antes e depois do realce linear. Banda 2 (A e B), banda 3 (C e D) e banda 4 (E e F).....	72
FIGURA 18: Composição colorida RGB (CBERS/Agosto) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.....	73
FIGURA 19: (A) Imagem Landsat 5, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 8 e 12 e (B) imagem segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 30 e 40.....	74
FIGURA 20: Imagem Landsat de 08/05/2008, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 20 e 30.	75
FIGURA 21: Imagem Landsat de 12/08/2008, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 20 e 20.	75
FIGURA 22: Imagem CBERS de 15/08/2007, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 18 e 30.	76
FIGURA 23: Imagem CBERS de 02/07/2007, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 15 e 30.	76
FIGURA 24: Temas identificados pelo algoritmo Isoseg, (A) Landsat/Maio; (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto.....	78

FIGURA 25: Imagens classificadas pelo algoritmo Isoseg (A) Landsat/Maio; (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto.....	79
FIGURA 26: Índice Kappa e Exatidão Global para o classificador Bhattacharya (%)	82
FIGURA 27: Exatidão do produtor e exatidão do usuário para cada classe mapeada nas imagens Landsat e CBERS pelo classificador Bhattacharya.....	84
FIGURA 28: Mapeamento das classes de uso do solo pelo algoritmo Bhattacharya, (A) Landsat/Maio, (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto...	86
FIGURA 29: Índice Kappa e Exatidão Global para a classificação Maxver.....	90
FIGURA 30: Exatidão do produtor e exatidão do usuário para cada classe mapeada nas imagens Landsat e CBERS, utilizando o algoritmo Maxver.....	91
FIGURA 31: Classificação Maxver da imagem CBERS/Agosto.....	94
FIGURA 32: Classificação Maxver das imagens (A) CBERS/Julho, (B) Landsat/Maio e (C) Landsat/Agosto	95
FIGURA 33: Comparação dos valores de índice Kappa e exatidão global para as classificações Bhattacharya e Maxver.	96
FIGURA 34: Mapa de graus de erodibilidade	98
Figura 35: Graus de declividade do terreno	100
FIGURA 36: Graus de proteção da vegetação e usos contra a erosão dos solos.....	103
FIGURA 37: Mapa de suscetibilidade á erosão.....	106

LISTA DE QUADROS E TABELAS

QUADRO 1: Bandas e faixas espectrais do Landsat TM. Fonte: DGI, 2008.....	9
QUADRO 2: Bandas e faixas espectrais do CBERS. Fonte: DGI, 2008.....	11
QUADRO 3: Principais aplicações para as bandas espectrais do Landsat 5 TM (adaptado de LILLESAND & KIEFFER, 1994).....	40
QUADRO 4: Calendário agrícola (adaptado da EMPAER, 2009).....	42
QUADRO 5: Classes de erodibilidade.....	54
QUADRO 6: Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta, adaptado de BERTONI & LOMBARDI NETO (2005)	56
QUADRO 7: Classes de uso e ocupação	56
QUADRO 7: Classes de declividade	57
TABELA 1: Temas gerados na classificação automática utilizando o algoritmo Isoseg.	77
TABELA 2: Área classificada pelo algoritmo Isoseg (%).....	80
TABELA 3: Área classificada pelo algoritmo Bhattacharya (%).....	87
TABELA 4: Classes de erodibilidade	97
TABELA 5: Classes de declividade.....	99
TABELA 6: Classes preliminares de potencial a erosão	101
TABELA 7: Causas de proteção da vegetação contra a erosão dos solos	102
TABELA 8: Classes de suscetibilidade a erosão	104
TABELA 9: Áreas ocupadas pelas classes de suscetibilidade.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E UNIDADES

μm	Micrômetro
ARCGIS	Grupo de programas informáticos que constitui um SIG
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
EG	Exatidão Global
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPAER	Empresa Matogrossense de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural
EP	Exatidão do Produtor
EU	Exatidão do Usuário
EUA	Estados Unidos da América do Norte
GB	<i>Gigabyte</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HRV	<i>High Resolution Visible</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IK	Índice Kappa
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
K	Índice Kappa
km^2	Quilômetros quadrados
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
MAXVER	Máxima verossimilhança
MDT	Modelo Digital do Terreno
METEOSAT	<i>Meteorological Satellite</i>
MISR	<i>Multi-angle Imaging Spectro-Radiometer</i>
mm	Milímetros
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MOPPIT	<i>Measurements Of Pollution In The Troposphere</i>
MP	<i>Mega Pixels</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>

NIMA	<i>National Imagens and Mapping Agency</i>
NOAA	<i>National Oceanic Atmospheric Administration</i>
PAN	Pancromático
PDI	Processamento Digital de Imagens
pH	Potencial hidrogeniônico, indicador ácido-base
RGB	Vermelho (<i>Red</i>), Verde (<i>Green</i>) e Azul (<i>Blue</i>)
SEPLAN	Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SPOT	<i>Satellite pour l'Observation de la Terre</i>
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
TIFF	<i>Tagged Image File Format</i>
TIROS	<i>Television Infrared Observation Satellite</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UTM	Projeção Universal Transversal de Mercator

RESUMO

CUNHA, K. L. *Uso de imagens Landsat e CBERS no mapeamento da suscetibilidade à erosão na região de Primavera do Leste – MT*. Cuiabá, 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso.

O mapa de suscetibilidade à erosão dos solos na região de Primavera do Leste é apresentado neste trabalho. Para sua elaboração foram integrados dados de declividade, erodibilidade e uso e cobertura do solo. O mapeamento do uso do solo foi feito através da classificação das imagens do satélite Landsat TM-5, dos meses de maio e agosto de 2008, e imagens CBERS CCD-2, dos meses de julho e agosto de 2008. Foram utilizados os classificadores Isoseg, Bhattacharya e Maxver, disponíveis no SPRING. A acurácia da classificação foi determinada através do cálculo da Exatidão Global e do Índice Kappa. A imagem que gerou a melhor classificação foi a imagem Landsat do mês de maio classificada com o algoritmo Maxver, com Exatidão Global de 83% e índice Kappa de 80%. A área possui cerca de 3000 km² dos quais mais de 50% são usados pela agricultura. Menos de 30% da área é coberta pela vegetação nativa e a maior parte dos solos possui erodibilidade fraca ou muito fraca. A declividade foi obtida através de dados da missão SRTM e classificada como fraca ou muito fraca em grande parte da área. A integração dos dados de declividade, erodibilidade e uso do solo foi realizada ArcGis 9.2 e foram definidas cinco classes de suscetibilidade à erosão. 36% da área é classificada como moderadamente suscetível, 32% da área, pouco suscetível e 23%, pouco a não suscetível e são relacionadas às áreas de mata ciliar e cerrado. As classes extremamente suscetível e muito suscetível ocupam 2,46% e 2,88% da área, ficando restritas às áreas de borda e escarpas do planalto. O mapa de suscetibilidade fornece informações relacionadas à fragilidade dos ambientes, úteis na elaboração de planos de manejo e de conservação do solo, ou que podem ser utilizadas em projetos de implantações de obras em áreas urbanas ou agrícolas.

Palavras-chave: Classificação de imagens, SIG, erodibilidade.

ABSTRACT

CUNHA, K. L. *Use of Landsat-5 TM and CBERS-2 CCD for erosion susceptibility map on the Primavera do Leste region - MT.* Cuiabá, 2009. 147 p. Dissertation (Master in Science) – Mato Grosso Federal University.

To map susceptibility to soil erosion on the Primavera do Leste region, slope, erodibility and use of land, were integrated. To the current use of land map, Landsat TM-5 images, of the May and August, and CBERS-2 CCD, of the July and August, were classified. The classifiers used were the Isoseg, Bhattacharya and Maxver, available in the SPRING. The accuracy of classification was determined by calculating the Global Accuracy and Kappa index. The image that generated the best classification was the Landsat image from May, classified with the algorithm Maxver, with Global Accuracy of 83% and Kappa index of 80%. The area has about 3000 km² of which more than 50% are used by agriculture. Less than 30% of the area is covered by native vegetation and most of the soil erodibility is low or very low. The slope was obtained using data from the mission SRTM and classified as low or very low in mostly area. To facilitate the integration of data of slope, erodibility and use of the soil, was used Arcgis 9.2 and were defined five classes of susceptibility. The map of susceptibility indicates that 36% of the area is classified as moderately susceptible. The class little susceptible represents 32% of the area and little to no susceptible 23%, and are related to areas of riparian forest and cerrado. The classes extremely susceptible and very susceptible occupy 2.46% and 2.88% of the area, being restricted to border areas and escarpments of the plateau. The map of susceptibility provides information related to the fragility of the environment, useful in the preparation of management plans and conservation of soil, or can be used in deployments of works projects in urban areas or agricultural.

Keywords: Image classification, GIS, erodibility.

1 INTRODUÇÃO

A degradação do meio ambiente devido à pressão humana e ao uso incorreto das terras é um dos maiores problemas no mundo. Atualmente os países em desenvolvimento vêm sofrendo mais com esse problema devido a fatores como o rápido crescimento demográfico e a necessidade de aumento da produção de produtos para o consumo humano e isso leva à busca por novas terras agricultáveis e à ocupação urbana de áreas inadequadas, e nessa busca, rapidamente, são reduzidos os recursos naturais.

Nesse contexto, a tendência do agricultor brasileiro foi de buscar novas áreas do território para aumentar a produção, considerando a vastidão do território e a fertilidade original de suas terras e com isso houve, e ainda há, uma caminhada rumo ao oeste e norte do país em busca de novas terras.

A ocupação do cerrado de forma mais acelerada se iniciou durante a implantação de um projeto de colonização dos cerrados de Mato Grosso do Sul e Goiás, com a finalidade de proporcionar a ocupação racional e ordenada do cerrado. Para isso o governo criou programas de desenvolvimento como: o Polocentro (Programa de Desenvolvimento dos Cerrados) em 1975; o Prodecer (Programa de Cooperação Nipo-Brasileira para o Desenvolvimento dos Cerrados) em 1980, o Padap (Programa de Assentamento Dirigido do Alto Paranaíba) e o Proálcool (Programa Nacional do Álcool) em 1975 (BACCARO, 1999).

Essa forma de ocupação trouxe grandes mudanças para a região, pois começou se a usar mecanismos de agricultura moderna, com a adoção de intensa

mecanização, adubação, agrotóxicos, etc. Essa modernização provocou alterações na biodiversidade, no equilíbrio hidrogeomorfológico das vertentes, na sedimentação dos fundos de vales e na diminuição da vazão dos mananciais.

No Brasil, um dos fatores de desgaste que mais seriamente tem contribuído para a improdutividade do solo é, sem dúvida, a erosão hídrica, facilitada e acelerada pelo homem com suas práticas inadequadas de agricultura. Além disso, podem-se citar outros fatores que contribuem para o empobrecimento do solo como: a lavagem dos elementos nutritivos solúveis nas águas de percolação, que se infiltram em profundidades onde as raízes das plantas não alcançam; a queima acelerada de matéria orgânica e o consumo sem a devida reposição dos elementos nutritivos extraídos da terra nos produtos agrícolas, vegetais ou animais.

Os problemas advindos do uso irracional do solo, seja ele urbano ou rural, têm despertado cada vez mais o interesse de estudiosos e pesquisadores no mundo todo. O aumento da população mundial e a crescente demanda por alimentos têm levado a comunidade científica a buscar soluções para um uso mais eficiente do solo, diminuindo a produtividade do solo e a perda por erosão (SILVA, 1999).

A necessidade de se conhecer, mapear e monitorar o uso do solo, para se buscar uma ocupação mais controlada das terras é uma questão que vem sendo levantada há muitos anos, e que era limitada devido ao tempo e aos custos envolvidos nos levantamentos de campo e elaboração dos mapas. Essa preocupação se tornou maior a partir do crescimento dos centros urbanos e do setor agropecuário e da intensa exploração dos recursos naturais. O levantamento do uso do solo tornou-se um aspecto de interesse, uma vez que é um aspecto primordial para qualquer ação de planejamento do território e gestão dos recursos naturais (DESTRO & CAMPOS, 2006).

Esses fatores juntamente com as necessidades de planejamento de cada região do país levaram a um aprimoramento das técnicas e equipamentos ligados a essa finalidade e nesse contexto surge o sensoriamento remoto e o geoprocessamento e faz com que essas ferramentas sejam de grande importância.

Uma técnica bastante utilizada no acompanhamento da dinâmica do uso do solo é a interpretação das imagens de satélite, que pode ser feita de forma analógica, através da observação de algumas de suas características, tais como brilho, cor,

tamanho, forma, tonalidade, sombra, contexto, declividade, posição, bem como pela detecção dos limites entre áreas homogêneas e identificação de seus polígonos.

Através da análise do uso e ocupação do solo da região é possível identificar regiões suscetíveis aos processos erosivos, causados principalmente pela retirada da cobertura vegetal e da falta de práticas adequadas de uso do solo.

A degradação ambiental gera processos erosivos que tornam os solos menos produtivos e o ambiente desequilibrado, por isso, o controle e monitoramento da erosão são de fundamental importância no estabelecimento de qualquer uso do solo.

Devido à retirada da maior parte da cobertura vegetal natural, ao uso intenso do solo com a agricultura mecanizada e pecuária e à ocupação urbana em áreas inadequadas do Planalto dos Guimarães, a região escolhida para este estudo possui todos os fatores antrópicos que aceleram o processo erosivo, e que, juntamente com os fatores naturais como solos, declividade, cobertura vegetal e outros, indicam que a área tem grande potencial de risco à erosão.

O objetivo geral deste trabalho é gerar uma carta de suscetibilidade à erosão numa região do Planalto dos Guimarães, que engloba parte dos municípios de Primavera do Leste, Poxóreo, Dom Aquino e Campo Verde.

Os objetivos específicos a serem alcançados são: classificar as imagens dos satélites Landsat TM/5 e CBERS CCD/2 utilizando o SIG SPRING; testar o método de classificação por crescimento de regiões, utilizando o algoritmo não supervisionado Iseeg; testar o método de classificação por crescimento de regiões, utilizando o algoritmo supervisionado Bhattacharya; testar o método de classificação por *pixel*, utilizando o algoritmo Maxver; gerar a matriz de erro para cada classificação e discutir a eficiência dos métodos de classificação através da Exatidão Global, Índice Kappa e demais estatísticas geradas pela matriz de erro; decidir qual classificação gerou o melhor mapa de uso e ocupação; gerar o mapa de declividade através do Modelo Numérico do Terreno (imagem SRTM), gerar o mapa de erodibilidade dos solos, manipular e integrar todos esses dados no SIG ArcGis 9.2 para gerar a carta de suscetibilidade e analisar os resultados.

No item 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre os principais temas desse estudo, como os tipos de imagens usadas para o mapeamento das classes de uso do solo e as técnicas utilizadas para este fim; geoprocessamento, sensoriamento

remoto e Sistemas de Informação Geográfica; o processo erosivo desde seu início, os fatores controladores da erosão e suas diversas formas de ocorrência.

No item 3 é apresentada uma descrição da área de estudo, envolvendo os aspectos físicos como geologia, relevo, tipos de solos e hidrografia e foram descritas todas as metodologias usadas para se classificar as imagens de satélite para se gerar a carta de uso do solo e por fim o mapa de suscetibilidade a erosão.

Os resultados obtidos são discutidos no item 4. Inicialmente são analisadas as informações de campo e os produtos obtidos após do pré-processamento das imagens de satélite. Posteriormente são apresentados e discutidos os resultados de todas as etapas. No item 5 são apresentadas as conclusões deste estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo foi realizado um levantamento bibliográfico a respeito dos sistemas satélites e sobre os produtos gerados pelos satélites Landsat e CBERS, usados neste trabalho, além de descrever brevemente os sistemas mais utilizados atualmente em estudos ambientais. Posteriormente foi feito um breve apanhado a respeito das principais características das imagens digitais e sobre seu uso nos estudos ligados a erosão.

Ainda são tratados neste capítulo o sensoriamento remoto, geoprocessamento, SIG, que são as ferramentas usadas na manipulação e análise dos produtos orbitais. Como o estudo inclui a classificação de imagens orbitais, foi importante fazer uma breve revisão a respeito do comportamento espectral dos alvos. Por fim foi descrito o processo erosivo desde seu início, os fatores naturais e antrópicos que o influenciam e as formas como ele se apresenta (ravinas, voçorocas, et.) .

2.1 SISTEMAS SATÉLITES

Um grande número de satélites de observação da Terra orbita nosso planeta com o objetivo de fornecer imagens freqüentes da superfície. Existem dois tipos de satélites:

- Satélites geostacionários ou geossincronizados – são posicionados num ponto fixo no espaço de uma maneira que se sincronizem com a rotação da Terra e permaneçam sempre estacionados sobre um ponto geográfico da superfície terrestre.

- Satélites de órbita polar ou solarsincronizado (de órbita sincronizada com o Sol) – estes satélites ficam circulando de pólo a pólo, cruzando o plano da linha do equador.

Cada satélite possui um tipo de aplicação diferente e quanto a suas aplicações eles são classificados em três tipos:

1. Satélites de comunicação,
2. Satélites de recursos ambientais e
3. Satélites meteorológicos.

Cada satélite de sensoriamento remoto carrega a bordo sensores de imageamento. Para avaliar a capacidade desses sensores são aplicados, principalmente, dois critérios: resolução espacial e resolução espectral. A resolução espacial ou geométrica refere-se ao campo de visada instantânea (IFOV), e indica o tamanho do *pixel* no terreno ou a menor área possível a ser abrangida por uma unidade de imagem. Quanto maior for a resolução geométrica melhor será o detalhamento de objetos em cena, resultando em um conjunto maior de informações.

A resolução espectral é definida como a capacidade de um sensor de espectrorradiômetro de medir a reflectância de uma determinada faixa de comprimento da onda eletromagnética, ou seja, é a capacidade que um sensor tem para discriminar objetos em função da sua sensibilidade espectral (FLORENZANO, 2008; LIU, 2006). A banda espectral mais estreita significa a resolução mais alta.

Ainda podem ser citadas a resolução radiométrica do sensor, que se refere à sua capacidade de discriminação das intensidades de energia refletida ou emitida pelos objetos e a resolução temporal, que é a frequência com que o imageamento sobre uma mesma área é realizado.

Os sensores a bordo dos satélites captam a energia (radiação eletromagnética) refletida ou emitida pela superfície em diferentes comprimentos de onda ou frequência, e alguns a absorção da radiação na atmosfera. Nossos olhos são sensibilizados apenas com a radiação da região do visível, enquanto que os sensores ópticos captam a radiação da região do visível e do infravermelho e os sensores do tipo radar (*Radio Detection Ranging*) captam a radiação na faixa espectral de

microondas.

Os radares podem operar durante a noite, dias nublados, com chuva ou com fumaça e essa é uma vantagem importante, principalmente em países tropicais como o Brasil, que ficam parte do tempo coberto por nuvens em extensas regiões do seu território (FLORENZANO, 2008).

Os sensores podem ser classificados quanto à fonte de radiação, ao princípio de funcionamento e ao tipo de produto gerado. De acordo com a finalidade ou a grandeza que se deseja medir é possível escolher determinados equipamentos que melhor se prestem a atividade.

2.2 SATÉLITE LANDSAT

A NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou dos Estados Unidos no dia 23 de julho de 1972 o satélite chamando ERTS 1 - *Earth Resources Technology Satellite*, que logo após seu lançamento foi renomeado, passando a se chamar Landsat. Esses satélites são destinados a exploração dos recursos da Terra e desde 1972 foram lançados com sucesso uma série de seis satélites: 1, 2, 3, 4, 5, e 7.

O Landsat é um satélite amplamente usado em parte porque tem uma grande série temporal de dados. Os primeiros satélites da família Landsat foram equipados com o MSS (*Multispectral Scanner*) com quatro bandas de 80 m de resolução. Mais tarde o Landsat 4 e 5 ganharam o sensor TM (*Thematic Mapper*). O Landsat 5 foi lançado em 1 de março de 1984 e continua ativo até o momento, e seu objetivo é utilizar sensores multiespectrais para gerar imagens da superfície com média resolução espacial. Porém as imagens geradas atualmente possuem reduzida qualidade e estão cada vez mais degradadas. E o último satélite lançado adquiriu o sensor ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) e possui ainda um sensor pancromático e dois sensores de banda termal (VRIELING, 2006; LIU, 2006).

Os satélites Landsat 4 e 5 são superiores aos seus antecessores, pois fornecem imagens direto às estações de recepção localizadas em várias regiões do globo via satélites de comunicação para receberem os sinais registrados pelos sensores TM e MSS, possuem distribuição de energia para a operação de instrumentos, sensores e equipamentos de suporte, controle de estabilidade da altura relacionada as estações

terrestres e intercomunicação com os ônibus espaciais.

Os sensores TM fornecem melhor resolução espacial (30 m), com exceção da banda 6 (banda termal) com 120 m, fidelidade geométrica aperfeiçoada, maior detalhe radiométrico e melhor definição das bandas espectrais que o sensor MSS. A órbita destes sensores é circular, quase polar, sincronizada com o sol e com uma altitude de 705 km.

A antena do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em Cuiabá recebe de forma contínua as imagens de todo o território nacional, constituindo um enorme acervo de dados de um longo período sobre o Brasil e a América Latina.

As principais aplicações do Landsat, de acordo com LIU (2006), são:

- a) Acompanhamento dos usos do solo;
- b) Apoio ao monitoramento de áreas de preservação;
- c) Atividades mineradoras
- d) Cartografia e atualização de mapas;
- e) Desmatamentos;
- f) Detecção de invasões em áreas indígenas;
- g) Dinâmica de urbanização;
- h) Estimativas de fitomassa;
- i) Monitoramento da cobertura e condições de crescimento vegetal;
- j) Queimadas;
- k) Secas e inundações,
- l) Sedimentos em suspensão e
- m) Monitoramento da qualidade da água.

A interpretação das imagens de satélites pelos usuários finais depende principalmente dos atributos de textura e cores presentes na imagem, principalmente para discriminar alvos que apresentem grande variedade, como tipos de vegetação, padrões específicos de uso e ocupação do solo e interpretações ligadas à geomorfologia.

As imagens Landsat contêm todas as bandas espectrais e cada banda representa a resposta do solo em uma certa faixa espectral, como pode ser visto no quadro 1.

QUADRO 1: Bandas e faixas espectrais do Landsat TM. Fonte: DGI, 2008.

Banda	Faixa espectral
1	0,45 a 0,52 μm – azul
2	0,52 a 0,60 μm – verde
3	0,63 a 0,69 μm – vermelho
4	0,76 a 0,90 μm - infravermelho próximo
5	1,55 a 1,75 μm - infravermelho médio
6	10,4 a 12,5 μm - infravermelho termal
7	2,08 a 2,35 μm - infravermelho distante

Para a visualização e confecção dos produtos em papel, uma imagem em preto e branco é composta com apenas uma banda, enquanto que uma imagem colorida é feita com 3 bandas, associando-as às bandas as cores azul, verde e vermelha, a sua escolha. De acordo com o DGI (2008), as principais combinações para imagens coloridas em papel são:

- Bandas 3, 2 e 1: imagens em "cor natural", com boa penetração na água, realçando as correntes, a turbidez e os sedimentos. A vegetação aparece em tonalidades esverdeadas.
- Bandas 4, 3 e 2: define melhor os limites entre o solo e a água, ainda mantendo algum detalhe em águas pouco profundas, e mostrando as diferenças na vegetação que aparece em tonalidades de vermelho.
- Bandas 3, 4 e 5: mostra mais claramente os limites entre o solo e a água, com a vegetação mais discriminada, aparecendo em tonalidades de verde e rosa.
- Bandas 2, 4 e 7: mostra a vegetação em tons verdes e permite discriminar a umidade tanto na vegetação como no solo.

2.3 SATÉLITE CBERS

Um programa de cooperação foi assinado em 6 de julho de 1988 entre China e Brasil para o desenvolvimento de dois satélites de observação da Terra. Esse

programa desenvolveu os satélites da série *China Brazil Earth Resources Satellite* – CBERS, que combina recursos financeiros e tecnológicos dos dois países. O primeiro satélite da série o CBERS 1 foi lançado em 14 de outubro de 1999 e o CBERS 2, que é tecnicamente idêntico ao CBERS 1, foi lançado em 21 de outubro de 2003.

O satélite CBERS é composto por dois módulos. O primeiro módulo acomoda os sistemas óticos de três sensores: o *High Resolution CCD Cameras* (CCD), o *Infra-Red Multi-Spectral Scanner* (IRMSS), o *Wide Field Imager* (WFI) e os eletrônicos usados para observação da Terra de coleta de dados. O segundo módulo tem os equipamentos que asseguram o suprimento de energia, os controles, as telecomunicações e as demais funções necessárias para a operação do satélite.

A órbita do CBERS é heliossincronizada numa altitude de 778 km com 14 órbitas por dia. O satélite possui uma resolução espacial de 26 dias, que é o tempo gasto para cobrir uma vez a Terra pelos sensores CCD e IRMSS. O WFI gasta 5 dias para obter uma cobertura completa do globo em duas bandas espectrais (vermelho e infravermelho próximo).

O IRMSS gera imagens de 120 km de largura e resolução de 80 m nas bandas visíveis e 160 m nas banda termais. O WFI fornece imagens com uma faixa de 180 km de largura com resolução de 260 x 260 m. Cada *pixel* da imagem tem uma resolução espacial de 20 m para o instrumento imageador CCD.

De acordo com o INPE (2007), destacam-se como aplicações potenciais da CCD:

- Vegetação: identificação de áreas de florestas, alterações florestais em parques, reservas, florestas nativas ou implantadas, quantificações de áreas, sinais de queimadas recentes.
- Agricultura: identificação de campos agrícolas, quantificação de áreas, monitoramento do desenvolvimento e da expansão agrícola, quantificação de pivôs centrais, auxílio em previsão de safras, fiscalizações diversas.
- Meio ambiente: identificação de anomalias antrópicas ao longo de cursos d'água, reservatórios, florestas, cercanias urbanas, estradas; análise de eventos episódicos naturais compatíveis com a resolução da Câmera, mapeamento de uso do solo, expansões urbanas.

- Água: identificação de limites continente-água, estudos e gerenciamento costeiros, monitoramento de reservatórios.
- Cartografia: dada a sua característica de permitir visadas laterais de até 32° a leste e a oeste, em pequenos passos, possibilita a obtenção de pares estereoscópicos e a conseqüente análise cartográfica em três dimensões. Essa característica também permite a obtenção de imagens de uma certa área no terreno em intervalos mais curtos, o que é útil para efeitos de monitoramento de fenômenos dinâmicos.
- Geologia e solos: apoio a levantamentos de solos e geológicos.
- Educação: geração de material de apoio a atividades educacionais em geografia, meio ambiente, e outras disciplinas.

Cada banda representa a resposta do solo em uma certa faixa espectral, como pode ser visto no quadro 2.

QUADRO 2: Bandas e faixas espectrais do CBERS. Fonte: DGI, 2008.

Instrumento	Banda	Faixa espectral
WFI	1	0,63 - 0,69 μm (vermelho)
	2	0,76 - 0,90 μm (infra-vermelho)
CCD	Pan	0,51 - 0,73 μm (pancromática)
	1	0,45 - 0,52 μm (azul)
	2	0,52 - 0,59 μm (verde)
	3	0,63 - 0,69 μm (vermelho)
	4	0,77 - 0,89 μm (infravermelho próximo)
IRMSS	1	0,50 - 1,10 μm (pancromática)
	2	1,55 - 1,75 μm (infravermelho médio)
	3	2,08 - 2,35 μm (infravermelho médio)
	4	10,40 - 12,50 μm (infravermelho termal)

2.4 MISSÃO SRTM

O projeto SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) advém da cooperação entre a NASA e a NIMA (*National Imagens and Mapping Agency*) do Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América do Norte e das agências espaciais da Itália e da Alemanha. Os dados para os EUA e as demais áreas entre as latitudes 60°N e 56°S foram coletadas em fevereiro de 2000 e disponibilizados para os EUA sob a resolução de 30m e de 90m para o resto do mundo. Desde agosto de 2003, os dados SRTM da América do Sul estão disponíveis, com acesso livre na rede mundial de computadores.

Os produtos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) - Missão Topográfica de Radar Transportado - fazem parte de um conjunto de imagens de radar e são sensores de visada vertical e lateral, logo são capazes de reproduzir altitudes. Trata-se de um modelo digital do terreno, ou seja, representa em três dimensões espaciais o relevo, latitude, longitude e altitude (x, y, z) (CARVALHO, 2007).

Os dados SRTM apresentam características indesejáveis, além das informadas pelo fornecedor, como falhas negativas e sua sensibilidade a quaisquer objetos presentes sobre a superfície do terreno e mesmo variações da cobertura vegetal (FLORENZANO, 2008). Para amenizar esses erros da imagem algumas técnicas são usadas para minimizar estes efeitos, como filtragens e métodos de interpolação.

A Embrapa obteve os dados brutos SRTM os quais foram corrigidos e padronizados, a fim de se eliminar problemas inerentes aos imageamentos por radar, tais como depressões espúrias, picos e pontos anômalos e áreas com ausência de dados (MIRANDA, 2005).

Os dados topográficos da missão SRTM permitem visualizar o espaço geográfico em três dimensões e com o uso do SIG obter de forma automática, variáveis morfométricas (altitude, declividade, orientação das vertentes) que são essenciais em estudos geomorfológicos.

Esta tecnologia apresenta diversos exemplos de aplicações para o desenvolvimento sustentável da agricultura e do país, dentre elas: programas de manejo de bacias hidrográficas, eletrificação rural, conservação de solos, preservação

de recursos florestais, cumprimento do código de florestal, gestão dos recursos hídricos, planejamento territorial, implantação de estradas rurais, melhoria da cartografia topográfica disponível (principalmente na Amazônia), zoneamento ecológico – econômico, monitoramento ambiental, etc. (MIRANDA, 2005).

2.5 OUTROS SATÉLITES

Existem hoje vários satélites de observação da Terra em órbita, com diferentes finalidades, a seguir são descritos e apresentados exemplos alguns dos principais sistemas sensores utilizados em agricultura e meio ambiente no Brasil, de acordo com a Embrapa (2009).

O programa de satélite NOAA começou em 1960 com a denominação TIROS (*Television and Infrared Observation Satellite*) e foi desenvolvido pela NASA e pelo Departamento de Defesa dos EUA na tentativa de desenvolver uma série de satélites meteorológicos. A série de satélites NOAA gera diariamente dados globais de parâmetros meteorológicos e condições ambientais na forma de dados quantitativos. Esses dados são base para estudos de monitoramento de queimadas e variabilidades climáticas, previsão do tempo, zoneamentos agroclimáticos, etc.

O satélite *Systeme Pour l'Observation de la Terrere* - SPOT foi planejado e projetado como um sistema operacional e comercial de observação da Terra e foi lançado em fevereiro de 1986. O modo PAN é aconselhado para aplicações que procuram precisão geométrica e resolução. O modo multiespectral XS ou XI é recomendado para aplicações temáticas, para estudos de vegetação, usos do solo, entre outros.

O *Indian Remote Sensing Satellite* (IRS) foi lançado em 1988 e oferece uma ampla possibilidade de acesso às imagens em diversas resoluções e conseqüentemente aplicações, com satélites especializados em coletar dados de forma temática. Possui imagens PAN de 5 m de resolução e cada imagem cobre uma área de 70 km x 70 km e cobre alguns estados brasileiros.

A série de satélites radares *European Remote Sensing Satellite* (ERS), iniciada em 1 de julho de 1991, é dotada de instrumentos como sensores de varredura e câmeras, gerando um fluxo contínuo de informações sobre os oceanos e terras

emersas. Cada cena recobre uma área de 100 km x 100 km com uma resolução espacial de 25 m. Os dados do ERS podem ser aplicados no monitoramento agrícola, ambiental, geológico e hidrológico. Além da aplicação na exploração petroleira marinha e monitoramento da poluição marinha de petróleo e derivada, monitoramento de tráfego de navios e gerenciamento costeiro.

O ORBVVIEW 1 foi lançado em abril de 1995, com uma série de quatro satélites, sendo o ultimo perdido no lançamento. O ORBVVIEW 3 foi lançado em 26 de junho de 2003 e fornece imagens com 1 m de resolução no PAN e 4 m de resolução no modo multiespectral, numa faixa rastreada de 8 km de largura. As imagens são utilizadas para identificação e análise de objetos como imóveis, automóveis e aeronaves, e permite a elaboração de mapas de alta precisão. A partir de 2008 o nome do satélite foi alterado para GeoEye.

O IKONOS foi lançado em setembro de 1999 e foi o primeiro satélite a possuir uma câmera de uso civil que registra informações com 1m de resolução na banda pancromática (escala de cinza) e de 4 metros nas faixas espectrais (vermelho, azul, verde e infravermelho próximo). O satélite IKONOS I fornece imagens da Terra com grande detalhamento e bastante utilizadas pela sociedade. As imagens geradas pelo satélite da série IKONOS apresenta algumas vantagens e benefícios de aplicação como a alta resolução espacial e a possibilidade de fusão das imagens PAN em tons de cinza com imagens multiespectrais para geração de imagens coloridas de 1m de resolução.

O satélite TERRA foi lançado em dezembro de 1999 e possui cinco instrumentos: O sensor MODIS é o principal instrumento a bordo do TERRA, ele realiza observações de toda a superfície terrestre em 1 ou 2 dias e coleta dados dos continentes, oceanos e atmosfera mais baixa. O sensor MOPITT coleta os dados de monóxido de carbono e metano na troposfera. O sensor CERES coleta dados que são utilizados para monitoramento da radiação das nuvens. Os dados do sensor MISR são usados para monitorar tipos e concentrações de aerossóis, tipos e altura de nuvens e usos do solo e o sensor ASTER registra imagens de alta resolução espacial de 15 m a 90 m da Terra e os produtos gerados incluem radiações e refletâncias espectrais da superfície da Terra, temperatura da superfície e emissividade, imagens digitais de elevação obtidas por estereografia, mapas da vegetação e uso do solo, nuvens, gelo

do mar e gelo polar e observação de desastres naturais.

O Programa *Earth Resources Observation Satellite* (EROS) lançou o primeiro satélite da série em 5 de dezembro de 2000. Os satélites operam numa órbita de 480 km de altura heliosincronizada. São equipados com uma câmera com detectores *Charge Coupled Device* (CCD) que produz imagens de 1,8 m de resolução. Os satélites EROS possibilitam o recobrimento total do globo com revisita diária de áreas de interesse (isso depende dos objetivos do cliente).

O QuickBird foi lançado em outubro de 2001 e possui uma resolução de 0,61m em modo pancromático e 2,44 no modo multiespectral (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). Os sistemas do QuickBird foram construídos para obterem uma alta resolução espacial, uma apurada precisão em geoposicionamento e uma extensa área de imageamento.

O ENVISAT foi lançado em 1 de março de 2002 e iniciou a aquisição de dados da Terra com observações da atmosfera, dos oceanos, dos continentes e áreas recobertas de gelo. Os instrumentos do satélite incluem o ASAR – *Advanced Synthetic Aperture Radar* e MERIS – *Médiun Resolution Imaging Spectrometer*.

