



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MONTES CLAROS

**USO DO GEOPROCESSAMENTO NA
CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO
CANABRAVA NO MUNICÍPIO DE
GUARACIAMA, MG**

CÉSAR VINÍCIUS MENDES NERY

2010

CÉSAR VINÍCIUS MENDES NERY

**USO DO GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CANABRAVA NO
MUNICÍPIO DE GUARACIAMA, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientador
Prof. Dr. Marcos Koiti Kondo

JANAÚBA
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Setorial da UNIMONTES

N443u Nery, César Vinícius Mendes.
 Uso do geoprocessamento na caracterização física da
 bacia hidrográfica do córrego Canabrava no município
 de Guaraciama, MG [manuscrito] / César Vinícius
 Mendes Nery. – 2010.
 86 p.
 Dissertação (mestrado)-Programa de Pós-Graduação
 em Produção Vegetal no Semiárido, Universidade
 Estadual de Montes Claros-Unimontes, 2010.
 Orientador: Prof. D. Sc. Marcos Koiti Kondo.
 1. Geoprocessamento. 2. Sensoriamento Remoto. I.
 Kondo, Marcos Koiti. II. Universidade Estadual de
 Montes Claros. III. Título.
 CDD. 526.982

CÉSAR VINÍCIUS MENDES NERY

**USO DO GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA
BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO CANABRAVA NO
MUNICÍPIO DE GUARACIAMA, MG**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido, área de concentração em Produção Vegetal, para obtenção do título de Magister Scientiae .

APROVADA em 26 de março de 2010.

Prof. Dr. Marcos Koiti Kondo
UNIMONTES
(Orientador)

Prof. Dr. Luiz Henrique de Souza
UFMG
(Coorientador)

Prof. Dr. Luiz Henrique Arimura
Figueiredo
UNIMONTES
(Coorientador)

Profa. Dra. Gleyce Campos Dutra
UFVJM

**JANAÚBA
MINAS GERAIS – BRASIL**

À Elisângela, esposa e amiga, pelo inestimável apoio, incentivo e paciência; à Vitória, pelos momentos de alegria e felicidade, imprescindíveis, ao longo deste percurso; e aos meus pais, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Marcos Koiti Kondo, pela orientação, experiência e pelas valiosas discussões durante a elaboração do trabalho.

Ao Dr. Luiz Henrique de Souza, pela orientação e pela amizade demonstrada no transcorrer do trabalho.

Ao Dr. Luiz Henrique Arimura Figueiredo, pela orientação, pela amizade e disponibilidade demonstrada durante o trabalho.

Ao Dr. Rodinei Facco Pegoraro (responsável pelo Laboratório de Solos da UNIMONTES) e ao Técnico Universitário, Ismael de Jesus Ferreira Amorim, pela ajuda e empenho nas análises de solos.

Aos colegas Murilo César Osório Camargos, Guilherme Barbosa Vilela e Otávio Diniz Lopes, pela troca de experiências que tanto me enriqueceram de conhecimento e sabedoria.

Aos membros do Núcleo Interinstitucional de Estudos Ambientais do Norte de Minas NIEA NM, pela troca de experiências e apoio.

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	3
3 REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Modelo Digital de Terreno - MDT	4
3.2 Imagens de Sensoriamento Remoto.....	9
3.3 Mapeamento de Solos	13
3.4 Perdas de solo por erosão laminar	14
4 MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 A Área em Estudo.....	18
4.2 O Delineamento da Bacia e suas variáveis morfométricas	19
4.3 Geologia.....	20
4.4 Geomorfologia.....	21
4.5 A Caracterização dos solos	21
4.6 Uso e ocupação do solo.....	22
4.7 Erosão laminar.....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1 O Delineamento da Bacia e suas variáveis morfométricas	27
5.2 Variáveis Morfométricas Locais.....	30
5.2.1 Declividade.....	30
5.2.2 Orientação das vertentes.....	33
5.2.3 Curvatura Vertical.....	33
5.2.4 Curvatura Horizontal.....	34
5.2.5 A Forma do Terreno.....	38

5.3	Geologia.....	43
5.4	Geomorfologia.....	46
5.5	Solos	46
5.6	Mapa de Uso do Solo.....	51
5.7	Erosão Laminar	54
6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	ANEXOS	67

LISTA DE ABREVIATURAS

ADD - Azimute, Divisores e Drenagem
CBERS - Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres
CCD - *charge-coupled device*
CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais
COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETM - *Enhanced Thematic Mapper*
EUPS - Equação Universal de Perdas de Solo
GPS - Sistema de Posicionamento Global
IGC - Instituto de Geociências
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LANDSAT - *Land Remote Sensing Satellite*
LEGAL - Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDT - Modelo Digital de Terreno
MLME - Modelo Linear de Mistura Espectral
NASA - Agência Espacial Norte-Americana
ND - Níveis Digitais
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*
TM - *Thematic Mapper*
SAD 69 - *South American Datum 1969*
SIG - Sistema de Informação Geográfica
SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission*
VSEI - Vegetação Secundária em Estágio Inicial
VSEM - Vegetação Secundária em Estágio Médio
WGS 84 - *World Geodetic System 1984*

RESUMO

NERY, César Vinícius Mendes. **Uso do geoprocessamento na caracterização física da bacia hidrográfica do córrego Canabrava no município de Guaraciama, MG.** 2010. 54 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG.¹

A obtenção de informações para o estudo de bacias hidrográficas foi alavancado com o advento da informática e seus sistemas de informações geográficas, do sensoriamento remoto por meio das imagens de sistemas orbitais e dos modelos digitais de terreno criados a partir das imagens de radar. Este trabalho teve como objetivo o estudo de alguns parâmetros geomorfológicos na região dos cerrados do norte de Minas Gerais, mais especificamente na microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG, visando a fornecer subsídios para a comunidade, a extensão rural e demais partes interessadas. Foram utilizados dados da *Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM* e as imagens do Sensor *Thematic Mapper - TM* a bordo da satélite Landsat 5 para o estudo de variáveis morfométricas como: declividade, elevação, comprimento de rampa, curvaturas vertical e horizontal e Canais de Drenagem. O uso do solo, por meio do índice de vegetação NDVI, e a erosão laminar, por meio da equação universal de perdas de solo – EUPS, também foram modeladas a partir desses dados. Os dados SRTM permitiram a derivação de variáveis morfométricas, a delimitação da bacia, a modelagem da EUPS e caracterização dos solos. As imagens do sensor TM possibilitaram comparar o comportamento espectral dos solos em áreas de solo descoberto, a sua caracterização e discriminação de classes, bem como o seu uso. Os dados SRTM e as imagens TM do satélite Landsat 5 proporcionaram um detalhado estudo da microbacia do córrego Canabrava. Os altos valores de erosão laminar encontrados na microbacia estão associados às altas declividades, ausência de cobertura do solo e solos da classe Neossolos Litólicos, que não apresentam aptidão para cultivos agrícolas. Para redução desses problemas, devem ser adotadas diferentes ações de acordo com a capacidade de uso do solo. Nas áreas de maior declividade, inadequadas para produção agrícola, devem-se promover recomposição da flora nativa e o cercamento das nascentes que aí se encontram. Em áreas de menor declividade, adequadas ao uso como pastagens, devem-se priorizar a construção de terraços, bacias de captação e plantio em nível, como práticas de caráter mecânico e

¹ **Comitê de Orientação:** Prof. Dr. Marcos Koiti Kondo (Orientador); Prof. Dr. Luiz Henrique Arimura Figueiredo (UNIMONTES) (Co-Orientador); Prof. Dr. Luiz Henrique de Souza (UFMG) (Co-Orientador); Profa. Dra. Gleyce Campos Dutra (UFVJM).

promover a recuperação das pastagens de forma a melhorar a cobertura do solo como prática de caráter vegetativo. As perdas de solo por erosão laminar na bacia foram estimadas em aproximadamente 32507,25 t ano⁻¹.

ABSTRACT

NERY, César Vinícius Mendes. **Geoprocessing in the physical characterization of Canabrava stream Watershed in Guaraciama County, Minas Gerais State.** 2010. 54 p. Dissertation (**Master's Degree in Vegetal Production in Semi-Arid**) – Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, Minas Gerais, Brazil.¹

The information attainment for study of watersheds was raised with the advent of computer science and its systems of geographic information, of the remote sensing by means of the images of orbital systems and digital land models created from the radar images. This work aimed to study some geomorphologic parameters in the Brazilian Savanna in the north of Minas Gerais State, more specifically in Canabrava small watershed stream, Guaraciama, MG, seeking to supply subsidies to community, the rural extension and the others interested people. Data were used from Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM and the images of the Sensor Thematic Mapper - TM on board the Landsat 5 satellite for the study of morphometric variables as: declivity, rise, slope-length, vertical and horizontal curvature, Draining Canals. The soil use by means of NDVI vegetation index and the laminar erosion through of the universal equation of soil losses - EUPS, also were shaped from these data. The SRTM data allowed the derivation of morphometric variables, the watershed delimitation, the EUPS modeling and soils characterization. The TM images made possible to compare the spectral soil behavior in discovered soils, its characterization and discrimination of classes as well as its use. Data SRTM and TM-5 images provided a detailed study of the Canabrava small watershed stream. The high found values of laminar erosion in the microbasin are associates to the high declivities, absence of soil covering and soil of the class lithosols, that do not present aptitude for cropping. For reduction of these problems, different actions must be adopted in accordance with the capacity of soil use. In the areas of larger declivity, inadequate for cropping, resetting of the native flora and the springs delimitation must be promoted. In areas of lesser declivity, appropriate for pastures, it must be prioritized the construction of terraces, capitation watershed and plantation in level, as practical of mechanical character and promote the pastures recovery aiming to improve the soil covering as practice of

¹ **Guidance committee:** Prof. Dr. Marcos Koiti Kondo (Advisor); Prof Dr. Luiz Henrique Arimura Figueiredo UNIMONTES (Co-Advisor); Prof. Dr. Luiz Henrique de Souza UFMG (Co-Advisor); Profa. Dra. Gleyce Campos Dutra (UFVJM).

vegetative character. The soil losses for laminar erosion in the basin were estimated at approximately 32507,25 t year⁻¹.

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade dos cultivos agrícolas visa a, dentre outros aspectos, conciliar produtividade com preservação do solo e da água. Nessa busca, o estudo das microbacias se torna fundamental, pois é nelas que se dá o processo produtivo.

Esse estudo sempre foi dificultado pelo custo e demora na aquisição e processamento de dados topográficos para sua consecução. Com o advento da informatização, o processamento foi facilitado sobremaneira, a capacidade de processamento aumentou e o custo de equipamentos diminuiu, facilitando, assim, o acesso a computadores de maior capacidade. Os sistemas de informações geográficas (SIG) facilitaram as operações de processamento com uso de linguagens de programação e algoritmos.

A partir de 2000, com a disponibilização dos dados de sensoriamento remoto do programa *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) associados às tecnologias do SIG e computadores com maior capacidade de processamento, permitiram a modelagem de dados morfométricos para estudo das bacias hidrográficas.

Outros dados de sensoriamento remoto que permitiram um grande avanço no estudo das microbacias foram as imagens de sensores orbitais, como TM-Landsat, CCD-CBERS e outras mais. As imagens de satélite possibilitaram o estudo do uso atual dos solos, de seus atributos e sua classificação. É nesse contexto que se desenvolve o presente trabalho com o objetivo de estudar a aplicação de dados SRTM e de imagens TM do satélite Landsat 5 no estudo da microbacia do córrego Canabrava.

Além deste objetivo geral, temos os seguintes objetivos específicos:

- Explorar o potencial de aplicação dos dados SRTM nas diversas etapas da modelagem de erosão em microbacias, utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS);
- Aplicar a análise dos dados SRTM no traçado das redes de drenagem e na delimitação de microbacias;
- Avaliar o potencial das variáveis topográficas derivadas de dados SRTM como subsídio à preparação dos dados morfométricos.

2 JUSTIFICATIVA

A pressão econômica e a busca pela lucratividade podem levar os agricultores à degradação dos solos explorados em suas atividades agrícolas. Portanto, a orientação no uso e conservação dos solos se torna cada vez mais necessária. O estudo das microbacias como unidade de manejo e conservação tem encontrado barreiras no custo para obtenção de dados para mapeamento.

Com o advento do sensoriamento remoto, aumentou-se a coleta e disponibilização desses dados, diminuindo os custos relativos à obtenção de informações para a construção de modelos que auxiliem no estudo das bacias hidrográficas.

O desafio para a pesquisa atualmente é estudar e correlacionar os atributos, as classes e os diversos usos do solo, bem como a sua cobertura vegetal, construindo modelos mais adequados que ofereçam algo novo à extensão rural e aos próprios agricultores.

Este projeto tem como objetivo estudar esses parâmetros na região dos cerrados do norte de Minas Gerais, mais especificamente na microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG, com área de aproximadamente 4.500 ha, onde cerca de 90 famílias de pequenos agricultores exploram propriedades de 10 a 15 ha, em média, utilizando mão-de-obra familiar.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Modelo Digital de Terreno - MDT

A análise de bacias hidrográficas, além da interpretação visual, demanda dados topográficos, que podem ser obtidos por meio dos modelos digitais de terreno (MDT) ou modelos digitais de elevação (MDE). A técnica clássica de representação do relevo, utilizada durante muito tempo, foi o traçado manual de curvas de nível a partir de um levantamento topográfico ou fotos aéreas. Com a informática, surgiu uma nova técnica, a modelagem digital, que permitiu a automatização desse procedimento (ROCHA, 2007).