Existem também vários satélites usados exclusivamente para obter dados meteorológicos, como o GOES – *Geostationary Operational environmental Satellite*, que fornece dados para previsão do tempo para o globo inteiro; o METEOSAT que fornece dados sobre previsão do tempo e condições meteorológicas principalmente para a Europa e o INSAT, satélite meteorológico lançado pela Índia. O DMSP – *Defense Meteorological Satellite Program* foi inicialmente destinado a atividades de defesa dos EUA, mas os dados obtidos têm sido utilizados para estudo meteorológicos e para fins civis.

2.6 IMAGENS DIGITAIS

O termo imagem se refere à função bidimensional de intensidade da luz $f(x,y)$, onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho (ou níveis de cinza) naquele ponto. Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e colunas identificam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento da

matriz identifica o nível de cinza daquele ponto. Os elementos dessa matriz são chamados de elementos da imagem ou *picture elements (pixels)* (GONZALES & WOODS, 2000).

As imagens representam formas de captura indireta de informação espacial, obtidas por meio de satélites, fotografias ou scanners aerotransportadas, onde cada *pixel* tem um valor proporcional à reflectância do solo para a área imageada.

O tipo de imagem deve ser selecionado considerando os objetos e as características da área de estudo. Outra característica importante é a data da imagem, pois a superfície esta sempre em mudança e a imagem representa parte da superfície no momento de passagem do satélite.

Um único tipo de imagem dificilmente fornece toda a informação procurada, dessa forma podem ser usadas imagens multiespectrais, multidata e multisensores, que oferecem um grande número de informações.

De acordo com FLORENZANO (2008), no mapeamento de marcas de processos erosivos imagens obtidas no espectro visível e no infravermelho médio corresponde à banda 7 do Landsat/TM são as mais indicadas.

Dados de satélite são usados para detectar diretamente a erosão ou detectar as conseqüências/danos do processo erosivo. Embora o mapeamento de características da erosão seja feito com a aplicação de imagens de satélite ou fotografias aéreas, o tamanho das feições erosivas são frequentemente inibidas nas imagens de satélites. Resoluções espaciais como as oferecidas pelo SPOT e Landsat podem ser aplicadas para identificar grandes e médias ravinas mas não permite analisar o crescimento destas através da sequência de imagens (LANGRAN, 1983; MILLINGLON & TOWNSHEND, 1984 apud VRIELING, 2006)¹.

¹ LANGRAN, K.J., **Potential for monitoring soil erosion features and soil erosion modelling components from remotely sensed data. Proceedings of IGARSS'83.** IEEE, San Francisco, CA, 1983, pp. 2.1– 2; apud VRIELING, A. **Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review.** Catena, V. 65, Issue 1, 31 January 2006, p. 2-18.

MILLINGTON, A.C., Townshend, J.R.G. **Remote sensing applications in African erosion and sedimentation studies.** In: Walling, D.E., Foster, S.S.D., Wurzel, P. (Eds.), *Challenges in African Hydrology and Water Resources: Proceedings of the Harare Symposium.* IAHS Publication, vol. 144. IAHS Press, 1984, pp. 373– 384 apud VRIELING, A. **Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review.** Catena, V. 65, Issue 1, 31 January 2006, p. 2-18.

O uso de imagens com datas diferentes fornece um melhor delineamento das áreas erodidas é uma alternativa para a interpretação visual é a extração automática de áreas erodidas. FLORAS & SGOURAS (1999), usam o algoritmo de classificação Maxver depois de analisar a componente principal das imagens Landsat TM e SPOT HRV para classificar a vegetação e mapear áreas erodidas.

As imagens derivadas de produtos do sensoriamento remoto são excelentes fontes de dados para produzir mapas de uso e cobertura da terra. Estes mapas são gerados a partir de técnicas de processamento de imagens, como a classificação digital (LEÃO et al, 2007). Um dos principais parâmetros que devem ser fornecidos junto aos mapas é a avaliação do erro envolvido no produto.

2.7 GEOPROCESSAMENTO, SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

O geoprocessamento pode ser definido como o conjunto de tecnologias que utilizam técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação espacial, sendo estas tecnologias categorizadas em coleta (cartografia, sensoriamento remoto, GPS, topografia, etc), armazenamento (bancos de dados) e análise dos objetos e fenômenos onde a posição geográfica é importante (ARONOFF, 1989 apud IBGE, 2007)².

O geoprocessamento é uma forma de atender as necessidades referentes ao monitoramento, caracterização e planejamento de decisões relativas ao espaço geográfico, abrindo perspectivas diferenciadas aos profissionais que atuam com o meio ambiente (OLSZEWSKI, 2004). De uma forma mais específica, NOVO (1992), define o geoprocessamento como sendo:

“A utilização conjunta de modernos sensores, equipamentos para processamento de dados, equipamentos de transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc., com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e da análise das interações entre a energia eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra em

²ARONOFF, S. Geographic information systems: a management perspective. Ottawa: WDL Publications, c1989 apud IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia/IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais.** – 2. Ed. – Rio de Janeiro: IBGE,2007. 323 p.

suas mais diversas manifestações.”

O sensoriamento remoto é considerado uma ferramenta indispensável nas classificações de ecossistemas e descrições das condições ambientais, além de ter potencial para contribuir na compreensão da diversidade biológica e análises dos padrões da paisagem (MATSON & USTIN, 1991 apud COUTINHO, 1997)³.

Com relação ao sensoriamento remoto é importante conhecer seus princípios fundamentais e conceitos, como tipos de satélite (órbita, altitude, horário, etc); características do sensor (resolução, faixa espectral em que funciona, ângulo de visada, etc); interação da energia eletromagnética com os objetos e fatores que interferem nessa relação, e com isso, na radiação captada pelos sensores e nos níveis de cinza registrados na imagem. De acordo com FLORENZANO (2008), os fatores são que interferem na interação da energia eletromagnética com os objetos são:

- O nível de aquisição dos dados;
- O método de aquisição dos dados;
- As variações intrínsecas ao alvo ou de sua própria natureza;
- Variação temporal,
- Variações da localização do alvo em relação a fonte e ao sensor (refere-se a geometria de aquisição dos dados) e
- Parâmetros atmosféricos.

O Sensoriamento Remoto vem sendo usado para pesquisar a erosão do solo através da interpretação de fotos aéreas e imagens de satélite para detectar feições e obter modelos de dados de entrada nos sistemas de informações geográficas (VRIELING, 2006). A quantidade de dados que podem ser manipulados em uma base de dados que contem fontes espaciais (imagens de satélite) é muito grande, principalmente se os dados cobrem uma grande região geográfica. Para trabalhar esses dados existem meios para armazenar, recuperar, manipular, analisar e exibir os resultados. Essas tarefas são feitas pelos Sistemas de Informação Geográfica – SIG's

³ MATSON, P.A.; USTIN, S.L. The future of remote sensing in ecological studies. Ecology, New York, v.72, n.6, p.1917, Dec. 1991 apud COUTINHO, A.C. **Segmentação e classificação de imagens Landsat - TM para o mapeamento dos usos da terra na região de Campinas, SP.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Dissertação de mestrado.

(RICHARDS & JIA, 2006).

Os SIG's possibilitam diagnosticar e caracterizar uma área de estudo realizando o cruzamento e a manipulação de dados do meio físico e socioeconômico, e auxiliam e facilitam a análise dos fatores que atuam sobre o ambiente. De acordo com ROSA & ROSS (1999) apud CORREIA JR⁴, SIG's são sistemas computacionais que armazenam e manipulam informações georreferenciadas, o que compreende capturar, armazenar, gerenciar, analisar e exibir dados com um componente espacial, de localização e atributos que os descrevem chegando a um modelo digital de representação do espaço.

Dentre as formas de armazenamento de dados em formato digital, existe a forma matricial ou *raster* e o formato vetorial. O formato raster é utilizado para armazenar imagens, como fotografias e imagens de satélite. O modelo vetorial representa a realidade por meio de pontos, linhas e polígonos.

2.8 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ALVOS

Cada superfície apresenta uma interação particular com a radiação eletromagnética e dependendo do comprimento de onda da radiação incidente e das propriedades da superfície, haverá uma reflexão diferente. O comportamento espectral, ou assinatura espectral, dos alvos está relacionado ao processo de interação entre eles e a radiação eletromagnética, que pode ser absorvida, transmitida ou refletida. A figura 1 demonstra a reflexão espectral de solo seco, vegetação verde e água clara, nos diferentes comprimentos de onda.

⁴ ROSA, M. R., ROSS, J. L. S. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. In: Revista do Departamento de Geografia. N. 13. Humanitas/FFLCH/USP. São Paulo, 1999 apud CORREIA JR, P.A. **Elaboração de modelos para estudo das mudanças dos padrões de uso e cobertura da terra na bacia do Taibaçupeba, região metropolitana de São Paulo, com auxílio de sensoriamento remoto orbital**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Dissertação de mestrado.

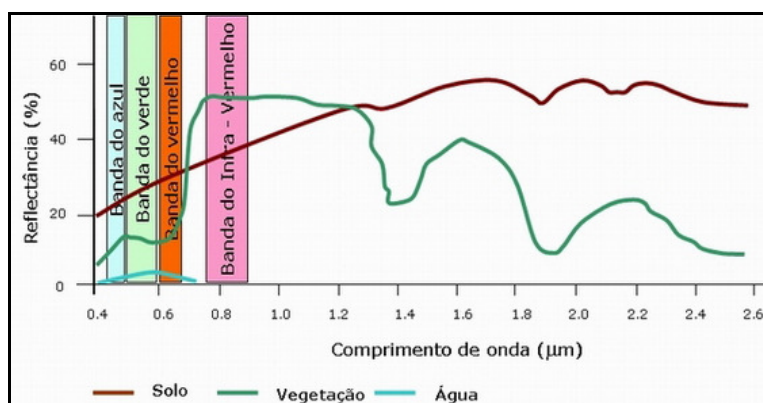


FIGURA 1: Curva padrão da reflexão espectral do solo seco, vegetação e água clara (fonte: <http://www.igeo.pt/gdr/>).

2.8.1 Características espectrais da vegetação

Os dados de satélites, usados para o mapeamento da cobertura vegetal, são baseados em características da reflectância dos objetos e estas características variam em função de diferentes fatores relacionados à vegetação, como a fenologia, fertilidade do solo, práticas de manejo, relevo, etc. É importante observar esses fatores, pois eles podem gerar algumas confusões durante o processo de classificação das imagens.

A vegetação (saudável e verde) quase sempre apresenta a configuração ‘pico-vale’, como pode ser visto na figura 1. Os vales na porção visível do espectro são ordenados pelos pigmentos das folhas (LILLESAND & KIEFER, 1994).

A vegetação verde tem baixa reflexão na banda azul e vermelha e um pico na luz verde, por isso ela parece verde para nossos olhos. A clorofila é a maior responsável por absorver o vermelho e azul e refletir o verde. Quando a planta apresenta algum problema em relação à clorofila, há uma diminuição da absorção das bandas vermelha e azul.

A variação da reflectância entre uma planta e outra se deve, principalmente, a sua estrutura e ao tamanho das folhas. Devido a essas diferenças entre um tipo e outro de vegetação, é possível distinguir uma espécie da outra, ou seu estágio de desenvolvimento através de imagens de satélite, mas são poucas as imagens que permitem esse tipo de estudo.

A cobertura vegetal é considerado um fator muito importante no estudo da

erosão, por isso é essencial gerar um mapa da cobertura atual do solo, feito através da interpretação visual ou por meio de uma classificação automática, onde são analisadas suas características espectrais.

2.8.2 Características espectrais da água

Considerando o aspecto de reflectância da água, a característica mais distinta é a energia absorvida na faixa do infravermelho próximo. A absorção depende de vários fatores que estão inter-relacionados, como a interação da superfície com o material em suspensão ou com a profundidade dos corpos d'água (LILLESAND & KIEFER, 1994).

A água clara geralmente reflete pouco, pois no infravermelho toda a radiação é absorvida. A água com concentração de sedimentos suspensos provenientes da erosão do solo tem uma reflexão expressiva nas faixas da luz visível.

Ao longo do espectro a água vai diminuindo a refletância à medida que se desloca para comprimentos de onda maiores. Na região do visível, nas faixas azul e verde observa-se significativa refletância da água, diminuindo na direção do infravermelho.

2.8.3 Características espectrais do solo

Nos minerais e rochas a absorção da energia eletromagnética é determinada pelos íons ferroso e férrico, água e hidroxila e sua assinatura espectral é função da quantidade de matéria orgânica, granulometria, composição mineral e capacidade de troca catiônica (FIGUEIREDO, 2005).

A quantidade de energia refletida por um determinado tipo de solo é função de todos esses fatores que conjuntamente se encontram no solo. Em determinadas condições a influência de um parâmetro, na energia refletida do solo, sobrepuja os demais, resultando num espectro característico daquele parâmetro (MOREIRA, 2005).

As características químicas e físicas do solo estão ligadas a fatores de formação do solo, como material de origem, clima e relevo. E são essas características que influenciam na reflectância espectral dos diferentes tipos de solo.

As características básicas e distintas de cada fator que possam ser empregados para identificação e discriminação de cada tipo de solo, e que influenciam em sua assinatura espectral, são:

- Cor do solo;
- Composição mineral;
- Matéria orgânica;
- Textura,
- Rugosidade e estrutura do solo e
- Emissividade do solo

2.9 O PROCESSO EROSIVO

A erosão é o processo de desprendimento e arraste acelerado do solo causado pela chuva e pelo vento em direção as partes mais baixas de um terreno (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999; TORRI & BERSOLLI, 2000).

Para se entender o processo erosivo como um todo é preciso entender a erosão desde os seus primeiros estágios, ou seja, a partir do momento em que as gotas de chuva começam a bater no solo e provocam a ruptura dos agregados pela ação do *splash*, até causar o selamento do solo, dificultando a infiltração e promovendo o escoamento difuso, que se concentra e forma ravinas e voçorocas (GUERRA, 1999). A seguir são descritos os principais mecanismos envolvidos no processo erosivo:

a) Deslocamento de partículas pelo impacto da gota de chuva

A água da chuva exerce sua ação erosiva sobre o solo mediante o impacto da gota de chuva, que cai com energia e velocidade variável, de acordo com seu diâmetro e a ação de escorrimento.

Conhecido como *splash erosion* ou erosão por salpicamento, o deslocamento de partículas por impacto de gotas de chuva acarreta compactação da superfície do

terreno, através da remobilização do silte e da argila nos espaços intergranulares, e erosão, através da projeção de partículas para fora da zona de impacto.

A ação de compactação das gotas de chuva causa ao solo, rapidamente, a perda da capacidade de infiltrar água, o que gera grande volume de enxurrada, principalmente quando há chuvas muito intensas.

b) Transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial

O processo de escoamento superficial é o maior agente de transporte das partículas de solo. A força do escoamento depende da concentração e velocidade com que ela se move, e depende também da declividade do terreno.

A erosão é máxima quando a enxurrada contém quantidade suficiente de material abrasivo para desprender a maior quantidade possível que a enxurrada seja capaz de transportar (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

Se uma superfície está protegida contra as gotas de chuva, pouco solo será desagregado e transportado, apenas as partículas que se soltam pelas concentrações de enxurrada serão transportadas.

c) Deposição do material desprendido e transportado

Quando o escoamento superficial perde força ou encontra um corpo d'água, as partículas transportadas se depositam, e são geralmente separadas por tamanho das partículas. Primeiro são depositados os de baixa transportabilidade e por último os materiais mais leves, que são facilmente transportáveis, como silte, argila e matéria orgânica.

O vento é nocivo ao solo nu que já foi cultivado, e que em consequência apresenta partículas soltas. Os solos arenosos sofrem muito mais o processo erosivo, pois são mais vulneráveis ao vento que solos argilosos por exemplo.

Nas condições naturais, a erosão é um processo normal, por via de regra, gradual e lento, o que tende para uma condição de relativa estabilidade, em que o desenvolvimento do solo em profundidade compensa a destruição causada pela erosão natural. A intervenção do homem através da utilização do solo provoca, muitas vezes, uma aceleração do processo erosivo, e pode-se dizer então que a erosão acelerada ou erosão do solo começou com a agricultura (COSTA, 2004).

2.10 FATORES CONTROLADORES DA EROSÃO

Os tipos de erosão mais comumente mapeados são as ravinas e voçorocas. Embora essas feições só possam ser identificadas individualmente pelos satélites quando elas alcançam dimensões muito grandes, é possível identificá-las obtendo informações sobre fatores ambientais que favoreçam seu desenvolvimento (KING ET AL, 1989 apud METTERNICHT & ZINCK, 1998)⁵.

Esses fatores são sinais da degradação do solo causados por causas naturais ou antrópicas que são visíveis em solo exposto ou são indiretamente determinados a partir de indicadores como o uso do solo, vegetação e morfologia do terreno (METTERNICHT & ZINCK, 1998).

O território brasileiro possui algum grau de suscetibilidade aos processos erosivos devido a uma série de fatores como: diferentes tipos de solos, com suas respectivas propriedades físicas e químicas; tropicalidade dos climas; tipos de cobertura vegetal (nem sempre com alta densidade), forma, declividade e comprimento das encostas e o uso e manejo inadequado dos solos (GUERRA & BOTELHO, 2001).

HELD & CLAWSON (1965); SILVA (1999); BERTONI & LOMBARDI NETO (1999); GUERRA (2001); CUNHA & GUERRA (2003), FLORENZANO (2008) consideram como os principais fatores controladores do processo erosivo os listados a seguir:

- Topografia
- Erodibilidade do solo, dependendo das propriedades do solo (textura, densidade aparente, porosidade, teor de matéria orgânica, teor e estabilidade dos agregados e pH do solo)
- Erosividade da chuva
- Uso do solo
- Cobertura vegetal

⁵ KING, C., MAUCORPS, J., AUMONIER, R., RENAUX, B., LENOTRE, N., Détection d'indices d'érosion par SPOT dans les sols limoneux Du Nord-Pas de Calais, une étude multi-date. Bull. SFTP 114, 1989. P 10-13 apud METTERNICHT, G.I., ZINCK, J.A. **Evaluating the information of JERS – 1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53, 1998, p. 143-153.

2.10.1 Topografia

A topografia de um terreno, representada pela declividade e comprimento de rampa, exerce acentuada influência sobre a erosão. O tamanho e a quantidade de material em suspensão arrastado pela água dependem da velocidade com que ela escorre, e essa velocidade é resultante do comprimento da rampa e do grau de declividade do terreno (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999).

Para estudar o efeito da topografia na erosão, o relevo tem sido discriminado baseado na interpretação de imagens como as do satélite Landsat. Quase todos os modelos de espacialização da erosão precisam de um Modelo Digital de Elevação – MDE ou Modelo Digital do Terreno - MDT como fonte de entrada de dados para avaliar a declividade do terreno.

A topografia relativamente plana, que domina grandes extensões do Planalto Central, leva os agricultores a mecanizar essas áreas sem levar em conta os riscos que alguns solos dessa região possuem em termos de erosão (GUERRA & BOTELHO, 2001). A mecanização faz com que aumente a compactação do solo, diminuindo a porosidade e as taxas de infiltração, e com isso o escoamento superficial aumenta, principalmente nas encostas do Planalto Central.

2.10.2 Erodibilidade do solo

O solo é definido como a coleção de corpos naturais ocorrendo na superfície da terra. Essa tênue camada é composta por partículas de rocha em diferentes estádios de desagregação, água e substâncias químicas em dissolução, ar, organismos vivos e matéria orgânica em diferentes fases de decomposição (MONIZ, 1972 apud BERTONI & LOMBARDI NETO, 1999)⁶.

Características do solo como a porosidade, umidade e grau de agregação afetam diretamente a capacidade de infiltração e o escoamento superficial. A infiltração é o movimento da água dentro da superfície do solo. Quanto maior sua velocidade menor é a intensidade da enxurrada e menor os danos com a erosão. A

⁶ MONIZ, A.C. **Elementos de pedologia**. São Paulo, Polígono, Ed. Univ. São Paulo, 1972. 459 p. apud BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990.

capacidade de um solo infiltrar a água é maior no início de uma chuva e vai diminuindo rapidamente de acordo com as alterações na estrutura da superfície do solo.

Os solos são diferentes em sua resistência à erosão, a qual é função de suas propriedades como a textura, estrutura, umidade, rugosidade e conteúdo de matéria orgânica. Essas condições físicas e químicas, que conferem maior ou menor resistência a ação das águas, tipificam o comportamento de cada solo exposto a condições semelhantes de topografia, chuva e cobertura vegetal. Essa diferença, devida às propriedades de cada solo, é denominada de acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), erodibilidade do solo, que é a sua vulnerabilidade ou suscetibilidade à erosão.

2.10.3 Vegetação e uso do solo

A cobertura vegetal é uma importante proteção do solo contra os processos erosivos, pois reduz as taxas de perda do solo através de sua densidade, da possibilidade de reduzir a energia cinética da chuva, pela interceptação de suas copas, e de formar húmus, importante para a estabilidade e o teor de agregados dos solos (CUNHA & GUERRA, 2003).

De acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), há uma considerável diferença entre as quantidades de perdas por erosão para cada tipo de cultura, como por exemplo, a mata é mais eficiente para evitar a perda de solo e de água do que uma plantação de algodão. Em áreas parcialmente cobertas pela vegetação, o escoamento e a perda de solo aumentam rapidamente, de acordo com GUERRA (2001), esse aumento está ligado a solos com menos de 70% de cobertura vegetal e ocorre geralmente em áreas semi-áridas, agrícolas e de superpastoreio.

Estudos desenvolvidos por BACCARO (1999) e colaboradores durante 12 anos na região do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba mostram que as voçorocas tiveram sua origem relacionada ao desmatamento e ao uso agrícola da terra de modo inadequado, além do superpastoreio e queimadas associadas a chuvas torrenciais e às propriedades do solo. Isso favorece a ação violenta do escoamento superficial difuso e concentrado, que tem um forte poder erosivo.

Nas áreas mais declivosas do cerrado, dissecadas, predominam as pastagens naturais e plantadas, enquanto que nas superfícies tabulares, propícias a mecanização pratica-se a monocultura para exportação (soja, milho e algodão) e a silvicultura.

Os processos erosivos marcam essas paisagens, seja diminuindo a produtividade agrícola e das pastagens, seja rasgando as vertentes e anfiteatros de cabeceiras de drenagem em ravinas e voçorocas. Isso tem levado ao uso intenso de corretivos, agrotóxicos e fertilizantes agrícolas, que contaminam os mananciais e colocam a fauna e a flora em risco de extinção, comprometendo a biodiversidade do Cerrado.

Para estudos de erosão, o uso do solo tem sido identificado e mapeado utilizando-se a interpretação visual de composições coloridas de imagens de satélites ou classificações automáticas das mesmas (KHAN et al, 2001; SHARMA & SINGH, 1995 apud VRIELING, 2006)⁷.

Geralmente se usa a classificação não supervisionada, na qual os *pixels* são agrupados de acordo com suas relativas similaridades espectrais, ou ainda a classificação supervisionada, onde os *pixels* são distribuídos para pré-definir classes que são geralmente estabelecidas baseadas nos dados sobre a área de estudo.

FLORAS & SGOURAS (1999) usam a classificação Maxver depois da análise da componente principal das imagens Landsat/TM e SPOT-HRV para definir áreas com erosão e classificar a vegetação.

As áreas erodidas são classificadas de acordo com a cobertura vegetal, também feita com a interpretação visual ou através de características da vegetação e da topografia obtidas de outras fontes de dados. O uso de imagens com datas diferentes fornece um melhor delineamento das áreas erodidas. Uma alternativa para a interpretação visual é a extração automática dessas áreas.

⁷KHAN, M. A., GUPTA, V. P., MOHARANA, P. C. **Watershed prioritization using remote sensing and geographical information system: a case study from Guhiya, India.** Journal of Arid Environments 49 (3), 2001. P 465-475; Sharma, K.D., Singh, S. **Satellite remote sensing for soil erosion modelling using the ANSWERS model.** Hydrological Sciences Journal 40 (2), 1995. p 259–272 apud VRIELING, A. **Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review.** Catena, V. 65, Issue 1, 31 January 2006, p. 2-18.

2.11 TIPOS DE EROSÃO

Parte da água da chuva cai diretamente no solo e outra parte é interceptada pela vegetação. A parte da água do ciclo hidrológico que chega ao solo direta ou indiretamente é a que participa da erosão pluvial. A erosão hídrica se dá por três processos:

- 1- Destacamento das partículas do solo, agregados, torrões e grandes volumes de solo quando há movimentos de massa,
- 2- Movimento do material destacado através de infiltração ou fluxo superficial e
- 3- Deposição

O processo erosivo pode ser dividido, de acordo com TORRI & BORSELLI (2000), em classes baseados em outros critérios, como:

1. Erosão superficial (splash e erosão laminar);
2. Erosão linear (em sulcos e ravinas),
3. Erosão subsuperficial e
4. Movimentos de massa.

Segundo OLIVEIRA (1999) erosão por ravinas e voçorocas é causada por vários fatores em diferentes escalas temporais e espaciais e derivam de rotas de fluxos d'água que podem ocorrer na superfície ou subsuperfície.

O solo perdido pela erosão hídrica é geralmente mais fértil, pois nele contem os nutrientes das plantas, o húmus e os fertilizantes que o agricultor aplica. Terrenos com erosão severa tornam-se difíceis de trabalhar, e os sulcos que se formam impedem o seu manejo, e ainda mais graves são as grotas que aparecem ao longo do tempo, os inutilizando, chegando a um ponto onde são abandonados.

A erosão laminar é a forma menos notada e por isso é a mais perigosa, pois nesse processo a água escorre pelo terreno sem formar canais definidos e arrasta primeiro as partículas mais leves do solo, que são importantes para manter a fertilidade do solo.

De acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (1999), este tipo de erosão é dificilmente perceptível, porém em culturas perenes podem-se perceber depois de alguns anos as raízes expostas, o que indica que a camada de solo superficial foi

arrastada. A erosão laminar é diferenciada da erosão linear pela profundidade dos sulcos formados no terreno.

A erosão em sulcos é ocasionada por chuvas intensas e resulta de pequenas irregularidades na declividade do terreno que faz com que o escoamento se concentre em pontos preferenciais do terreno e atinja um volume e velocidade suficientes para formar sulcos mais ou menos profundos.

De acordo com DAEE-IPT (1990) apud SALOMÃO (2002)⁸, a profundidade da erosão em sulcos não ultrapassa 0,5 m, enquanto que as ravinas tem uma profundidade maior, sendo considerada um estágio mais avançado da erosão linear. É comum considerar ravinas como voçorocas, porém cada uma delas apresenta características próprias.

De acordo com SALOMÃO (2002), o processo de ravinamento se dá em função apenas da erosão superficial, com a linha de água apresentando grandes declives, canais mais profundos e longos, enquanto que a voçoroca se forma pela ação da erosão superficial e subsuperficial.

A água que escoar durante uma chuva tende a procurar sulcos preferenciais no relevo e rapidamente os fluxos vindos de várias direções se encontram formando um fluxo mais volumoso e conseqüentemente, o arraste de partículas é maior e forma sulcos maiores e bem definidos que podem eventualmente formar grandes voçorocas.

Voçorocas são causadas por fluxos concentrados com alto poder erosivo para escavar profundos e extensos canais que geralmente surgem onde várias linhas de fluxo se unem e se concentram, de acordo com TORRI & BORSELLI (2000). Elas são ocasionadas por grandes concentrações de enxurrada que passam sempre no mesmo sulco. Isso faz com que esse sulco aumente de tamanho a cada chuva e a quantidade de solo deslocado é cada vez maior gerando enormes cavidades, em extensão e profundidade. A voçoroca tem um alto poder destrutivo e difícil contenção.

⁸ IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Controle de erosão**. 2ª Ed. São Paulo, DAEE/IPT, 1990 apud SALOMÃO, F. X. T. **Plano de controle de processos erosivos em escarpa, no perímetro urbano e periurbano da cidade de Primavera do Leste, MT**. FAPEMAT - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso, Cuiabá, 2002.

3 MATERIAL E MÉTODOS

VRIELING (2006) apresenta um roteiro de metodologia aplicada na avaliação da erosão usando técnicas de sensoriamento remoto. Primeiro foram detectadas características do processo erosivo e as áreas erodidas, assim como a avaliação dos impactos em campo (como deposição de sedimentos e qualidade da água). Depois foram detectados os fatores que controlam a erosão.

Neste trabalho, a metodologia seguida foi semelhante. Foi escolhida uma área de estudo onde há intenso uso da terra por atividades antrópicas ligadas à agropecuária e onde já existem processos erosivos em estágio avançado em áreas urbanas. Foi realizada uma visita de campo para se verificar os usos atuais do solo e a partir dessas informações foram aplicadas técnicas de classificação de imagens de satélites e realizado o mapeamento do uso atual dos solos. Para se verificar a precisão desse mapeamento foi discutida a questão da exatidão usando métodos estatísticos. Foram discutidos três fatores que influenciam o processo erosivo: topografia, erodibilidade e uso e cobertura dos solos, que foram integrados com o objetivo de gerar o mapa de suscetibilidade a erosão.

A etapa inicial do trabalho foi realizada com a finalidade de se obter informações a respeito do estudo proposto e caracterizar a área de estudo, por meio de:

- Estudo e seleção de informações que caracterizam a área quanto à geologia, pedologia, hipsometria, geomorfologia, climatologia, hidrologia, uso e cobertura do solo.

- Bibliografias específicas sobre processamento de imagens digitais, o processo erosivo e suscetibilidade a erosão;
- Levantamento de informações gerais em entidades como Embrapa, INPE e SEPLAN;
- Levantamento de cartas temáticas, cartas topográficas, base cartográfica digital e analógica e imagens de satélites;

Nesta etapa foram organizadas as informações e os conhecimentos a serem integrados e interpretados nas etapas seguintes.

Na segunda etapa foram gerados os mapas de caracterização e localização da área; pré-processamento, análise, classificação e interpretação das imagens de satélite para a elaboração dos mapas de caracterização do uso do solo e geração do mapa de suscetibilidade à erosão. O uso do geoprocessamento como suporte para a análise ambiental foi de fundamental importância no desenvolvimento dessa etapa do projeto. A terceira etapa foi a interpretação geral e análise integrada dos produtos gerados.

3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada no Planalto dos Guimarães e engloba parte dos municípios de Poxoréo, de Dom Aquino, de Campo Verde e de Primavera do Leste, possuindo uma área de 3.000 km². O único perímetro urbano encontrado na área é Primavera do Leste, que está a 230 km da capital do estado, Cuiabá, e possui uma área de aproximadamente 15 km². As coordenadas UTM do retângulo envolvente da área de estudo são 739.106/8.269.972 e 807.278/8.313.902, como pode ser visto na figura 2.

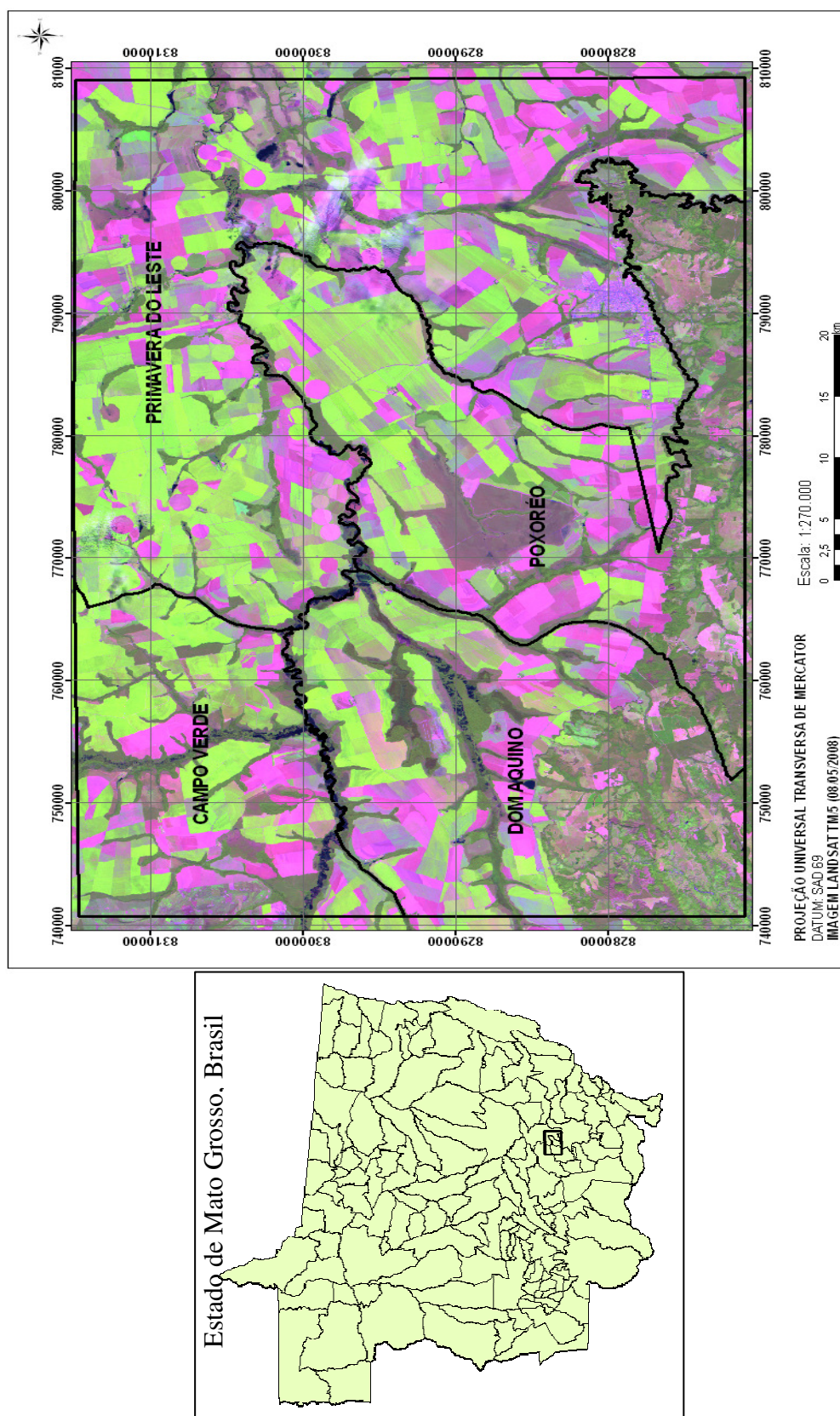


FIGURA 2: Localização da área de estudo. Imagem Landsat TM em composição colorida das bandas 3, 4 e 5.

3.1.1 Hidrografia

A região encontra-se no divisor de águas de três importantes bacias hidrográficas: Bacia do Prata, Bacia do Araguaia-Tocantins e Bacia Amazônica.

O principal curso d'água que corta a região é o Alto Rio das Mortes, que tem direção leste e drena toda a superfície da chapada. Entre os seus afluentes estão os Ribeirões dos Perdidos, Chico Nunes, Buritama, Traíra, Lagoa Seca, e outros que nascem na borda da chapada ou em seu todo e tomam direções variadas. Nessa área também se encontra o córrego da Lambança, que é um afluente do Rio São Lourenço, um dos principais rios da bacia do Paraguai.