Segundo Felgueiras (1998), o MDT é uma representação da distribuição de um fenômeno espacial em forma matemática. O MDT serve para descrever o comportamento do fenômeno por meio de grades regulares ou triangulares. Conforme Rocha (2007), as grades regulares (Figura 1) são representações matriciais, onde cada elemento se encontra relacionado a um valor numérico. Nos procedimentos para cálculo da grade regular, podem ser utilizados interpoladores para estimar valores em locais não amostrados. Dentre os interpoladores mais usados temos: Vizinheiro mais próximo, Inverso do quadrado da distância e Krigagem com uso de geoestatística.

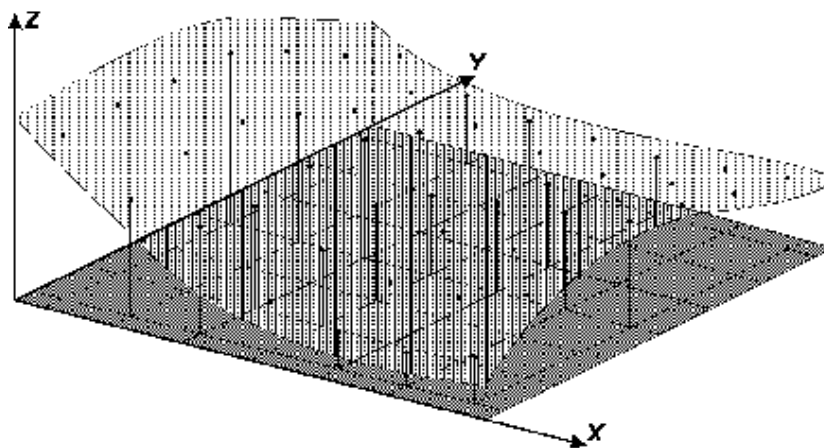


FIGURA 1. Modelo de superfície gerada por uma grade regular
Fonte: Namikawa (1995)

Na preparação de um MDT, há necessidade de aquisição de dados, que podem ser adquiridos por digitalização, restituição fotogramétrica, levantamentos de campo e sensoriamento remoto.

Os dados para preparação do MDT podem ser adquiridos por sensoriamento remoto de sensores orbitais, como os dados da Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) obtidos quando a nave espacial *Endeavour* orbitou a terra realizando uma missão topográfica. A missão liderada pela Agência Espacial Americana (NASA) em parceria com outras instituições, inclusive de outros países como Alemanha e Itália, gerou, em apenas onze dias, uma base de dados da superfície do planeta. Na missão realizada em 11 a 22 de fevereiro de 2000, o veículo espacial sobrevoou a terra a 233 km de altitude com inclinação de 57° coletando medidas tridimensionais da superfície, por uma técnica de sensoriamento remoto por radar, denominada interferometria. Para isso, a nave foi equipada com um braço de 60 m (Figura 2) em cuja extremidade foram instalados os mesmos sensores para criar um efeito de paralaxe. Os dados foram coletados com resolução de um e três arcos (VALERIANO, 2005). Os

dados foram distribuídos para toda a América Latina com resolução espacial de 90 x 90 m.

Valeriano (2005) estudou a correlação de dados SRTM com dados cartográficos obtidos por meio da digitalização de cartas topográficas na escala 1:50.000, elaboradas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC). Os mapas de altimetria, declividade e orientação de vertentes foram obtidos com os mesmos processos, sendo que os dados de altimetria do SRTM apresentaram diferenças imperceptíveis quando comparados com os dados cartográficos, com uma alta correlação ($R^2 = 0,998$). A declividade apresentou uma maior dispersão ($R^2 = 0,834$) devido, principalmente, a dois fatores, as diferenças de resolução e o próprio algoritmo.

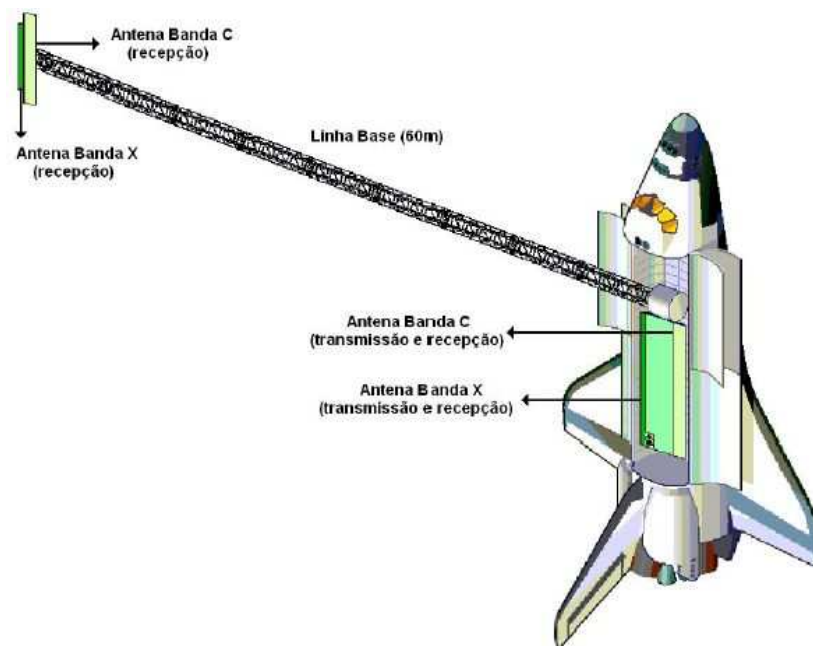


FIGURA 2. Ônibus Espacial Endeavour utilizado para a missão SRTM.
Fonte: Adaptado de Araújo (2006)

Para o primeiro caso, apesar do modelo ter sido elaborado com uma resolução de 20 m, os dados originais apresentam uma resolução de 90 m. O desempenho do algoritmo pode ser modificado com algumas adaptações. De acordo com Valeriano (2005), a comparação entre os dois modelos permitiu verificar a possibilidade de uso dos dados SRTM em escalas em torno de 1:25.000, representando uma importante perspectiva em levantamentos do meio físico para diagnósticos, e planejamento de uso do solo.

A declividade geralmente é agrupada em classes, podendo-se adotar diversos intervalos conforme a metodologia utilizada. A Embrapa (1999) propõe os seguintes intervalos de classes para análise da declividade (Tabela 1).

TABELA 1. Limites de classes de declividade para avaliação de terras segundo EMBRAPA (1999).

Classes de declividade	
Relevo	Faixa de declividade (%)
Plano	0 a 3
Suave ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	Acima de 75

O uso do MDT obtido dos dados SRTM permite a extração de variáveis morfométricas para o estudo das bacias, dentre elas Valeriano (2008a) destaca:

- Declividade: é o ângulo de inclinação da superfície em relação ao plano horizontal. Pode ser expressa em graus ou porcentagem.
- Orientação das vertentes: é uma medida de ângulo horizontal da direção do escoamento superficial, expressa em graus de azimute em relação ao norte verdadeiro.
- Comprimento de rampa: tem relação com o escoamento superficial, determinando velocidade do fluxo e grau de confluência. Faz parte da equação universal de perdas de solo (EUPS) como fator LS.
- Curvatura vertical: auxilia na identificação das unidades homogêneas do relevo que, por sua vez, está relacionada com acúmulo de água, minerais e matéria orgânica do solo.
- Curvatura horizontal: refere-se ao caráter convergente/divergente dos fluxos de matéria sobre o terreno, também está relacionada com acúmulo de água, minerais e matéria orgânica do solo.
- Canais de drenagem e divisores de água: é o ponto de partida para o traçado das microbacias e a organização funcional de seus elementos para modelagem da hidrologia fluvial. A rede de drenagem é uma das importantes variáveis na caracterização dos tipos de rochas e solos das bacias.

Medeiros *et al.* (2008) avaliaram a qualidade altimétrica dos dados SRTM em comparação com curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000 para os Estados de Goiás e Distrito Federal. O MDE dos dados SRTM apresentou coeficiente de determinação (R^2) acima de 0,99, com incertezas menores que 25 m e erro médio quadrático de 11 m, concluindo-se que os dados SRTM constituem uma excelente fonte de informação altimétrica.

Santos *et al.* (2009) aplicaram dados SRTM no estudo da microbacia leste do Araripe no interior do Nordeste Brasileiro, mais precisamente nos estados de Pernambuco e Ceará. Foi executada a aplicação das variáveis morfométricas, altimetria, declividade e formas do terreno em dados SRTM com resolução espacial de 30 m extraídas automaticamente.

3.2 Imagens de Sensoriamento Remoto

Além dos dados SRTM, o sensoriamento remoto fornece imagens de grande utilidade no estudo de bacias hidrográficas. O sensoriamento remoto é, segundo Novo (1992), a utilização de sensores para aquisição de informações sobre objetos ou fenômenos sem que haja contato direto entre eles. Os sensores óticos dependem da energia solar ou do calor emitido pela terra para registrar dados. A energia eletromagnética pode interagir com o alvo, sendo refletida, transmitida, absorvida e reemitida.

A intensidade da energia eletromagnética registrada por um sensor é apenas uma porção da energia refletida pelo alvo. A intensidade média do fluxo radiante refletido, originado de todas as intensidades provenientes de cada um dos infinitos pontos existentes na superfície é denominada de Radiância (L). A radiância pode ser medida para cada comprimento de onda (L_{λ}) (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Para uma mesma fonte de radiação e um mesmo comprimento de onda, a radiância pode sofrer oscilações. Assim, torna-se necessário um conceito novo que pode servir de parâmetro comparativo entre imagens de diferentes sensores ou de imagens de datas diferentes, a Reflectância.

A refletância é uma propriedade de determinado objeto em refletir a radiação eletromagnética nele incidente e é expressa por meio dos fatores de refletância (ρ), que podem ser expressos em termos espectrais (ρ_{λ}). Quando

existem duas geometrias envolvidas (zenital e azimutal) dizemos que a refletância é bidirecional (PONZONI e SHIMABUKURO, 2007). Estudando as curvas de refletância dos alvos, verifica-se que eles apresentam características imutáveis para dados comprimentos de onda, conferindo, assim, uma “assinatura espectral” aos alvos (Figura 3).

As imagens de sensoriamento remoto necessitam passar por processamento para melhor fornecer informações acerca dos alvos a serem estudados. Esse processamento deve ser realizado em *software* específico, sendo uma das alternativas o Sistema de informações Georreferenciadas – SPRING (CÂMARA *et al*, 1996), de distribuição gratuita pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

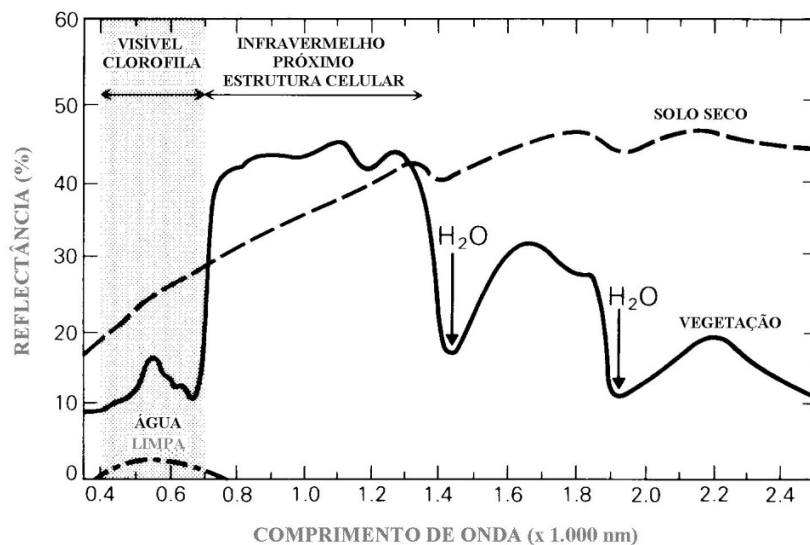


FIGURA 3. Curvas típicas de refletância espectral para vegetação verde, solo seco e água limpa.
Fonte: Pizarro (1999).

Segundo Florenzano (2008), as técnicas de processamento de imagens digitais podem ser agrupadas em três conjuntos: técnicas de pré-processamento, técnicas de realce e técnicas de classificação. Nas técnicas de pré-processamento são realizadas operações de remoção de ruído, atenuação de efeitos atmosféricos, calibração radiométrica e correção das distorções geométricas. O georreferenciamento das imagens para a correção geométrica pode ser realizado, consoante Crosta (1992), com aquisição de pontos de controle com GPS (Sistema de posicionamento global) em campo ou, como descrito por Mello *et al.* (2005), registro com base em outra imagem ortorretificada como, por exemplo, os mosaicos da NASA .

As técnicas de realce têm como objetivo a melhoria na qualidade visual das imagens para facilitar a interpretação. A técnica mais importante nesse grupo é a aplicação de contraste linear visando distribuir linearmente os níveis de cinza da imagem, por meio da análise de seu histograma. As operações aritméticas, adição, subtração, multiplicação e divisão, podem ser realizadas nas imagens a fim de realçar similaridades espectrais.

A técnica de classificação, segundo Crosta (1992), consiste na extração e identificação de feições com padrões espectrais comuns associados a uma determinada classe. Para Palmeira (2004), a classificação pode ser supervisionada, na qual o usuário tem conhecimento prévio das feições, adquirindo amostras representativas para cada uma das classes que deseja identificar na imagem; e a classificação não supervisionada, na qual o usuário não tem nenhum tipo de conhecimento prévio sobre as classes a serem geradas.

Dentre as operações aritméticas com imagens, destaca-se o cálculo de índices de vegetação. Segundo Liu (2006), esses índices servem para monitorar

e quantificar as condições e distribuições espaciais das vegetações, usando dados de reflectâncias espectrais da radiação eletromagnética.

Dentre os diversos índices existentes, o mais popularizado é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que é calculado pela diferença de refletância entre a faixa do infravermelho próximo (NIR) e o visível (VIS), sendo essa diferença normalizada pela soma das faixas NIR e VIS (LIU, 2006).

$$NVDI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (1)$$

Onde: *NIR* é a refletância entre a faixa do infravermelho próximo (0,75 a 1,1 μm) e *VIS* é a refletância entre a faixa do visível (0,4 a 0,7 μm).