3.1.2 Geologia

A geologia é uma característica importante na compreensão dos solos de uma região. As unidades litoestratigráficas identificadas no mapa geológico do Estado de Mato Grosso (SEPLAN, 2001) foram:

- Formação Serra Geral: Litologicamente é constituída por uma sucessão de derrames de lavas, predominantemente básicas, contendo domínios subordinados intermediários e ácidos, principalmente no terço médio e superior.
- Formação Botucatu: Arenitos finos a médios, bimodais, com grãos bem arredondados e estratificações cruzadas de grande porte, podem ocorrer na forma de intertrapes com basaltos. Desenvolvem extensos areais.
- Formação Furnas: Arenitos de granulometria grosseira a localmente finos. Na base apresentam horizontes conglomeráticos monomíticos de espessura métrica.

A área de estudo é constituída geologicamente pelas seguintes unidades do Período Terciário-Quaternário:

- Ha - Aluviões atuais: areias, siltes, argilas e cascalhos da era Cenozóica.
- Tpspl – Superfícies paleogênicas paleoplanizadas com latossolização: paleossolos argilosos e argilo-arenosos microagregados de cor vermelho-

escuro. Podem apresentar na base crosta ferruginosa.

3.1.3 Solos

De acordo com a base de dados da SEPLAN (2001), os principais tipos de solos encontrados na área de estudo são: predominantemente Latossolos Vermelhos, seguidos em importância pelos Latossolos Vermelho-Amarelos e, por último, Neossolos Quartzarênicos. Além disso, em menor escala são encontrados nas bordas e escarpas do planalto os Neossolos Litólicos, Plintossolos e Cambissolos e nas áreas próximas aos cursos d'água os Organossolos. A seguir são listadas brevemente as principais características de cada tipo de solo de acordo com a nova classificação brasileira de solos da Embrapa (IBGE, 2007).

3.1.3.1 Latossolos

Em geral são solos muito intemperizados, profundos e de boa drenagem. Distribuem-se por amplas superfícies do território nacional, diferenciando-se entre si principalmente pela coloração e teores de óxidos de ferro, que determinam a sua separação em quatro classes distintas. Na área de estudo ocorrem o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho-Amarelo.

- Latossolo vermelho (LV): geralmente são profundos ou muito profundos, homogêneos, de boa drenagem e quase sempre com baixa fertilidade natural (necessitam de correções químicas para aproveitamento agrícola). São normalmente porosos, exceto aqueles com teores elevados de argila. Mesmo assim, a grande quantidade de poros proporciona a estes solos altas permeabilidades. Ocorrem em todo o Brasil, mas tem grande expressividade nos chapadões da Região central, como é o caso da Chapada dos Guimarães. São responsáveis por boa parte de produção de grãos em sistema de manejo desenvolvido nessa região do país.
- Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA): são profundos, com boa drenagem e normalmente com baixa fertilidade natural. São também solos profundos, mas podem apresentar reduzidos teores de bases trocáveis, de micronutrientes e de fósforo. Quando de textura argilosa são muito explorados com lavouras de grãos mecanizadas e quando de textura média são usados com pastagens.

Ocorrem em todo o território brasileiro.

3.1.3.2 Neossolos

Congregam solos rasos, como o Neossolos Litólicos; ou profundos e arenosos, como o Neossolo Quartzarênico, ou solos profundos e arenosos com presença de minerais primários de fácil intemperização, Neossolos Regolíticos, ou ainda, solos constituídos por sucessão de camadas de natureza aluvionar, como os Neossolos Flúvicos.

Os Neossolos ocorrem de forma dispersa em ambientes específicos, como é o caso dos relevos muito acidentados de morrarias e serras, como os Neossolos Litólicos (RL). Já os Neossolos Quartzarênicos (RQ) são muito expressivos no Brasil e ocupam grandes concentrações em alguns estados do Centro-Oeste e Norte, como o Estado do Mato Grosso.

3.1.3.3 Cambissolos

São solos que vão desde rasos a profundos. A drenagem varia de acentuada a imperfeita e podem apresentar qualquer tipo de horizonte A e também cores diversas. Muitas vezes são pedregosos, cascalhentos e mesmo rochosos. Ocorrem em todas as regiões do Brasil, em especial em regiões serranas ou montanhosas. Em condições de relevo suave (mecanizável) e sem presença de cascalho ou pedregosidade, ocorrem com grande expressão na porção sudeste do Mato Grosso.

3.1.3.4 Oganossolos

Constituem solos pouco evoluídos, constituídos por material orgânico proveniente de restos vegetais em graus variados de decomposição, em ambientes mal a muito mal drenados ou úmidos de altitude elevada, que ficam saturados com água por poucos dias no período chuvoso. São solos que têm elevado teor de água em sua constituição, o que dificulta muito o seu manejo para exploração agrícola.

Quando não drenados artificialmente, apresentam-se saturados com água na maior parte do tempo e tem ocorrências em regiões baixas e alagadas, geralmente planícies de inundação de rios e córregos e áreas deprimidas.

Ocorrem em presença significativa em planícies de córregos nos planaltos do Brasil Central.

3.1.3.5 *Plintossolos*

Caracterizam-se principalmente pela presença de expressiva plintização com ou sem petroplintita (concreções de ferro ou cangas).

- Os Plintossolos Argilúvicos apresentam drenagem restrita, tem como característica diagnóstica a presença do horizonte plíntico que é identificado principalmente por cores mosqueadas ou variegadas, compostas por tons desde vermelhos a acinzentados. Tem manejo agrícola bastante delicado e necessita de bom controle de sua dinâmica hídrica interna, já que tem como consequência o endurecimento da plintita. Na região Centro Oeste imensos projetos de cultivo de grãos (principalmente arroz) estão instalados sobre os mesmos, com uso de irrigação/drenagem.
- Os Plintossolos Pétricos, geralmente de melhor drenagem, caracterizam-se pela presença no perfil dos horizontes diagnósticos concrecionário e/ou litoplíntico. São usados apenas para pastoreio extensivo quando sob vegetação campestre ou campo cerrado, ou com pasto plantado com espécies forrageiras rústicas. Tem ocorrência mais restrita aos planaltos da Região Centro Oeste e Norte (Tocantins, Goiás e Mato Grosso) e alguns platôs da Amazônia.

3.1.4 Unidades geomorfológicas

O Planalto Central engloba quase toda a região do Centro-Oeste e partes do Sudeste brasileiro. Nessa área o relevo se apresenta com extensos planaltos, intercalados por grandes depressões, com cobertura de florestas e savanas. Esse relevo, contendo os planaltos e as depressões, foi modelado em sucessivas fases erosivas durante o Cenozóico (GUERRA & BOTELHO, 2001).

No Planalto dos Guimarães, especificamente na área de estudo, foram identificados cinco tipos de relevo, de acordo com o mapa de unidades geomorfológicas da SEPLAN (2001). As unidades geomorfológicas identificadas são

descritas brevemente, de acordo com SANTOS (2000).

- Sistema denudacional estrutural (Sf): São os sistemas em que as estruturas geológicas são os principais responsáveis pela conformação geral do relevo. Estas estruturas responsáveis pelo arranjo das formas de relevo geralmente possuem dimensões regionais, como por exemplo, faixas dobradas, grandes sistemas de falhas e bacias sedimentares. Na área de estudo foi identificada no terceiro nível taxonômico dos Sistemas Denudacionais o Sistema de Blocos Falhados – Sf, que se caracteriza estruturalmente como uma área onde esforços tectônicos interferem severamente na disposição das formas de relevo através de falhas e fissuras. O resultado destes esforços gera relevos com blocos abatidos (*graben*) e outros elevados (*horst*), que interferem na topografia original.
- Sistema de planície aluvionar meandriforme (Pmd): correspondem a depósitos sedimentares dos canais fluviais meandrantess, os quais possuem gênese associada ao baixo gradiente das superfícies regionais. O padrão de relevo é composto por planícies aluviais elaboradas pelos rios atuais. As planícies meândricas possuem todo o sistema hidrográfico e fisiográfico em formação. Os meandros possuem feições características, como as margens côncavas, onde ocorre o processo de escavação (bancos de solapamento), enquanto nas margens convexas ocorre a sedimentação (*point bar*). Pântanos de reverso ocorrem à retaguarda dos diques marginais, com presença de depósitos orgânicos. Este sistema distribui-se amplamente no Estado de Mato Grosso, com ocorrência em rios de pequeno, médio e grande porte.
- Sistema de planície fluvial (Pf): associados a rios de menor porte, onde se verificam a ocorrência da ação das cheias e das vazantes, resultando em depósitos sedimentares ao longo de seus canais. Este sistema corresponde às áreas que têm como gênese processos de agradação preponderantemente fluvial, sendo que esse sistema tem desenvolvimento local, fato associado à existência de nível de base local. Possuem formato alongado acompanhando o canal fluvial. Geralmente, estão associados a rios de menor porte, onde em função da escala de mapeamento, não é possível identificar a padronagem dos

rios (meândricos, anastomosados, *braided*), ou efetivamente estão ligadas a rio pouco sinuosos.

- Sistema de aplainamento (Ap1): este sistema corresponde ao conjunto de formas aplainadas e que ocupam posição de cimeira dentro do conjunto regional do relevo. São identificadas a partir de sua ampla área de ocorrência, apresentando baixas declividades e baixa densidade de drenagem. Outra característica marcante deste sistema é a sua relação com o material superficial, composto por uma cobertura argilosa muito espessa, que apresenta crostas ferruginosas em sua base.
- Sistema Lacustre/Palustre – Depressões Úmidas (Du): Este sistema ocorre em áreas de indefinição de drenagem localizada em posições interfluviais de topos tabulares localizadas em posição de cimeira, com baixas declividades, geralmente menores do que 1%, e dimensões, geralmente superiores a 5 km. Estas características acabam por interferir nos fluxos superficiais, pois não ocorre canalização das águas de chuvas para um sistema fluvial hierarquizado, disponibilizando toda a água precipitada para a infiltração.

3.1.5 Unidades climáticas

Na área de estudo são identificadas três unidades microclimáticas associadas a diferentes tipos de relevo, a saber: topos da Chapada dos Guimarães, topos elevados da Chapada dos Guimarães e planalto do rio das Mortes. A característica comum entre elas é que o período de déficit hídrico se concentra nos meses de maio a setembro (PORTILLO, 2007).

De acordo com o mapa de unidades climáticas da SEPLAN (2001), a área pertence a unidade climática Tropical Continental alternadamente úmido e seco das chapadas planaltos e depressões, que pode ser subdivida em:

- III A2a - mesotérmico de topos e cimeiras dos chapadões: em altitudes de 600 a 700 m; topo da Chapada dos Guimarães, com temperatura média de 23°; pluviosidade entre 1650 e 1900 mm/ano. Os meses de seca vão de maio a setembro e o período chuvoso vai de novembro a abril.

- III A2b - mesotérmico de topos e cimeiras dos chapadões: em altitudes de 700 a 900 m; topos elevados da Chapada dos Guimarães, com temperatura média de 22,5°; pluviosidade entre 1800 a 2100 mm/ano. Os meses de seca de julho a agosto e o período chuvoso vai de outubro a maio.
- III C9 - mesotérmico quente e úmido da fachada meridional dos planaltos: em altitudes de 300 a 700 m, com temperatura média de 24,6°; pluviosidade entre 1600 e 1800 mm/ano. Os meses de seca vão de junho a setembro e o período chuvoso vai de novembro a abril.

3.1.6 Vegetação

A região está situada sob o bioma do Cerrado. De acordo com RIBEIRO & WALTER (2007), são descritos onze tipos principais de vegetação para o bioma Cerrado, enquadrados em formações florestais (Mata Ciliar, Mata de Galeria, Mata Seca e Cerradão), savânicas (Cerrado sentido restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e Vereda) e campestres (Campo Sujo, Campo Limpo e Campo Rupestre).

De acordo com o mapa de vegetação da SEPLAN (2001), a vegetação original corresponde às savanas arborizadas (cerrado), à savana florestada (cerradão), às formações ripárias (formações savânicas associadas às vertentes com matas em grotões de drenagem), savana parque (campo cerrado) e por último, a savana gramíneo-lenhosa (campos úmidos).

3.2 IMAGENS E SOFTWARES UTILIZADOS

As imagens utilizadas foram:

- Landsat 5, instrumento TM, com data de passagem em 08/05/2008 e 12/08/2008, órbita 225/ponto 71,
- CBERS2, instrumento CCD, com data de passagem em 02/07/2008 e 15/08/2007, órbita 164/ponto 117 e
- Da missão SRTM.

As imagens Landsat e CBERS foram obtidas em 22/10/2008 no catálogo de imagens do INPE, disponível na internet. As imagens foram escolhidas de acordo com a época de plantio e colheita de grãos, visto que o solo é usado para o cultivo de grandes lavouras de soja, algodão e milho. Essas imagens foram as que apresentaram menor cobertura por nuvens.

As imagens Landsat 5 e CBERS foram usadas neste trabalho pelo fato de serem instrumentos de trabalho em geoprocessamento muito usados em todo o Brasil e no mundo, pois possuem uma resolução espectral satisfatória para a classificação do uso do solo e por estarem disponíveis gratuitamente no acervo de imagens do INPE.

As bandas do sensor TM usadas neste trabalho foram escolhidas de acordo com suas características individuais, especificadas por LILLESAND & KIEFFER (1994). As principais aplicações para as bandas espectrais do Landsat 5 são definidas no quadro 3.

QUADRO 3: Principais aplicações para as bandas espectrais do Landsat 5 TM (adaptado de LILLESAND & KIEFFER, 1994).

Banda	Comprimento de onda (μm)	Localização da faixa	Principais aplicações
3	0,63-0,69	Vermelho	-diferenciação de espécies vegetais -identificação de feições culturais
4	0,76-0,90	Infravermelho próximo	-tipos, vigor e biomassa da vegetação - identificação de corpos d'água - umidade do solo
5	1,55-1,75	Infravermelho médio	- mapeamento de vegetação - umidade dos solos - diferenciação entre nuvens e neve

A imagem SRTM foi adquirida gratuitamente no site da Embrapa em 13/11/2008. A imagem usada pertence à carta SD-21-Z-D do IBGE, os MDE's estão e sistema de coordenadas e Datum WGS84, com resolução de 90 m. A utilização dos

dados numéricos originais (MDE's) exigem o emprego de softwares de geoprocessamento. Os softwares e equipamentos usados foram:

- Os softwares SPRING 5.0 (INPE), ArcGis 9.2 *Esri* e GPS TrackMaker®,
- Computador portátil de 1GB de memória,
- Câmera digital de 7.1 mp e
- GPS Garmim eTrex.

3.3 VISITA DE CAMPO

O trabalho de campo é parte indispensável no estudo do mapeamento dos usos do solo por meio de imagens de satélite e faz parte dos processos de interpretação, tornando a classificação mais confiável. A priori, foram escolhidos pontos das imagens que geravam confusão no momento da classificação visual, ou que eram feições desconhecidas. A maior parte da área é usada pela agropecuária, principalmente algodão, soja e milho.

A visita de campo é necessária para se verificar as características de cada alvo. As áreas visitadas foram georreferenciadas com o auxílio do GPS (Global Positioning System) da marca Garmim, modelo eTrex. Por dispor-se de um software que permitia fazer navegação em tempo real, foi possível identificar os usos de solo ao longo do caminho marcando pontos amostrais em locais de interesse, que foram disponibilizados em forma de trilha no programa GPS TrackMaker®.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS CLASSES TEMÁTICAS

As classes definidas foram: mata ciliar, cerrado, pastagem, água, área urbana, solo exposto, agricultura em estágio inicial e agricultura sadia e madura. A classe agricultura foi dividida em duas sub-classes (agricultura em estágio inicial e agricultura sadia e madura) a fim de se facilitar o mapeamento das feições e conferir um melhor resultado a classificação. De acordo com o calendário agrícola da EMPAER (2009), as principais culturas da região provavelmente seguem o

cronograma do quadro 4. A partir desses dados de colheita e plantio foi possível definir as classes de uso do solo que foram mapeadas em cada imagem.

QUADRO 4: Calendário agrícola (adaptado da EMPAER, 2009)

ALGODÃO					
JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
- Preparo do solo; - Plantio; - Adubação; - Adubação em cobertura	- Preparo do solo - Plantio; - Adubação; - Tratos culturais; - Adubação de cobertura.	- Capina; - Raleação - Adubação de cobertura; - Controle de pragas.	- Capina (algodão familiar); - Controle de pragas.	- Capina (algodão familiar); - Controle de pragas; - Colheita.	- Capina; - Colheita.
JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
- Colheita; - Comercialização.	- Colheita; - Comercialização.	Comercialização.	Comercialização.	Comercialização.	- Preparo do solo; - Plantio no cerrado; - Aplicação de herbicida
MILHO					
JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
Controle de pragas.	- Colheita; - Transporte; - Comercial. - Armazenam.	- Colheita; - Transporte; - Comercial. - Armazenam.	- Colheita; - Transporte; - Comercialização - Armazenam.	- Descompactação do solo; - Calagem.	- Descompactação do solo; - Calagem.
JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
- Descompactação do solo; - Calagem; - Amostragem do solo.	- Calagem; - Preparo do solo.	Preparo do solo.	- Plantio; - Adubação; - Aplicação de herbicida.	- Plantio; - Adubação - Controle de pragas; - Aplicação de herbicida.	- Plantio; - Adubação de cobertura; - Controle de pragas.
MILHO SAFRINHA					
JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
Coleta e amostra de solo para análise.	- Preparo do solo; - Plantio/Adubação; - Aplicação de herbicida.	- Preparo do solo; - Plantio/Adubação de cobertura; - Aplicação de herbicida.	- Tratos culturais; - Adubação de cobertura.	Tratos culturais.	- Colheita; - Transporte; - Comercialização. - Armazenam.
JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
- Colheita; - Transporte; - Comercializ.					
SOJA					
JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO
- Controle fitossanitário; - Controle de plantas invasoras.	- Controle de invasoras pragas; - Plantio da soja safrinha; - Colheita da soja precoce.	- Controle fitossanitário; - Dessecação para colheita; - Colheita; - Transporte; - Armazenam.	- Colheita; - Armazenamento; - Transporte; - Comercializ.	- Conservação do solo; - Plantio irrigado; - Colheita; - Armazenam. - Transporte; - Comercialização	- Tratamento de sementes; - Plantio irrigado; - Conservação do solo; - Transporte; - Comercializ.
JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
- Conservação do solo; - Fotossanidade da soja irrigada; - Transporte; - Comercializ. - Calagem; - Coleta e análise de solo.	- Colheita da soja irrigada; - Transporte; - Comercializ. - Calagem; - Coleta e análise de solo.	- Conservação do solo; - Preparo do solo; - Calagem no início das chuvas; - Colheita da soja irrigada.	- Preparo do solo; - Nivelação do plantio; - Inoculação das sementes; - Plantio da soja precoce; - Aplicação de herbicida.	- Preparo do solo; - Inoculação; - Plantio; - Aplicação de herbicida.	- Preparo do solo; - Inoculação; - Plantio; - Aplicação de herbicida; - Controle de pragas..

Por não ser de interesse desse estudo mapear cada tipo de cultura existente nos talhões, elas foram reagrupadas nas classes agricultura em estágio inicial e agricultura sadia e madura, considerando apenas o seu estágio de desenvolvimento, que pôde ser observado em campo e identificados através de suas características espectrais. As classes área urbana e água foram definidas por serem feições bastante evidentes na imagem e também com base em outras fontes de dados.

Algumas classes foram definidas com o intuito de reagrupar algumas feições existentes em pequenas porções. Dessa forma foi criada a classe cerrado, que englobou todas as formações florestais contidas nesse bioma, como as savanas arborizadas, florestadas, savana parque e gramíneo lenhosa. A classe mata ciliar também é uma formação do cerrado, porém, optou-se por criar uma nova classe que englobasse as formações savânicas associadas com matas de áreas de drenagem e cursos d'água.

A classe pastagem foi definida a partir de outras fontes de dados e a partir dos dados de campo. As classes solo exposto, agricultura em estágio inicial e agricultura sadia e madura foram definidas de acordo com características espectrais das feições na imagem, com as informações obtidas em campo e com o calendário agrícola.

3.5 TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Sistemas de processamento e análise de imagens, munidos de softwares específicos, permitem aplicar técnicas de processamento digital de imagens (PDI), como correção e realce.

O Sistema de Processamento de Informação Georreferenciada (SPRING) é um exemplo de software livre de geoprocessamento que, acoplado com um SIG gera diretamente um plano de informação e uma carta temática e possibilita acessar, superpor e integrar à imagem analisada muitos dados armazenados no sistema, como hidrografia, arruamento, mapas temáticos, etc (FLORENZANO, 2008).

Técnicas de processamento digital de imagens consistem em operações ou transformações numéricas aplicadas nas imagens e podem ser agrupadas em três conjuntos:

- ✓ Técnicas de pré-processamento,
- ✓ Técnicas de realce e
- ✓ Técnicas de classificação.

3.5.1 Pré-processamento

A função do pré-processamento é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances de sucesso dos processos seguintes. Exemplos de técnicas de pré-processamento são: a calibração da radiometria; a atenuação dos efeitos da atmosfera; a correção distorções geométricas por meio de georreferenciamento e reamostragem e a remoção de ruídos e isolamento de regiões cuja textura indique a probabilidade de informação alfanumérica (FLORENZANO, 2008; GONZALES & WOODS, 2000) .

A correção de imagens pode ser subdividida em correção radiométrica e geométrica. A correção geométrica visa eliminar dois tipos de erros que ocorrem nos dados de satélite, ou seja, erros devido ao movimento do satélite e erros devido à curvatura da Terra. Essas distorções são chamadas distorções geométricas.

A correção geométrica é feita por georreferenciamento, que é a técnica mais usada para corrigir tipos de distorções geométricas presentes nas imagens digitais. Para georreferenciar uma imagem, utiliza-se uma base cartográfica ou pontos de controle obtidos por GPS ou outra imagem já corrigida, e aplica-se uma técnica de registro de imagem.

3.5.2 Técnicas de realce

A finalidade do realce é melhorar a qualidade visual das imagens e facilitar o trabalho de interpretação. Uma técnica simples e eficiente para detectar, por exemplo, feições e unidades geomorfológicas, é a ampliação linear de contraste, que consiste na expansão da distribuição linear de dados originais para todo o intervalo possível para 255 níveis de cinza em imagens de 8 bits.

A geração de composições coloridas pode ser considerada uma técnica de realce. As imagens obtidas por sensores eletrônicos são originalmente visualizadas

em preto e branco, mas é possível gerar composições coloridas associando duas ou três imagens às cores primárias vermelho, verde e azul (sistema RGB).

3.6 INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS

Interpretar uma imagem é dar significado aos objetos nela representados e identificados. A interpretação visual é um trabalho longo no sensoriamento remoto e as técnicas visuais fazem uso da habilidade humana para avaliar quantitativamente os padrões espectrais em uma imagem (LILLESAND & KIEFER, 1994). O conhecimento prévio da área de estudo e sobre o tema de estudo (relevo, vegetação, etc.) facilita o processo de interpretação e aumenta o potencial de leitura da imagem.

Para cada resolução, espacial e geométrica, existe uma escala ótima para análise de uma imagem. Quanto mais a escala se afastar desse ótimo, para mais ou para menos, maior será a perda de informações. Esse ótimo corresponde ao modo pleno (resolução plena) no qual cada ponto corresponde a um elemento de resolução (*pixel*) na tela. A melhor escala para imagens CBERS é 1:70.000 e para imagens LANDSAT (5/7, 1, 2 e 3) é 1:50.000 (DGI, 2009).

Devido à resolução espacial das imagens mais utilizadas, existem alguns problemas para a sua incorporação em trabalhos de mapeamento do uso e ocupação do solo em regiões densamente ocupadas e com mosaico muito heterogêneo.

Por isso, a utilização de mais de uma fonte de informações orbitais auxilia na detecção, identificação, delimitação e caracterização da cobertura vegetal e do uso do solo, já que diferentes horários de aquisição, ângulos de visada, resolução espectral e espacial dos satélites resultam em respostas diferentes e complementares. Também é importante a utilização de mais de um algoritmo de classificação para alcançar melhores resultados (COUTINHO, 1997).

A respeito da classificação do uso e cobertura do solo, ROSA (1992), afirma:

“O conhecimento atualizado da distribuição e da área ocupada pela agricultura, vegetação natural e áreas urbanas, bem como as informações sobre mudanças ocorridas na área são cada vez mais necessários a legisladores e planejadores (...), no entanto não existe classificação do uso do solo que seja única e ideal. Cada classificação é feita de acordo com as necessidades do usuário e

adaptadas a cada região.”

Para auxiliar na interpretação de imagens Landsat-5 TM com composição colorida, obtidas dos canais três, quatro e cinco, associadas com as cores azul (B), verde (G) e vermelha (R), respectivamente, são usadas chaves de interpretação de objetos representados nessas imagens. Essas chaves de interpretação consistem na criação de um conjunto de elementos de interpretação que caracterizam um determinado objeto.

As chaves de interpretação sistematizam e orientam o processo de análise e interpretação de imagens. Cada intérprete pode criar suas próprias chaves. FLORENZANO (2008) apresenta exemplos de chaves de interpretação, descritos a seguir:

- Área urbana => cor magenta (rosa); textura ligeiramente rugosa; forma irregular; localização junto a rodovias.
- Solo exposto => cor magenta (dependendo do tipo de solo, pode ser bem claro, tendendo ao branco); textura lisa; forma regular; localização junto de áreas urbanas (área terraplanada para loteamentos, instalação de indústrias, etc.) ou áreas agrícolas (preparadas para cultivo ou recém colhidas).
- Área desmatada => cor magenta; textura lisa; forma regular
- Área agrícola => cor magenta (solo preparado ou cultura colhida), verde claro (cultura em estágio inicial) e verde escuro (cultura sadia e madura); textura lisa; forma regular/geométrica; padrão de talhões (divisão em parcelas).
- Áreas de pastagem => cor magenta (solo preparado e pastagem seca) e verde (pastagem densa e verde); textura lisa (pastagem plantada) e ligeiramente rugosa (pasto sujo); forma irregular.
- Área de mata/capoeira => cor verde escuro; textura rugosa; forma irregular.
- Corpos d'água => cor azul (material em suspensão) ou preta (água limpa); textura lisa; forma irregular, linear retilínea ou curvilínea para rios.

3.7 SEGMENTAÇÃO DE IMAGENS

A distinção e identificação de diferentes objetos na superfície terrestre é um dos principais objetivos do sensoriamento remoto, e tais ações são possíveis devido ao comportamento espectral de cada objeto. Os objetos da superfície são representados na imagem pelos *pixels*, e estes podem então ser agrupados em classes.

A segmentação de imagens é um procedimento computacional aplicado antes de um algoritmo de classificação automática e tem por objetivo fragmentar uma região, em unidades homogêneas, considerando algumas de suas características intrínsecas, como textura e contraste, e definir regiões na imagem, correspondendo a objetos na superfície terrestre (WOODCOCK et al, 1994 apud COUTINHO, 1997)⁹.

Esta característica diferencia-se da técnica de classificação *pixel a pixel*, a qual se baseia apenas nos atributos espectrais (CORREIA JR, 2006).

A segmentação pode ser feita de duas maneiras, uma forma consiste na detecção das bordas ou detecção de bacias e a outra consiste na delimitação de objetos pela técnica de crescimento de regiões. Este último é uma técnica de agrupamento dos dados, na qual somente as regiões adjacentes, espacialmente, podem ser agrupadas.

O método de segmentação bastante usado é o baseado no crescimento de regiões, que geralmente permite extrair um conjunto mais rico de atributos e selecionar amostras mais representativas de cada classe do que técnicas de detecção de bacias. Esse método utiliza um algoritmo que considera a similaridade, no qual, definidos os limiares de similaridade e de área (CORREIA JR., 2006). A seguir são definidos os dois limiares:

1. Limiar de similaridade: limiar abaixo do qual duas regiões são consideradas similares e agrupadas em uma única região.
2. Limiar de área: valor de área mínimo, representado em número de *pixels*, para que uma região seja individualizada.

⁹WOODCOCK, C.E.; COLLINS, J.B.; GOPAL, S.; JAKABHAZY, V.D.; LI, X.; MACOMBER, S.; RYHERD, S.; HARWARD, V.J.; LEVITAN, J.; WU, Y.; WARBINGTON, R. **Mapping forest vegetation using Landsat TM imagery and a canopy reflectance model**. Remote Sensing of Environment, New York, v.50, n.3, p.240-254, Dec. 1994 apud COUTINHO, A.C. **Segmentação e classificação de imagens Landsat - TM para o mapeamento dos usos da terra na região de Campinas, SP**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Dissertação de mestrado.

A segmentação por crescimento de regiões disponível no SPRING depende das variáveis como grau de similaridade e tamanho mínimo para o estabelecimento de uma região. De acordo com COUTINHO (1997), a imposição de graus de similaridade muito baixos cria um número muito grande de fragmentos na imagem. Se a variável tamanho mínimo de uma região, for muito alto, haverá um reagrupamento de variáveis, criando polígonos heterogêneos, assim como, se forem definidos grau de similaridade e área mínima muito pequenos, haverá a formação de fragmentos heterogêneos.

Após a definição destes limiares os algoritmos fragmentam a imagem em regiões homogêneas, para logo em seguida processar a classificação. Esses algoritmos são conhecidos como classificadores por regiões.

3.8 CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS

As técnicas de classificação visam o reconhecimento automático de objetos em função de determinado critério de decisão agrupando em classes de objetos que apresentam similaridade em suas respostas espectrais.

Na classificação procura-se rotular cada *pixel* da imagem em uma classe temática, semelhante ao que se faz na abordagem visual, e para isso usa-se os algoritmos de classificação. Além dos níveis de cinza, também devem ser interpretadas a textura e a forma da imagem. O procedimento de classificação envolve duas fases: o treinamento e a classificação, propriamente dita.

O treinamento consiste no reconhecimento da assinatura espectral de cada uma das classes de uso do solo da área imageada. O treinamento pode ser feito com a obtenção de parâmetros estatísticos de cada classe contida na área, ou apenas baseia-se no nível máximo e mínimo de níveis de cinza na área.

A **classificação supervisionada** é utilizada quando se tem algum conhecimento prévio sobre as classes na imagem, ou seja, o usuário identifica alguns *pixels* (amostragem) e essas amostras são usadas pelos algoritmos de classificação para localizar os demais e os relaciona a determinada classe.

Na **classificação não-supervisionada** o próprio algoritmo de classificação

define amostras representativas para cada uma das classes de acordo com critérios estatísticos. É indicada quando o analista não possui conhecimento prévio sobre a área de estudo.

Nas classificações digitais, um conjunto de amostras é utilizado para caracterizar cada classe temática a ser mapeada, e os *pixels* a eles pertencentes são comparados um a um às amostras fornecidas e são agrupados a classes temáticas a que eles pertencem, essa classificação é denominada *pixel a pixel*.

Os classificadores *pixel a pixel* utilizam apenas as informações espectrais de cada *pixel* para achar regiões homogêneas, enquanto que os classificadores por regiões utilizam a informação espectral de cada *pixel* mais a informação espectral que envolve a relação com seus vizinhos.

O método de classificação supervisionada *pixel a pixel* mais utilizado é o máxima verossimilhança (Maxver). A fase de treinamento consiste em fornecer ao sistema um conjunto de *pixels* representativos de cada alvo no solo existentes na imagem a ser classificada. O método consiste em classificar a imagem ponto a ponto usando o critério da máxima verossimilhança a partir de classes fornecidas pelo usuário. O método considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis digitais das classes utilizando parâmetros estatísticos.

Na técnica de classificação supervisionada as classes são definidas a priori e na classificação não-supervisionada as classes são definidas a posteriori, como um resultado da análise. Para classificar uma mesma área, podem-se utilizar os dois métodos de classificação. Assim, primeiro aplica-se a classificação não-supervisionada, como base para a seleção das amostras de treinamento e depois aplica-se a classificação supervisionada.

Outro método de classificação supervisionada, que é baseado na segmentação prévia da imagem, muito utilizado por usuários do SPRING é o método que usa o algoritmo Bhattacharya. Ele trabalha com a distância Bhattacharya, que é utilizada para medir a separabilidade estatística entre um par de classes, ou seja, mede a distância média entre as distribuições de probabilidade dessas classes (INPE, 2006).

Já o classificador não supervisionado por crescimento de regiões – Isoseg - agrupa regiões a partir de uma medida de similaridade chamada distância de Mahalanobis.

METTERNICHT & ZINCK (1998), usaram a classificação digital de dados Landsat-TM e JERS-SAR na região do visível, infravermelho, termal e microondas para complementar a detecção e mapeamento da erosão no Vale Sacaba (Bolívia), obtendo resultados muito bons.

GOES et al (2006) utilizaram os classificadores Iseleg, Bhattacharya, Maxver e Maxver-ICM para mapear o uso do solo em uma região do Ceará através de imagens CBERS e Landsat, obtendo melhores resultados com os classificadores por crescimento de regiões. Já VALÉRIO et al (2008), comparando o classificador não supervisionados Isodata e o Maxver para mapear o uso da qualidade da água no reservatório de Manso – MT, obtiveram melhores resultados com o classificador Maxver.

3.9 VERIFICAÇÃO DA PRECISÃO DA CLASSIFICAÇÃO

De acordo com CHORLEY & HAGGET (1975) apud CORREIA JR (2006)¹⁰, os mapas são exemplos de representações estáticas, e nenhum mapa representa perfeitamente a realidade. Os mapas trazem consigo todos os problemas referentes à redução da escala, ao tipo de projeção, às convenções, entre outras. Mas uma área que vem continuamente recebendo atenção por parte dos especialistas em sensoriamento remoto é a avaliação da precisão das classificações (LILLESAND & KIEFFER, 1994).

Após a classificação das imagens, faz-se necessário verificar a exatidão dos mapas obtidos. Uma forma bastante comum de avaliar a precisão da classificação é a elaboração de uma matriz de erro ou matriz de confusão. Essas matrizes são tabelas constituídas de linhas e colunas que expressam o número de células classificadas em relação a uma referência que pode ter sido obtida a partir de imagens aéreas, observações de outros mapas ou medições de campo. Elas comparam para todas as categorias a relação entre esses dados de referência e os resultados correspondentes

¹⁰ CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. **Modelos físicos e de informação em geografia**. São Paulo: EDUSP; Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1974. 260 p. apud CORREIA JR, P. A. **Elaboração de modelos para estudo das mudanças dos padrões de uso e cobertura da terra na bacia do Taibaçupeba, região metropolitana de São Paulo, com auxílio de sensoriamento remoto orbital**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Dissertação de mestrado.

na classificação automática (LILLESAND & KIEFFER, 1994).

Na matriz, as colunas representam os dados de referência, enquanto que as linhas representam a classe de cobertura designada pela classificação ou fotointerpretação. As classificações corretas são indicadas na diagonal principal da matriz, sendo que os elementos fora desta diagonal indicam uma combinação de erros de inclusão e exclusão.

A exatidão global da classificação é determinada pela divisão do total de *pixels* classificados corretamente (diagonal principal) pelo número total de *pixels* (N) da matriz. Para calcular a exatidão de cada categoria o analista deve dividir o número correto de *pixels* nas linhas e colunas. O número de *pixels* corretos em uma categoria é dividido pelo número total de *pixels* da qual a categoria pertence (total de colunas). De acordo com JENSEN (2005), esta estatística indica a probabilidade de um *pixel* de referência estar corretamente classificado e é a medida do erro de omissão.

Esta estatística é chamada Exatidão do Produtor, porque o produtor (analista) da classificação está interessado no quanto uma área pode ser classificada corretamente. Se o total de *pixels* corretos da categoria for dividido pelo total de *pixels* realmente classificados nesta categoria, o resultado é uma medida de erros de comissão. A Precisão do Usuário é a probabilidade que um *pixel* classificado no mapa realmente represente esta categoria na superfície (STORY & CONGALTON, 1986 apud JENSEN, 2005)¹¹.

Como a questão da confiabilidade dos mapeamentos efetuados é uma das maiores preocupações em relação ao processamento digital de imagens de satélite, isso levou os pesquisadores desenvolverem vários métodos para se estimar a precisão dos mapas. Uma estatística muito usada, considerada eficiente e segura, para se avaliar a exatidão dos mapeamentos é o índice Kappa.

A partir dos dados da matriz de erro é possível calcular, além da exatidão global, o coeficiente Kappa, que permite determinar estatisticamente se uma matriz é significativamente diferente de outra (CONGALTON & GREEN, 1999 apud PORTILLO, 2007)¹². O índice Kappa é dado pela fórmula a seguir:

¹¹ STORY, M.; CONGALTON, R. **Accuracy assessment: a user's perspective**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 52 (3), 1986. 397-399 apud JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3ª Ed. Prentice Hall series in geographic information science, 2005.

¹² CONGALTON, R. G.; GREEN, K. Basic Analysis Techniques. In: CONGALTON, R.G.; GREEN,

$$K = \frac{N \sum X_{ii} - \sum X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}}$$

Onde: N é o número total de observações

$\sum X_{ii}$ é a soma do número de observações corretas nas linhas e colunas

X_{i+} é o total das linhas e X_{+i} é o total das colunas

De acordo com LANDIS & KOCH (1977) apud JENSEN (2005)¹³, os valores de $k > 0,80$ (80%) apresentam uma exatidão ótima, valores de k entre 0,40 e 0,80 (40% e 80%) apresentam exatidão moderada e valores de $k < 0,40$ (40%) apresentam exatidão baixa.

ALVES et al (1998), analisam o desempenho de cinco técnicas diferentes de classificação automática de imagens do sensor TM para identificar áreas desflorestadas em uma região do estado de Rondônia. Entre os classificadores usados estão a classificação não supervisionada (algoritmo Isoseg), a classificação supervisionada (algoritmo Bhattacharya) e a classificação supervisionada (algoritmo Maxver). Os resultados foram satisfatórios, pois a classificação conservou-se entre 89% e 95%. O coeficiente Kappa foi $k > 0,8$ em todos os casos, o que significa um excelente grau de concordância, o que mostra que a classificação digital gera mapas com resultados satisfatórios.

GOES et al (2006), obteve índices Kappa para o classificador Bhattacharya de 51% e de 34% para o Maxver, índices considerados moderado e ruim. O baixo desempenho dos classificadores pode ser explicado pela confusão entre diferentes classes, que foi influenciada pela qualidade da imagem.

K (Ed). **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Lewis Publishers, 1999. Cap 5, p. 43-63 apud Portillo, J. E. Sensoriamento remoto e SIG na análise da cotonicultura nos municípios de Campo Verde e Primavera do Leste - MT São José dos Campos: INPE, 2007.

¹³LANDIS, J.; KOCH, G. **The measurement of observer agreement for categorical data**. Biometrics, 33, 1977. P. 159-174 apud JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3ª Ed. Prentice Hall series in geographic information science, 2005.

3.10 INTEGRAÇÃO DE DADOS PARA MAPEAMENTO DA EROSÃO

O primeiro passo no mapeamento da erosão é definir claramente os objetivos sobre o tipo de avaliação, a extensão da região, o nível de integração espacial e aspectos temporais. Em geral o nível de integração espacial é o *pixel*, ou bacias hidrográficas - regiões hidrológicas (VRIELING 2006).

Normalmente se faz uma integração de dados de satélite com outras fontes de dados já existentes. A escolha do método de integração depende dos objetivos do mapeamento. É comum usar meios para integrar fatores controladores da erosão, como o uso de modelos qualitativos e quantitativos.

FEOLI et al (2002) realizaram um estudo piloto no distrito de Adwa (Tigray, Etiópia) com o objetivo de avaliar os fatores relacionados com a degradação do meio ambiente e avaliar os efeitos das atividades agrícolas nos recursos naturais. Dados ambientais, modelo digital de elevação, vegetação, geomorfologia e mapas de erosão da área de estudo foram integrados com dados socioeconômicos usando um SIG. Para atingir o objetivo os dados foram avaliados usando análises multivariadas, incluindo a lógica fuzzy. Esses métodos foram usados para obter uma descrição quantitativa da heterogeneidade do sistema.

Muitas abordagens qualitativas para mapeamento da erosão têm sido desenvolvidas, as quais são adaptadas de acordo com as características da região e os dados disponíveis. Isso resulta em mapas que descrevem/representam classes de erosão ou riscos à erosão que vão de muito baixo a muito alto (VRIELING, 2006).

Não há um método padrão para a integração de dados qualitativos, conseqüentemente muitos métodos diferentes existem. Contudo, é comum classificar os fatores que controlam a erosão em classes discretas e aplicar regras de decisão para combinar as classes. Fatores de seleção e regras de decisão são geralmente baseados no julgamento do especialista, ou nos conhecimentos de autores sobre o processo erosivo na região.

A abordagem qualitativa mais básica é indicar pesos para representar as unidades espaciais da intensidade da erosão. Os pesos são aplicados de acordo com a importância dos fatores no processo erosivo. Posteriormente o risco a erosão é determinado a partir de pesos por soma, média e uso de regras de decisão

hierárquicas para combinar os pesos.

Para avaliar o desempenho de um método específico de mapeamento da erosão e seus valores previstos, é necessária a validação dos mapas resultantes com dados independentes, ou seja, é necessário avaliar a precisão dos dados.

Para validar mapas de erosão, são usadas observações e interpretação de imagens de alta resolução e fotografias aéreas para localizar áreas com processo erosivo e deposição evidentes, e esta informação gera bons resultados.

Neste trabalho são integrados os mapas de uso e ocupação do solo, declividade e tipos do solo, considerando a erodibilidade de cada tipo de solo. Os mapas de uso e ocupação usados são os mapas adquiridos através das imagens de satélites melhor classificadas. O mapa de declividade é adquirido a partir da imagem SRTM.

É necessário fazer antes uma consideração em relação aos tipos de uso e ocupação do solo e sua relação com o processo erosivo, assim como, em relação à declividade do terreno e a erodibilidade dos solos.

De acordo com SALOMÃO (1999), em áreas ocupadas pela agricultura predomina o processo de erosão laminar, e a suscetibilidade dos solos à erosão pode ser determinada com base na análise de fatores naturais influentes no processo erosivo como a erodibilidade do solo, declividade e uso e ocupação. O mapa de solos foi elaborado considerando a erodibilidade do solo que, deve ser baseado nos índices de erodibilidade dos solos mapeados.

Para o estado de Mato Grosso não existem dados disponíveis sobre os índices de erodibilidade do solo, por isso os dados usados nesse estudo se baseiam nos índices encontrados para o estado de São Paulo por BERTONI & LOMBARDI NETO (1985)¹⁴ apud SALOMÃO (1999). No quadro 5, a seguir, podem ser vistos os valores encontrados para cada tipo de solo e os graus de erodibilidade, baseados nas classes de erodibilidade definidas por ROSS (2005).

QUADRO 5: Classes de erodibilidade

¹⁴ BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985. 368 p. apud SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

Tipos de solo	Classes de erodibilidade	Índices relativos de erodibilidade	Grau de erodibilidade
Cambissolos, Neossolos Litólicos e Quartzarênicos	I	10,0 a 8,1	Muito Forte
Argissolos, Plintossolos	II	8,0 a 6,1	Forte
Latossolo vermelho amarelo	III	6,0 a 4,1	Médio
Latossolos amarelo	IV	4,0 a 2,1	Fraco
Latossolo vermelho e solos Orgânicos	V	2,0 a 1,0	Muito fraco

O tipo de cobertura do solo também tem grande importância no processo erosivo, pois de acordo com BERTONI & LOMBARDI NETO (2005), há considerável diferença entre as quantidades de solo perdidos por erosão para cada tipo de cultura. Os tipos de cobertura do solo seguem uma hierarquia de acordo com a quantidade de solo arrastado, por exemplo, a mata e a pastagem apresentam menores taxas de perda de solo do que o algodão.

Entre as culturas agrícolas, BERTONI & LOMBARDI NETO (2005), classificaram as culturas em relação à quantidade de solo arrastada e as perdas de água, e subdividiu as culturas, segundo o grau crescente de proteção oferecida contra a erosão:

- 1º grupo - mamona, feijão e mandioca
- 2º grupo - amendoim, arroz e algodão
- 3º grupo - soja e batatinha
- 4º grupo - cana-de-açúcar e milho

Como nesse estudo as culturas agrícolas foram classificadas de acordo com características de seu ciclo vegetativo (cultura em estágio inicial e sadia/madura) é importante ressaltar que a proteção oferecida pela cobertura vegetal é gradual, ou seja, os estágios de desenvolvimento da cultura definem os efeitos da cobertura. A seguir, são mostradas no quadro 6, as perdas de solo para diversas culturas e tipos de manejo, desde o preparo do solo até a colheita.

QUADRO 6: Razão de perdas de solo entre área cultivada e área continuamente descoberta, adaptado de BERTONI & LOMBARDI NETO (2005)

	Razão por perda de solo por período de estagio de cultura (%)				
Cultura	D	1	2	3	4
Pasto	-	-	0,4-4,0	-	-
Soja/rotação milho	15	12	20	4	3
Soja /rotação milho, plantio direto	-	8	10	4	3
Algodão/rotação soja	20	20	30	15	13
Milho contínuo/palha superficial	-	5	2	1	1
Algodão, contínuo convencional	40	60	40	50	20
Soja, contínuo convencional	35	30	20	20	5

Períodos: D (preparo do solo: desse preparo até ao plantio)

1 (plantio: do plantio a um mês após)

2 (estabelecimento: do fim do período 1 até dois meses após o plantio)

3 (crescimento e maturação: de 2 meses após o plantio até a colheita)

4 (resíduo: da colheita até o preparo do solo)

Dessa forma pode-se ter uma idéia de qual o tipo de cultura agrícola protege menos o solo contra a erosão. O algodão e a soja são as culturas que menos oferecem proteção ao solo, pois as perdas de solo durante o preparo do solo e durante o plantio são bastante altas, diminuindo um pouco até o período da colheita. A pastagem oferece maior cobertura ao solo, porém isso depende da qualidade da pastagem.

ROSS (2005) estabelece uma relação entre alguns tipos de cobertura do solo e sua importância no processo erosivo, ou seja, na sua capacidade de proteger o solo contra a erosão. SALOMÃO (1999) estabelece cinco classes de ocupação do solo, tendo em vista o estudo da erosão, onde o critério de classificação é o porte da vegetação e a intensidade da ação antrópica no manejo da terra. Assim, as classes foram divididas da seguinte maneira:

QUADRO 7: Classes de uso e ocupação

Classes	Tipo de uso e ocupação	Grau de Proteção do solo
I	Culturas anuais, estradas e áreas urbanizadas	Muito Fraco
II	Culturas perenes, cana-de-açúcar e pastagem	Fraco
III	Pasto sujo e campo cerrado	Médio
IV	Reflorestamento, capoeirão e florestas	Alto
V	Espelhos d'água	Nulo

A declividade é um fator importante no processo erosão, pois ela define a velocidade e a quantidade do solo arrastado pelo escoamento superficial. De acordo com ROSS (2005) as classes de declividade são hierarquizadas em cinco categorias, classificadas de acordo com seu grau de influência no processo erosivo. As classes de declividade podem ser associadas ao tipo de relevo e ao grau de limitação a erosão, de acordo com RAMALHO E BEEK (1995)¹⁵ apud MINOTI (2006). O quadro 7 foi elaborado de acordo com essas informações.

QUADRO 7: Classes de declividade

Classes de declividade	Relevo	Grau de limitação
0 a 6%	Plano/suavemente ondulado	Muito Fraco
6 a 12%	Suavemente a moderadamente ondulado	Fraco
12 a 20%	Ondulado	Médio
20 a 45%	Fortemente ondulado	Muito forte

O mapa de declividade nesse estudo é obtido por meio dos dados da imagem SRTM e reclassificado de acordo com os graus de declividade encontrados a fim de se obter cinco classes para a área de estudo.

¹⁵ RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. Rio de Janeiro, Embrapa – VNPS, 1995. 65p. apud MINOTI, R. T. **Abordagem qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do médio Mogi- Superior, 2006**. Tese (doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao aplicar a metodologia descrita anteriormente no item 3. Inicialmente são analisadas as informações de campo e os produtos obtidos após do pré-processamento das imagens de satélite. Posteriormente são apresentados e discutidos os resultados do pré-processamento e classificação das imagens.

São apresentados os mapas de declividade, erodibilidade e uso e ocupação do solo e o resultado da sobreposição destes produtos, que é o mapa de suscetibilidade a erosão.

4.1 VISITA DE CAMPO

A visita de campo foi realizada a fim de se verificar os tipos de uso e cobertura do solo na região estudada. A priori foram selecionadas algumas áreas de interesse a serem visitadas. Essas áreas foram escolhidas por apresentarem um tipo de uso não identificado inicialmente e acima de tudo, a visita de campo é essencial para se obter uma classificação precisa de uma região de interesse.

Tendo em vista que a área de estudo não é muito extensa, por volta de 3.000 km² foi possível percorrer grande parte da área a fim de se obter o maior número de informações possível sobre o uso do solo. Os pontos coletados com o GPS foram transferidos para o computador por meio do software GPS TrackMaker®, como pode

ser visto na figura 3, e pode ser vista também partes do caminho percorrido durante a visita de campo.

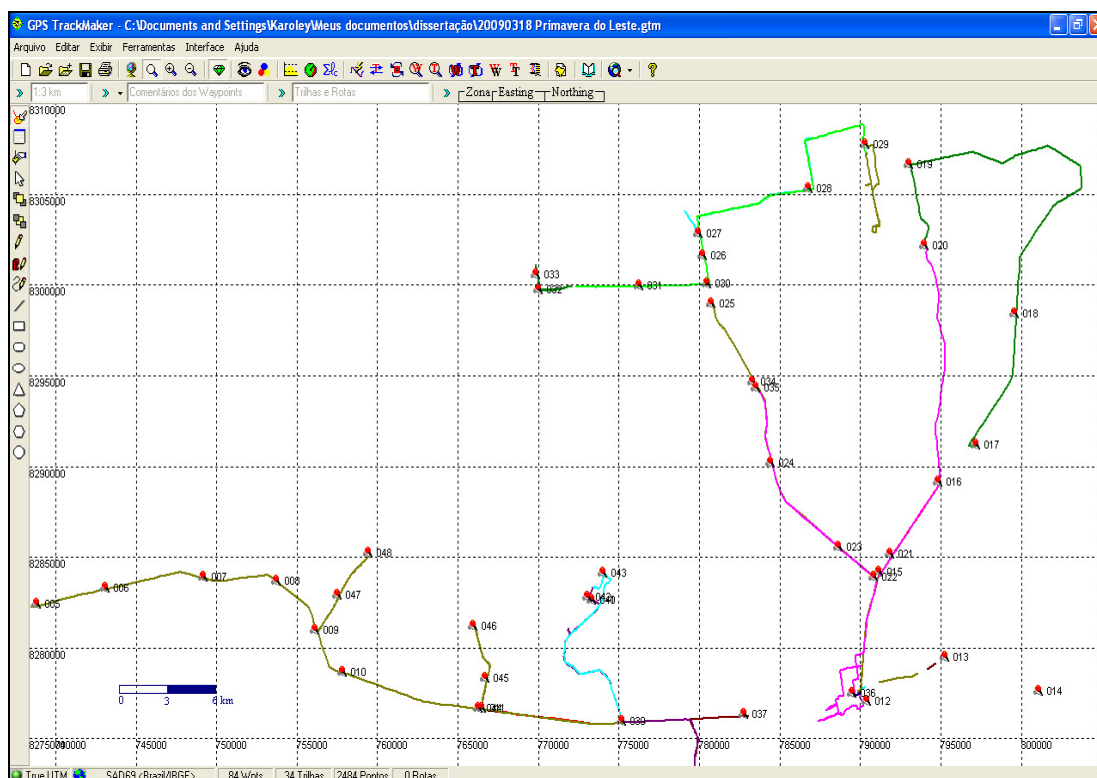


FIGURA 3: Trilha e pontos obtidos durante a visita de campo realizada nos dias 18 e 19/03/2009.

Os pontos foram coletados e identificados durante a visita de campo, como pode ser observado no quadro no ANEXO A.

Foi possível observar na imagem que alguns pontos possuem o mesmo tipo de cultura devido às características espectrais das feições, mas em campo pode ser notado que também existem culturas diferentes que apresentam respostas espectrais semelhantes, o que indica que há um padrão de resposta espectral entre as diferentes culturas, especialmente no seu estágio inicial. Esse tipo de situação dificulta o mapeamento de cada tipo de cultura existente na área, pois há uma diversidade de culturas dentro de um pequeno espaço que apresentam mesmas características espectrais, de textura ou geometria. Isso demandaria um trabalho moroso e desnecessário para o estudo proposto.

Um exemplo pode ser visto nas figuras 4 (A, B, C e D), onde foram

identificadas culturas de milho e soja em estágio inicial, contudo, nas imagens de satélite adquiridas elas não foram diferenciadas, por isso foram agrupadas em uma única classe de uso.



FIGURA 4: Talhões com (A) milho, (B) milho, (C) milho e (D) soja - culturas em estágio inicial.

Também foram identificadas culturas de algodão e milho em grande parte dos locais visitados, e nesse caso, as culturas já se encontravam em um estágio de desenvolvimento mais avançado, e em alguns pontos já floridas como pode ser observado nas figuras 5 (B e D), posteriormente esse tipo de cobertura foi definido como cultura sadia e madura.

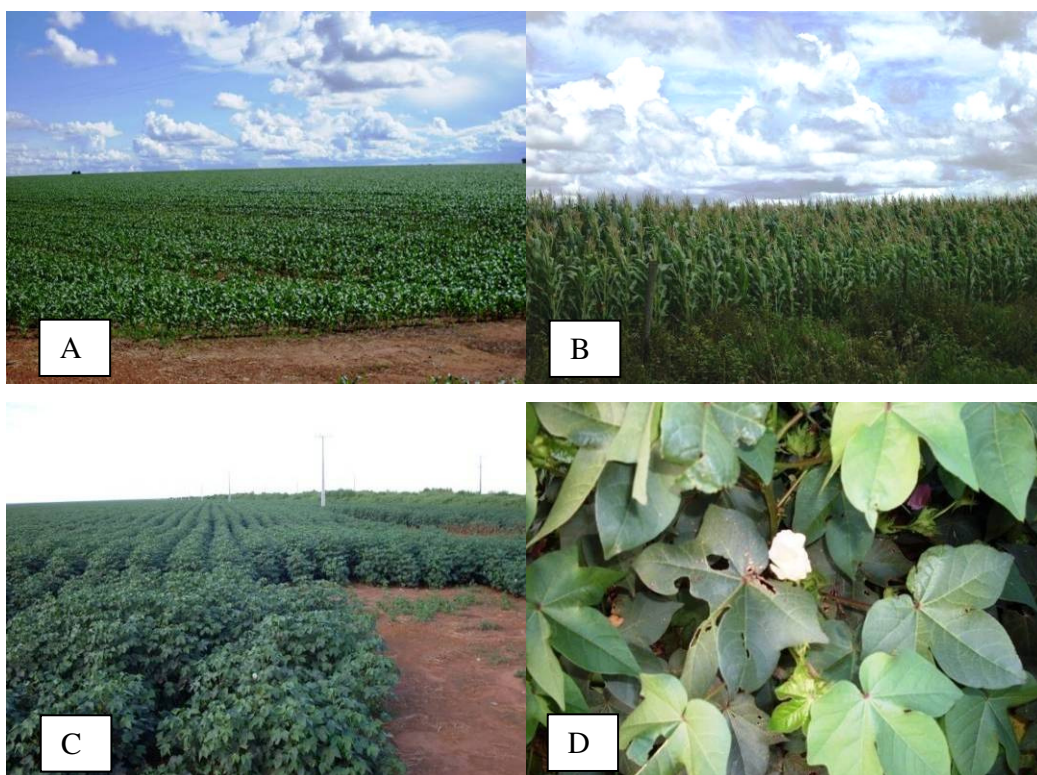


FIGURA 5: Talhões com (A) milho sadio, (B) milho florido, (C) algodão sadio e (D) algodão florido - cultura sadia/madura.

Foram identificados pontos onde a soja ou milho ainda estavam sendo colhidos, porém, como os dados foram obtidos no mês de março, e a imagem a ser classificada com data mais próxima foi a do mês de maio, essas áreas foram classificadas como solo exposto.

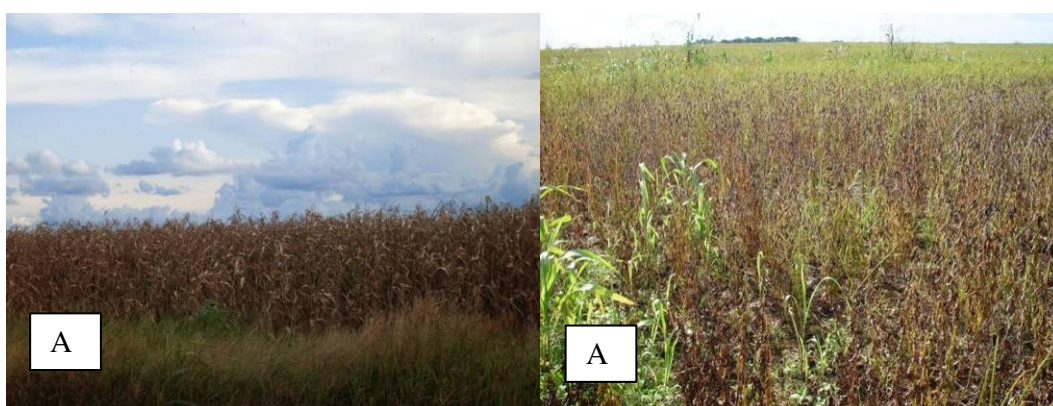


FIGURA 6: Talhões com (A) milho seco e (B) soja seca - culturas secas, prontas para colheita.

E ainda foram identificadas áreas onde a soja foi colhida recentemente, como pode ser visto na figura 7, ou o solo estava sendo preparado (arado) para receber uma nova cultura. Nesse caso, na imagem de satélite essas áreas apresentam um padrão espectral semelhante, o que torna difícil a identificação de cada um e a criação de classes distintas. Nesse caso, os dois tipos de uso foram reagrupados em uma única classe (Solo exposto).



FIGURA 7: Solo exposto, após colheita da safra.

Foram identificados áreas de mata ciliar, cerrado, pastagem, áreas alagadas e cursos d'água. Na imagem pôde ser identificada uma grande mancha de cerrado, onde foi verificado um solo arenoso e encharcado, e de acordo com agricultores locais a área não é utilizada para fins agrícolas devido a essas características. Áreas próximas a esse local, onde existem plantações de milho são drenadas em toda a sua extensão. A figura 8 mostra essas características, porém, é preciso considerar que essas características são para um mês de chuvas intensas, e que essas áreas mudam suas características ao longo do ano.

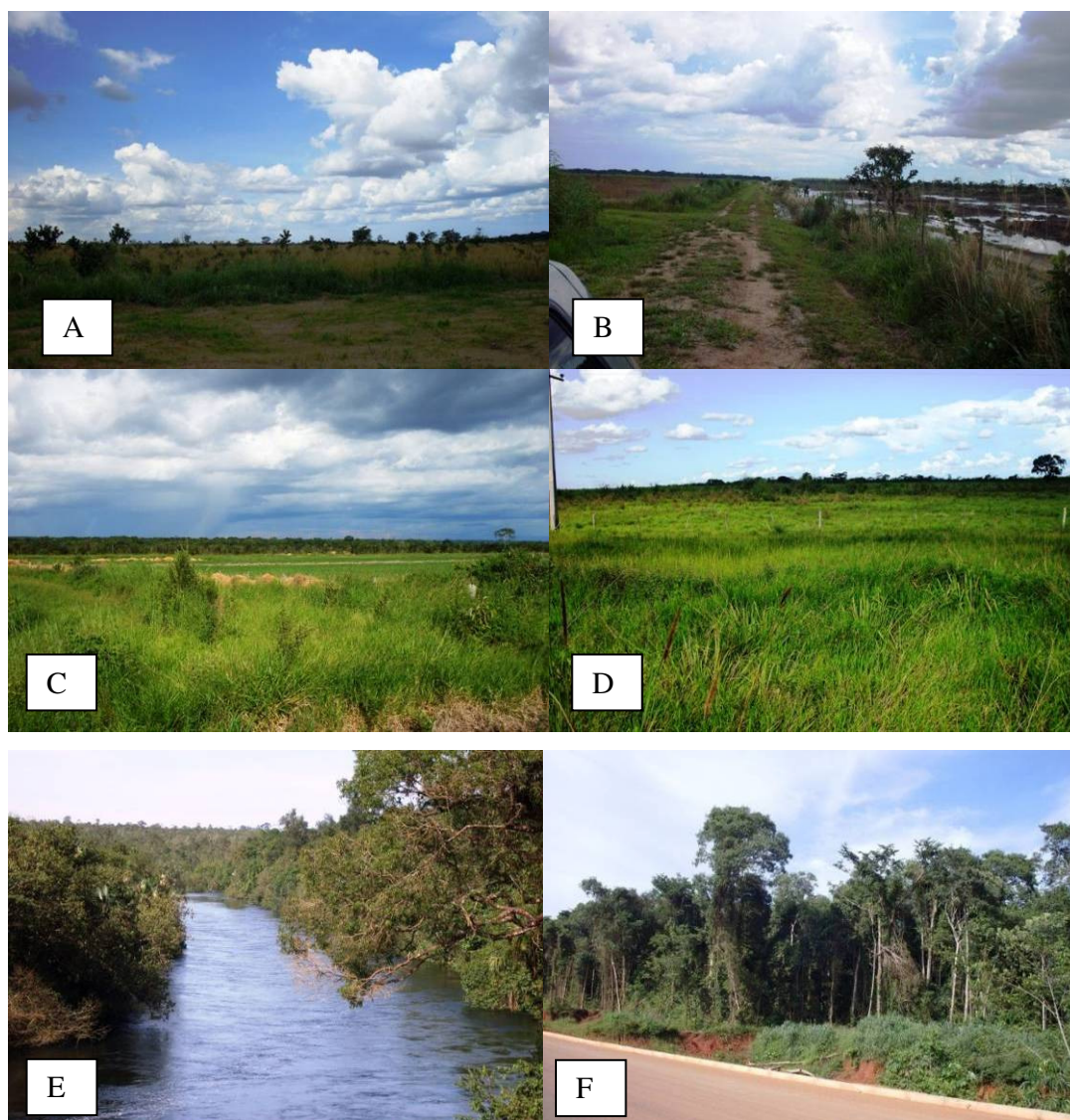


FIGURA 8: (A) Área de cerrado, (B) área alagada, (C) canais de drenagem, (D) pastagem, (E) Rio das Mortes e mata ciliar e (F) cerrado/mata ciliar.

Foram identificadas algumas áreas com erosão, principalmente às margens das estradas e rodovias, como pode ser visto nas figuras 9 (A), (B) e (C). Esse é um problema que ocorre devido à falta de planejamento e manutenção das margens das estradas. Existem muitas estradas sem pavimentação na região, e por elas circulam muitos veículos pesados que transportam a colheita produzida, como é o caso da MT 334 e MT 453. Esse fluxo de veículos compacta o solo, o que interfere diretamente na quantidade e na velocidade da água escoada durante as chuvas.

Apesar de esses problemas serem identificados em várias partes, foram vistas, também, obras para a contenção do processo erosivo, como as bacias de captação ao

longo das estradas (Figuras 9 (D) e (E)), principalmente porque entre a rodovia e as plantações existe uma área de solo exposto que precisa de uma atenção redobrada, especialmente em áreas próximas aos cursos d'água e com declividade um pouco mais acentuada.

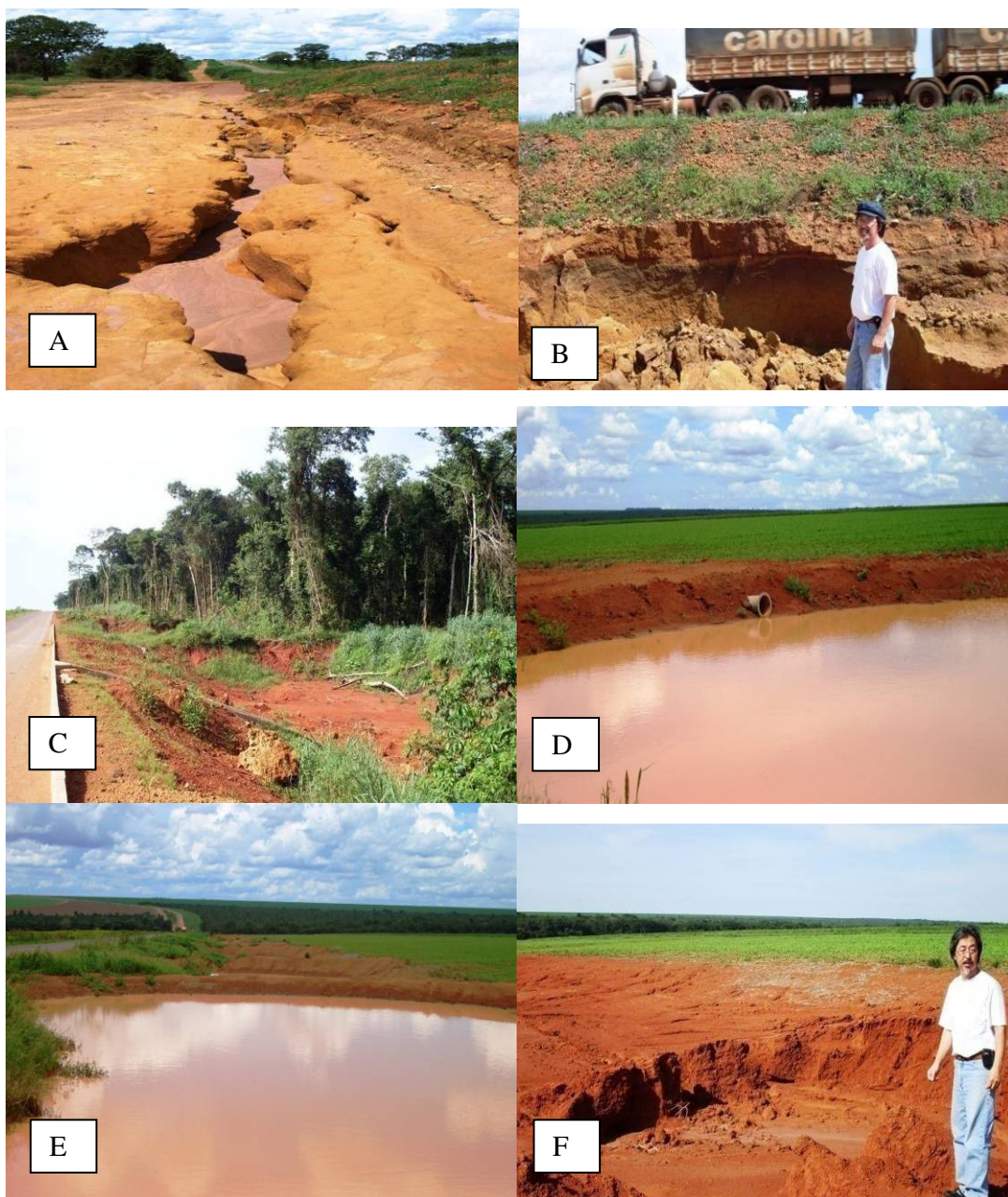


FIGURA 9: (A) e (B) Erosão à beira da MT 070, (C) erosão à beira de estrada, (D) (E) e (F) bacias de contenção à beira de estrada.

Em alguns casos as bacias não suportaram a quantidade de água e romperam

em algumas partes, como nos casos mostrados nas figuras 9 (F), mas o fluxo de água foi controlado pelas demais bacias e pela mata ciliar. As figuras a seguir mostram as erosões e as bacias de contenção.

Os principais focos de erosão, já bastante conhecidos, estão localizados na cidade de Primavera do Leste, na borda do Planalto, como pode ser visto na figura 10. Nesse lugar a erosão ocorreu de forma severa, modificando drasticamente o ambiente, como pode ser observado nas figuras 10 (A, B e C). Para amenizar e controlar o problema, algumas obras de contenção da erosão foram realizadas como pode ser visto na figura 10 (D) foram construídos canais de concreto para direcionar o escoamento da água da chuva. Esse fluxo, que anteriormente escoava por fluxos preferenciais no terreno causando a erosão.

Pode ser observado em campo que a voçoroca (figura 10 A) está estabilizada, não havendo mais o deslocamento de massas de solo, além disso, a vegetação existente no foco indica que o processo de erosão foi contido, como pode ser visto na 10 (C) existe vegetação nas bordas e no fundo da voçoroca. As bacias de contenção mostraram se eficientes no armazenamento da água da chuva, impedindo que esta continue o seu fluxo em direção a escarpa. Na figura 10 (F) ainda pode ser visto a água da chuva armazenada na bacia.