O NDVI pode ser usado tanto para identificação de áreas sem qualquer cobertura vegetal como para classificar os diferentes usos do solo, baseado na sua refletância, tendo em vista que, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2007), segue a mesma tendência e guarda alta correlação com a imagem fração vegetação, que pode ser obtida a partir da aplicação do Modelo linear de Mistura Espectral (MLME).

O modelo linear de mistura espectral visa estimar a proporção dos componentes solo, vegetação e sombra, para cada pixel, a partir da resposta espectral nas diversas bandas, gerando as imagens-fração solo, vegetação e sombra. O modelo de mistura espectral pode ser escrito como:

$$RI = A*VEGEI + B*SOLOI + C*SOMBRAI + EI \quad (2)$$

Onde *ri* é a resposta do *pixel* na banda *i*; *a*, *b* e *c* são as proporções de vegetação, solo e sombra (ou água); *ei* é o erro na banda *i* e *i* indica a banda (SHIMABUKURO *et al.*, 1998).

Dos procedimentos usados na estimativa das proporções dos componentes de um dado pixel, o mais aceito atualmente utiliza o método dos mínimos quadrados para a solução de um sistema de equações lineares. A

descrição do método dos mínimos quadrados para modelo linear de mistura espectral é detalhada em Shimabukuro e Smith (1991).

3.3 Mapeamento de Solos

Além da vegetação, o estudo dos solos também tem sido realizado por meio do sensoriamento remoto. Com a crescente preocupação ambiental, as técnicas de sensoriamento remoto têm sido usadas para identificar, de maneira mais rápida, as propriedades químicas e físicas dos solos, delinear limites de seus tipos, classificá-los e mapeá-los visando ao planejamento de ações de conservação e preservação (LIU, 2006).

Segundo Liu (2006), o tamanho das partículas de solo influencia a refletância. Geralmente, agregados maiores, com superfícies irregulares e grande número de espaços intra-agregados têm menor refletância, mas superfícies mais uniformes formadas por areias mais finas têm uma refletância mais alta. Em solos argilosos com textura fina, a refletância diminui devido à umidade e matéria orgânica, que por sua vez guarda uma correlação direta com o carbono do solo.

O mapeamento de solos pode ser realizado com base na correlação entre as classes de solo e as classes de declividade. Marques *et al.* (2003) realizaram o mapeamento das classes de solos da região de Machado, MG, com base nessa correlação, tendo obtido bons resultados, comprovados por campanhas de campo para a checagem do modelo. Concluindo que é viável chegar numa classificação mais detalhada para os solos, por meio de cruzamento com outros planos de informação (geologia, hipsometria, entre outros) da região.

Dados SRTM foram utilizados por Silva *et al.* (2007) na realização do levantamento pedológico do Projeto de Assentamento Favo de Mel, no Estado

do Acre. De acordo com Silva *et al.* (2007), o uso dos dados SRTM possibilitou a geração do mapa de unidades fisiográficas da área em estudo que, por sua vez, foi utilizado para produzir um modelo pedológico preliminar e direcionar o processo de amostragem a campo, concluindo que seu uso dinamiza o processo metodológico como um todo, aumentando a eficácia das coletas de dados de campo, reduzindo o tempo de execução, diminuindo custos financeiros e aumentando a qualidade e a precisão do mapa.

Domingues *et al.* (2007) estudaram a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento na elaboração de mapa de solo com aumento de resolução espacial, nos municípios de Rincão e Jaboticabal – SP. Segundo os autores, foram utilizados: - A imagem do LANDSAT 7 ETM+, - A Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, - Os dados da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e - O mapa de solos na escala 1:500.000 obtido por meio da EMBRAPA (1999). Para a confecção do mapa de solos, foram sobrepostos, com o mesmo sistema de coordenadas geográficas, o mapa de litologias da área, o MDE e o mapa de declividade. Concluíram que o conjunto de métodos pode ser aplicado para fazer esse detalhamento pedológico em caráter preliminar, sendo essencial para validar esse detalhamento.

3.4 Perdas de solo por erosão laminar

O uso de equações empíricas na determinação das perdas de solos, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008), vem se tornando prática indispensável para o planejador conservacionista.

No planejamento conservacionista, a equação universal de perdas de solo - EUPS, proposta por Wischmeier e Smith (1978), pode ser usada como guia, determinando práticas mais adequadas à conservação do solo para uma determinada área.

A EUPS pode ser organizada em sistemas de informações geográficas – SIG com finalidade de quantificar as perdas de solos, principalmente pela erosão laminar.

Tomazoni e Guimarães (2005) utilizaram o SIG SPRING para sistematizar e quantificar as perdas de solo por erosão laminar na Bacia do Rio Anta Gorda no Paraná. No trabalho, a EUPS foi sistematizada por meio de uma linguagem de programação específica denominada linguagem de programação espacial para geoprocessamento algébrico – LEGAL. Os autores verificaram que o uso do sistema de informações geográficas SPRING na avaliação e no monitoramento ambiental em bacias hidrográficas mostrou-se uma ferramenta de grande eficiência no que concerne à caracterização das áreas em seus aspectos físicos e na quantificação da erosão laminar.

Brito *et al.* (1998) utilizaram a EUPS sistematizada no SIG Idrisi para estimar a perda de solo por erosão laminar em Iraí de Minas, MG, constatando que o sistema de informações geográficas se mostrou como uma ferramenta muito valiosa na integração dos dados de perda de solo por erosão laminar e na geração de produtos cartográficos para avaliar e monitorar a sustentabilidade ambiental do sistema agroalimentar dos cerrados.

Amorim e Silva (2009) estudaram a modelagem do processo de vulnerabilidade à erosão do Solo, utilizando o SPRING, concluindo que o *software* se apresentou satisfatório para o desenvolvimento de todo o trabalho, principalmente no processo de aplicação das equações presentes na metodologia utilizada, que foram feitas na interfase LEGAL.

3.5 O manejo de microbacias hidrográficas

O conceito de manejo de microbacias hidrográficas, para Lima (1996), tem, às vezes, causado controvérsias ou sido confundido como manejo de um curso d'água ou proteção da vegetação que recobre uma determinada região para

melhoria da qualidade da água. O manejo da bacia hidrográfica está relacionado com a conservação dos recursos ambientais visando a atender às necessidades da população. Para Brooks (1991), o manejo de bacias hidrográficas é definido como o processo de organizar e orientar o uso da terra e de outros recursos naturais numa bacia hidrográfica a fim de produzir bens e serviços, sem destruir ou afetar adversamente o solo e a água. Segundo Lima (1996), o manejo de bacias hidrográficas envolve uma série de ações ou práticas relacionadas à cobertura do solo e obras de engenharia. Assim, práticas de conservação do solo, mapeamento de solo segundo as classes de capacidade de uso, etc., são ferramentas empregadas no manejo de bacias hidrográficas.

Conforme Souza e Fernandes (2000), as bacias e sub-bacias hidrográficas vêm se consolidando como compartimentos geográficos coerentes para planejamento integrado do uso e ocupação dos espaços rurais e urbanos tendo em vista o desenvolvimento sustentado no qual se compatibilizam atividades econômicas com qualidade ambiental.

Uma bacia hidrográfica pode ser entendida como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes. Nas depressões longitudinais se verifica a concentração das águas das chuvas, isto é, do lençol de escoamento superficial, formando o lençol concentrado – os rios. A noção de bacia hidrográfica obriga naturalmente a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores d'água, cursos d'água principais, afluentes e subafluentes. Em todas as bacias hidrográficas deve existir uma hierarquização na rede, e a água escoar dos pontos mais altos para os mais baixos (GUERRA & GUERRA, 1997).

Atualmente, com a disseminação de dados digitais e aplicativos de sistema de informações geográficas, técnicas automáticas de delimitação de bacias hidrográficas substituíram as antigas técnicas de delimitação manual. Modelos Digitais de Elevação (MDE), que podem ser obtidos por meio de vetorização e interpolação de curvas de nível, a partir de uma folha topográfica,

e também através de dados aéreos e orbitais, são elementos fundamentais para a delimitação automática de bacias hidrográficas (DIAS *et al.*, 2004; FURNANS, 2001).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 A Área de Estudo

A área de estudo compreende a microbacia do córrego Canabrava, da bacia do córrego Jequitinhonha, localizada no município de Guaraciama, MG (Figura 4), distante 14 km da sede do Município. A microbacia está compreendida entre as coordenadas geográficas 17°10'59'' e 17°04'56'' de latitude Sul e 43°38'28'' e 43°34'56'' de longitude Oeste.

A população da microbacia do córrego Canabrava é composta em sua grande maioria por agricultores familiares, que utilizam tecnologias tradicionais com pequenas quantidades de insumos como corretivos, fertilizantes e defensivos.

A base da mão-de-obra é familiar com uma produção de subsistência e colocação do excedente no mercado local, não tendo, dessa maneira, uma remuneração satisfatória. A atividade econômica predominante é a agropecuária, destacando também a produção de milho, arroz e feijão.

O tipo climático na região da microbacia, segundo a classificação de Köppen, é Aw com temperaturas médias mensais acima de 18 °C, em todos os meses do ano com uma estação seca bem definida e precipitação abaixo de 60 mm no mês mais seco.

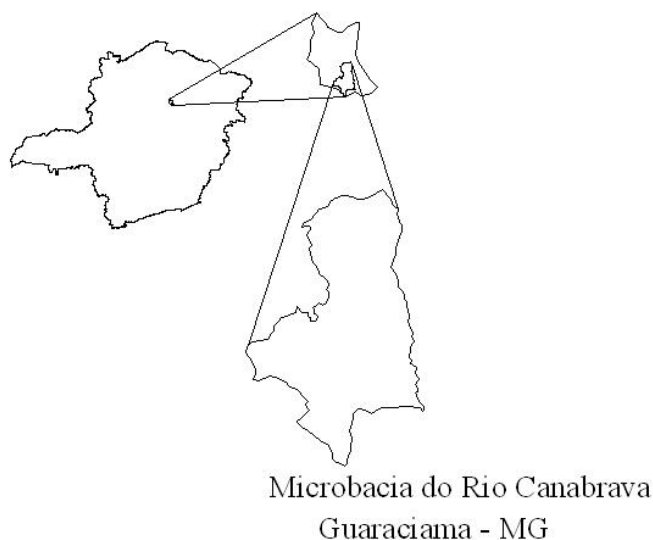


FIGURA 4. Localização da área de estudo.

A rede de drenagem possui disposição na forma dendrítica, apresentando ramificações irregulares de cursos de água em todas as direções. Os ângulos de inserção entre os canais de drenagem secundários e os principais são os mais variados. Este modelo expressa uma característica básica das bacias sedimentares, com pouca resistência à erosão.

4.2 O delineamento da bacia e suas variáveis morfométricas

Os dados para construção do MDT foram obtidos do site do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE, Projeto Topodata (VALERIANO, 2005), com resolução espacial de 30 m, referenciados ao Datum WGS 84. Esses dados foram importados no Sistema SPRING, sendo convertidos para o Datum SAD 69, no sistema de coordenadas UTM. As variáveis topográficas extraídas do modelo foram descritores locais do terreno: - Altimetria, - Declividade, -

Orientação de vertentes, - Curvatura horizontal, - Curvatura vertical, - Talvegues e Divisores de água utilizando metodologia desenvolvida por Valeriano (1999).

O produto das variáveis morfométricas denominado ADD (Azimute, Divisores e Drenagem) serviu de base para o delineamento da bacia, que constituiu no delineamento dos canais de drenagem e dos divisores de água baseado na derivação da forma de seções transversais, em que se buscam mínimos (drenagem) e máximos (divisores) locais, conforme metodologia proposta por Valeriano, 2008a. Após a definição da linha perimétrica da bacia, foi possível o cálculo da área da mesma, utilizando as ferramentas métricas do sistema SPRING.

Para um melhor conhecimento da bacia, foram elaborados histogramas de frequência das variáveis elevação e declividade.

A partir da imagem da declividade, foi realizado o seu fatiamento conforme EMBRAPA (1999) para o estabelecimento dos limites de classes. O mapa temático foi criado a partir da vetorização da matriz de dados, e a área de cada classe calculada por meio da ferramenta medidas de classes do SPRING.

Os mapas foram gerados por meio do aplicativo SCARTA, sendo as devidas áreas calculadas como descrito anteriormente.

4.3 Geologia

Os dados geológicos foram obtidos a partir do Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais de 2003 (Pinto *et al.*, 2003), sendo as imagens convertidas para o formato *shape file* e, posteriormente, importadas como um plano de informação (PI) no sistema.

4.4 Geomorfologia

O estudo da geomorfologia da área foi realizado a partir do modelo natural do terreno (MNT) gerado a partir dos dados SRTM. Foi elaborado um perfil transversal da bacia de modo a permitir uma melhor visualização de suas características geomorfológicas.

4.5 Caracterização dos solos

A caracterização dos solos foi realizada a partir do cruzamento de fontes de informação como: Mapa de solos do estado de Minas Gerais (CETEC, 2009), dados hipsométricos, mapa de declividade e mapa de forma do terreno.

As classes de declividade, dados hipsométricos e forma do terreno foram definidas de acordo com o modelo de correlação abaixo (Tabela 2).

A acurácia das informações obtidas foi verificada por meio de um levantamento pedológico expedito, com abertura de trincheiras e retirada de amostras, cujos procedimentos de amostragem foram executados de forma aleatória em cada tipo de solo levantado, com três repetições em distâncias variadas entre si, nas profundidades de 0 a 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 60 cm.

As amostras de solo foram submetidas às seguintes análises, conforme EMBRAPA (1997): pH em água, fósforo disponível (Mehlich-1) (P), fósforo remanescente (P-rem), potássio disponível (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade efetiva de troca de cátions (t), capacidade de troca de cátions a pH 7 (T), saturação por alumínio (m), saturação por bases (V), matéria orgânica (M. O.) e análise textural (argila, silte e areia).

Os dados obtidos foram relacionados com a sua resposta espectral, por meio da transformação dos níveis digitais (ND) em dados de refletância utilizando metodologia e coeficientes propostos por Chander *et al.* (2009). Os

coeficientes de calibração obtidos foram introduzidos em uma planilha eletrônica proposta por Gürtler *et al.* (2005) e seus resultados foram utilizados na programação em linguagem LEGAL.

TABELA 2. Modelo de correlação entre classes de declividade, elevação, forma da terra e grupamento de solos da microbacia do córrego Canabrava.

Classes de Declividade (%)	Elevação (m)	Forma da Terra	Classes de Solo
0 a 3	Entre 740 e 850	Convergente côncavo e Convergente Retilíneo	Gleissolo Háptico Tb Distrófico (GXbd)
0 a 3	Abaixo de 815	Divergente Retilíneo e Planar Retilíneo	Cambissolo Háptico Tb Distrófico (CXbc)
0 a 3	Acima de 815	Divergente Retilíneo e Planar Retilíneo	Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)
8 a 20	Acima de 780	Divergente Retilíneo, Planar Retilíneo e Divergente Convexo	Neossolo Litólico Distrófico (RLd)
20 a 45	Indiferente	Indiferente	Neossolo Litólico Distrófico (RLd)
45 a 75	Indiferente	Indiferente	Neossolo Litólico Distrófico (RLd)

4.6 Cobertura do solo

As imagens do sensor TM do LANDSAT 5 com data de 26/05/2009, obtidas por meio do catálogo de imagens do INPE, foram registradas, a partir dos mosaicos da NASA, utilizando a metodologia proposta por Mello *et al.* (2005).

Na fase de processamento das imagens, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Transformação dos níveis digitais (ND) em dados de refletância utilizando metodologia e coeficientes propostos por Chander *et al.* (2009). Os coeficientes de calibração obtidos foram introduzidos em uma planilha eletrônica proposta por Gürtler *et al.* (2005) e seus resultados foram utilizados na programação em linguagem LEGAL, em anexo.

- Cálculo do índice NVDI, por meio da linguagem de programação LEGAL no sistema SPRING.

- Aplicação do modelo linear de mistura espectral (MLME) gerando imagens-fração sombra, solo e vegetação detalhada em Shimabukuro e Smith (1991).

- Extração de amostras de *pixels* das imagens NDVI, fração sombra, solo e vegetação e comparação por meio de testes de médias utilizando o sistema SISVAR (FERREIRA, 2000).

- Segmentação da imagem escolhida utilizando o algoritmo crescimento de regiões e os coeficientes de similaridade 16 e área 25.

- Classificação supervisionada, com extração de no mínimo quatro amostras de cada tema.

- Conversão da imagem (matriz) em um mapa temático (vetorial).

As classes, identificadas após o processamento da imagem foram vegetação secundária em estágio médio (VSEM), vegetação secundária em estágio inicial (VSEI), lavoura, solo descoberto e pastagem.

4.7 Erosão laminar

Para o cálculo de perdas de solo por erosão, foi utilizada a equação universal de perdas de solo (EUPS) proposta por Wischmeier e Smith (1978), cujo teor é o seguinte:

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (3)$$

Onde:

- A é a quantidade de terra removida, em $t \text{ ha}^{-1}$
- R (erosividade) é o índice de erosão causada pela chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$).
- K (erodibilidade do solo) é a intensidade de erosão por unidade de índice de erosão da chuva, para um solo específico que é mantido continuamente sem cobertura, mas sofrendo as operações culturais normais em $t \text{ ha}^{-1}/(\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1})$;
- L (comprimento do declive) é a relação de perdas de solo entre o comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 25 m para o mesmo solo e grau de declive, adimensional;
- S (grau de declive) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa, adimensional;
- C (uso e manejo) é a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto, adimensional;
- P (práticas conservacionistas) é a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro abaixo. São utilizadas tabelas referentes às práticas conservacionistas, adimensional.

Os dados de erosividade (fator R) para o cálculo das perdas de solo foram obtidos por meio do *software* NetErosividade MG (MOREIRA *et al.*, 2008), tendo como referência uma coordenada localizada em um ponto central da microbacia.

A erodibilidade (fator K), que reflete a suscetibilidade à erosão para determinado tipo de solo, foi obtida por meio da associação dos valores encontrados segundo Reatto *et al.* (2000), conforme tabela 3.

O fator topográfico (LS), que relaciona a intensidade de perdas esperadas de solo em função do comprimento de rampa e da declividade, foi obtido por meio da Equação de Bertoni (1959).

$$LS = 0,0094.L^{0,63}.S^{1,18} \quad (4)$$

Onde:

LS = Fator Topográfico;

L = Comprimento de rampa/encosta (m);

S = Declividade média da rampa/encosta (%).

A técnica usada para o cálculo de L consistiu na aplicação de um *buffer* no SIG, para geração de um mapa de distâncias. A declividade foi obtida no SIG, pelo cálculo da primeira derivada da elevação em relação à distância horizontal.

TABELA 3. Valores de erodibilidade K, segundo Reatto *et al.* (2000).

Classes de Solo ¹	Fator K (t ha ⁻¹ /(MJ mm ha ⁻¹ h ⁻¹))
CXbd	0,0237
GXbd	0,0355
LVd	0,0263
RLd	0,0368

¹ Solos: Cambissolo Háptico Tb Distrófico (CXbd); Gleissolo Háptico Tb Distrófico (GXbd); Latossolo Vermelho Distrófico (LVd); Neossolo Litólico Distrófico (RLd).

Fator CP é a relação esperada entre as perdas de solo em áreas com cultivos e vegetação com áreas descobertas. A redução da erosão depende do tipo de cultura e manejo adotado, da quantidade de chuvas, da fase do ciclo vegetativo dentre outras variáveis, cujas combinações apresentam diferentes efeitos na perda de solo (STEIN *et al.*, 1987). As classes de uso e ocupação do solo, que serviram de base para o cálculo do fator CP foram obtidas por meio do mapa temático de uso e ocupação do solo cujas áreas foram quantificadas e seus pesos atribuídos de acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Pinto (1995), conforme tabela 4.

TABELA 4. Valores de C e P, adaptado de Bertoni e Lombardi Neto (1985) e Pinto (1995).

Classes de Uso do Solo¹	Fator C	Fator P
Solo descoberto	1,0	1,0
Reflorestamento	0,0001	0,5
Pastagem	0,001	1,0
VSEM	0,003	1,0
VSEI	0,007	1,0

¹ VSEM: Vegetação secundária em estágio médio VSEI: Vegetação secundária em estágio inicial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 O Delineamento da bacia e suas variáveis morfométricas

Os Modelos Digitais de Terreno – MDT são matrizes cujos pontos assumem a forma (x,y,z) , sendo as variáveis x e y as coordenadas que definem a localização dos pontos, e a variável z o valor de altitude dos pontos. Os Modelos digitais são grades retangulares que podem ser obtidas a partir dos dados SRTM.

Os dados SRTM que serviram de base para este trabalho foram obtidos do Projeto Topodata, cujos dados foram “krigados” com uso de geostatística e uma nova grade retangular criada, com resolução de 1”arco, ou seja, 30 x 30 m (VALERIANO, 2008a).

No estudo da microbacia podemos notar pelo histograma de elevação (Figura 5) que a mesma possui uma distribuição bimodal com uma área de baixada e uma área de relevo mais elevado, em torno de 1000 m de altitude. Os valores de declividade (Figura 6) denotam valores mínimos e valores máximos, comuns na ocorrência de relevos escarpados (VALERIANO, 2008b).

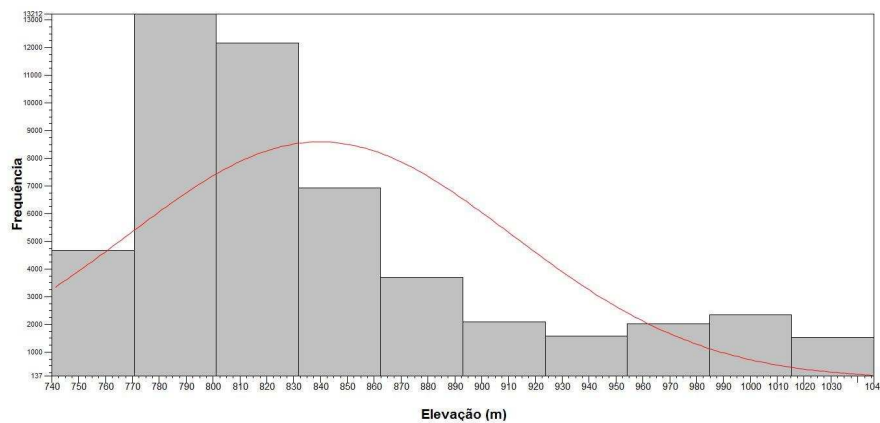


FIGURA 5. Distribuição de frequência dos dados de elevação da microbacia do córrego Canabrava, Município de Guaraciama, MG.

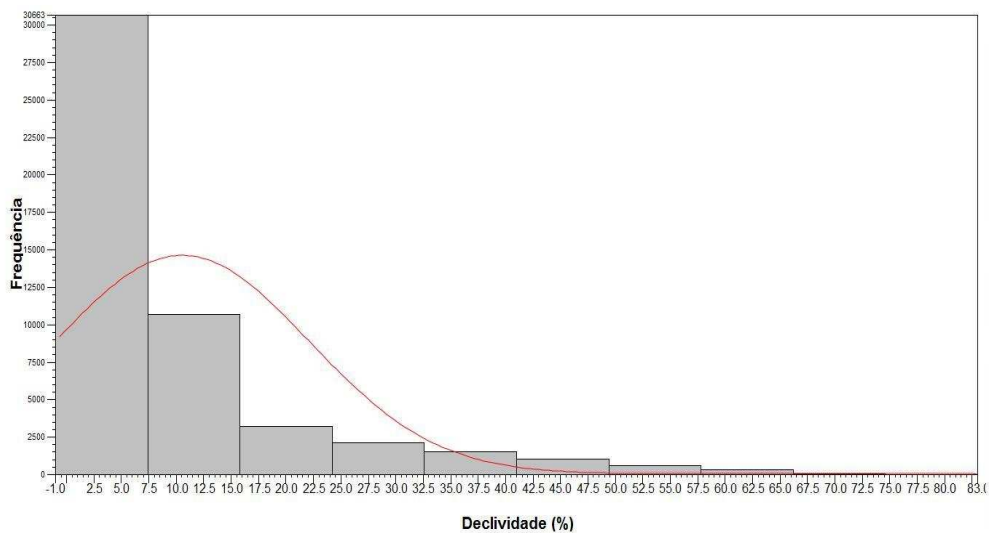


FIGURA 6. Distribuição de frequência dos dados de declividade da microbacia do córrego Canabrava, Município de Guaraciama, MG.

Os dados após importação em *software* SIG serviram para a definição de variáveis morfométricas e, em seguida, para o correto delineamento da microbacia.

Das variáveis morfométricas que serviram de base para o delineamento da bacia, a principal foi o produto denominado ADD (Azimute, Divisores e Drenagem) (Figura 7), que constitui no delineamento dos canais de drenagem e dos divisores de água baseado na derivação da forma de seções transversais, em que se buscam mínimos (drenagem) e máximos (divisores) locais (VALERIANO, 2008).

A área da bacia encontrada foi de 4547,9414 ha. O cálculo das isolinhas ou curvas de nível da bacia também pôde ser executado, por que adotou-se uma equidistância de 10 m.

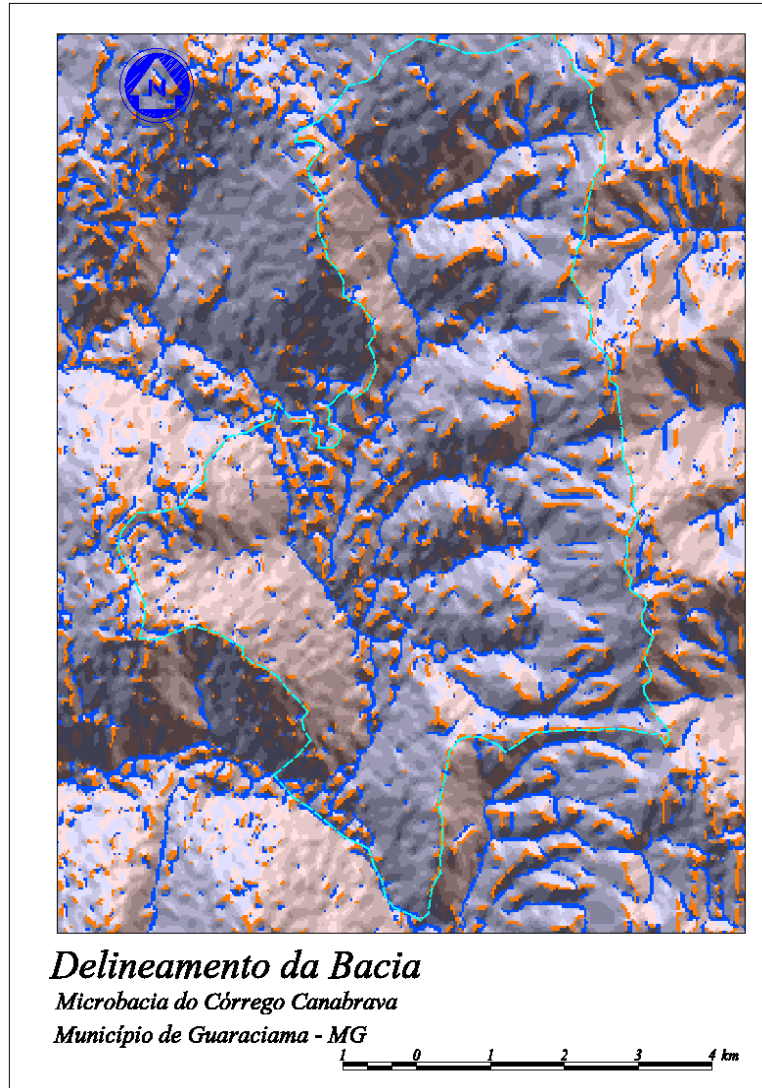


FIGURA 7. Delineamento da microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

5.2 Variáveis morfométricas locais

Após o cálculo das isolinhas e do delineamento da área da bacia, foram obtidas as seguintes variáveis morfométricas: - Declividade, - Orientação das vertentes, - Curvatura horizontal e - Curvatura vertical.