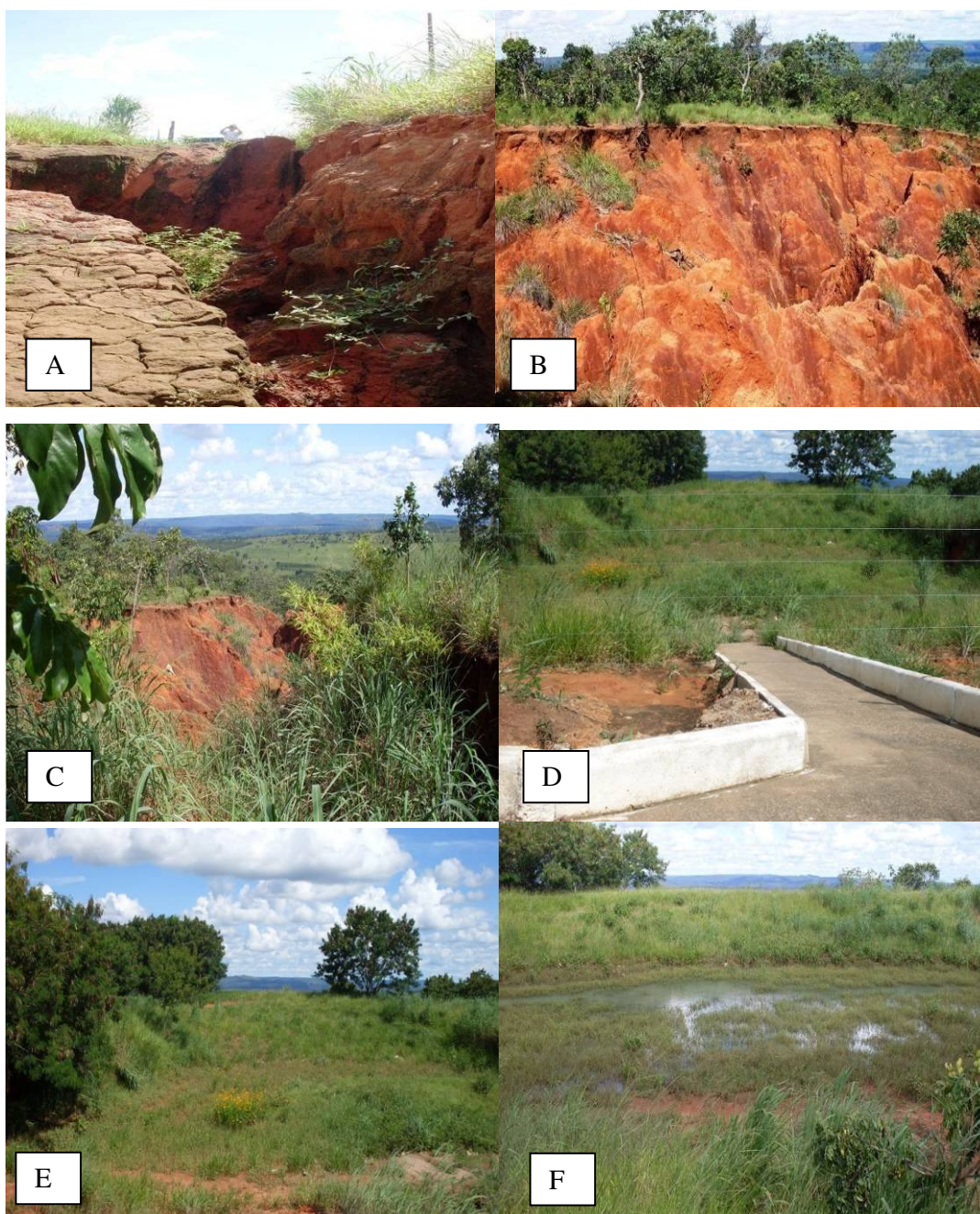


FIGURA10: (A) Erosão na cidade de Primavera do leste; (B) voçoroca na borda do Planalto, (E) voçoroca na borda do Planalto (D) canal de escoamento da água, (E) bacia de contenção na borda do planalto e (F) bacia de contenção ainda com água da chuva

4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

4.2.1 Georreferenciamento

Antes de se iniciar a classificação das imagens de satélite foi feito o registro dessas imagens através de coordenadas de pontos conhecido. Essa transformação elimina distorções geométricas existentes na imagem, causadas no processo de formação da imagem, pelo sistema sensor e por imprecisão dos dados de posicionamento da plataforma (satélite).

As imagens Landsat foram inseridas no módulo IMPIMA (pertencente ao SPRING), onde foi feita a conversão da imagem do formato TIFF para o formato GRB. Assim, este arquivo imagem está pronto para ser georreferenciado no Spring.

As bandas utilizadas foram 3, 4 e 5 e os pontos usados para o georreferenciamento foram os pontos coletados em campo com o GPS.

4.2.2 Realce linear do contraste

Como parte do pré-processamento da imagem, foi aplicada a técnica de contraste de realce linear, para melhorar a qualidade da imagem.

Somente imagens em níveis de cinza podem ser selecionadas para realce, seja uma única imagem (banda) ou um conjunto de três, formando uma composição colorida em seguida.

Analisando os histogramas na figura 11 é possível observar que a melhor distribuição dos níveis de cinza representa um ganho na qualidade da imagem, pois as feições ficaram mais delineadas, especialmente para a banda 3, onde as áreas de solo exposto e áreas urbanas ficaram bem mais realçadas. Na banda 4 houve um ganho na qualidade em relação as áreas agrícolas, cerrado e mata ciliar e na banda 5 foram realçadas as áreas de solo exposto.

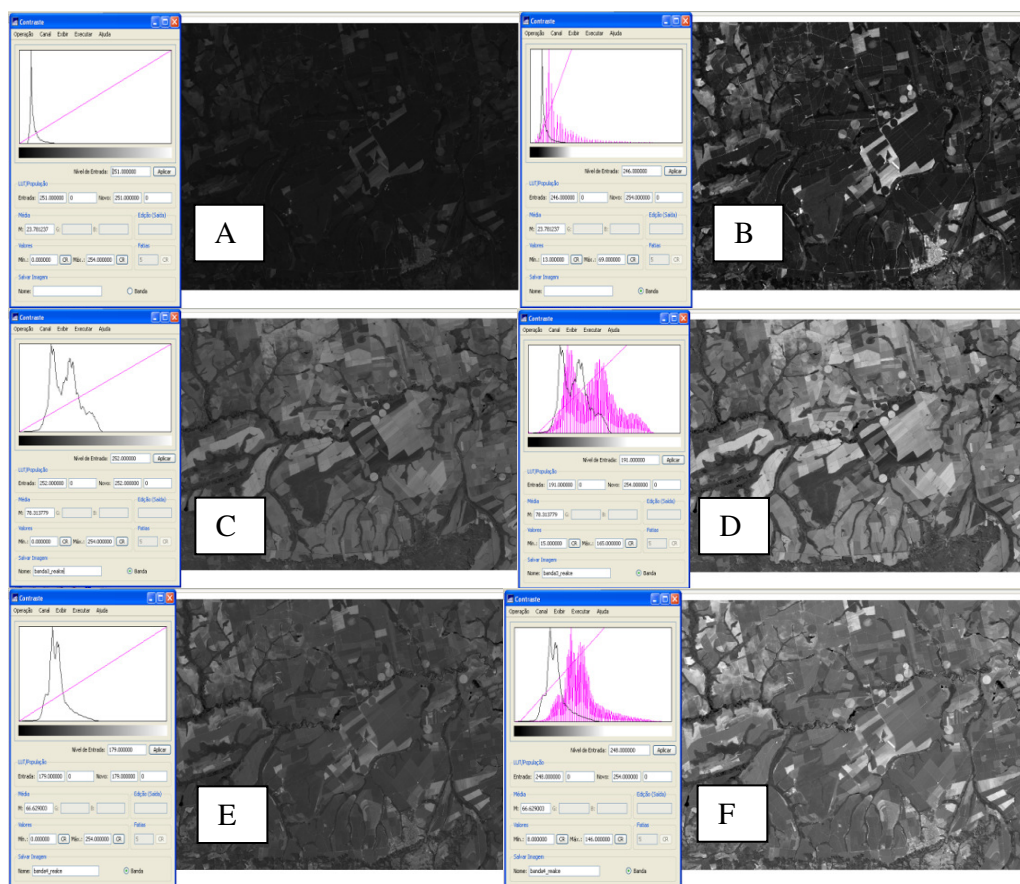


FIGURA 11: Banda 3 (A e B), banda 4 (C e D) e banda 5 (E e F), LandsatTM/Maio, antes e após o realce.

Após a aplicação do realce linear em cada banda, foi feita a composição colorida (R5G4B4), como pode ser visto na figura 12, onde pode se notar a diferença entre as imagens. Houve uma melhora significativa na qualidade da imagem, o que significa um ganho de qualidade no momento da análise das feições.

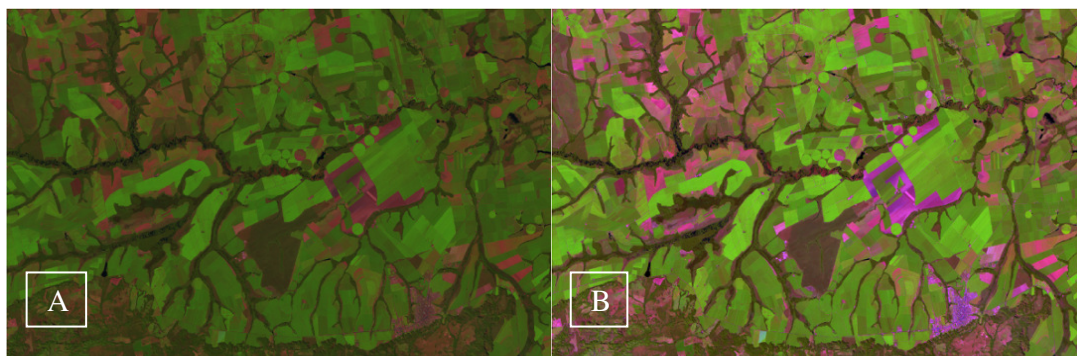


FIGURA 12: Composição RGB (Landsat/Maio) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.

O mesmo procedimento foi aplicado na imagem Landsat /Agosto. A seguir, na imagem 13, podem ser vistos os histogramas de cada banda e a significativa melhora no visual das imagens proporcionada pela melhor distribuição dos níveis de cinza.

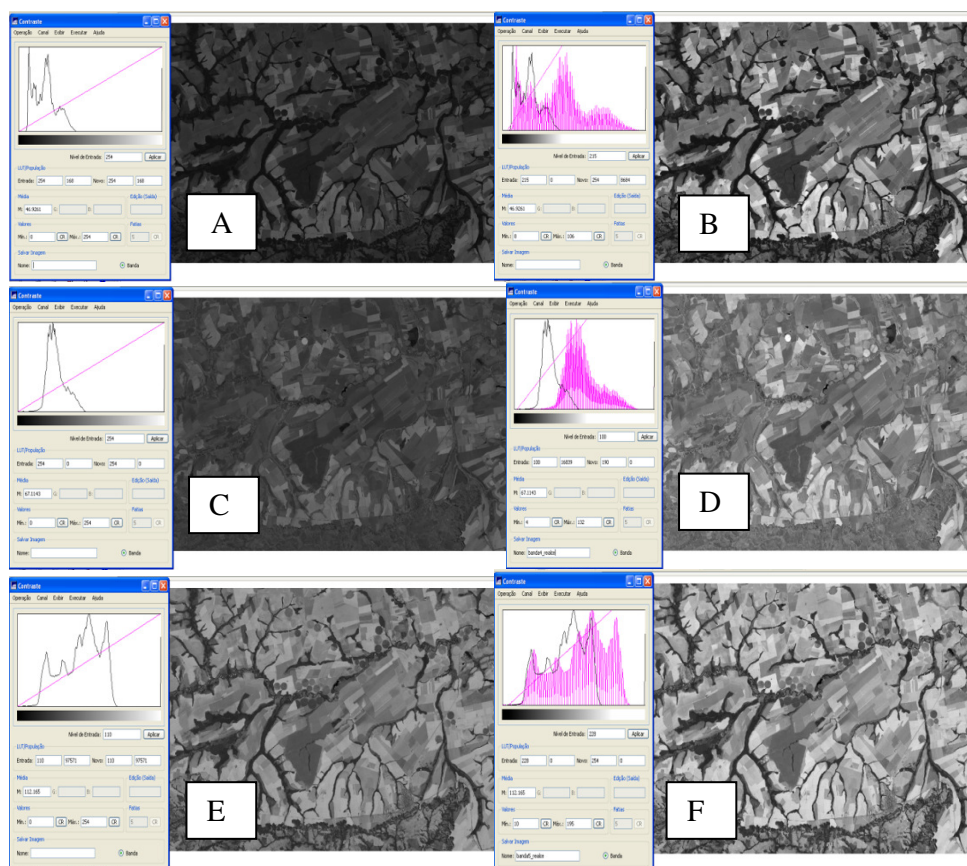


FIGURA 13: Banda 3 (A e B), banda 4 (C e D) e banda 5 (E e F), da imagem Landsat TM/Agosto, antes e após o realce.

Após a aplicação do realce linear, pode ser vista a diferença entre as imagens, numa composição colorida (R5G4B3) e pode ser notado como as áreas de solo exposto foram mais bem definidas na figura 14(B). Apesar de fazerem parte da mesma classe a resposta espectral do solo é diferente em várias partes da imagem. Isso ocorre em virtude do tipo de solo, umidade ou do manejo, nesse caso pode ser uma área preparada para cultivo ou recém colhida.

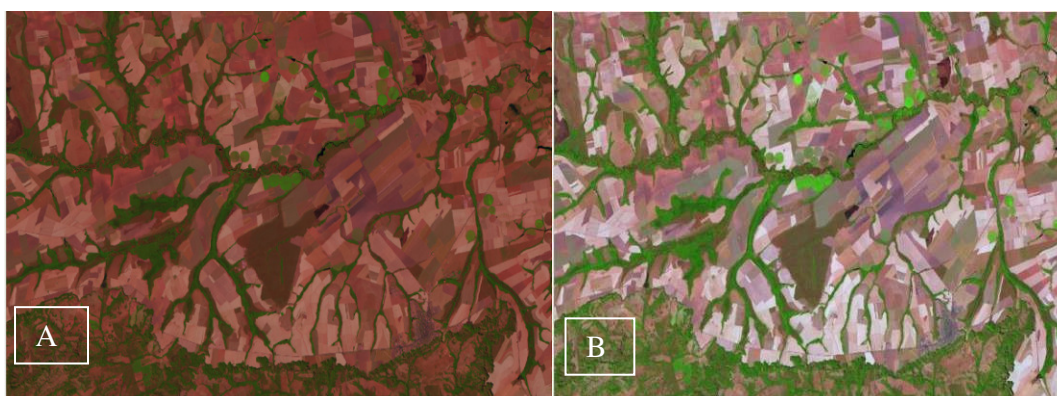


FIGURA 14: Composição colorida (Landsat/Agosto) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.

Esperava-se adquirir uma imagem CBERS 2 CCD para o mês de maio, a fim de se fazer uma comparação com os resultados da imagem Landsat nos anos de 2007 ou 2008. Porém não foi possível devido à intensa cobertura por nuvens e indisponibilidade no catálogo do INPE. A imagem com data de passagem mais próxima do mês de maio e com menor índice de cobertura de nuvens foi do mês de julho.

Os mesmos procedimentos aplicados nas imagens Landsat TM foram aplicados nas bandas 2, 3 e 4 das imagens CBERS. Porém, visualmente, o resultado não foi tão bom quanto o esperado, mas houve uma melhora na qualidade das imagens. O resultado da aplicação do realce na imagem CBERS/Julho pode ser visto na figura 15.

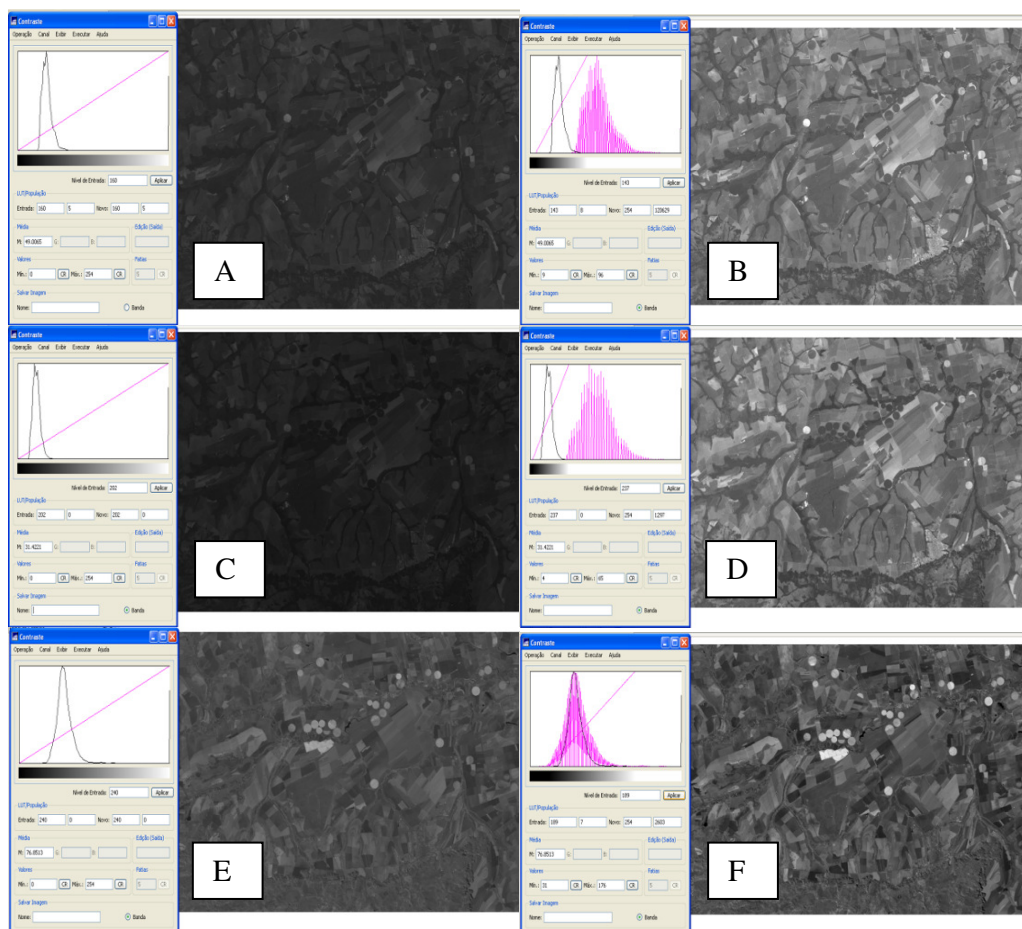


FIGURA 15: Banda 2 (A e B), banda 3 (C e D) e banda 4 (E e F) da imagem CBERS CCD/Julho, antes e após o realce.

A figura 16 mostra a composição colorida (R3G4B2) da imagem CBERS antes e depois da aplicação do contraste linear, porém, após a aplicação do contraste a imagem apresentou uma mancha, que é um problema característico das imagens CBERS, e isso pode interferir nos resultados da classificação automática. Mas, pode se notar o quanto a imagem realçada ficou melhor em relação à imagem bruta. Após o realce as feições tomaram as cores características de uma composição colorida RGB, e é possível distinguir na figura 16 (B) todas as feições existentes na cena, como solo exposto, agricultura e mata ciliar, por exemplo.

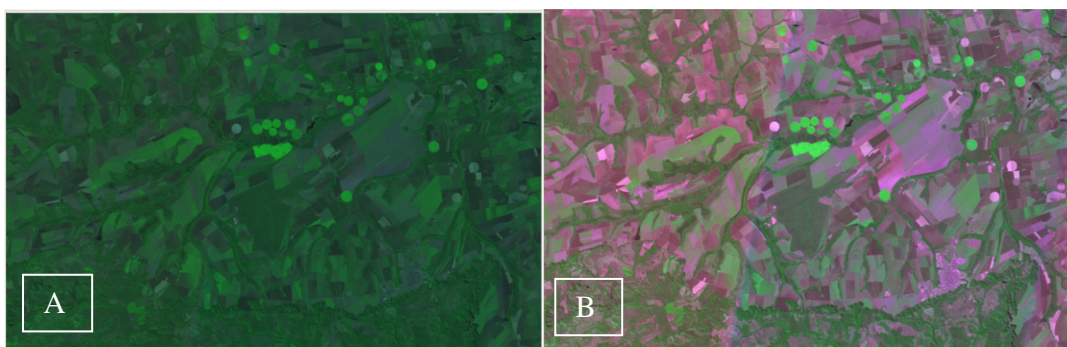


FIGURA 16: Composição colorida RGB (CBERS/Julho) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.

A aplicação do realce foi feito nas bandas 2, 3 e 4 das imagem CBERS do mês de agosto e na figura 17 pode ser vista a diferença na qualidade das imagens após a aplicação do realce.

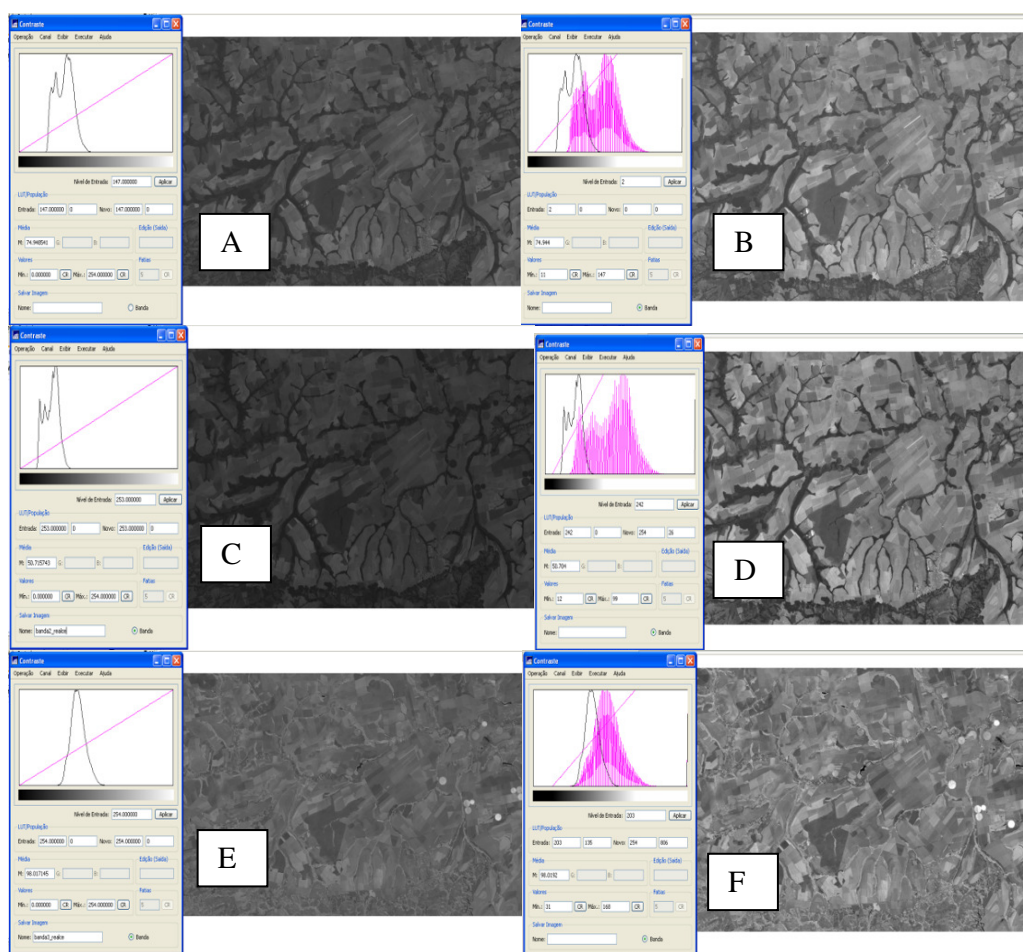


FIGURA 17: Banda 2 (A e B), banda 3 (C e D) e banda 4 (E e F) da imagem CBERS CCD/Agosto, antes e após o realce.

A imagem CBERS escolhida para o mês de agosto teve passagem no ano de 2007. Ao se comparar com a imagem Landsat do mesmo mês, porém do ano de 2008, a cobertura do solo não variou de um ano para o outro, ou seja, nesta época do ano o solo está exposto na maior parte da região.

Na figura 18 é mostrada a composição colorida da imagem CBERS do mês de agosto, antes e depois da aplicação do contraste linear, pode-se notar que o resultado foi visivelmente melhor do que para a imagem do mês de julho, apesar de que, nesta imagem também surgiu uma faixa mais clara no centro da imagem.

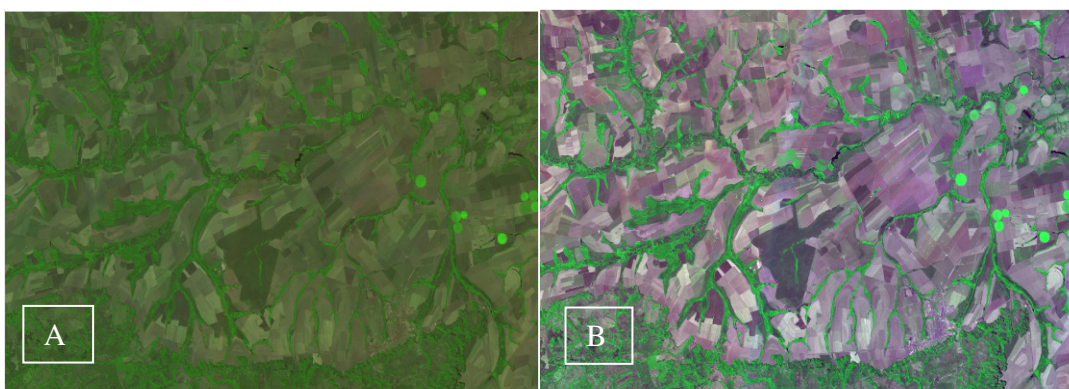


FIGURA 18: Composição colorida RGB (CBERS/Agosto) - (A) antes da aplicação da técnica de realce por contraste linear e (B) após a aplicação do realce.

4.3 SEGMENTAÇÃO

Antes de se iniciar o processo de classificação por região, foi feita a segmentação da imagem. Os valores de limiar de similaridade e a área mínima foram escolhidos com base em outros trabalhos já realizados. ALVES et al (1998), utilizaram a classificação não supervisionada, com o algoritmo Isoseg, utilizando limiar 8 e área mínima de 10 *pixels*. COUTINHO (1997) utilizou os valores de 30 e 40, respectivamente.

Foi realizada a segmentação nas imagens realçadas, com diferentes valores de similaridade e área, a fim de se verificar a melhor segmentação para a posterior classificação. O valor de similaridade agrupa as áreas com características semelhantes, enquanto o valor de área significa que o programa irá mapear apenas

áreas com um valor acima daquele estipulado pelo usuário.

Quando o limiar de similaridade for muito baixo, como o caso da figura 19 (A), a imagem fica muito subdividida, gerando polígonos em excesso e com as mesmas características, o que pode dificultar o mapeamento das classes. Isso gera uma quantidade de detalhes que não são necessários nessa classificação de uso do solo.

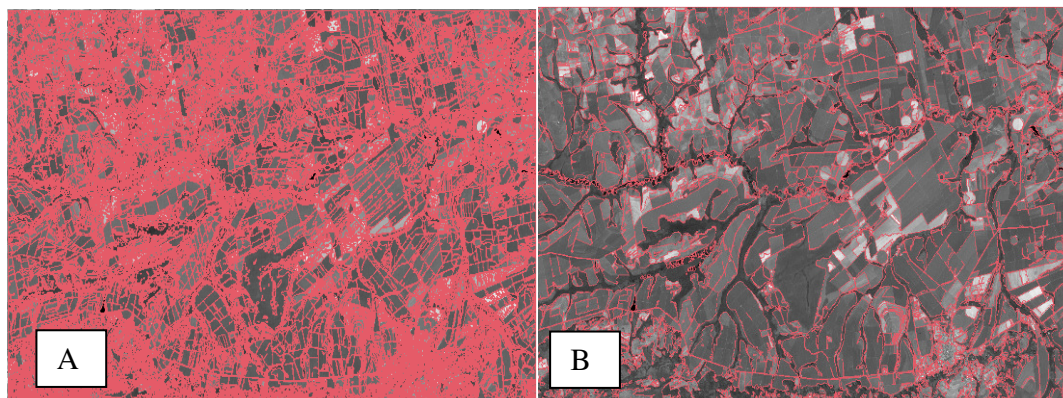


FIGURA 19: (A) Imagem Landsat 5, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 8 e 12 e (B) imagem segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 30 e 40.

Por outro lado, quanto menos detalhes se necessita na classificação de uso do solo, maior será a similaridade, como pode ser notado na figura 19 (B), a imagem segmentada com similaridade 30 e tamanho de área 40. Nesse caso, algumas feições deixaram de ser delimitadas. Para o caso de uma classificação mais detalhada essa segmentação não seria a mais indicada, pela perda de informações. Quando o limiar de similaridade está bom, em torno de 15 ou 20, a classificação fica bem detalhada, mas não há uma quantidade excessiva de informações.

Para se alcançar uma segmentação que gerasse uma boa divisão das feições, foram testados vários valores de similaridade e área em todas as imagens. Esses valores foram escolhidos com base na literatura consultada a decisão tomada considerou os valores que não geraram uma quantidade muito grande de polígonos.

Para a imagem Landsat do mês de maio foram testados os limiares de similaridade e área com os valores de 15/30, 20/30 e 15/20, respectivamente. A figura 20 mostra a imagem segmentada com o limiar de similaridade igual a 20 e área igual a 30, que foi a melhor segmentação testada para a imagem do mês de maio

(08/05/2008), pois apresenta um nível de detalhamento satisfatório para o mapeamento de classes de uso do solo.

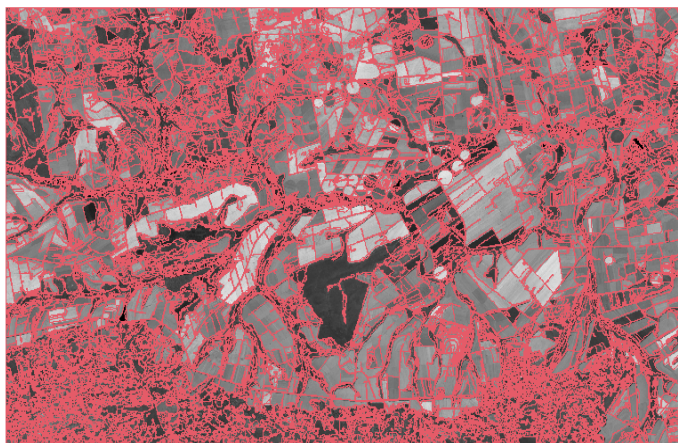


FIGURA 20: Imagem Landsat TM de 08/05/2008, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 20 e 30.

Para a imagem Landsat TM do mês de agosto, foram testados os limiares de similaridade e área com os seguintes valores: 15/30; 15/20, 20/30 e 20/ 20. Este último valor apresentou os melhores resultados, pois gerou polígonos não delimitados pela segmentação com limiar de similaridade 20 e área 30, como para a imagem do mês de maio. A figura 21 mostra a segmentação realizada para a imagem do mês de agosto (12/08/2008):

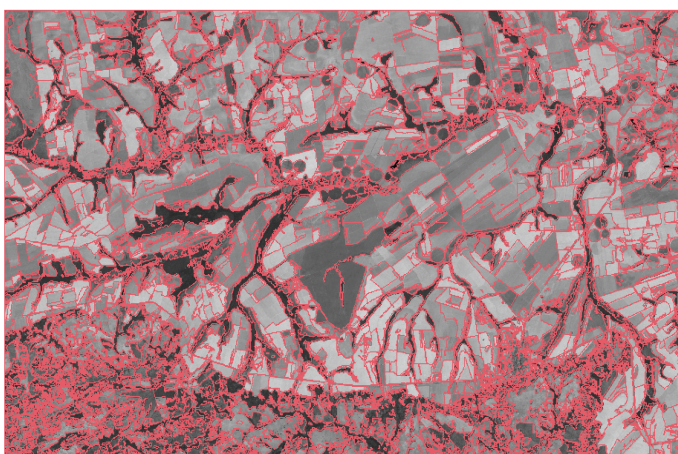


FIGURA 21: Imagem Landsat TM de 12/08/2008, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 20 e 20.

Para a imagem CBERS do mês de agosto foram testados os seguintes valores de limiar de similaridade e área: 20/30; 15/20; 15/30, 18/30 e 20/20. A segmentação que apresentou melhores delimitação das regiões foi a segmentação com limiar de similaridade 18 e valor de área 30, como pode ser visto na figura 22. Para a mesma região e época, os valores de similaridade e área foram diferentes para a imagem Landsat e CBERS.

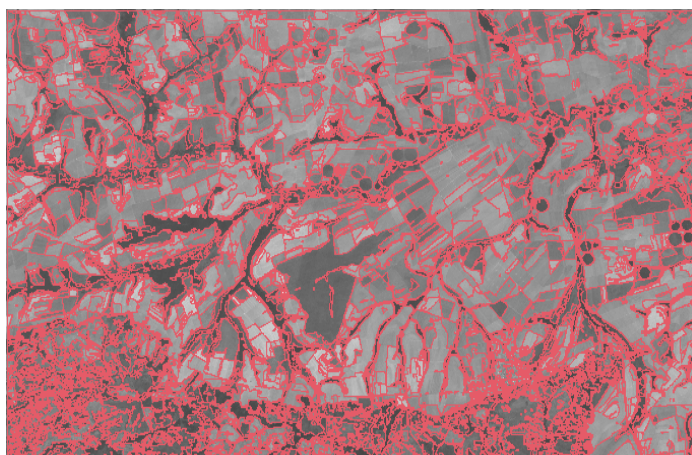


FIGURA 22: Imagem CBERS de 15/08/2007, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 18 e 30.

Para a imagem CBERS do mês de julho foram testados os seguintes valores de limiar de similaridade e área: 15/20, 20/30 e 15/30. A segmentação que apresentou melhores delimitação das regiões foi a segmentação com limiar de similaridade 15 e valor de área 30, como pode ser visto na figura 23.

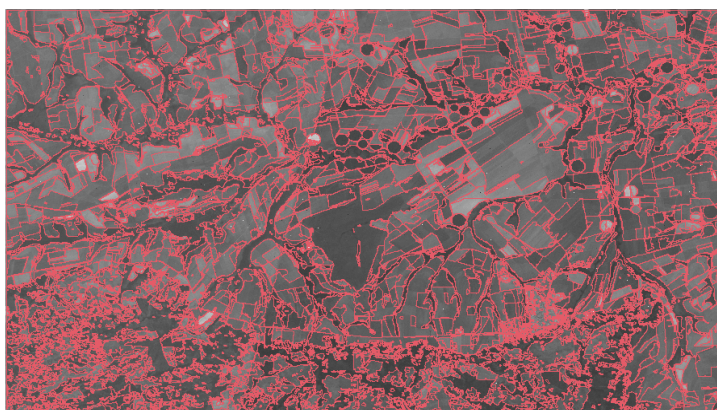


FIGURA 23: Imagem CBERS de 02/07/2007, segmentada com valores de similaridade e tamanho de área 15 e 30.

4.4 CLASSIFICAÇÃO DAS IMAGENS

4.4.1 Classificação por regiões (supervisionada e não supervisionada)

Os valores de limiar de similaridade e área encontrados em cada imagem foram usados para a classificação por crescimento de regiões não supervisionada utilizando o algoritmo Isoseg e para a classificação supervisionada utilizando o algoritmo Bhattacharya.

4.4.1.1 Classificação Isoseg

O mapeamento automático utilizando o algoritmo Isoseg gerou temas que posteriormente foram classificados de acordo com as classes de uso do solo identificados. Para cada imagem, de cada mês diferente, foi obtido uma quantidade de temas diferentes, como pode ser visto na tabela 1.

TABELA 1: Temas gerados na classificação automática utilizando o algoritmo Isoseg.

Imagem/mês	Nº de temas gerados na classificação Isoseg
Landsat/Maio	34
CBERS/Julho	52
Landsat/Agosto	47
CBERS/Agosto	47

Muitos temas representam uma mesma classe de uso, pois na classificação não supervisionada por regiões utiliza-se além da informação espectral de cada *pixel*, a informação que envolve a relação entre os *pixels* e seus vizinhos. Como pode ser visto na figura 24, a imagem classificada com os temas fica muito difícil de ser interpretada, já que os temas não foram identificados de acordo com as classes identificadas. A classificação automática sem supervisão não gera as classes automaticamente porque elas não são fornecidas antes da classificação ser realizada.