5.2.1 Declividade

A declividade é uma variável muito importante quando se trata de levantamentos conservacionistas, pois essa variável entra como *input* do cálculo de perdas de solo, além de ter uma estreita relação com os processos geomorfológicos.

A declividade pode ser definida como o ângulo de inclinação da superfície terrestre em relação a um plano horizontal, podendo ser expressa em graus ou em porcentagem. No cálculo da declividade, a partir do MDT, são analisados os desníveis entre os *pixels* vizinhos, considerando a distância entre eles, ou seja, a resolução da imagem.

Após o cálculo da declividade, o seu fatiamento de acordo com EMBRAPA (1999), os mapas matriciais foram convertidos em mapas vetoriais (Figura 8) para facilitar o cálculo de áreas por faixa de declividade. Os resultados encontrados constam na tabela 5.

TABELA 5. Classes de declividade da microbacia do córrego Canabrava, segundo critério da EMBRAPA (1999).

Classes de declividade		
Faixa de declividade (%)	Área (ha)	Área (%)
0 a 3	3465,73	76,20
3 a 8	425,67	9,36
8 a 20	516,17	11,35
20 a 45	138,65	3,05
45 a 75	1,72	0,04
Acima de 75	0,00	0,00

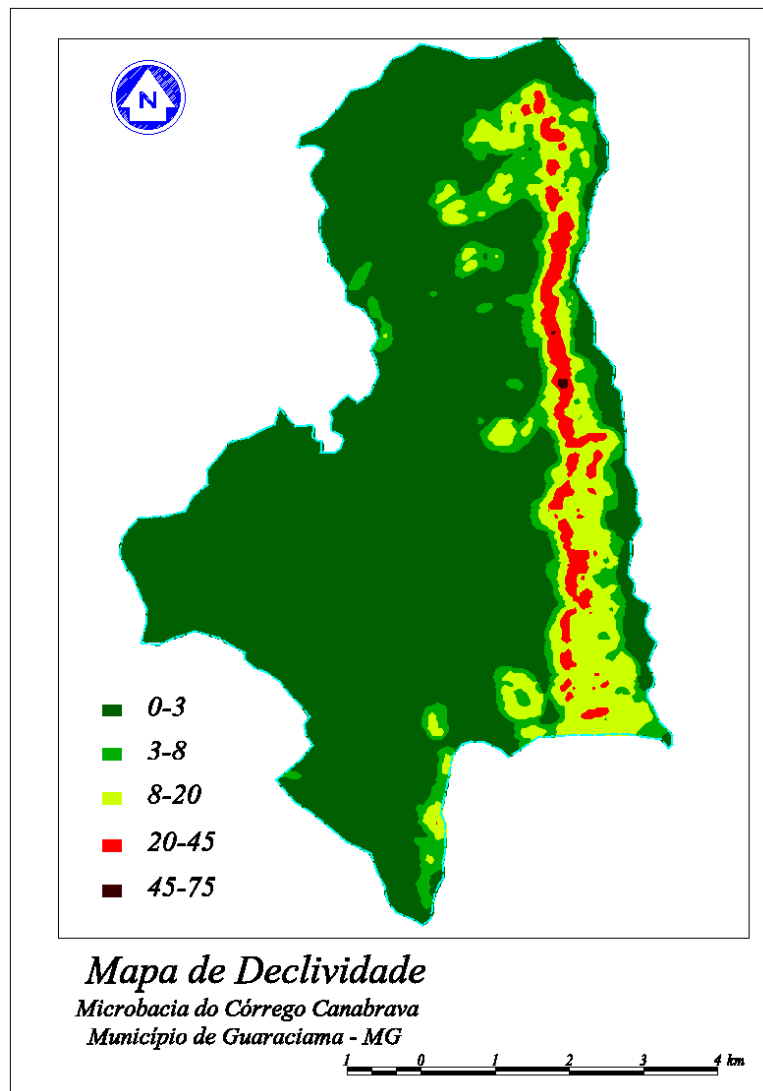


FIGURA 8. Mapa de declividade da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

A bacia apresenta, em sua maior parte (85%), áreas com baixas declividades (0 a 8%) que permitem a mecanização no seu cultivo.

Apresenta também uma área de 140,37 ha com alta declividade (20 a 75%) que não permitem a mecanização agrícola, uma vez que as áreas acima de 45% de declividade devem ser destinadas à preservação, conforme previsto no Código Florestal Brasileiro (Lei 4771, 15 de setembro de 1965).

5.2.2 Orientação das vertentes

A orientação das vertentes pode também ser chamada de exposição; é o ângulo azimutal da superfície em relação ao norte, podendo ser medida em graus (0 a 360°). A exposição está relacionada com a quantidade de radiação recebida por culturas agrícolas, principalmente em áreas de grande latitude, sendo essa exposição um fator a ser considerado na implantação dessas culturas. Para Valeriano (2008b), a principal utilização da orientação das vertentes está relacionada com a descrição da hidrologia local.

5.2.3 Curvatura Vertical

A curvatura vertical (figura 9) é a variação da declividade pela distância, sendo caracterizada pelo caráter côncavo e/ou convexo do terreno, podendo ser expressa em ($^{\circ} m^{-1}$). No SIG o cálculo da curvatura é feito baseado na diferença de declividade de *pixels* vizinhos, por meio de janelas móveis. As curvaturas se caracterizam em retas (curvaturas nulas) e côncavas e convexas (curvaturas positivas ou negativas), refletindo no processo de carreamento e acúmulo de água e matéria orgânica nos solos. Solos em curvatura côncava tendem a uma maior umidade, maior resistência à seca e um maior teor de matéria orgânica do solo. Solos com curvatura convexa tendem a ser mais secos e de menor profundidade.

Na bacia, os terrenos de curvatura côncava ou muito côncava representam 44,28% da área, ou seja, 2013,71 ha. Os solos com curvatura vertical convexa ou muito convexa representam 37,26% da área, isto é, 1694,75 ha. O restante da área (839,48 ha) é terreno de curvatura vertical retilínea.

As áreas de curvatura vertical côncava, por serem mais férteis e úmidas, são mais antropizadas, tendo sua área ocupada com pequenas lavouras e pastagens. É também nessas áreas que, geralmente, estão localizadas as residências dos pequenos agricultores. As áreas de curvatura vertical convexa, por serem menos úmidas e de solo pouco profundo, normalmente são exploradas apenas para extração de lenha ou para pastejo, de forma suplementar, principalmente na estação chuvosa. Devido à retirada da vegetação primária nessas áreas convexas, ocorre uma excessiva exposição do solo aos processos erosivos, devendo ser incluídas como áreas prioritárias no processo de recuperação.

5.2.4 Curvatura Horizontal

A curvatura horizontal é a variação da orientação das vertentes pela distância, podendo ser expressa em graus por metro. A curvatura é importante por nos orientar sobre o fluxo de água e matéria orgânica sobre o solo. Pode ser dividida em classes que variam de convergente a divergente, tendo como ponto central a classe planar. O seu cálculo é realizado analisando-se a variação da orientação entre *pixels* vizinhos, sendo o sinal negativo para divergente e o sinal positivo para convergente. As classes de curvatura horizontal constatadas na microbacia encontram-se na figura 10.

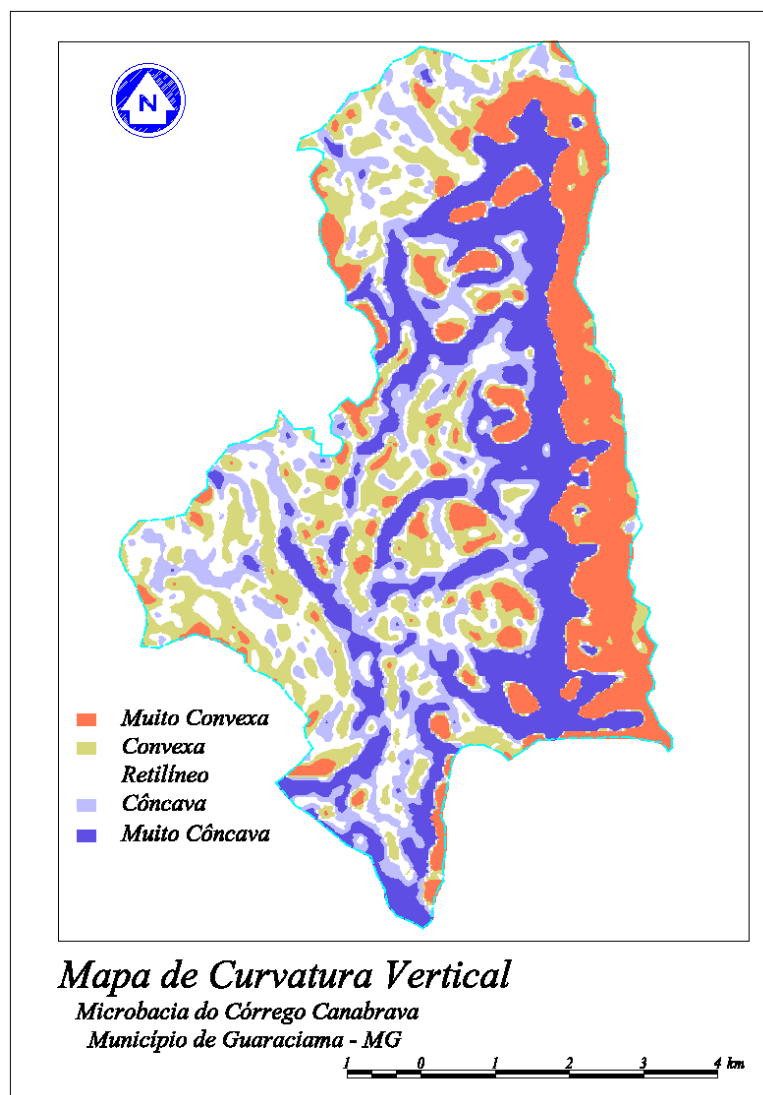


FIGURA 9. Mapa de curvatura vertical da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Na bacia, a classe de curvatura horizontal de maior representatividade é a classe planar com 27,9% da área, ou seja, 1267,67 ha, seguida pelas classes

divergente, com 1179,44 ha, 25,9% da área; convergente 779,03 ha, 17,1% da área; muito convergente 724,57 ha, 15,9% da área, e muito divergente com 597,2 ha, 13,1% da área. A curvatura horizontal apresenta características de ocupação semelhante à curvatura vertical, pois nas curvaturas do tipo convergente e muito convergente (33,1%), de disposição do tipo anfiteatro, ocorrem mais intensamente os processos de acúmulo de água, minerais e matéria orgânica no solo. Nessas áreas o uso do solo é mais intenso, principalmente com pequenas lavouras e pastagens. As áreas de exposição aberta (39,1%) são menos úmidas e geralmente de solos mais rasos. Devido a essas características, são pouco utilizados com exploração agrícola. Esses solos merecem um maior cuidado, com relação aos processos erosivos, principalmente quando associados a solos de curvatura vertical convexa ou muito convexa.

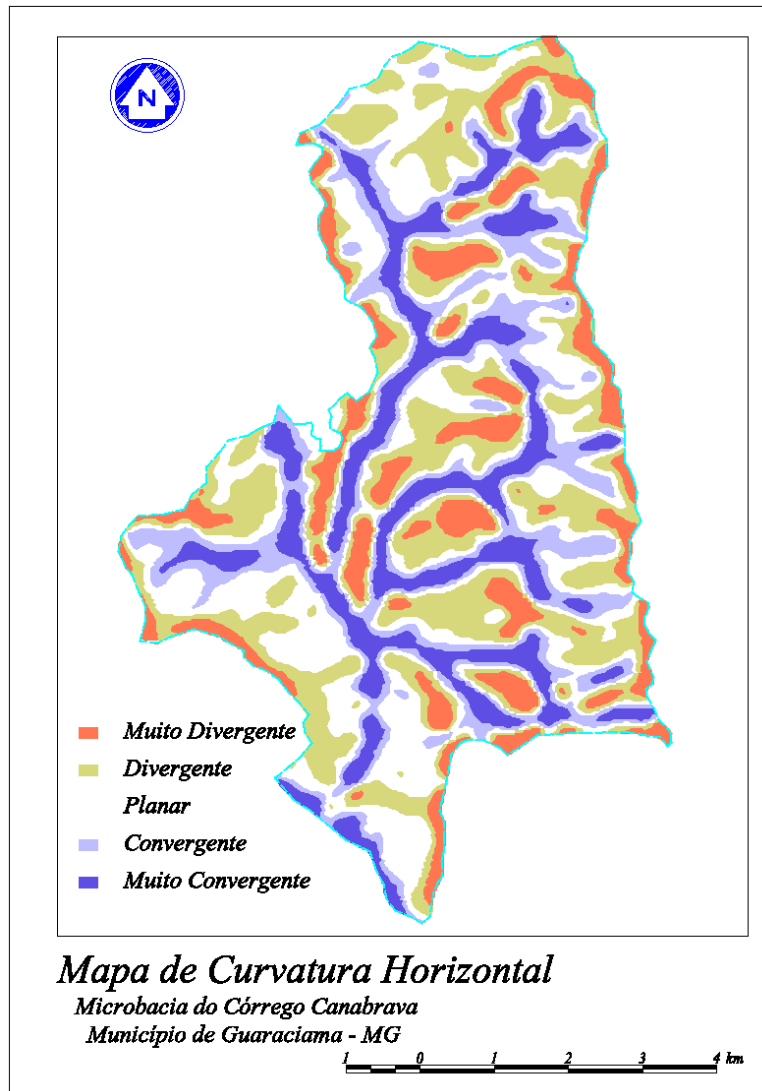


FIGURA 10. Mapa de curvatura horizontal da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

5.2.5 A Forma do Terreno

As curvaturas verticais e horizontais podem ser combinadas de forma a produzir um mapa da forma do terreno (Figura 11). A forma do terreno apresenta características locais interessantes a serem estudadas devido à sua relação com os processos de pedogênese, morfogênese, hidrologia e ecologia (VALERIANO, 2008a). As classes de forma do terreno encontram-se esquematizadas na figura 12.