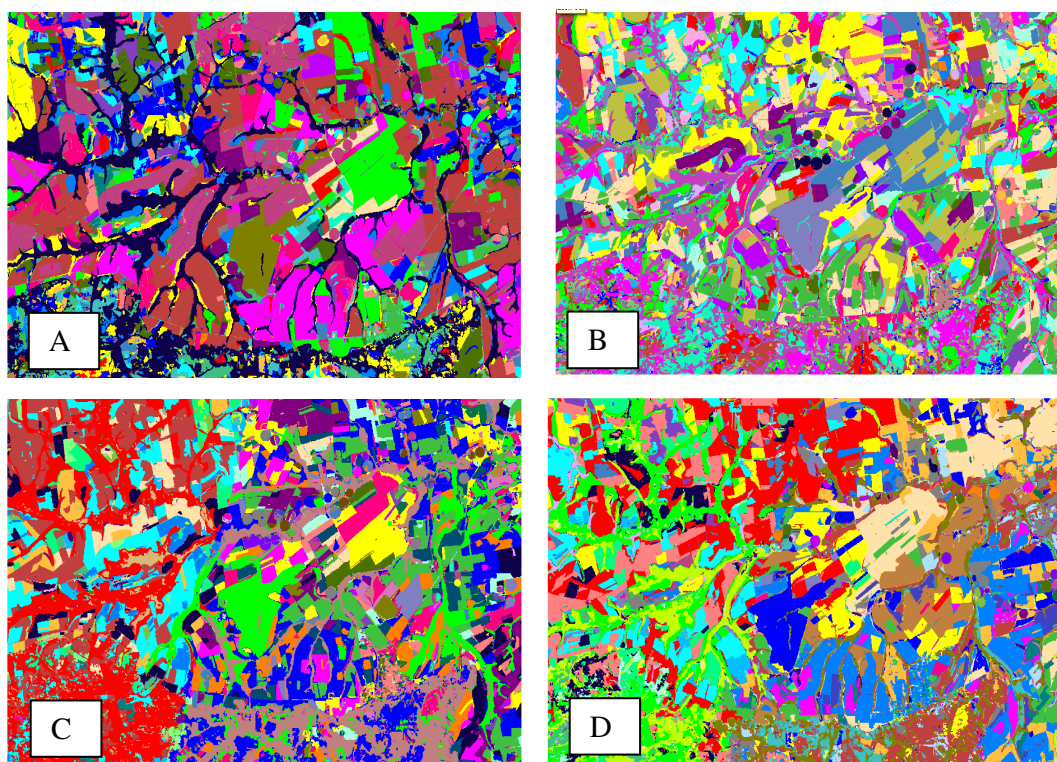


FIGURA 24: Temas identificados pelo algoritmo Isoseg, (A) Landsat/Maio; (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto.

Essa etapa de pós-classificação é demorada e requer atenção do usuário, pois existem regiões que são confundidas pelo classificador com outras de características espectrais semelhantes. Cabe ao usuário definir qual classe será definida em tais regiões. Dessa forma se reafirma a necessidade de se conhecer o ambiente a ser mapeado para que seja gerado um mapa com a maior confiabilidade possível.

A classificação dos temas gerados foi realizada visualmente, considerando elementos da paisagem para a interpretação de algumas características como cor, textura, tamanho, forma, padrão e principalmente os dados adquiridos em campo como fonte de referência. Na pós-classificação os temas gerados foram reagrupados nas classes identificadas, como pode ser visto na figura 25.

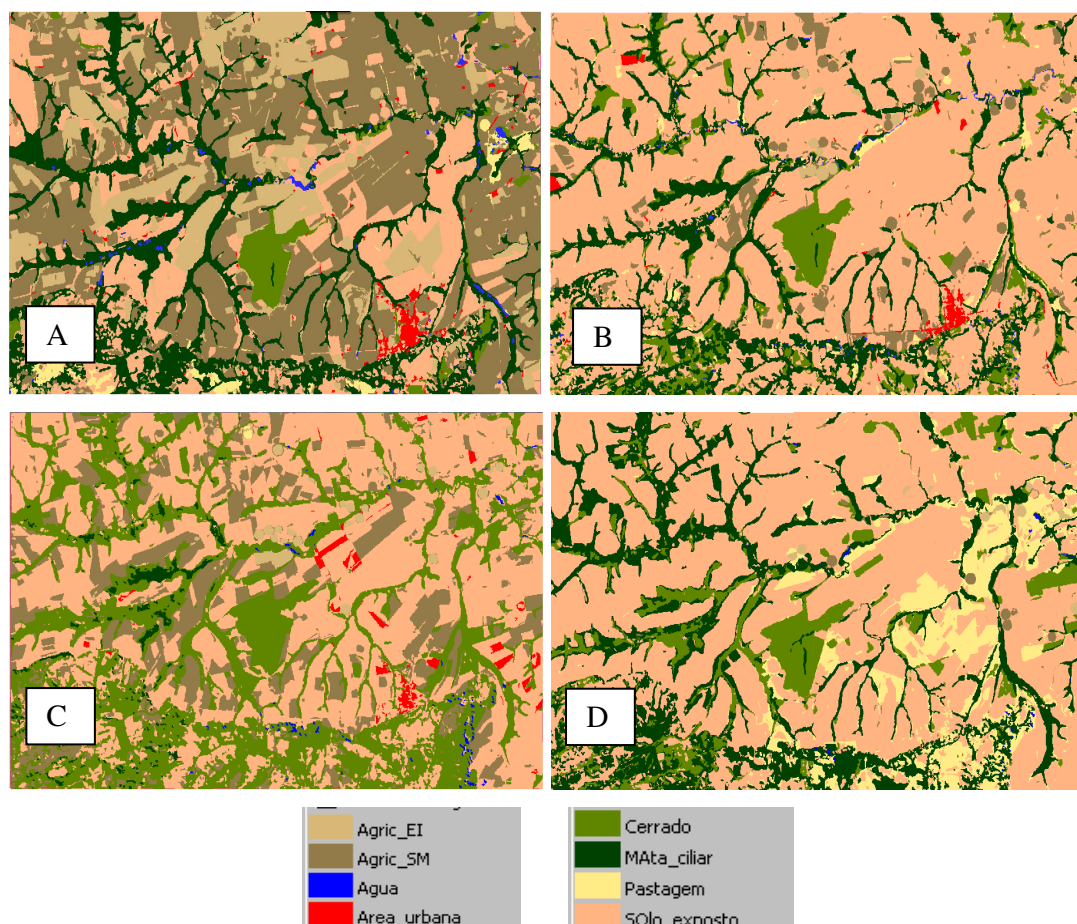


FIGURA 25: Imagens classificadas pelo algoritmo Ioseg (A) Landsat/Maio; (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto.

Após a classificação automática foi realizado o mapeamento dos temas, que resultaram em mapas de uso e cobertura do solo em formato vetorial. A partir desses mapas em formato vetorial foi possível calcular a área de cada polígono gerado.

Na tabela 2 podem ser vistos os valores das áreas em % de cada classe mapeada. Para a classificação da imagem Landsat/Maio a cobertura do solo com algum tipo de cultura chega a 53,78% da área, a agricultura em estágio inicial foi de 13,41% e a agricultura sadia e madura foi 40,37%. Essa é uma das principais diferenças em relação às classificações para os outros meses, onde predomina o solo exposto.

No mês de julho ocorre a colheita do algodão e do milho safrinha e também se inicia o processo de calagem do solo, por isso a área de solo exposto chega a 48,4%. Na classificação das imagens Landsat e CBERS do mês de agosto o solo

exposto chega a 71,3% e 62,4%, respectivamente, como pode ser visto na tabela 2. Pois é nessa época do ano que as lavouras foram colhidas e o solo está sendo preparado para receber o próximo plantio.

TABELA 2: Área classificada pelo algoritmo Iseseg (%)

Classe de uso do solo	Landsat/Maio	Landsat/Agosto	CBERS/Julho	CBERS/Agosto
Agric_EI	13,41	0,55	1,17	0,71
Agric_SM	40,37	4,39	17,96	0,89
Água	0,61	0,85	0,28	0,14
Área Urbana	0,81	0,59	1,09	-
Cerrado	2,68	7,4	29,42	9,12
Mata Ciliar	17,81	12,49	1,01	15,9
Pastagem	1,58	2,11	-	10,20
Solo exposto	22,1	71,3	48,4	62,4
Área Total (km ²)	3.000	3.000	3.000	3.000

Outra característica marcante nessa classificação se refere ao mapeamento da área urbana. A cidade de Primavera tem uma área de aproximadamente 15 km², porém na imagem CBERS/Julho o classificador conseguiu identificar apenas 7,34% da área do perímetro urbano e na imagem CBERS/Agosto a área urbana não foi identificada. Porém, em todas as imagens, outras áreas, pertencentes à classe solo exposto, foram classificadas como área urbana. Isso se explica pelo fato de áreas urbanas serem feições difíceis de se mapear e que se confundem com as demais classes, especialmente solo exposto.

Em relação à classe mata ciliar, de uma forma geral ela foi bem mapeada, exceto na imagem CBERS/Julho, onde esta foi confundida com a classe Cerrado, sendo identificados apenas 1% dessa classe. Em relação aos demais meses analisados, a classe cerrado foi superestimada para o mês de julho, onde o algoritmo identificou como cerrado 29,4% da cobertura da área. Na imagem Landsat/Maio a classe cerrado ficou restrita a 2,68%, isso pode ser explicado porque houve muita confusão entre as classes cerrado e mata ciliar.

A classe pastagem foi mapeada com mais intensidade na imagem CBERS/Agosto, com 10,2% da área, o que não condiz com a realidade de campo, pois as áreas de pastagem estão localizadas em pequenas áreas da região, em áreas

onde o solo fica alagado e não é propício a agricultura. Por outro lado, nas demais imagens a classe não obteve um bom mapeamento, pelo fato de se confundir com outras classes. Na imagem do mês de julho essa classe não foi identificada.

A classe água obteve melhor delienamento de suas feições na imagem Landsat/Agosto. Nas imagens CBERS de julho e agosto, o classificador conseguiu delimitar apenas as áreas onde os cursos d'água eram mais volumosos.

O mapeamento da imagem Landsat/Agosto gerou um bom resultado, exceto pela confusão entre mata ciliar e cerrado. Não foi possível reclassificar essas áreas, pois os polígonos gerados durante a segmentação não reconheceu essas classes de forma distinta. Nesse caso, se os valores da segmentação fossem menores a fragmentação dos polígonos seria muito grande, fragmentando, dessa forma, áreas mais homogêneas, o que resultaria num trabalho mais demorado e na perda de qualidade do mapeamento de outras feições.

Na classificação Isoseg não é possível obter amostras da classificação, por isso, não é possível montar uma matriz de erro para se estimar os valores de precisão da classificação. Porém, em termos visuais, os resultados obtidos nas classificações das imagens Landsat foram superiores aos obtidos com as imagens CBERS.

4.4.1.2 Classificação Bhattacharya

Para gerar a classificação supervisionada por crescimento de regiões utilizando o algoritmo Bhattacharya, foi feita a segmentação da imagem e após esse procedimento foram coletadas as amostras para cada classe de uso do solo previamente definida. Nesse caso as amostras são as regiões delimitadas no processo de segmentação. Foram coletadas tantas amostras necessárias para que a classificação se mostrasse satisfatória.

Essas amostras foram adquiridas para identificar as classes de uso de acordo com as informações coletadas de outras fontes de dados e por suas características espectrais, reconhecidas pelo classificador. Como nenhuma feição ou objeto na superfície, mesmo pertencendo à mesma classe, tem exatamente a mesma resposta espectral, foi necessário adquirir diversas amostras para cada classe.

A partir dessas amostras foi montada a matriz de erro, onde são mostradas a

quantidade de amostras classificadas corretamente em cada classe e também os erros de cada amostra. As amostras foram escolhidas de forma aleatória, dispersas por toda a área de estudo. Algumas dessas amostras foram adquiridas considerando o conjunto de dados adquiridos em campo, considerados como verdade de campo.

As amostras de campo foram importantes na validação da classificação. Para que o mapeamento das classes fosse o melhor possível, foi feita a análise das amostras antes de se efetuar o mapeamento das classes. A partir dos dados das amostras, foram montadas as matrizes de erro para as quatro imagens classificadas, separadamente, como pode ser visto no anexo B. Para montar as matrizes de erro foram coletadas tantas amostras quanto necessário para se chegar a um nível de precisão satisfatório.

O número de amostras adquiridas para cada classe foi diferente, pois algumas classes, como solo exposto e mata ciliar, necessitaram de um número maior de amostras para que as amostras fossem melhores, ou seja, próximas a uma exatidão de 100%. Já para classes como água e área urbana o número de amostras foi menor, pois essas classes não apresentaram variabilidade em sua resposta espectral, e a área ocupada por elas não permitiu a coleta de um número maior de amostras. Na figura 26 são apresentados os valores de IK e IG para todas as imagens classificadas com o algoritmo Bhattacharya.

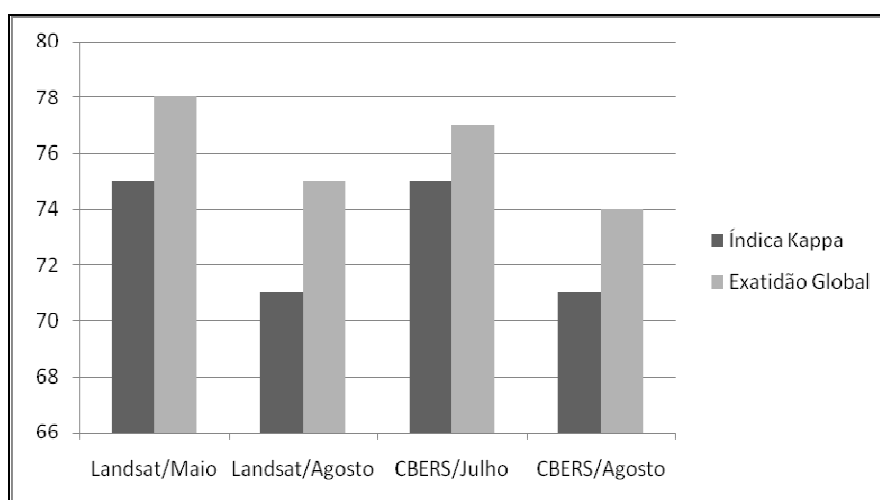


FIGURA 26: Índice Kappa e Exatidão Global para o classificador Bhattacharya (%)

A imagem Landsat/Maio apresentou os melhores resultados de precisão. O IK foi 75%, considerado moderado, e EG foi de 78%. A imagem CBERS/Julho apresentou resultados semelhantes com IK 75% e EG 77%. Entre as quatro imagens classificadas esses foram os melhores resultados obtidos. As imagens do mês de agosto apresentaram resultados considerados moderados, porém foram abaixo dos resultados alcançados pelas imagens de maio e julho. Os resultados das imagens Landsat e CBERS do mês de agosto foram 71% de IK para ambas e EG de 75% e 74%, respectivamente.

Os resultados de todas as imagens classificadas ficaram acima de 70%, porém é necessário analisar de forma mais aprofundada os valores de cada amostra individualmente a fim de se obter uma resposta mais confiável da classificação. Isso é necessário, pois apesar da classificação apresentar um bom resultado, às vezes uma classe não foi muito bem classificada e pode gerar conclusões erradas.

No anexo B, junto com as matrizes de erro de cada imagem, podem ser vistos também os resultados dos cálculos de Exatidão do Produtor (EP)/erros de comissão e Exatidão do Usuário (EU)/erros de omissão. As matrizes foram analisadas no programa Excel, onde também foram calculados a EP e EU e foram elaborados os histogramas com os valores de cada índice.

Analisando os valores de exatidão do produtor e exatidão do usuário, pode-se deduzir que para a imagem Landsat/Maio que obteve EG e IK moderados, as classes água, área urbana e agricultura sadia/madura, foram classificadas corretamente, pois seus resultados permaneceram 100% corretos. Isso porque essas amostras não apresentaram nenhuma confusão com outras classes. A classe solo exposto obteve EP de 78% (moderada), porém ao se analisar a EU (erros de comissão) pode-se concluir que apenas 58% dessas áreas são realmente da classe solo exposto, devido à confusão das amostras com pastagem. Na classificação do uso do solo para a imagem Landsat/Maio, a classe com menores índices foi a classe cerrado, com 27% de EP e 48% de EU, ou seja, apenas 27% das amostras foram classificadas corretamente e dessas amostras, apenas 48% foram classificadas dentro dessa classe.

A figura 27, a seguir, ilustra as diferenças entre esses resultados para as quatro imagens classificadas.

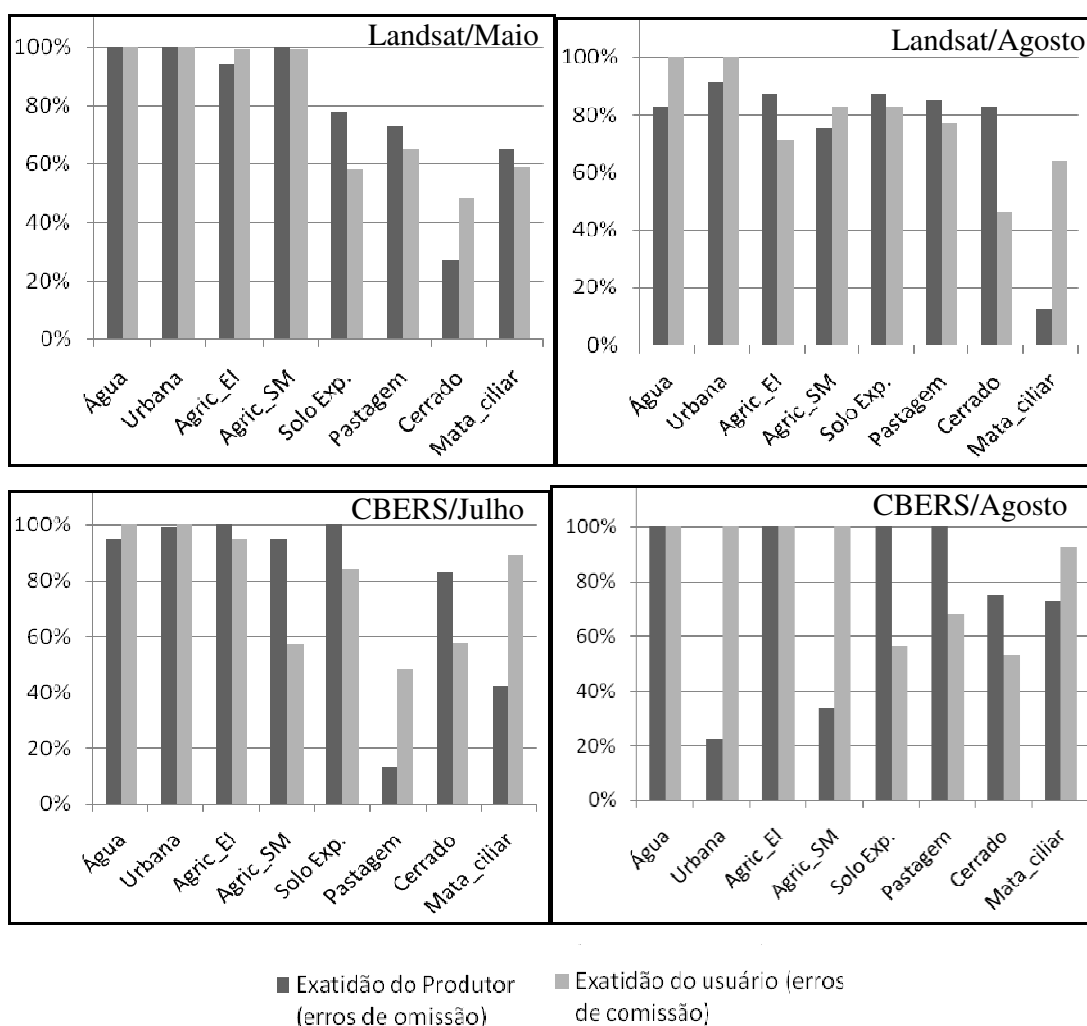


FIGURA 27: Exatidão do produtor e exatidão do usuário para cada classe mapeada nas imagens Landsat e CBERS pelo classificador Bhattacharya.

A classificação da imagem CBERS/Julho, obteve bons resultados de EP e EU para as classes água, área urbana e agricultura em estágio inicial e solo exposto, todos próximos a 100%, o que indica que o mapeamento dessas classes pelo algoritmo realmente condizem com a realidade de campo em todas as amostras. O pior resultado foi para a classe pastagem, que apresentou EP de 13% e EU de 48%, o que significa que as amostras adquiridas apresentaram grande confusão com outras classes, levando o classificador a mapear áreas de outras classes como cerrado, por isso os resultados foram muito baixos e o mapeamento dessa classe não foi confiável. As amostras das classes mata ciliar e cerrado foram bastante confusas entre si, o que gerou resultados não muito satisfatórios de exatidão.

As imagens Landsat/Agosto e CBERS/Agosto apresentaram os mesmos valores de índice Kappa, 71%. Com isso é possível perceber a importância de se analisar de forma mais cuidadosa a matriz de erro através da Exatidão do Produtor e a Exatidão do Usuário, pois esses valores vão indicar a precisão e a qualidade do mapeamento de cada classe de forma individual. Como pode ser visto na figura 27, esses valores para cada classe nas duas imagens variam fortemente.

Na classificação da imagem Landsat/Agosto a classe água obteve o pior desempenho dentre todas as classificações, a exatidão do produtor foi de apenas 83%, mas a exatidão do usuário foi de 100%, ou seja, todos os *pixels* classificados, realmente pertencem a esta classe.

A classe solo exposto teve exatidão do produtor de 87%, mas apenas 83% dessas amostras realmente pertenciam a esta classe. Em relação à classe cerrado, numa análise mais detalhada dos resultados, pode-se dizer que estes não foram muito satisfatórios, pois a exatidão do produtor foi de 83% e apenas 46% de exatidão do usuário. Isso ocorreu, provavelmente devido ao fato dessa classe ter se confundido com outras classes, especialmente mata ciliar e pastagem.

O pior resultado nessa classificação foi da classe mata ciliar, que obteve precisão do produtor de 12% e apenas 64% dessas amostras foram classificadas como mata ciliar. Isso porque, observando-se a matriz de erro pode-se notar que mais de 80% das amostras dessa classe foram classificadas como a classe cerrado.

Na classificação da imagem CBERS/Agosto a classe água teve resultado de exatidão do produtor e a exatidão do usuário de 100%, assim como a classe agricultura em estágio inicial. A classe agricultura sadia/madura obteve valores de exatidão do produtor e a exatidão do usuário de 34% e 100%, o que significa que das amostras coletadas apenas 34% delas foram classificadas como agricultura sadia e madura, e destas amostras corretas 100% realmente representam a classe na superfície.

As classes cerrado e mata ciliar tiveram exatidão do produtor e a exatidão do usuário de 75% e 53%, e 73% e 92%, respectivamente. De uma forma geral essas classes se confundiram bastante em todas as imagens classificadas, pois o algoritmo não conseguiu diferenciá-las de forma satisfatória, provavelmente por ser difícil essa tarefa, visto que as duas fazem parte de um mesmo tipo de vegetação (cerrado).

A classe solo exposto apresentou EP de 100%, mas destas amostras apenas 56% tem a probabilidade de realmente representar essa classe na superfície. O que pode ser explicado pelo fato de 77% das amostras de classe urbana terem sido classificadas como solo exposto. A classe urbana obteve exatidão do produtor de 23% e a exatidão do usuário foi de 100%, sendo este o pior resultado da classificação.

A figura 28 ilustra o mapeamento das classes pelo algoritmo Bhattacharya nas quatro imagens, e permite avaliar de forma qualitativa se os índices de precisão são realmente confiáveis e estão de acordo com a verdade de campo, pois apesar dos índices serem considerados bons, a classificação pode trazer resultados diferentes do esperado.

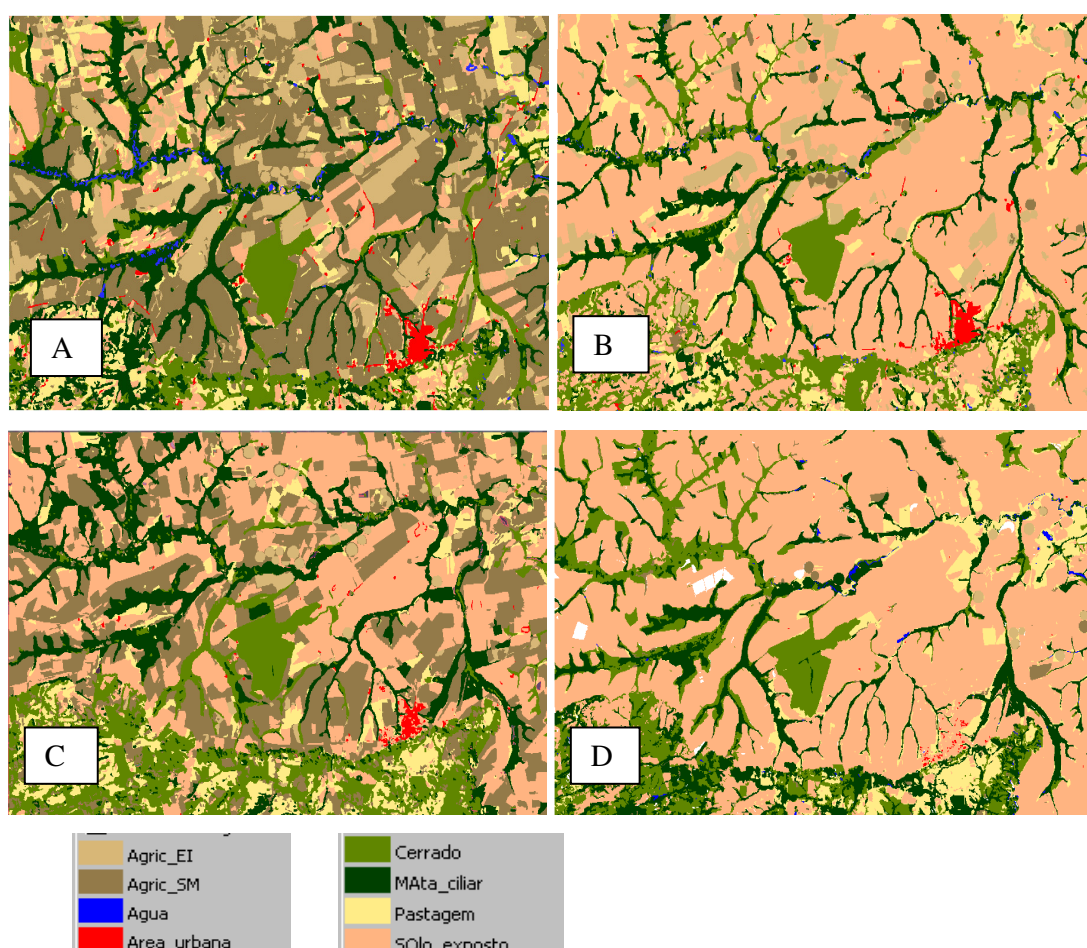


FIGURA 28: Mapeamento das classes de uso do solo pelo algoritmo Bhattacharya, (A) Landsat/Maio, (B) Landsat/Agosto, (C) CBERS/Julho e (D) CBERS/Agosto

Comparando os valores dos índices exatidão do produtor e exatidão do usuário para todas as classes, em todas as imagens, a classe que obteve menor exatidão foi mata ciliar, seguida pelas classes cerrado e pastagem. A classe urbana foi bem mapeada pelo algoritmo Bhattacharya, exceto na imagem CBERS/Agosto, onde a área da cidade não foi reconhecida. Como é possível observar na figura 28, a área urbana não foi mapeada em sua totalidade. Em outros casos áreas com solo exposto foram mapeadas como área urbana.

A seguir na tabela 3, podem ser vistos os valores mapeados de cada classe em todas as imagens.

TABELA 3: Área classificada pelo algoritmo Bhattacharya (%)

Classe de uso do solo	Landsat/Maio	Landsat/Agosto	CBERS/Julho	CBERS/Agosto
Agric_EI	11,92	1,79	2,28	0,38
Agric_SM	36,15	1,04	29,29	1,07
Água	0,95	0,46	0,21	0,26
Área Urbana	1,01	0,64	0,53	0,16
Cerrado	9,89	11,73	15,09	14,12
Mata Ciliar	14,58	8,94	12,30	14,51
Pastagem	5,53	9,72	7,68	5,82
Solo exposto	19,23	64,92	31,63	62,46
Áreas não classificadas	0,09	0,08	0,07	0,34
Área Total (km ²)	3.000	3.000	3.000	3.000

Na tabela 3 pode ser observada a porcentagem inferior da área da classe urbana na imagem CBERS/Agosto. A área urbana mapeada no total para as quatro imagens foi: Landsat/Maio 30,4 km², Landsat/Agosto 19,3 km², CBERS/Julho 16 km² e CBERS/Agosto 4,7 km². A área da cidade é de aproximadamente 15 km², mas na imagem CBERS/Agosto essa área não foi mapeada. Na imagem CBERS/Julho a cidade foi mapeada com área de 11,4 km². As imagens Landsat apresentaram melhores resultados com 12,5 km² na imagem de agosto e 14,1 km² na imagem de

maio.

Todas as classificações apresentam alguma vantagem ou desvantagem em relação a certas classes. Em relação à classe cerrado, as imagens CBERS não apresentaram bons resultados, tanto na classificação Bhattacharya como na classificação Iseseg, pois a área mapeada foi muito superior às áreas mapeadas nas imagens Landsat. A área de cerrado classificada na imagem CBERS/Julho corresponde a 15% da área de estudo, na imagem CBERS/Agosto foi de 14,1% e nas imagens Landsat de maio e agosto foi de 9,9% e 11,7%, respectivamente. A classificação que obteve melhores resultados em relação a esta classe foi a classificação da imagem Landsat/Maio, pois a confusão com a classe mata ciliar foi menor.

Em relação à área de agricultura sadia/madura e agricultura em estágio inicial mapeadas, essas classes tiveram maior representatividade na imagem Landsat/Maio, pois nesse mês as colheitas ainda não foram iniciadas. A cobertura por algum tipo de cultura no mês de maio chega a 48% da área de estudo, contra 2,8% no mês de agosto (imagem Landsat) e 1,44% (imagem CBERS). Já no mês de julho a cobertura das duas classes juntas foi de 31,5%, sendo que a agricultura em estágio inicial representa apenas 2,2% deste total.

A classe solo exposto de forma geral foi bem mapeada em todas as imagens, pois não houve confusão com a classe urbana. No mês de maio, quando todas as culturas ainda estão verdes, o solo exposto foi apenas 19,2% da área, enquanto que no mês de agosto, mais da metade da área se encontra sem cobertura vegetal, devido à colheita e preparo do solo. Na imagem Landsat a área chega a 64,9% e na imagem CBERS foi mapeado como solo exposto 62,5% da área. No mês de julho a área de solo exposto é de 31,63% pois nesse período a colheita já foi iniciada.

A classe pastagem, como pôde ser observado em campo, ocupa pequenas porções da área de estudo, mas em todas as classificações com o algoritmo Bhattacharya essa classe foi mapeada com uma área superior em relação a sua extensão verdadeira. Isso ocorreu principalmente pela confusão dessa classe com as classes de agricultura e cerrado. Na classificação com o algoritmo Iseseg essa classe foi melhor mapeada. A imagem Landsat/Agosto, na classificação Bhattacharya apresentou maior porcentagem de área classificada como pastagem, chegando a

9,72% da área, enquanto que na classificação Isoseg da mesma imagem essa classe foi mapeada numa área de 2,11%.

O que se pode dizer a respeito da classificação Bhattacharya é que se mostrou um algoritmo satisfatório para o mapeamento de uso e ocupação do solo, e a qualidade do mapeamento depende da qualidade da imagem e da época de aquisição desta. Em relação à precisão do mapeamento, este apresentou índices considerados bons, principalmente por se tratar de uma região tão heterogênea.

4.4.1.3 Classificação Maxver

Para gerar a classificação supervisionada por *pixel* utilizando o algoritmo Maxver, foram adquiridas amostras para cada área que representava as classes já definidas anteriormente. Em média foram adquiridas 20 amostras para cada classe, porém a classe solo exposto necessitou de mais amostras por apresentar uma grande variedade de feições com características espectrais diferentes, mesmo sendo da mesma classe. Isso foi necessário para que máximo de feições fosse identificado pelo classificador. Para as imagens CBERS foi necessário criar duas classes de solo exposto e mata ciliar, devido a problemas com a imagem (o surgimento de uma mancha na cena), o que dificultou o mapeamento das classes.

Com as amostras adquiridas foram montadas as matrizes de erro para as quatro imagens, como pode ser visto no anexo B. Analisando o histograma pode se notar que, mais uma vez, a melhor classificação foi para o mês de maio, onde os resultados do índice Kappa e da exatidão Global, foram de 80% e 83%, respectivamente.

A classificação da imagem Landsat/Agosto obteve na classificação Maxver Índice Kappa e Exatidão Global de 67% e 71%, valores inferiores aos encontrados na classificação Bhattacharya, onde os valores foram de 75% e 77%, respectivamente.

A figura 29 mostra os valores de índice Kappa e Exatidão Global de cada imagem.

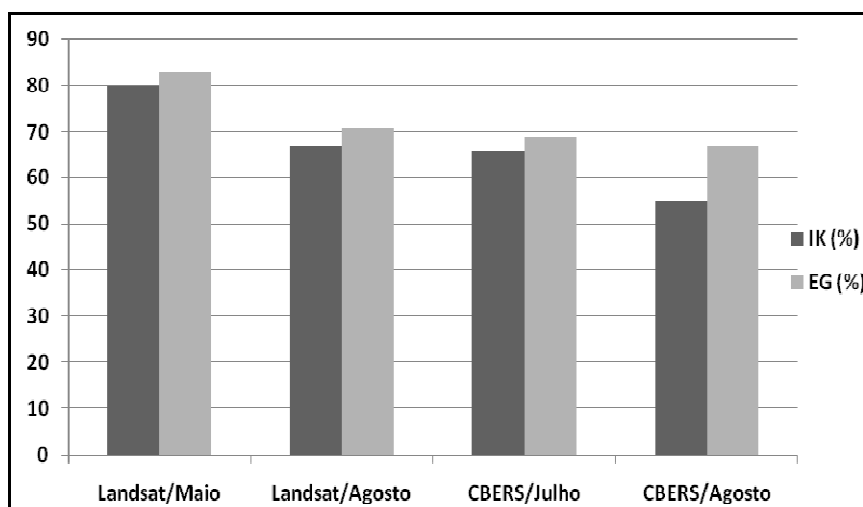


FIGURA 29: Índice Kappa e Exatidão Global para a classificação Maxver.

A classificação da imagem CBERS/Agosto obteve os piores valores de Índice Kappa e Exatidão Global, 55% e 67%, seguidos pela classificação da imagem CBERS/Julho com 66% e 69%, respectivamente. As imagens CBERS não apresentaram resultados satisfatórios na classificação Maxver, provavelmente esse baixo desempenho foi gerado pelos problemas encontrados na imagem. Mesmo fornecendo duas classes extras no momento da coleta das amostras os resultados não mudaram significativamente.

Além de analisar os valores de índice Kappa e exatidão global, é necessário analisar também os valores da exatidão do produtor e exatidão do usuário, pois esses valores indicarão quais as classes foram mais bem mapeadas pelo algoritmo. As matrizes de erro para a classificação Maxver, os cálculos de Índice Kappa, Exatidão Global, Exatidão do Produtor (EP)/erros de comissão e Exatidão do Usuário (EU)/erros de omissão podem ser vistos no anexo B.

Na imagem do mês de maio a classe urbana obteve bons resultados, EP de 92% e EU de 97%. Pouco mais de 6% das amostras foram classificadas como solo exposto. Já a classe cerrado obteve resultados ruins, EP de 58%, e dessas amostras classificadas como cerrado 71% delas correspondem realmente a essa classe no terreno, como pode ser visto na figura 30.

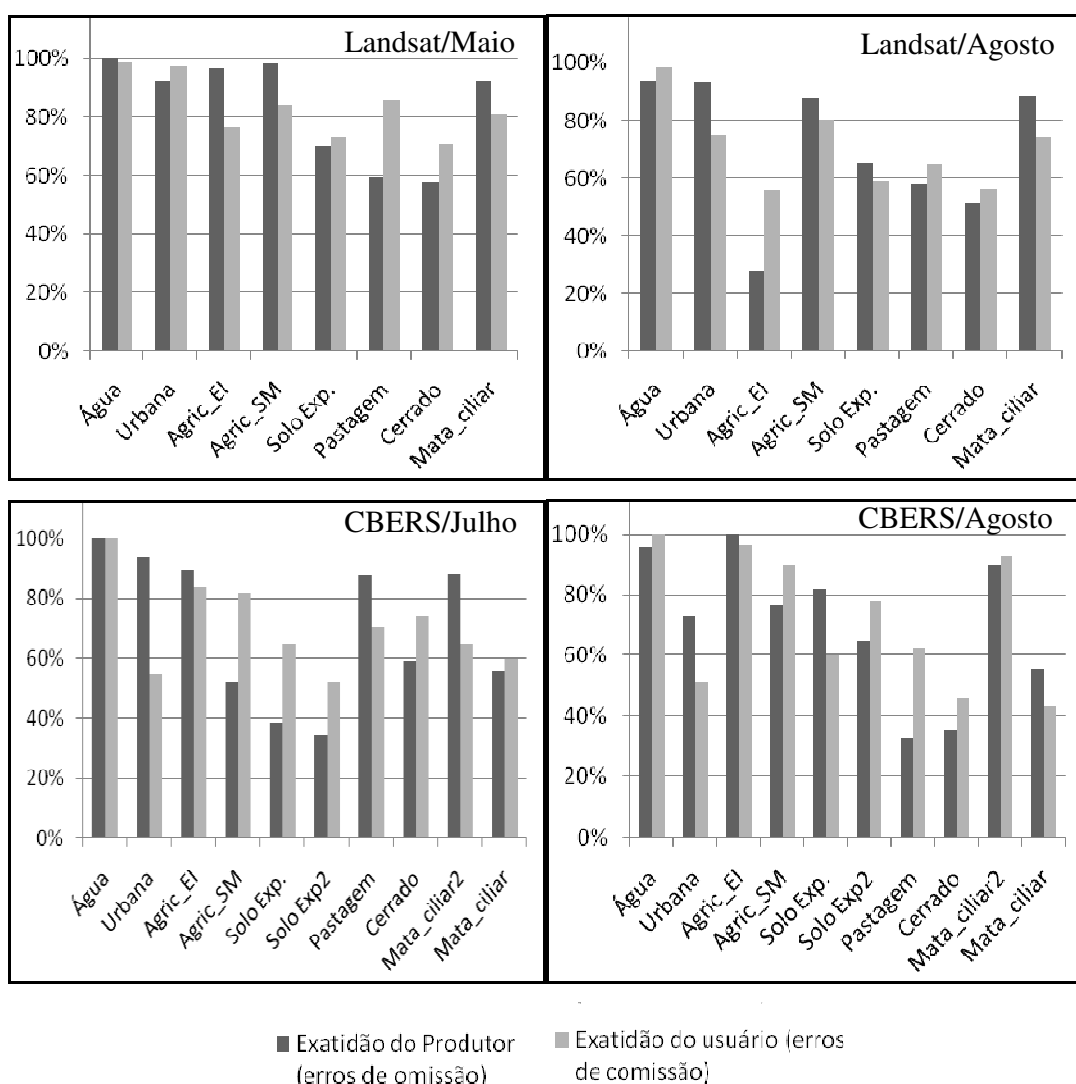


FIGURA 30: Exatidão do produtor e exatidão do usuário para cada classe mapeada nas imagens Landsat e CBERS, utilizando o algoritmo Maxver.

Nessa classificação, a classe cerrado se confundiu com a mata ciliar e com a agricultura sadia/madura. Os resultados não foram bom para a classe pastagem com EP de 59% e EU de 85%, em seguida os piores valores são da classe solo exposto, que obteve EP de 70% e EU de 73%.

As amostras dessas três classes não foram satisfatórias para o mapeamento automático utilizando o algoritmo Maxver, pois como pode ser observado na matriz de erro no anexo B, o número de amostras consideradas corretas foi abaixo de 70%, pois houve grande confusão entre essas três classes. O pior caso foi da classe cerrado, onde 21% das amostras foram classificadas como mata ciliar, e outros 17%

como agricultura sadia/madura.

Esse tipo de situação indica o quanto as respostas espectrais de alguns objetos e feições na superfície da terra são semelhantes e podem confundir o classificador, influenciando, dessa forma, a qualidade e precisão do mapeamento.

De acordo com os baixos valores de IK e EG na imagem Landsat/Agosto, os valores de EP e EU também não foram satisfatórios. Os melhores resultados foram das classes água, agricultura sadia/madura e mata ciliar. Já a classe urbana obteve EP de 93%, considerado muito bom, mas a EU foi 75%, o que indica que 25% da amostras não tem a possibilidade de realmente representar essa classe. As classes com piores resultados foram: agricultura em estágio inicial, cerrado, pastagem e solo exposto. A classe agricultura em estágio inicial obteve resultados extremamente ruins em relação aos demais. Na matriz de erro pode-se notar que a maior parte das amostras adquiridas para representar a classe foram classificadas como solo exposto. Dessa forma a EP foi de apenas 28%, ou seja, das amostras classificadas corretamente pelo algoritmo apenas 28% estavam realmente corretas, e destas amostras apenas 56% tem a probabilidade de representar a classe na superfície.

Na classe cerrado apenas 51% das amostras foram consideradas corretas, pois esta classe teve as amostras confundidas com todas as outras classes, principalmente com as classes pastagem e mata ciliar.

Na imagem de julho, a exatidão do produtor mais baixa foi das classes solo exposto e solo exposto 2, com 38% e 34%, respectivamente, e essas duas classes também tiveram EU muito baixos, 64% e 52%. As amostras da classe solo exposto se confundiram com as amostras da classe área urbana em 36% e com a classe solo exposto-2 em 22%. A classe solo exposto-2 se confundiu com área urbana em 40%. A classe área urbana obteve uma EP muito alta, de 94%, mas a EU foi muito baixa, de 55%, o que indica que nem todas as amostras da classe estão realmente corretas. Com estes valores o mapeamento dessas classes não foi muito satisfatório.

A classe agricultura em estágio inicial obteve um desempenho ruim, com EP igual a 52% e EU igual a 82%, que apesar de apresentar m valor alto, não é suficiente para atestar a precisão do mapeamento dessa classe, pois a quantidade de amostras corretas foi baixa. A classe mata ciliar também não teve um bom desempenho, com EP de 56% e EU de 60%. Isso pode ser explicado pela confusão das amostras dessa

classe com as amostras das classes mata ciliar-2 e cerrado.

A classe água foi a única classe 100% confiável, pois todos os *pixels* das amostras adquiridas foram classificados corretamente dentro da classe e a probabilidade dessas amostras realmente representarem a classe na superfície é de 100%. O que se espera de todas as amostras são valores o mais próximos de 100, para que o mapeamento seja realmente correto. Porém isso não é possível devido a fatores como a semelhança de resposta espectral dos alvos, ou de suas características intrínsecas.

A imagem CBERS/Agosto obteve os piores resultados de IK (55%) e EG (67%) e isso ocorreu pelo fato de todas as amostras, de todas as classes, não terem sido muito bem classificadas. Houve muita confusão entre as classes, o que pode ter ocorrido pela baixa qualidade da imagem classificada.

As classes com melhores valores de EP e EU foram as classes água, agricultura em estágio inicial e mata ciliar-2, que apresentaram valores acima de 90%. Os piores resultados foram das classes pastagem, cerrado e mata ciliar. Em todas as imagens classificadas essas três classes foram as que apresentaram os piores resultados, provavelmente pela dificuldade dos algoritmos em reconhecê-las de forma distinta.

A classe urbana nesta classificação não obteve bons resultados, com EP de 73% e EU de 52%. As amostras dessa classe se confundiram com as amostras da classe solo exposto em 22%. Houve também confusão das classes solo exposto e solo exposto-2 com a classe urbana. Os resultados do mapeamento da classe urbana com o algoritmo Maxver foram extremamente ruins para a imagem CBERS/Agosto, como pode ser observado na figura 31, onde pode ser visto a divisão da imagem e a classificação excessiva de áreas urbanas. Com isso pode-se notar o quanto é difícil mapear áreas urbanas, especialmente em áreas onde há solo exposto com diferentes características espectrais que podem ser confundidas com outras classes.

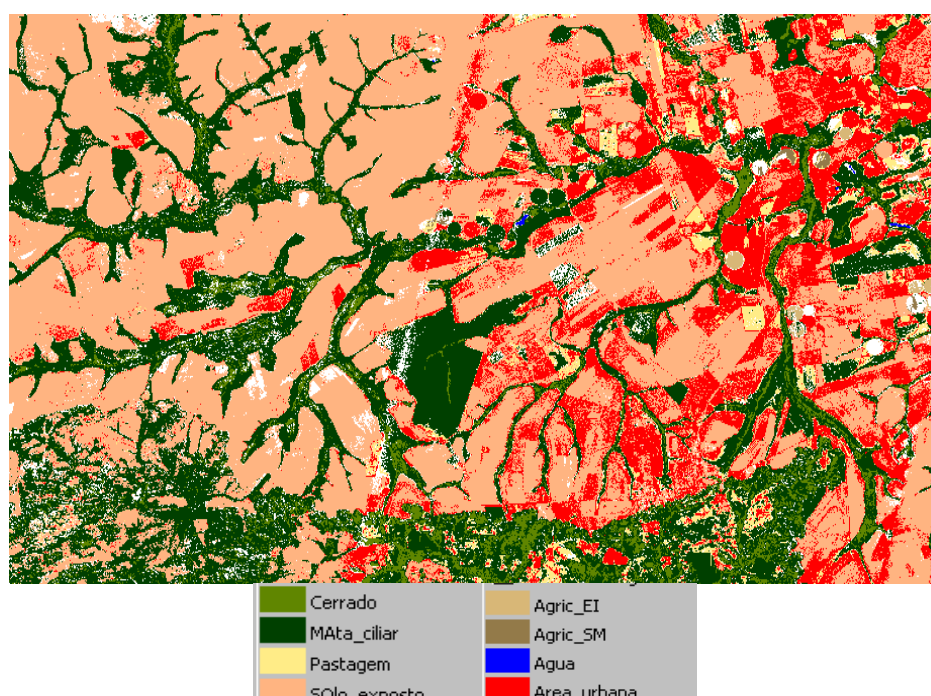


FIGURA 31: Classificação Maxver da imagem CBERS/Agosto

Nessa imagem, além da área urbana, outras classes que não foram bem mapeadas foram das classes cerrado e mata ciliar, como já foi demonstrado nos valores de EP e EU. A classe mata ciliar foi classificada em grande quantidade e em áreas onde é sabido que existe cerrado.

Como a imagem CBERS apresentou um defeito, com a criação de mais de uma classe de solo exposto e mata ciliar foi possível contornar esse problema de forma satisfatória na imagem CBERS/Julho, como pode ser visto na figura 32 (A). Apesar de o problema ter sido amenizado, muitas áreas de solo exposto ainda foram mapeadas como classe urbana, mas esse tipo de confusão ocorreu em todas as imagens na classificação Maxver, como pode ser visto na figura 32 nas áreas circuladas, que são áreas de solo exposto que foram classificadas como área urbana.

As imagens de CBERS/Julho e Landsat/Agosto apresentaram mais áreas classificadas como área urbana do que a imagem Landsat/Maio, e é possível notar que basicamente as mesmas áreas de solo exposto foram classificadas como área urbana nas três imagens (área circulada nas figuras 32 (A), (B) e (C)).

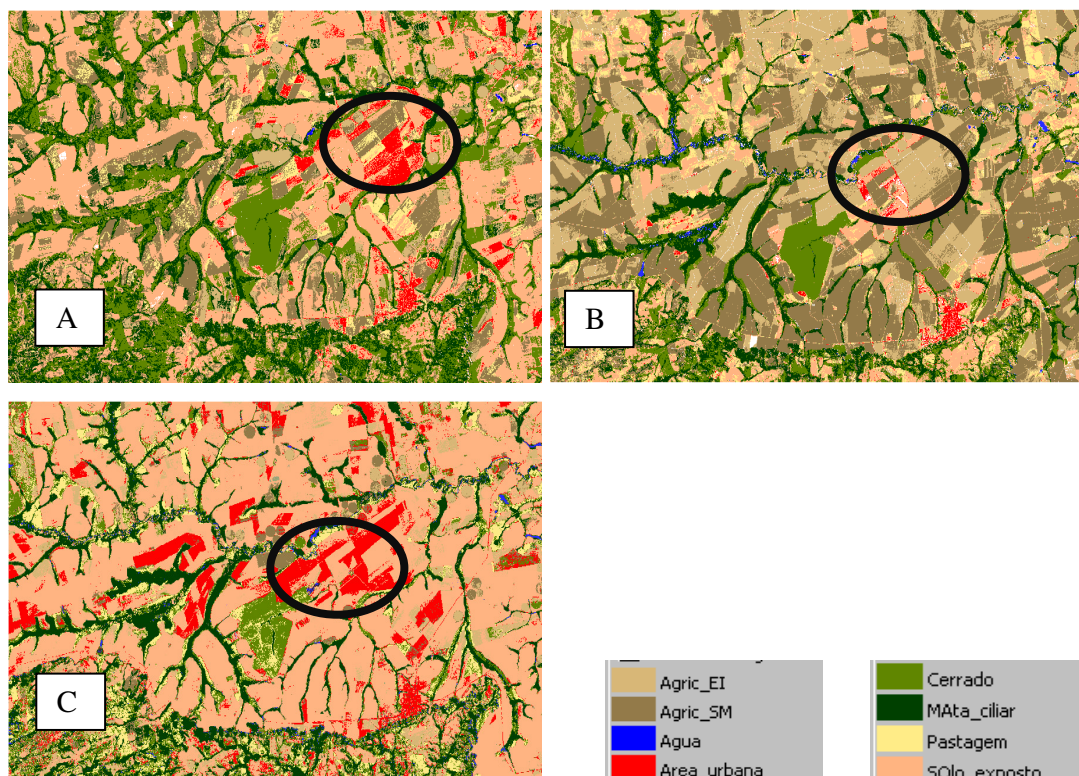


FIGURA 32: Classificação Maxver das imagens (A) CBERS/Julho, (B) Landsat/Maio e (C) Landsat/Agosto

Comparando os resultados de IK e EG das classificações Maxver e Bhattacharya, foi possível escolher a melhor imagem classificada. Essa classificação escolhida será integrada aos dados de declividade e erodibilidade do solo para se gerar o mapa de suscetibilidade a erosão.

Como pode ser visto na figura 33, a imagem Landsat/Maio apresentou os melhores resultados tanto na classificação Bhattacharya quanto na classificação Maxver. Para o mês de agosto a imagem Landsat gerou resultados melhores que a imagem CBERS. Entre as imagens CBERS, a imagem do mês de julho obteve resultados melhores que a imagem do mês de agosto. Os resultados do mês julho ainda foram melhores que os da imagem Landsat/Agosto.

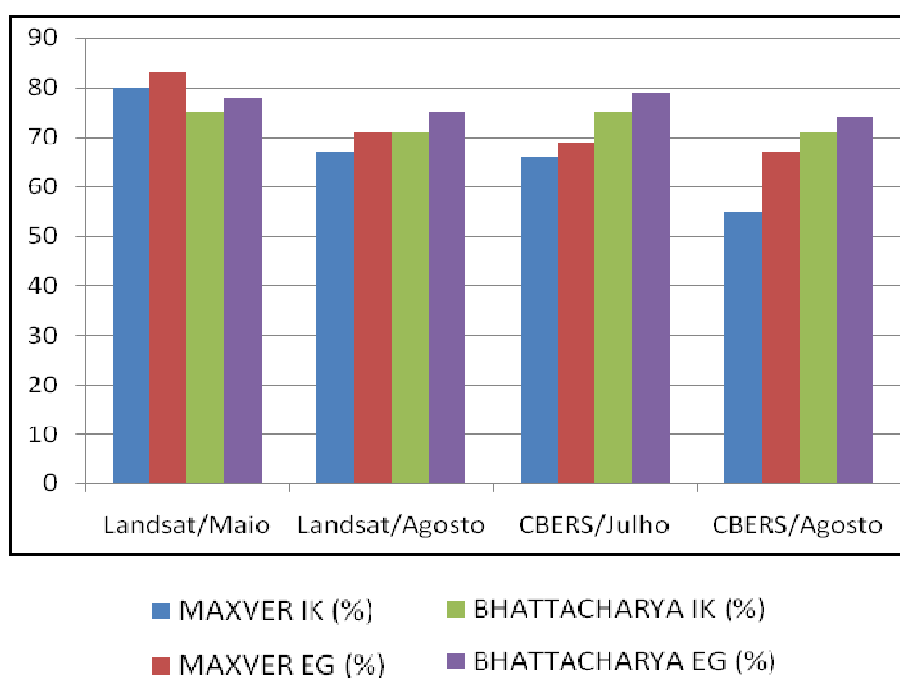


FIGURA 33: Comparação dos valores de índice Kappa e exatidão global para as classificações Bhattacharya e Maxver.

A comparação com o método de classificação usando o algoritmo Ioseg foi feito apenas de forma visual e por isso optou-se por não utilizar essa classificação para se obter o mapa de suscetibilidade, apesar dessa classificação ter apresentado bons resultados quando comparado aos outros métodos.

Dessa forma a imagem a ser usada para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo foi a imagens Landsat/Maio, classificada com o algoritmo Maxver.

4.5 SUSCETIBILIDADE À EROSÃO: ANÁLISE DA ERODIBILIDADE, DECLIVIDADE E USO E COBERTURA DO SOLO

De acordo com as classes de solos descritas na metodologia e sua erodibilidade foi elaborado o mapa de graus de erodibilidade dos solos. O mapa gerado apresenta cinco classes de erodibilidade variando de muito forte a muito fraco. Pode-se observar que na área onde predominam solos com grau de erodibilidade muito forte e forte atualmente existem focos de erosão muito severa, no caso, as erosões na borda do planalto, onde predominam Neossolos Quartzarênicos e Cambissolos. A figura 34 ilustra a espacialização dos graus de erodibilidade dos

solos, onde pode ser visto que a maior parte da área é ocupada por solos com grau de erodibilidade fraco, ou seja, o Latossolo Amarelo e Latossolo Vermelho.

As classes de erodibilidade dos solos para a região estudada foram classificadas de acordo com os solos encontrados na região e adaptada à metodologia descrita anteriormente. As classes de erodibilidade para a região do Planalto dos Guimarães são classificadas da seguinte maneira:

TABELA 4: Classes de erodibilidade

Classes de erodibilidade	Tipos de solos
1 (Muito Fraca)	Solos Orgânicos
2 (Fraca)	Latossolo Vermelho
3 (Moderada)	Latossolo Vermelho Amarelo
4 (Forte)	Plintossolos
5 (Muito Forte)	Cambissolos, Neossolos Litólicos e Quartzarênicos

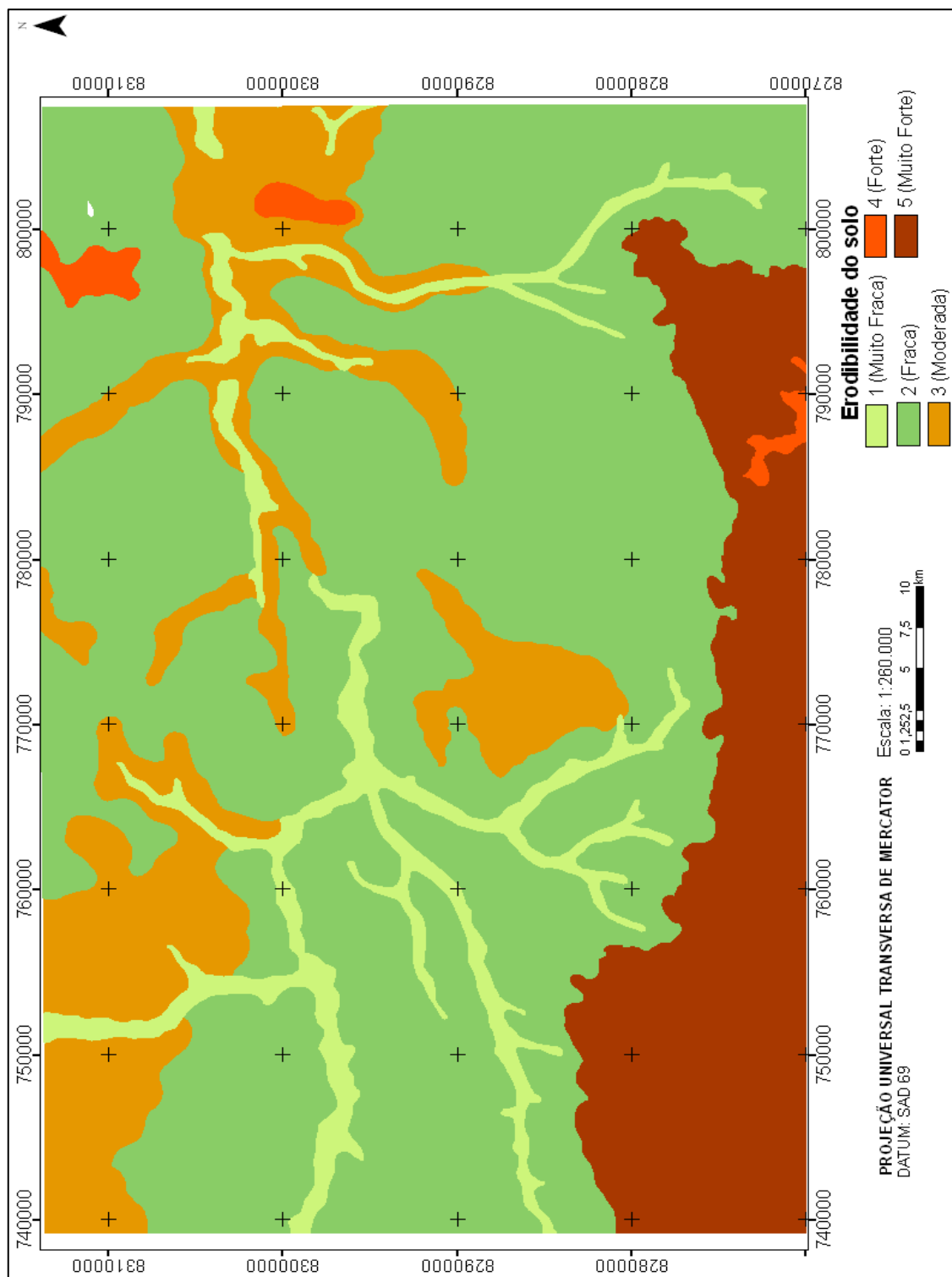


FIGURA 34: Mapa de graus de erodibilidade

O mapa de declividade foi obtido a partir da imagem SRTM, que foi reclassificado de acordo com a declividade encontrada na região. Os valores mínimos e máximos foram obtidos a partir da estatística disponível no SPRING, que fornecem dados a respeito da declividade. Dessa forma foi possível estabelecer o intervalo de dados para o mapa de declividade. A declividade mínima para a área é 0% e a declividade máxima é 58%.

Foram criadas 5 classes de declividade, considerando essas informações obtidas e também as informações obtidas de outros autores a respeito da classificação. Dessa forma, foram criadas as classes de acordo com a influência da declividade no processo erosivo, de muito fraca a muito forte. A classificação e área ocupada por cada classe podem ser vistas na tabela 5:

TABELA 5: Classes de declividade

Classes	Declividade (%)	Área (km ²)	Área (%)
1 (Muito Fraca)	0 - 3	673,63	22,45
2 (Fraca)	3-6	1973,27	65,78
3 (Moderada)	6-12	204,45	6,82
4 (Forte)	12-20	50,50	1,68
5 (Muito Forte)	>20	30,26	1,01

O relevo da área é, em quase totalidade, plano ou suavemente ondulado, ou seja, o grau de influência da declividade é muito fraco ou fraco no processo erosivo. Porém não se deve considerar nenhum fator que influencia a erosão de forma isolada, já que o processo é derivado da junção de diversos fatores.

É importante ressaltar que o mapa de declividade gerado a partir de imagens SRTM apresenta defeitos como ruídos e a geração de dados de elevação em torno de corpos d'água. Isso ocorre devido ao fato do radar reconhecer as diferenças de altitude entre o topo da vegetação e o solo, como se fosse diferenças de altitude. Esse tipo de situação pode ser observada na figura 35, onde existem algumas áreas com declividade moderada em formas circulares e também pela declividade reconhecida ao longo dos cursos d'água.

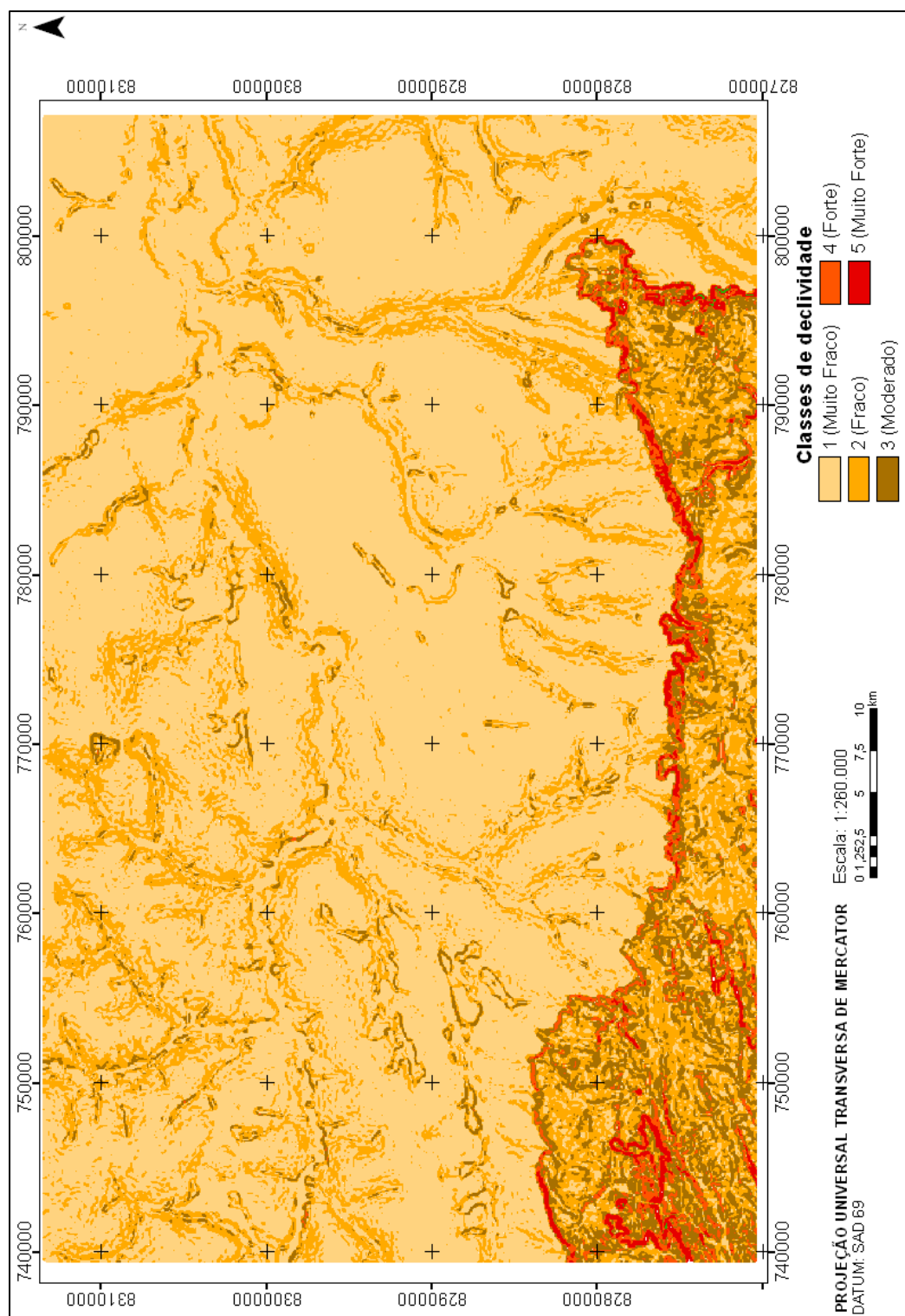


Figura 35: Graus de declividade do terreno

Dessa forma pode-se dizer que os dados de declividade gerados pela imagem SRTM não são totalmente confiáveis, caso se necessite de um estudo com alta precisão da declividade. Para se obter um mapa de declividade mais confiável é necessário verificar a precisão do mapeamento com medições em campo das áreas onde há dúvidas em relação ao grau de declividade.

Os dados de erodibilidade e declividade foram integrados em uma matriz a fim de se definir as classes do potencial erosivo. Esses dados geraram um mapa preliminar de potencial, que posteriormente foi integrado com os dados de uso e cobertura do solo. A tabela 7 mostra a relação das cinco classes de erodibilidade e declividade, a partir da qual foram criadas cinco classes de potencial dos solos à erosão:

TABELA 6: Classes preliminares de potencial a erosão

Declividade	Classes de erodibilidade				
	1	2	3	4	5
1	I	I	II	III	II
2	I	I	II	III	III
3	II	II	III	IV	IV
4	III	III	IV	V	V
5	III	IV	V	V	V

- I – Muito baixo: Latossolo Vermelho e Solos orgânicos em declividade muito fraca;
- II – Baixo: compreende todos os solos encontrados na área em declividades fracas e muito fracas;
- III – Moderado: Solos orgânicos e Latossolo Vermelho em declividade muito forte, Plintossolos em declividades de 0 a 6% e Neossolos e Cambissolos em declividade fraca,
- IV – Alto: Cambissolos, Plintossolos e Neossolos em declividades que variam de 0 a 20% e
- V – Muito Alto: compreende os Cambissolos, Plintossolos e Neossolos em declividades acima de 20%.

Após a geração do mapa preliminar de suscetibilidade foi feito o cruzamento desses dados com os dados de uso e cobertura do solo. O mapa de uso e cobertura foi gerado a partir da classificação da imagem Landsat TM-5 do mês de maio, que apresentou os melhores resultados de IK e EG.

Nesse mapeamento foram identificados oito tipos diferentes de uso e ocupação do solo, os quais foram agrupados em cinco classes de grau de cobertura do solo contra o processo erosivo.

Essas classes foram definidas de acordo com o porte da vegetação e com o tipo de atividade antrópica, como pode ser visto na tabela 7. As culturas de soja, algodão e milho, que predominam na região, oferecem pouca proteção ao solo, especialmente no período inicial, por isso a classe Agricultura_EI foi classificada como classe 1. Como foi dito anteriormente, a respeito do grau de proteção das culturas, mesmo em estágio de desenvolvimento mais avançado elas oferecem pouca proteção ao solo, dessa forma a Agricultura_SM foi classificada como classe 2 (Muito Fraco).

TABELA 7: Graus de proteção da vegetação contra a erosão dos solos

Grau de Proteção do solo	Tipos de uso e ocupação
1 (Muito Forte)	Mata ciliar e água
2 (Forte)	Cerrado
3 (Médio)	Pastagem
4 (Muito Fraco)	Agricultura_SM
5 (Fraco)	Solo exposto, área urbana e agricultura_EI

Como pode ser visto na figura 36, os graus de proteção muito forte e forte estão restritos a uma pequena porção da área, sendo estas apenas as matas ciliares e as áreas de cerrado. A maior parte da área se encontra com grau de proteção fraco e muito fraco.

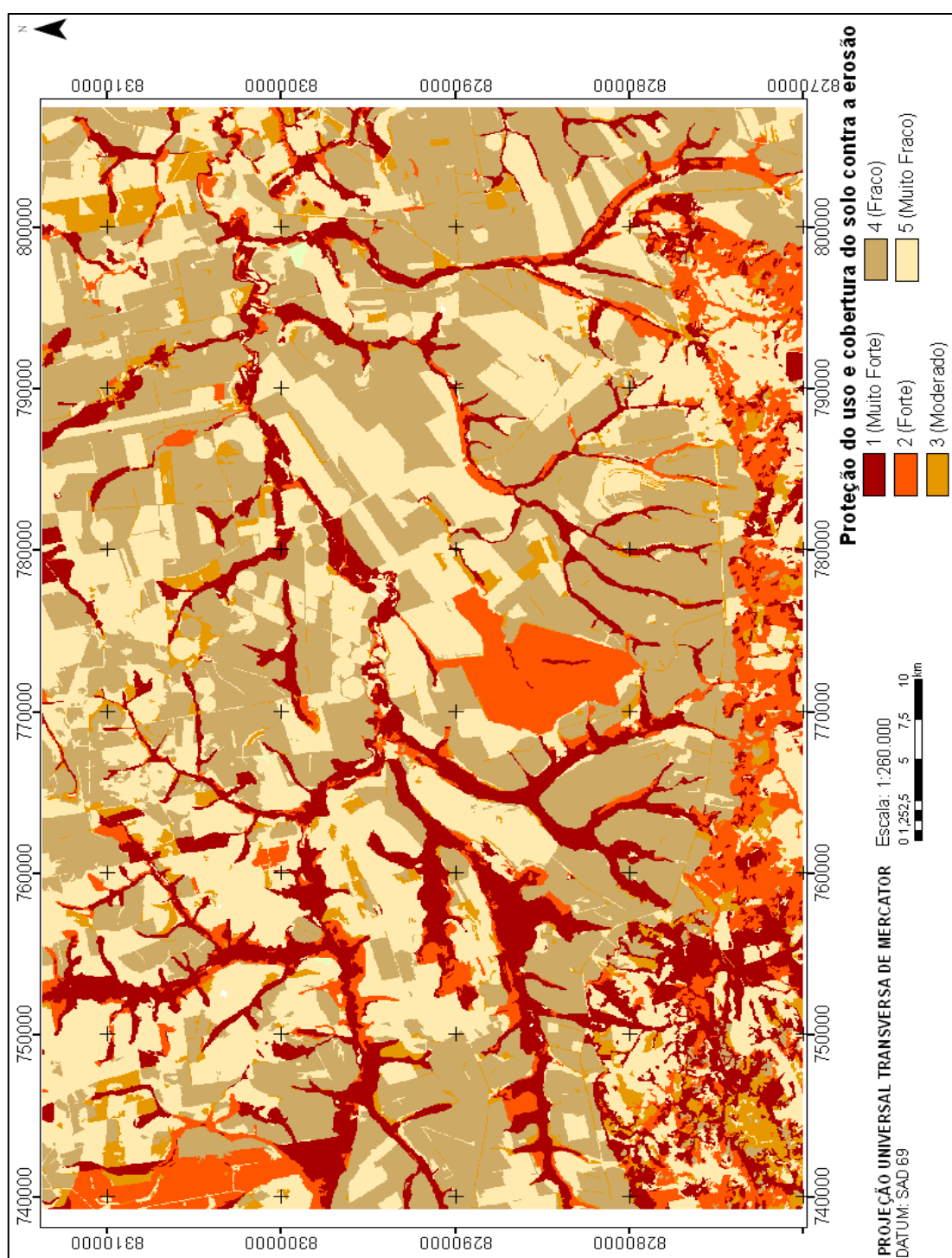


FIGURA 36: Graus de proteção da vegetação e usos contra a erosão dos solos.