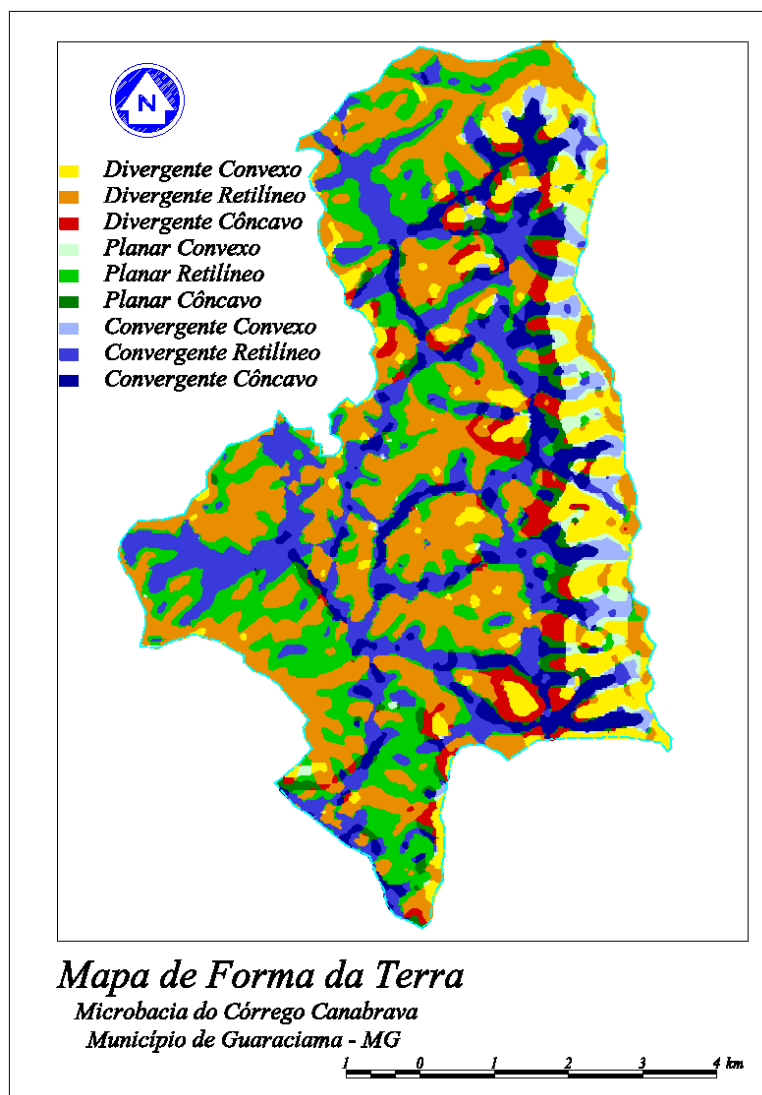


FIGURA 11. Mapa de forma da terra da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

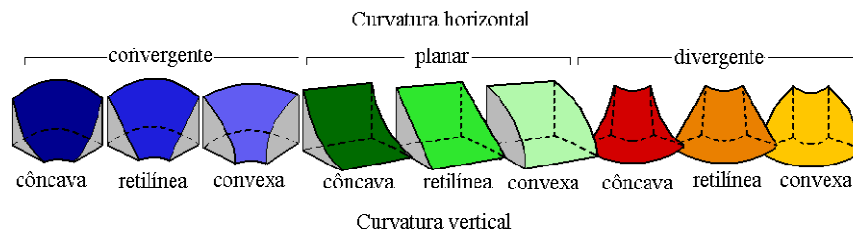


FIGURA 12. Esquemas de Forma da Terra
 Fonte: Valeriano (2008a).

Na tabela 6 temos a tabulação dos dados de forma da terra para a microbacia do córrego Canabrava.

As áreas cuja forma do terreno pertence à classe convergente côncavo (501,87 ha) e convergente retilíneo (818,29 ha) correspondem aos locais de maior umidade, maiores teores de matéria orgânica e, geralmente, solos de maior fertilidade. Essas classes de forma da terra, em altitudes menores que 850 m, estão associadas à ocorrência de solos da ordem Gleissolos (GXbd). Ocorre também nessas áreas uma maior diversidade da fauna e da flora, geralmente associada à presença de água. Essas áreas, em sua maior parte, constituem-se de áreas de preservação permanente (APP). A sua ocupação por cultivos de subsistência e pastagens se deu principalmente devido a sua relação com a água e a fertilidade dos solos.

Num outro extremo, temos a classe divergente convexo (441,48 ha), que se associa principalmente aos topos de morro, com solos da ordem RLd. São áreas menos úmidas, de baixa fertilidade, destinadas principalmente à preservação.

As áreas planares e divergentes, de mais alta altitude, associadas à unidade estratigráfica cobertura dendrítico-laterítica, deram origem a solos mais profundos (LVd), concordando com Sirtoli *et al.* (2008). Nessas áreas da bacia se deu a ocupação pela cultura do eucalipto.

TABELA 6. Dados da forma da terra da microbacia do córrego Canabrava

Classes	Área (ha)	Área (%)
Convergente Côncavo	501,87	11,0
Convergente Retilíneo	818,29	18,0
Convergente Convexo	111,39	2,4
Planar Côncavo	167,76	3,7
Planar Retilíneo	850,86	18,7
Planar Convexo	116,19	2,6
Divergente Côncavo	208,01	4,6
Divergente Retilíneo	1332,09	29,3
Divergente Convexo	441,48	9,7
TOTAL	4547,94	100

Um resumo das principais variáveis morfométricas da microbacia importantes na caracterização da bacia podem ser encontradas na tabela 7.

A microbacia apresenta um padrão de drenagem do tipo dendrítico, com densidade de drenagem acima de 10 km km^{-2} o que reflete uma menor capacidade de infiltração devido à formação geológica da região, sedimentação subaquosa formando quartzitos, metassiltitos e diamictitos. A altitude da bacia varia de 742 m a 1044 m com amplitude altimétrica de 302 m, conforme se observa na figura 13. A bacia apresenta um relevo colinoso a oeste e chapadas ao leste com vertentes escarpadas. A declividade varia de 0,34% a 82,27%, mas 76,2% da área da bacia apresenta declividade de 0 a 3%, refletindo o relevo suave em sua maior porção, com a presença de escarpas de alta declividade.

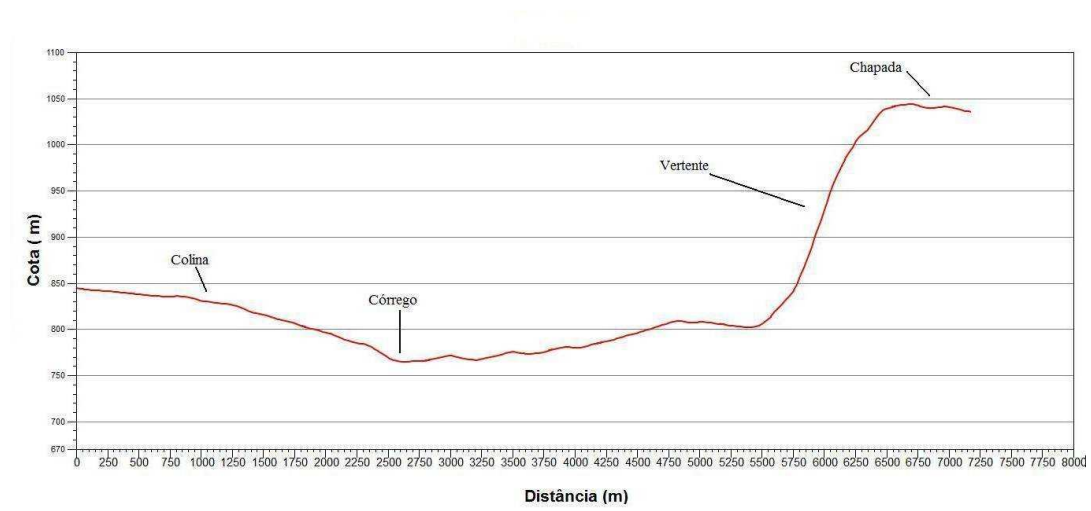


FIGURA 13. Perfil topográfico da microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG

TABELA 7. Dados morfométricos da microbacia do córrego Canabrava

Dados	Valores Encontrados		
	Mínimo	Médio	Máximo
Área (ha)		4.547,94	
Perímetro (m)		38.798,44	
Drenagem (m)		47.296	
Altitude (m)	742	840	1044
Declividade (%)	0,34	10,6	82,27

5.3 Geologia

A área da microbacia é caracterizada como pertencente à unidade estratigráfica do grupo Macaúbas, um rifte neoproterozóico que se desenvolveu nos limites da faixa de dobramentos Araçuai (ALMEIDA, 1977; UHLEIN, 1991; PEDROSA SOARES *et al.*, 1992; PEDROSA SOARES *et al.*, 2001). A formação Serra do Catuni, uma subdivisão da unidade foi apresentada por Noce *et al.* (1997) no mapeamento geológico realizado pela UFMG/COMIG.

A Formação Serra do Catuni, constituída por metadiamicritos, geralmente maciços, às vezes mostrando intercalações lenticulares de quartzitos e filitos ou metarritmitos. Os metadiamicritos apresentam grande espessura, da ordem de 150 a 2000 m. Trata-se de uma sedimentação gravitacional subaquosa, com predomínio de fluxos de detritos e com intercalações lenticulares de turbiditos, que podem ser correlacionados aos sedimentos glaciomarinhas pouco espessos da Formação Jequitaí. Pode-se, então, inferir uma idade de sedimentação de cerca de ~800 a 750 milhões de anos para a Formação Serra do Catuni (SALLUN *et al.*, 2008).

As unidades estratigráficas encontradas na bacia (Figura 13), de acordo com o Mapa Geológico de Minas Gerais (PINTO *et al.*, 2003), são: - Coberturas dendrítico-lateríticas (ENdl) formadas no período Neogeno acerca de 23,5 milhões de anos e – Formação Serra do Catuni (NP2sc) formadas por

quartzitos, metassiltitos e diamictidos de aproximadamente 850 milhões de anos, ou seja, do período Cryogeniano.

As coberturas dendrítico-lateríticas (ENdl) deram origem aos Latossolos (LVd), solos mais profundos e permeáveis que atualmente são ocupados, principalmente com a cultura do eucalipto. A Formação Serra do Catuni (NP2sc) deu origem aos Cambissolos (CXbd) e aos Solos Litólicos (RLd), cuja ocupação atual varia entre os demais usos.

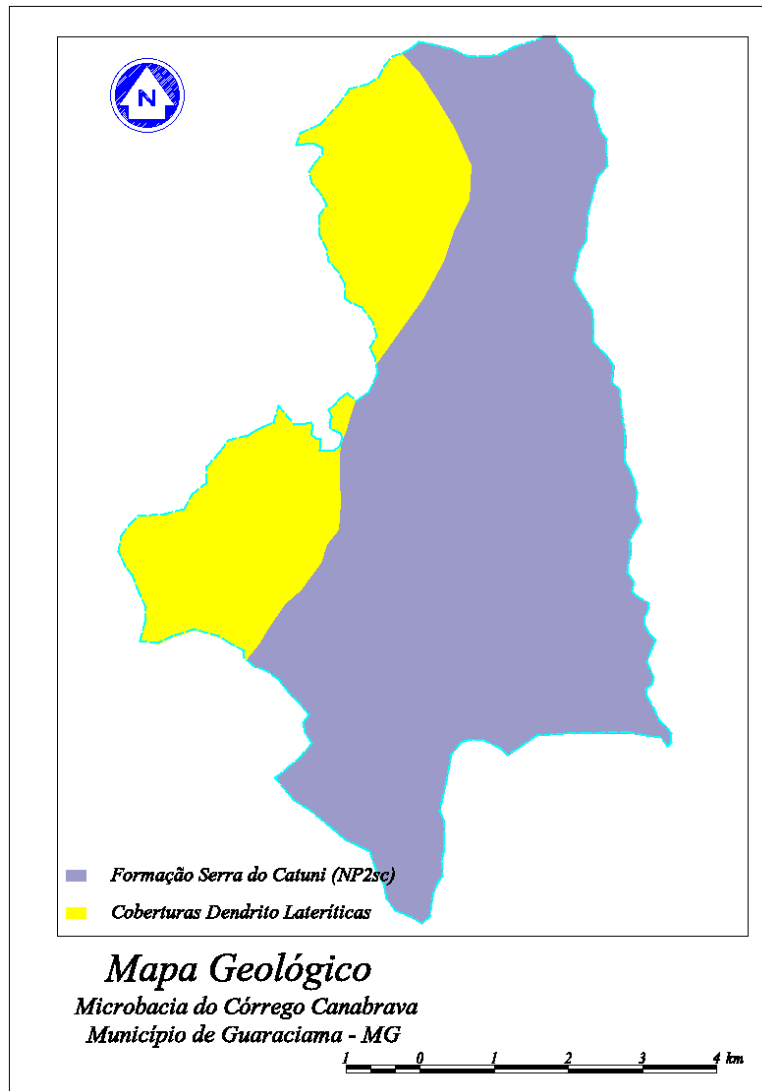


FIGURA 14. Mapa Geológico da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Fonte: Adaptado de Pinto *et al.* (2003)

5.4 Geomorfologia

O padrão de drenagem observado na área é do tipo dendrítico. O relevo apresenta-se, a oeste, como um relevo colinoso com vertentes suavizadas e formas arredondadas, declividade dominante de 0 a 15% e amplitude altimétrica menor que 100 m; ao leste, ocorrem as chapadas, com vertentes escarpadas, principalmente do tipo convexa com a formação de ravinas (Figura 14).