Por meio do cruzamento dos dados de uso e ocupação com os dados preliminares de suscetibilidade foi possível determinar cinco classes de erosão. Os critérios usados para determinar a suscetibilidade foram os mesmos usados anteriormente na classificação preliminar. Porém, agora os dados de uso e ocupação foram acrescidos e é possível analisar se os usos antrópicos são compatíveis com as características naturais do terreno.

As classes foram definidas da seguinte maneira e podem ser vistas na tabela 8:

- I (Pouco a não-suscetível): mata ciliar e cerrado em áreas com potencial erosivo muito baixo;
- II (Pouco suscetível): compreende áreas de baixo potencial erosivo ocupadas com mata nativa e pastagens;
- III Moderadamente suscetível: classes com potencial a erosão moderado associado à agricultura em estágio inicial e sadia/madura, solo exposto, pastagens, cerrado e mata ciliar,
- IV (Muito Suscetível) – áreas com alto potencial erosivo ocupadas por áreas urbanas, agricultura em estágio inicial e sadia/madura, solo exposto e pastagens e
- V (Extremamente Suscetível) – áreas com potencial erosivo muito alto associadas à agricultura em estágio inicial e sadia/madura, solo exposto e pastagens.

TABELA 8: Classes de suscetibilidade a erosão

Classes de uso e ocupação	Potencial a erosão				
	1	2	3	4	5
1	I	I	I	II	III
2	I	I	II	III	III
3	I	II	II	III	IV
4	II	III	III	IV	V
5	III	III	IV	V	V

O mapa final de suscetibilidade indica que mais de 36% da área foi classificada como moderadamente suscetível a erosão, como pode ser visto na tabela 9. Mais da metade da área foi classificada como pouco ou moderadamente suscetível aos processos erosivos. As áreas pouco suscetíveis estão presentes em 693 km² e pouco a não suscetíveis em 393 km², ocupando apenas áreas de mata ciliar e cerrado.

No mês de maio a área classificada como moderadamente suscetível a erosão chega a ocupar 1102,9 km² da área de estudo, esse valor pode variar ao longo do ano devido às épocas de plantio e colheita da soja, do algodão e do milho. Isso pode ocorrer já que o tipo de cobertura influencia de forma acentuada o processo erosivo e as culturas agrícolas oferecem variados graus de proteção ao solo.

As classes extremamente suscetível e muito suscetível ocupam uma área de 86,3 km² e 73 km², ficando restritas às áreas de borda e escarpas do planalto.

TABELA 9: Áreas ocupadas pelas classes de suscetibilidade

Classes de suscetibilidade	Área (km ²)	Área (%)
1 (Pouco a Não-Suscetível)	693,41	23,11
2 (Pouco Suscetível)	972,26	32,41
3 (Moderadamente Suscetível)	1102,92	36,76
4 (Muito Suscetível)	86,36	2,88
5 (Extremamente Suscetível)	73,85	2,46

Apesar de grande parte da área se encontrar sob solos com pouca suscetibilidade e declividades muito baixas (relevo plano a suavemente ondulado), o fator de uso e cobertura do solo teve papel decisivo na classificação final da suscetibilidade dessas áreas, pois o intenso uso antrópico como a agropecuária acelera e intensifica o processo erosivo. Isso pode ser visto no mapa de suscetibilidade a erosão (figura 37), onde as classes de suscetibilidade foram definidas obedecendo às classes de uso do solo.

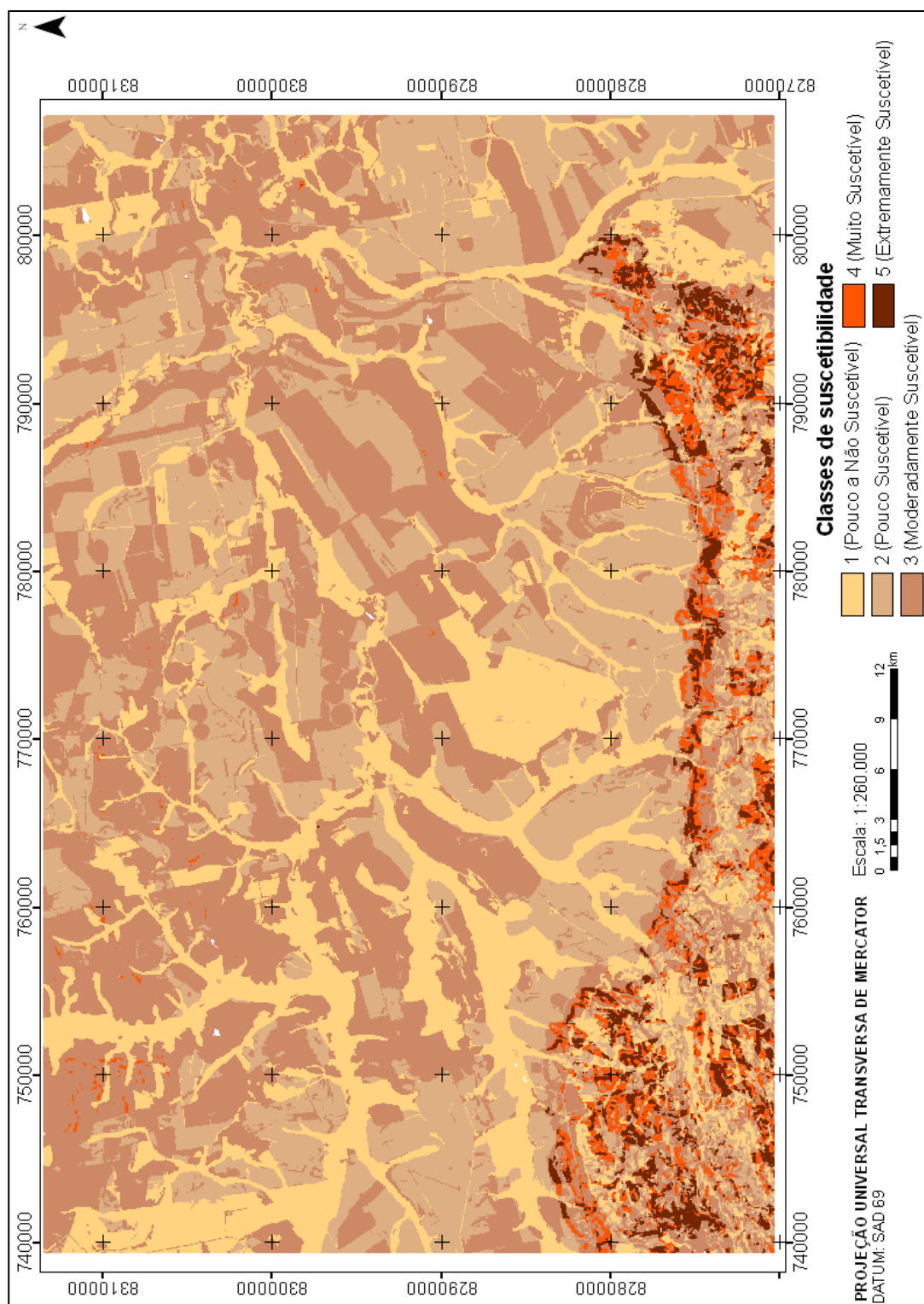


FIGURA 37: Mapa de suscetibilidade á erosão.

Como pode ser observado as áreas na borda e nas encostas do Planalto são extremamente e muito suscetíveis a erosão, e a área onde está localizada a cidade de Primavera do Leste é classificada como muito suscetível, o que indica a falta de planejamento da ocupação urbana.

A ocupação urbana de forma desordenada desencadeia processos erosivos muito expressivos e muitas vezes irreversíveis e que causam sérios transtornos para a própria população que ocupa áreas inadequadas. No caso de Primavera do Leste a cidade foi se desenvolvendo em uma área as margens da rodovia sem nenhum tipo de controle ou planejamento. A retirada da vegetação na borda do planalto para a construção de ruas e casas, em uma área com solos muito suscetíveis à erosão, causou sérios danos ao ambiente. O processo erosivo nessa área tomou proporções gigantescas, não sendo possível aplicar técnicas mecânicas de correção do solo, além disso, a quantidade de sedimentos arrastados nesse processo afetou de forma severa os mananciais próximos a essa área, causando o assoreamento do curso d'água e as atividades existentes nessa área.

Certas práticas agrícolas ligadas ao modelo de produção agrícola predominante, como o uso excessivo e inadequado de agrotóxicos, a destruição e a não-preservação da vegetação nativa e o uso intenso do solo são responsáveis por grande parte dos problemas com os recursos hídricos. A agricultura é apenas mais um tipo de poluição dispersa dos recursos hídricos, mas ela tem um grande impacto nos mesmos devido ao tipo de prática adotada.

O intenso desmatamento da área em função da agricultura aumenta a suscetibilidade do solo à erosão laminar, pois apesar da fraca declividade da área, o solo tem pouca proteção das culturas agrícola e em partes do ano o solo está completamente exposto. Dessa forma há um aumento na carga de sedimentos, que contêm matéria orgânica, fertilizantes, corretivos, sementes e pesticidas aplicados pelos produtores. Quando se depositam no leito dos rios esses sedimentos causam o assoreamento do leito, diminuem sua vazão e aumentam o risco de enchentes. Isso contribui para a poluição, pois resíduos de fertilizantes e pesticidas contaminam a água, diminuindo a população de peixes, podendo também afetar a saúde da população urbana que depende dessa água.

É importante ressaltar que neste caso realizou-se um estudo interpretativo, procurando enquadrar as unidades de declividade, erodibilidade e uso dos solos nos

graus de limitações de uso por suscetibilidade à erosão. No mapa, têm-se uma visão geral do agrupamento das unidades de mapeamento e uma avaliação qualitativa do risco de erosão dos ambientes identificados na área, com base nas unidades de mapeamento dos solos, da declividade e o uso e ocupação do solo. Este mapa de suscetibilidade à erosão deve ser entendido como um subsídio básico à visualização espacial da resultante das condições ambientais com o uso antrópico, condições essas que são potencializadoras do processo erosivo.

Como material cartográfico de trabalho o mapeamento apresenta muitas limitações geradas pela escala e pela qualidade dos produtos de sensoriamento remoto. Para um estudo mais detalhado e completo é necessário um estudo aprofundado em relação aos fatores que influenciam o processo erosivo.

5 CONCLUSÕES

O mapa de suscetibilidade à erosão dos solos na região de Primavera do Leste é apresentado neste trabalho. Para sua elaboração foram integrados dados de declividade, erodibilidade e uso e cobertura do solo.

O mapeamento do uso do solo foi feito através da classificação das imagens do satélite Landsat TM-5, e imagens CBERS CCD-2. Foram utilizados os classificadores Ioseg, Bhattacharya e Maxver, e a acurácia da classificação foi determinada através do cálculo da Exatidão Global e do Índice Kappa.

As imagens Landsat apresentaram melhores resultados na classificação das áreas agrícolas que as imagens CBERS.

A imagem que gerou a melhor classificação foi a imagem Landsat do mês de maio classificada com o algoritmo Maxver, com Exatidão Global de 83% e índice Kappa de 80%.

A área possui cerca de 3000 km² dos quais mais de 50% são usados pela agricultura. Menos de 30% da área é coberta pela vegetação nativa

A carta de erodibilidade foi elaborada a partir dos tipos de solos. A maior parte dos solos possui erodibilidade fraca ou muito fraca.

A declividade foi obtida através de dados da missão SRTM e foi classificada como fraca em 22,4% da área e muito fraca em grande parte da área, mais de 65%.

A integração dos dados de declividade, erodibilidade e uso do solo foi realizada ArcGis 9.2 e foram definidas cinco classes de suscetibilidade á erosão.

36% da área é classificada como moderadamente suscetível, 32% da área, pouco suscetível e 23%, pouco a não suscetível e são relacionadas às áreas de mata ciliar e cerrado.

As classes extremamente suscetível e muito suscetível ocupam 2,46% e 2,88% da área, ficando restritas às áreas de borda e escarpas do planalto.

Estes resultados podem auxiliar no planejamento do uso e ocupação das áreas muito susceptíveis a extremamente suscetíveis à erosão.

Este mapa de suscetibilidade fornece informações relacionadas à fragilidade dos ambientes, úteis na elaboração de planos de manejo e de conservação do solo, em projetos de implantações de obras em áreas urbanas ou agrícolas, quer pelos administradores públicos ou pelos produtores agrícolas.

Recomenda-se que um estudo da erodibilidade dos solos da região e mesmo para o Estado de Mato Grosso seja realizado, pois não há estudos com os solos locais.

6 BIBLIOGRAFIA

ALVES, D. S.; PEREIRA, J. L. G.; SOUZA, C. L.; SOARES, J. V.; MOREIRA, J. C.; ORTIZ, J. O. SHIMABUKURO, Y. E.; YAMAGUSHI, F. **Análise comparativa de técnicas de classificação do sensor Landsat – TM para caracterização de áreas desflorestadas.** Anais X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, Brasil, 11-14 de setembro – 1998, INPE, p. 1409-1419.

BACCARO, C. A. D. **Processos erosivos no domínio do cerrado.** In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo: Ícone, 1990. 365 p.

CARVALHO, T. M. **Métodos de sensoriamento remoto aplicados à geomorfologia.** Rev.Geogr. Acadêmica v.1 n.1(xii), 2007. p. 44-54.

CASTRO JUNIOR, P. R.; FONSECA NETO, L.; SALOMÃO, F. X. T.. **Conflitos de uso e controle erosivo em uma área representativa da produção agrícola intensiva no Planalto dos Guimarães em Mato-Grosso.** Revista Agricultura Tropical, v. 8, p. 76-99, 2006.

CORREIA JR, P. A. **Elaboração de modelos para estudo das mudanças dos padrões de uso e cobertura da terra na bacia do Taibaçupeba, região metropolitana de São Paulo, com auxílio de sensoriamento remoto orbital.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Dissertação (mestrado).

COSTA, J. V. **Caracterização e constituição do solo.** 7ª edição. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2004. 579 p.

COUTINHO, A.C. **Segmentação e classificação de imagens Landsat - TM para o mapeamento dos usos da terra na região de Campinas, SP.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997. Dissertação (mestrado).

CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. **Degradação Ambiental.** In: Geomorfologia e meio ambiente. Orgs.: A. J. T. G.e S. B. C. 4ª Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003. 394 p.

DÉSTRO, G. F. G.; CAMPOS, S. **SIG SPRING na caracterização do uso dos solos a partir de imagens do satélite CBERS.** Revista Energ. Agric., Botucatu, vol. 21, n.4. 2006, p.28-36

DGI/INPE – Divisão de Geração de Imagens. Disponível em <http://www.dgi.inpe.br/pedidos_Landsat/index.html>. Acesso em: 21 mar 2009.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2009. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 26 jan 2009.

Empresa Mato-grossense de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural (EMPAER). **Calendário agrícola.** Disponível em: <www.empaer.mt.gov.br/arquivos/arquivos.asp?cod=4>. Acesso em: 12 jan 2009

FEOLI, E., VUERICH, L.G., ZERIHUM, W. **Evaluation of enviromental degradation in northern Ethiopia using GIS to integrate vegetation, geomorphological, erosion**

and socio-economic factors. Agriculture, ecosystems and environment, v.91 (1-3), 2002, p. 313-325.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de Sensoriamento Remoto.** Setembro de 2005. Disponível em: < www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais>. Ultimo acesso em 25 nov 2008.

FLORAS, S.A.; SGOURAS, L.D. **Use of geoinformation techniques in identifying and mapping areas of erosion in a hilly landscape of central Greece.** International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, v. 1, (1), 1999, p. 68-77.

FLORENZANO, T. G. **Introdução à Geomorfologia.** In: Florenzano, Teresa Gallotti. (Org.). Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, v. 1, p. 12-30.

FLORENZANO, T. G. **Sensoriamento Remoto para Geomorfologia.** In: Florenzano, Teresa Gallotti. (Org.). Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, v. 2, p. 31-71.

GOES, C. A.; MELLO FILHO, W. L.; CARVALHO, M. **Avaliação do desempenho de diferentes classificadores (Isoseg, Bhattacharya, Maxver e Maxver- ICM), utilizando imagens CCD/CBERS - 1 e ETM/Landsat – 7 fusionadas.** Revista Ambiente & Água, Taubaté, v.1, n.2, p. 80-89, 2006.

GONZALES, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento de imagens digitais.** Tradução: Roberto Marcondes Cesar Jr, Luciano de Fontoura Costa - São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 509 p.

GUERRA, A. J. T. **O início do processo erosivo.** In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

GUERRA, A. J. T.; BOTELHO, R. G. M. **Erosão dos solos.** In: Geomorfologia do

Brasil. Orgs.: S. B. C. e A. J. T. G. - 2ª Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 388 p.

GUERRA, A. J. T. **Processos erosivos nas encostas**. In: Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Antonio José Teixeira GUERRA e Sandra Baptista da Cunha. 4ª Ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 472 p.

HELD, R. B.; CLAWSON, M. **Conservação do solo: passado, presente e futuro**. Rio de Janeiro: O Cruzeiro, 1965. 315 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia/IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. – 2. Ed. – Rio de Janeiro: IBGE, 2007. 323 p.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **SPRING: Tutorial de Geoprocessamento**. 2006. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html> . Acesso em: 28/05/2008.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **CBERS: usos e aplicações**. 2007. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br>>. Acesso em: 24/11/2008.

JENSEN, J. R. **Introductory digital image processing: a remote sensing perspective**. 3ª Ed. Prentice Hall series in geographic information science, 2005. 526 p.

LEÃO, C.; KRUG, L. A.; KAMPEL, M.; FONSECA, L. M. G. **Avaliação de métodos de classificação em imagens TM/Landsat e CD/CBERS para o mapeamento do uso e cobertura da terra na região costeira do extremo sul da Bahia**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 939-946.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 881 p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3

ed. New York: John Wiley & Sons, 1994. 750 p.

MACHADO, C. A. M. **Sondagens elétricas verticais aplicadas à interpretação de horizontes pedológicos de uma vertente m Campo Verde, MT.** Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente, Cuiabá, 2007. Dissertação (mestrado).

MEDEIROS, J. S. **Bancos de dados geográficos e redes neurais artificiais: tecnologias de apoio à gestão do território.** Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH), São Paulo, 1999. Tese (doutorado).

METTERNICHT, G. I.; ZINCK, J. A. **Evaluating the information of JERS – 1 SAR and Landsat TM data for discrimination of soil erosion features.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 53, 1998, p. 143-153.

MIRANDA, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevo.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 13 nov. 2008.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 3. ed., atual. e ampl. Viçosa: UFV, 2005. 313 p.

NOVO, E. M. L. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** – 2ª Edição – São Paulo: Edgar Blücher, 1992. 307 p.

OLIVEIRA, M. A. T. **Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas.** In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

OLSZEWSKI, N. **Ambientes na Bacia Hidrográfica do Rio Preto, com ênfase à porção do médio Rio Preto.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2004. Tese (doutorado).

PORTILLO, J. E. **Sensoriamento remoto e SIG na análise da cotonicultura nos municípios de Campo Verde e Primavera do Leste – MT.** São José dos Campos: INPE, 2007. Dissertação (mestrado).

RIBEIRO, J. F.; WATER, B. M. T. **Tipos de Vegetação do Bioma Cerrado**. Agência de informação Embrapa: Bioma Cerrado. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_23_911200585232.html>. Último acesso em 12 Mar 2009.

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

ROSA, R. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. Uberlândia, MG: EDUFU, 1992. 109 p.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. 8 ed. – São Paulo: Contexto 2005. 85 p. (Repensando a Geografia)

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos**. In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

SALOMÃO, F. X. T. **Plano de controle de processos erosivos em escarpa, no perímetro urbano e periurbano da cidade de Primavera do Leste, MT**. FAPEMAT - Fundação de Amparo á Pesquisa do Estado de Mato Grosso, Cuiabá, 2002.

SANTOS, M. V. **Zoneamento sócio-econômico-ecológico: diagnóstico sócio-econômico-ecológico do estado de mato grosso e assistência técnica na formulação da 2ª aproximação: Apresentação geral das memórias técnicas – geomorfologia**. Cuiabá, 2000. Disponível em: <<http://www.seplan.mt.gov.br>>. Acesso em 23 Mar 2009.

SEPLAN – Secretaria do Estado de Planejamento e Coordenação Geral. **Zoneamento Sócio Econômico Ecológico - ZSEE – Servidor de Mapas**. Disponível em: <<http://www.seplan.mt.gov.br/html/internas.php?tabela=paginas&codigoPagina=139&PHPSESSID=5100841896a3b0f109933030d08549d9>>. Último acesso em 21/03/2009.

SILVA, A. S. **Análise morfológica dos solos e erosão**. In: Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações. Orgs.: A. J. T. G., A. S. S. e R. G. M. B. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. 339 p.

TORRI, D.; BORSELLI, L. **Water erosion**. In: Handbook of soil science. Malcolm E. Summer, Editor-in-chief. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2000. 89 p.

VALÉRIO, A. M.; SILVA, G.B.S.S.; KAMPEL, M.; STECH, J. L. **Avaliação da classificação não supervisionada do uso do solo e tipos de água no Reservatório de Manso, MT**. Geografia. Ensino & Pesquisa, v. 12, p. 4081-4095, 2008.

VRIELING, A. **Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review**. Catena, V. 65, (1), 31 January 2006, p. 2-18.

ANEXOS

ANEXO A

Identificação dos pontos coletados durante a visita de campo.

PONTOS DE REFERÊNCIA	TIPO DE USO DO SOLO
1	Cuiabá
2	Ponto fora da área de estudo
3	Ponto fora da área de estudo
4	Ponto fora da área de estudo
5	BR 070, milho em estágio inicial
6	BR 070, algodão (Fazenda Linda Vista) e milho em estágio inicial (Fazenda Belo Horizonte)
7	BR 070, milho (Fazenda Santiago) e cultura recém colhida
8	BR 070, milho em florescência (Fazenda São Pedro)
9	BR 070, algodão (Fazenda Juriti)
10	BR 070, milho em estágio inicial
11	BR 070, milho
12	Voçoroca na cidade de Primavera do Leste
13	BR 070, lixão e mata ciliar
14	BR 070, milho
15	MT 130, Trevo PCH, algodão e soja seca (pronta para colheita)
16	MT 130, milho (Mantiqueira e Fazenda Entre Rios)
17	MT 130, solo exposto (cultura recém colhida)
18	MT 130, pasto e área alagada
19	Trevo MT 334 e MT 453, milho
20	MT 334, ponte sobre o Rio das Mortes
21	MT 130, algodão
22	Algodão (entrada para Vila União e Colônia Russa)
23	Algodão
24	Rio Perdido
25	Rio das Mortes
26	Curso d'água
27	Soja (entroncamento Vila União/Colônia Russa)

28	Milho
29	Milho
30	Algodão (entrada da Fazenda Calheiro)
31	Soja em estágio inicial (Fazenda Horizonte)
32	Algodão (Entroncamento MT 453)
33	MT 453, mata ciliar (nascente)
34	Soja seca e algodão
35	Algodão
36	Primavera do Leste
37	BR 070, erosão à beira da rodovia
38	Eucalipto (ponto fora da área de estudo)
39	BR 070, milho (entrada da Fazenda Jatobá)
40	Pasto sujo
41	Milho e soja
42	Cerrado
43	Solo preparado
44	BR 070, soja (entrada da Fazenda Barro Preto)
45	Soja
46	Milho em florescência
47	Milho e algodão
48	Soja recém colhida e em estagio inicial
49	Campo Verde

ANEXO B**Matriz de erro classificação Bhattacharya (Landsat/Maio) - %**

	Água	Urb	A_EI	A_SM	S E	Past	Cerr	M C	Total (linhas)
Água	100	0	0	0	0	0	0	0	100
Urbana	0	100	0	0	0	0	0	0	100
Agric_EI	0	0	94,7	0	0,77	0	0	0	95,52
Agric_SM	0	0	0	100	0	0	0,3	0	100,3
Solo Exposto	0	0	5,25	0	78,0	26,9	22,6	0	132,88
Pastagem	0	0	0	0	21,15	73,0	16,6	0	110,81
Cerrado	0	0	0	0	0	0	32,2	34,7	66,94
Mata Ciliar	0	0	0	0	0	0	44,92	65,2	110,18
Total (colunas)	100	100	100	100	99,99	100	116,6	100	816,63

Exatidão Global: 78%

Kappa: 75%

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (Landsat/Maio) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	100%	100%
Urbana	100%	100%
Agric_EI	94%	99%
Agric_SM	100%	99%
Solo Exp.	78%	58%
Pastagem	73%	65%
Cerrado	27%	48%
Mata ciliar	65%	59%

Matriz de erro classificação Bhattacharya (Landsat/Agosto) - %

	Água	Urb	A_EI	A_S M	S E	Past	Cerr	M C	Total (linhas)
Água	83,2	0	0	0	0	0	0	0	83,17
Urbana	0	91,0	0	0	0	0	0	0	91,07
Agric_EI	0	0	86,9	25,16	10	0	0	0	122,04
Agric_SM	0	0	13,12	74,8	0	0	0	1,79	89,75
Solo Exposto	0	5,3	0	0	86,9	12,34	0	0	104,53
Pastagem	0	0	0	0	3,05	85,4	16,62	6,27	111,36
Cerrado	16,83	0	0	0	0	0	82,6	80,44	179,87
Mata Ciliar	0	3,63	0	0	0	2,23	0,71	11,5	18,07
Total (colunas)	100	100	100	100	100	99,99	100	100	799,99

Exatidão Global: 75%

Kappa: 71%

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (Landsat/Agosto) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	83%	100%
Urbana	91%	100%
Agric_EI	87%	71%
Agric_SM	75%	83%
Solo Exp.	87%	83%
Pastagem	85%	77%
Cerrado	83%	46%
Mata_ciliar	12%	64%

Matriz de erro classificação Bhattacharya (CBERS/Julho) - %

	Água	Urb	A_EI	A_S M	S E	Past	Cerr	M C	Total (linhas)
Água	95,0	0	0	0	0	0	0	0	95,06
Urbana	0	99,6	0	0	0	0	0	0	99,67
Agric_EI	0	0	100	5,97	0	0	0,46	0	106,43
Agric_SM	0	0	0	94,0	0	83,09	1,6	0	178,72
Solo Exposto	0	0,33	0	0	99,1	0	0	0	99,44
Pastagem	0	0	0	0	0	16,9	14,89	0	31,8
Cerrado	0	0	0	0	0	0	83,0	57,17	140,22
Mata Ciliar	4,94	0	0	0	0	0	0	42,8	47,77
Total (colunas)	100	100	100	100	99,11	100	100	100	799,11

Exatidão Global: 77%

Kappa: 75%

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (CBERS/Julho) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	95%	100%
Urbana	99%	100%
Agric_EI	100%	93%
Agric_SM	94%	52%
Solo Exp.	100%	99%
Pastagem	16%	53%
Cerrado	83%	59%
Mata ciliar	42%	89%

Matriz de erro classificação Bhattacharya (CBERS/Agosto)

	Água	Urb	A_EI	A_S M	S E	Past	Cerr	M C	Total (linhas)
Água	100	0	0	0	0	0	0	0	100
Urbana	0	22,6	0	0	0	0	0	0	22,65
Agric_EI	0	0	83,5	0	0	0	0	0	83,56
Agric_SM	0	0	0	33,5	0	0	0	0	33,53
Solo Exposto	0	77,3	0	0	100	0	0	0	177,35
Pastagem	0	0	0	0	0	100	18,9	27,4	146,36
Cerrado	0	0	0	66,4	0	0	75,0	0	141,49
Mata Ciliar	0	0	0	0	0	0	6,05	72,6	78,62
Total (colunas)	100	100	83,5	100	100	100	100	100	783,5

Exatidão Global: 74%

Índice Kappa: 71%

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (CBERS/Agosto) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	100%	100%
Urbana	23%	100%
Agric_EI	100%	100%
Agric_SM	34%	100%
Solo Exp.	100%	56%
Pastagem	100%	68%
Cerrado	75%	53%
Mata ciliar	73%	92%

Matriz de erro para a classificação Maxver (Landsat/Maio) - %

	Água	Urb	A.EI	A.SM	S E	Pas	Cer	MC	Total (linhas)
Água	94,2	0	0	0	0	0	0	1	95,2
Urb	0	89,3	0	0	2,56	0	0	0	91,9
A_EI	0	0	95,3	0,8	0	28,1	0,63	0	124,9
A_SM	0	0	0,21	94,9	0	0	17,7	0,5	113,4
S E	0	6,67	3,06	0,76	65,2	12,5	1,1	0	89,3
Past	0	1,33	0,53	0	8,04	59,4	0,31	0	69,6
Cerr	0	0	0	0	17,46	0	57,4	6,22	81,0
M C	0	0	0	0	0	0	21,93	91,3	113,2
Total (colunas)	94,2	97,3	99,1	96,5	93,2	99,9	99,0	99,0	778,5

Exatidão Global: 83%

Índice Kappa: 80 %

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (Landsat/Maio) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	100%	99%
Urbana	92%	97%
Agric_EI	96%	76%
Agric_SM	98%	84%
Solo Exp.	70%	73%
Pastagem	59%	85%
Cerrado	58%	71%
Mata_ciliar	92%	81%

Matriz de erro para a classificação Maxver (Landsat/Agosto)

	Água	Urb	A_EI	A_S M	S E	Past	Cerr	M C	Total (linhas)
Água	92,7	0	0	0	0,33	0,12	0,19	0,76	94,18
Urbano	0	87,1	0	0	27,85	0,44	0,93	0	116,3
Agric_EI	0	0	21,8	11,82	2,39	0,6	2,61	0	39,2
Agric_SM	0	0,92	19,9	87,7	0,08	0,08	0,42	0,08	109,2
Solo Exposto	0	4,61	36,3	0	64,7	2,44	1,78	0,08	110,0
Pastagem	0	0	0	0	0,11	57,1	29	2,18	88,4
Cerrado	3,09	0,92	0	0,08	4,21	23,0	51,5	8,4	91,23
Mata Ciliar	3,09	0	0	0,31	0,08	14,2	13,2	87,9	118,8
Total (colunas)	98,96	93,55	78,16	99,93	99,83	98,05	99,62	99,41	767,51

Exatidão Global: 71%

Índice Kappa: 67%

Tabela de Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário (Landsat/Agosto) - %

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	94%	99%
Urbana	93%	75%
Agric_EI	28%	56%
Agric_SM	88%	80%
Solo Exp.	65%	59%
Pastagem	58%	65%
Cerrado	52%	56%
Mata_ciliar	88%	74%

Matriz de erros para a classificação Maxver (CBERS– Julho)

	Água	Urb	Agric_EI	Agric_SM	Solo_Exp	Solo_Exp2	Pastagem	Cerrado	Mata Ciliar2	Mata Ciliar	Total de linhas
Água	98,2		0	0	0	0	0	0	0	0,2	98,45
Urbana	0	92,4	0	0,11	36,27	40,3	0	0	0	0	169,1
Agric_EI	0	0	88,6	14,19	0,01	0	0	1,41	1,08	0,2	105,57
Agric_SM	0	0	0,06	52,2	0,63	0,97	8,47	0,11	0,36	0,99	63,88
Solo Exp.	0	0,47	0	0,04	37,8	16,58	3,1	0,45	0	0,2	58,69
Solo Exp2	0	5,69	0	1,63	22,12	33,0	0,82	0	0	0	63,27
Pastagem	0	0	0	30,01	0,76	5,13	87,5	0	0,09	0	123,54
Cerrado	0	0	6,3	0	0,65	0,02	0	59,3	5,2	8,48	79,94
Mata_ciliar2	0	0	3,44	0,68	0,03	0	0,06	9,33	87,8	34,32	135,67
Mata_ciliar	0	0	0,99	0,93	0	0	0	29,41	5,47	55,4	92,22
Total de colunas	98,25	98,58	99,47	99,88	98,32	96,01	100	100	100,01	99,81	990,33

Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário – classificação Maxver (CBERS–JULHO)

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	100%	100%
Urbana	94%	55%
Agric_EI	89%	84%
Agric_SM	52%	82%
Solo Exp.	38%	64%
Solo Exp2	34%	52%
Pastagem	88%	71%
Cerrado	59%	74%
Mata_ciliar2	88%	65%
Mata_ciliar	56%	60%

Exatidão Global: 69%

Kappa: 66%

Matriz de erros para a classificação Maxver (CBERS– Agosto)

	Água	Urb	Agric_EI	Agric_SM	Solo_Exp	Solo_Exp2	Pastagem	Cerrado	Mata Ciliar2	Mata Ciliar	Total de linhas
Água	81,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81,71
Urbana	0	70,2	0	0	6,3	5,85	53,9	0	0	0	136,27
Agric_EI	0	0	37,4	1,39	0	0	0	0	0	0	38,83
Agric_SM	0	0	0	53,7	0	0	6,24	0	0	0	59,96
Solo Exp.	0	22,47	0	0	75,8	28,1	0	0	0	0	126,5
Solo Exp2	3,66	0	0	0	10,53	63,3	3,47	0	0	0	81,01
Pastagem	0	3,93	0	15,15	0	0	31,9	0	0	0	50,97
Cerrado	0	0	0	0	0	0	0	35,1	0	41,38	76,47
Mata_ciliar2	0	0	0	0	0	0	0	4,04	89,5	3,13	96,67
Mata_ciliar	0	0	0	0	0	0	1,91	60,2	10,5	55,2	127,94
Total de colunas	85,37	96,62	37,44	70,26	92,69	97,37	97,41	99,38	100	99,79	876,33

Exatidão do Produtor e Exatidão do Usuário – classificação Maxver (CBERS–Agosto)

	Exatidão do Produtor (erros de omissão)	Exatidão do usuário (erros de comissão)
Água	96%	100%
Urbana	73%	52%
Agric_EI	100%	96%
Agric_SM	76%	90%
Solo Exp.	82%	60%
Solo Exp2	65%	78%
Pastagem	33%	63%
Cerrado	35%	46%
Mata_ciliar2	90%	93%
Mata_ciliar	55%	43%

Precisão Global: 67%

Índice Kappa: 55%