5.5 Solos

Os solos da microbacia foram mapeados a partir do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais (CETEC, 2009), imagens TM do satélite Landsat 5 e levantamento pedológico expedito. Os perfis foram classificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, levando-se em consideração as características físicas, químicas e mineralógicas.

Amostras de solo foram analisadas em laboratório encontrando-se os dados, referentes à fertilidade abaixo (Tabela 8).

TABELA 8. Dados médios dos atributos de fertilidade dos solos na camada 0-60 cm.

Solos ¹	pH	P (Mehlich) (mg dm ⁻³)	P remanescente (mg L ⁻¹)	K (mg dm ⁻³)	Ca (cmol _c dm ⁻³)	Mg (cmol _c dm ⁻³)
CXbd	5,2	0,3	20,3	23,3	1,0	0,4
GXbd	5,5	0,3	20,2	51,7	3,2	1,1
LVd	4,7	0,3	12,9	14,3	0,6	0,3
RLd	5,4	0,3	20,7	104,4	2,1	0,9

TABELA 8. Continuação.

Solos ¹	Al	H+Al	SB	t	T	m	V	M. O.
	(cmol _c dm ⁻³)					— (%) —		(dag kg ⁻¹)
CXbd	1,45	4,36	1,86	3,31	5,80	43,8	32,1	1,57
GXbd	0,22	4,43	4,46	4,68	8,89	4,8	50,2	2,52
LVd	1,14	6,95	0,88	2,02	7,83	56,5	11,2	4,37
RLd	0,63	4,19	3,23	3,86	7,42	16,3	43,5	4,49

¹ Solos: Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd); Gleissolo Háplico Tb Distrófico (GXbd); Latossolo Vermelho Distrófico (LVd); Neossolo Litólico Distrófico (RLd).

A análise textural dos solos da bacia foi realizada e os seus dados se encontram na tabela 9 abaixo.

TABELA 9. Dados médios dos atributos de textura dos solos na camada 0-60 cm.

Solos	Areia	Silte		Argila
		(g kg ⁻¹)		
CXbd	307	161	532	
GXbd	138	273	589	
LVd	195	483	322	
RLe	325	323	352	

A refletância das diferentes classes de solos foram estudadas por meio dos sensores TM do satélite LANDSAT 5. Os resultados foram submetidos ao teste de médias Scott-Knott a 5% de probabilidade, sendo apresentados na tabela abaixo (Tabela 10).

Com base no modelo de correlação adotado, foi gerado um mapa de solos da bacia (Figura 15).

Os solos da bacia (Tabela 11) são, em sua maioria (69,1%), solos pouco profundos das classes dos Cambissolos e Neossolos Litólicos. As áreas de curvatura vertical côncava, formadas nas áreas de drenagem da bacia, deram origem a solos da classe Gleissolos. Os Latossolos representam 9,7% da área e situam principalmente nas áreas planas de maior elevação.

TABELA 11. Classes de solo da microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Classes	Área (ha)	Área (%)
Cambissolo Háplico (CXbd)	964,44	21,2
Gleissolo Háplico (GXbd)	1667,55	36,7
Latossolo Vermelho Distrófico (LVd)	440,29	9,7
Neossolo Litólico Distrófico (RLd)	1475,66	32,4
TOTAL	4547,94	100

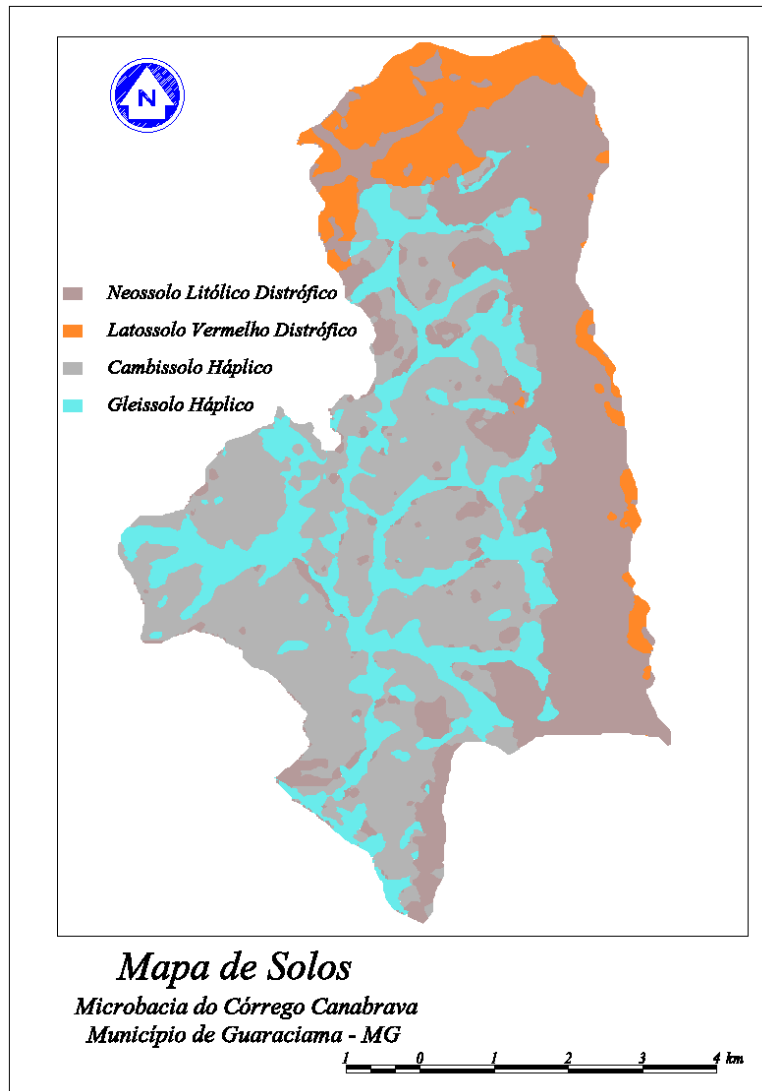


FIGURA 15. Mapa de solos da microbacia do córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

5.6 Mapa de cobertura do solo

O mapa de uso do solo pode ser obtido por meio da segmentação das imagens-fração obtidas a partir do MLME, ou a partir da segmentação da imagem gerada a partir do NDVI. Na figura abaixo há uma comparação entre essas imagens.

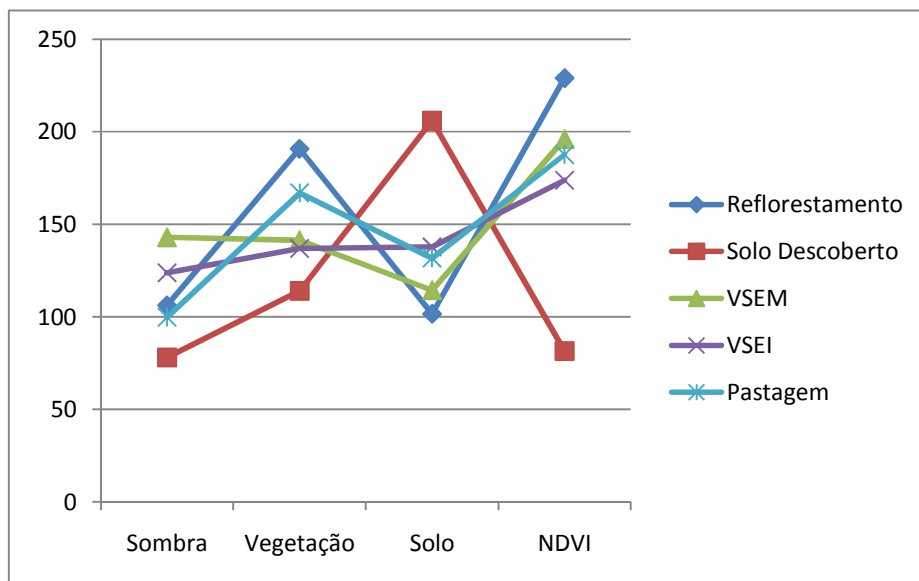


FIGURA 16. Curvas de resposta espectral das diferentes classes de uso dos solos nas imagens-fração e NDVI.

Na comparação das imagens, podemos notar que a NDVI apresenta valores bem próximos para as classes VSEM e pastagem podendo causar confusão entre essas duas classes, visto que as demais podem ser perfeitamente distinguidas, fato comprovado pela amostragem de *pixels* das classes quando são submetidas a um teste de médias (Tabela12).

O mapa de uso do solo, resultante da classificação supervisionada da imagem NDVI apresentada a seguir (Figura 17), foi dividido em cinco classes:

Pastagem, Reflorestamento, Solo descoberto, Vegetação Secundária em Estágio Médio (VSEM) e Vegetação Secundária em Estágio Inicial (VSEI).

Os resultados encontrados após a quantificação das áreas mapeadas encontram-se na tabela abaixo (Tabela 13).

TABELA 12. Valores médios de refletância convertidos para imagens (256 níveis) obtidas a partir do NDVI e do MLME.

	NDVI	Solo	Sombra	Vegetação	Média
Reflorestamento	229,0 Aa	101,6 Ad	106,2 Cc	190,8 Ba	156,9 a
Solo Descoberto	81,6 Cd	206,0 Aa	78,0 Cd	114,0 Bd	119,9 c
VSEM	196,0 Ab	114,4 Cc	143,0 Ba	141,4 Bc	148,7 b
VSEI	173,8 Ac	137,8 Bb	123,8 Cb	137,0 Bc	143,1 b
Pastagem	187,6 Ab	131,8 Cb	99,8 Dc	167,0 Bb	146,6 b
Média	173,6 A	138,3 C	110,2 D	150,0 B	143,0

Letras maiúsculas na linha diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade

Letras minúsculas na coluna diferem entre si pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade

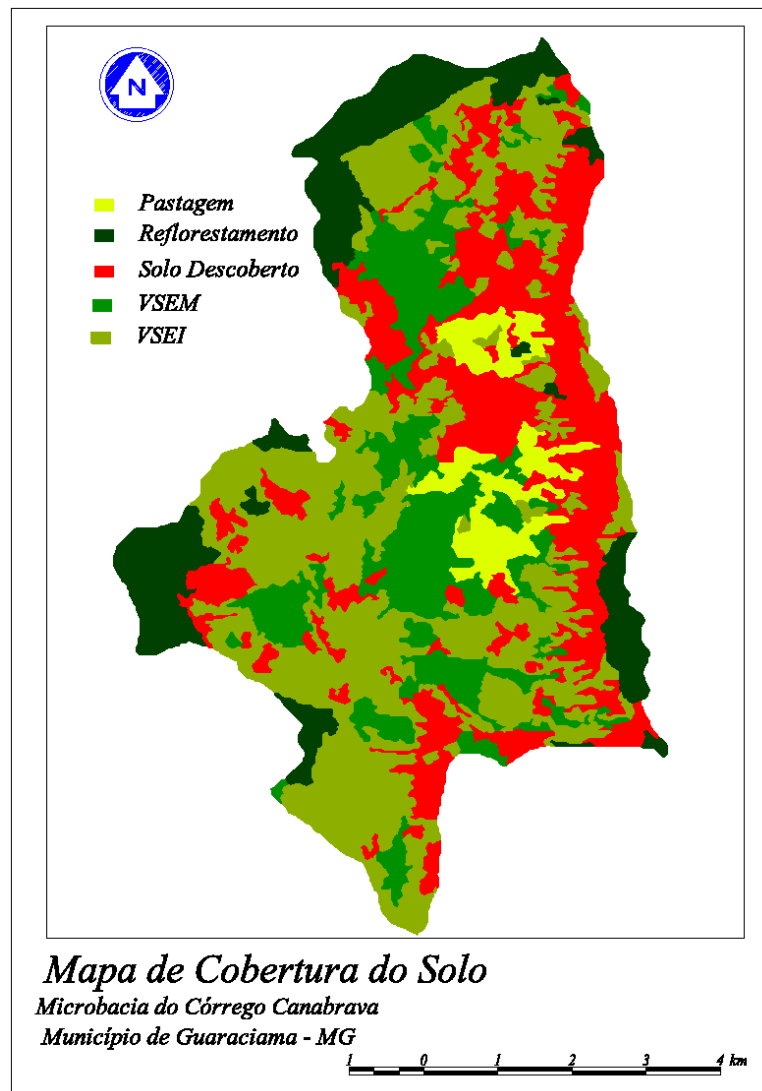


FIGURA 17. Mapa de uso do solo da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Analisando os dados da tabela acima encontramos um alto percentual de solo descoberto (26,76%) indicando uma alta suscetibilidade de uma grande área da bacia (1214,64 ha) aos processos erosivos do solo. A área ocupada com o cerrado, nos estágios inicial e secundário, perfaz um total de 2453,88 ha, ou seja,

54,0 % da área total da bacia. Por fim, as atividades de pecuária (pastagem) com 5,5 da área e reflorestamento com 13,8% da área total. Há de se chamar atenção para o fato de que, áreas ocupadas com pastagens degradadas podem ser classificadas como solo descoberto, e áreas ocupadas com pastagens com alta incidência de plantas invasoras podem ser classificadas como vegetação secundária.

5.7 Erosão Laminar

A erosão laminar, importante processo a ser quantificado no estudo de uma bacia, foi estimada conforme metodologia descrita, sendo seus resultados agrupados em nove classes (Tabela 14).

TABELA 13. Classes de uso do solo da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG

Classes	Área (ha)	Área (%)
Pastagem	250,62	5,5
Reflorestamento	628,80	13,8
Solo Descoberto	1214,64	26,7
VSEM	807,77	17,8
VSEI	1646,11	36,2

TABELA 14. Classes de erosão laminar da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Classes (t ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Área (ha)	Área (%)
< 2	2405,38	52,89
2 a 4	454,24	9,99
4 a 6	141,95	3,12
6 a 8	68,04	1,50
8 a 10	53,43	1,17
10 a 12	27,46	0,60
12 a 15	28,11	0,62
15 a 20	29,08	0,64
> 20	1340,25	29,47

Aproximadamente 30% da área da Bacia está sujeita a graves processos erosivos, com perdas acima de 12 t ha⁻¹ ano⁻¹, o que pode ser considerado, de maneira geral, como acima da tolerância, segundo Bertoni e Lombardi Neto (2008). A ocorrência dessas áreas (Figura 18) está associada mormente às elevadas declividades e a baixa cobertura do solo. A quantidade de solo total perdida na bacia é de aproximadamente 32507,25 t ano⁻¹ ocasionando a perda de fertilidade dos solos agrícolas e danos ambientais devido ao assoreamento dos pequenos córregos que compõem a bacia. O fator mais preocupante da perda de solos por erosão laminar na microbacia é a sua associação com altas declividades.

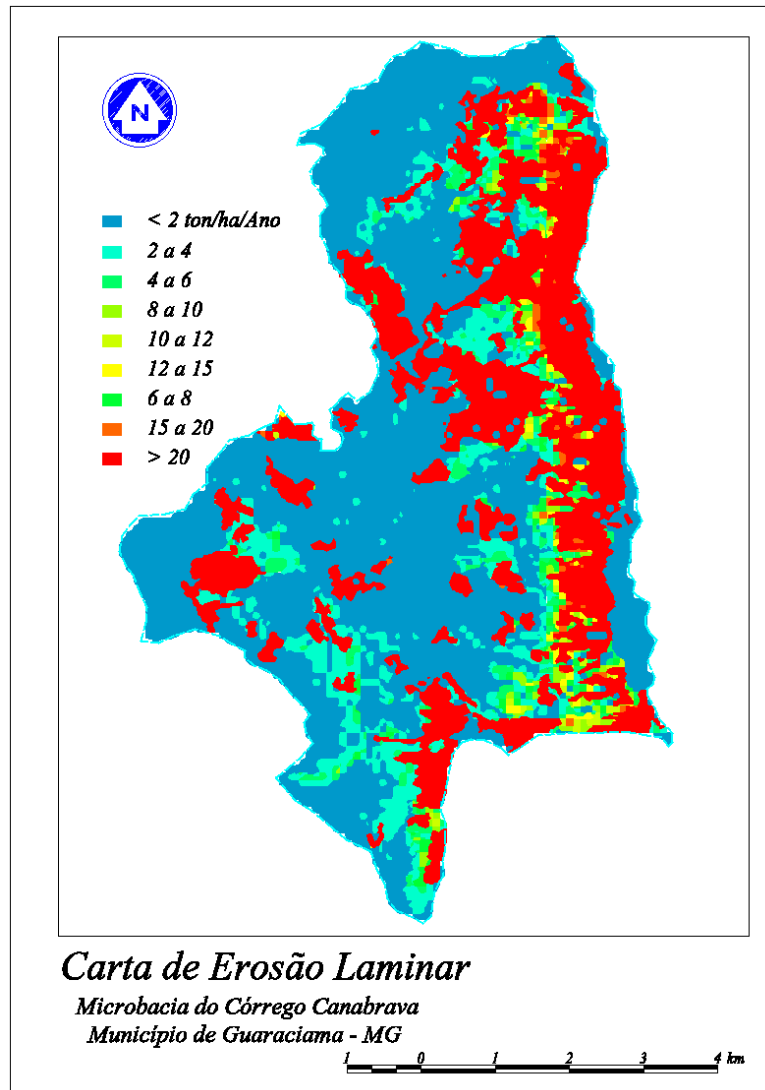


FIGURA 18. Carta de erosão laminar do solo da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG, em $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$.

Há diversos problemas ambientais na microbacia, destacando as perdas de solo por erosão, relacionadas aos elementos físicos da paisagem e à ocupação da terra. As áreas em que as perdas de solo por erosão laminar são mais intensas

ocorrem pela associação da ausência de cobertura do solo e altas declividades, principalmente ao leste da bacia (Figura 19).

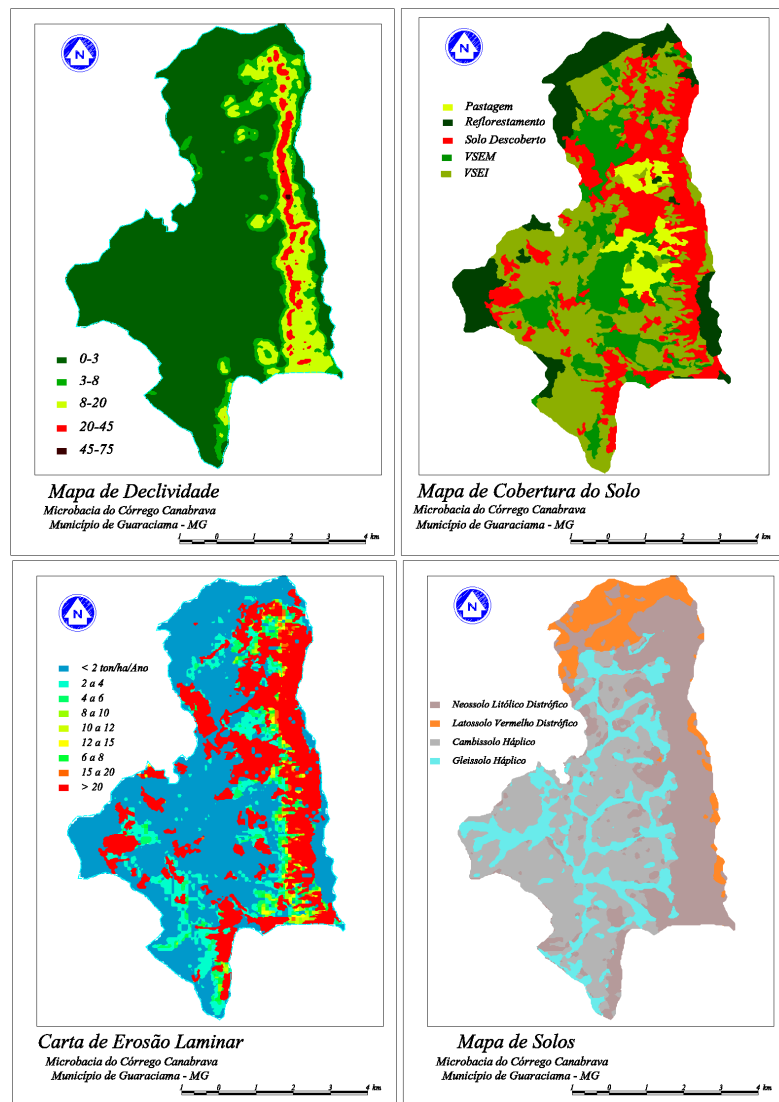


FIGURA 19. Mosaico de mapas da microbacia córrego Canabrava, município de Guaraciama, MG.

Para redução desses problemas, é imprescindível adotar ações de acordo com a capacidade de uso do solo. Nas áreas de maior declividade, inadequadas para produção agrícola, devem-se promover recomposição da flora nativa e o cercamento das nascentes que aí se encontram. Em áreas de menor declividade, adequadas ao uso de pastagens, devem-se priorizar a construção de terraços, bacias de captação e plantio em nível, como práticas de caráter mecânico, e promover a recuperação das pastagens de forma a melhorar a cobertura do solo, como prática de caráter vegetativo.

6 CONCLUSÕES

A degradação do solo e da qualidade da água na microbacia do córrego Canabrava, que se tornou intermitente, constitui-se num grave problema para a região. Com seu relevo ondulado, perdeu suas áreas vegetadas, para dar origem principalmente a plantios de eucalipto e lavouras de milho, arroz e feijão para subsistência.

Identifica-se na microbacia uma associação dos altos valores de erosão laminar com áreas de ocorrência Neossolos Litólicos, com solum pouco desenvolvido e presença de pedregosidade, sendo inaptos ao cultivo agrícola.

As imagens TM do satélite Landsat 5, juntamente com o modelo digital de terreno, proporciona um detalhado estudo da microbacia do Córrego Canabrava.

Os dados SRTM são adequados para o traçado das redes de drenagem e na delimitação de microbacias e permitem a derivação de variáveis morfométricas úteis ao estudo e caracterização da Bacia.

O modelo digital de terreno possibilita uma adequada modelagem da erosão laminar, na microbacia, utilizando a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 7, n. 4, p. 349-364, 1977.

AMORIM, R. F.; SILVA, F. M. Modelagem do processo de vulnerabilidade à erosão do solo utilizando o SPRING. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 5073-5080.

ARAÚJO, E. P. A. **Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em microbacias por geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE. 2006. 88 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355 p.

_____. **Conservação do solo**. Piracicaba: Livroceres, 1985. 392 p.

BERTONI, J. O espaçamento dos terraços em culturas anuais, determinados em função das perdas por erosão. **Bragantia**, Campinas, v. 18, p. 113-140, 1959.

BRITO, J. L. S. *et al.* Uso do geoprocessamento na estimativa da perda de solos por erosão laminar em Iraí de Minas-MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 501-512.

BROOKS, K. N. *et al.* **Hydrology and the management of watersheds**. Ames Iowa State: University Press, 1991. 392 p.

CÂMARA, G. *et al.* Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling. **Computers & Graphics**, London, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-Jun. 1996.

CHANDER, G., MARKHAM, B. L., HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, Boston USA, v. 113, p. 893-903, 2009.

CROSTA, A. P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, 1992. 170 p.

DIAS, L. S. O. *et al.* Utilização do radar interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v. 14, n. 2, p. 265-271, set. 2004.

DOMINGUES, A. L.; CRÓSTA, Á. P.; ASSAD, E. D. Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para elaboração de mapa de solo com aumento de resolução espacial: exemplos dos municípios de Rincão e Jaboticabal-SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5715-5722.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: EMBRAPA. **Produção da informação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **GIS para meio ambiente**. Curitiba: MundoGeo, p. 79-115, 1998.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows 4. 0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2000. p. 255-258.

FLORENZANO, T. G. Sensoriamento remoto para geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. cap. 2, p. 36-72.

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC MG. **Mapa de solos do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2009. 1 mapa. Escala 1:500.000.

FURNANS, J. E. **Topologic navigation and the pfafstetter system**. 2001. . Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia)-The University of Texas, Austin, 2001.

GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997.

GÜRTLER, S. et al. Planilha eletrônica para o cálculo da reflectância em imagens ETM+ Landsat. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 2, p. 162-167, 2005.

LIMA W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Florestais, 1996.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Editora UNIDERP, 2006. 908 p.

MARQUES, H. S. et al. Mapeamento das classes de solos da região de Machado-MG, a partir da correlação entre solos e relevo, utilizando técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 169-172.

MEDEIROS L. C., FERREIRA N. C., FERREIRA L. G. Avaliação da qualidade altimétrica dos modelos digitais de elevação obtidos a partir da missão SRTM e de curvas de nível do mapeamento sistemático nacional na escala 1:100.000 para o estado de Goiás e Distrito Federal. In: SIMPÓSIO NACIONAL CERRADO, 9., 2008, Distrito Federal. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, 2008.

MELLO, E. M. K. et al. O uso de imagens CBERS no monitoramento do desflorestamento da Amazônia Brasileira. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1313-1320.

MOREIRA M. C. *et al.* Neterosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1349-1353, 2008.

NAMIKAWA, L. M. **Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características.** São José dos Campos: INPE, 1995. 136 p.

NANNI, M. R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000, 365 p.

NOCE, C. M. et al. Nova divisão estratigráfica regional do Grupo Macaúbas na Faixa Araçuaí: o registro de uma bacia neoproterozóica. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 9., 1997, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBG, 1997. p. 29-31.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1992. 308 p.

PALMEIRA, A. F. **Técnica de sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicadas à gestão do território do município de Paragominas (Estado do**

Pará). São José dos Campos: INPE, 2004. 270 p.

PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* Toward a new tectonic model for the Late Proterozoic Araçuaí (SE Brazil) West Congolia (SW Africa) Belt. **Journal of South American Earth Sciences**, Oxford, v. 6, n. 112, p. 33-47. 1992.

_____. The Araçuaí-West Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, Boston, v. 110, p. 307-323, 2001.

PINTO, C. P., SILVA, L. C., LEITE, C. . **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2003. 1 mapa. Escala 1:1000.000.

PINTO, S. A. F. **Contribuição metodológica para análise de indicadores da erosão do solo utilizando técnicas de sensoriamento remoto, geoprocessamento e modelo predictivo**. Rio Claro: IGCE/UNESP, 1995. 136 p.

PIZARRO, M. A. **Sensoriamento remoto hiperespectral para a caracterização e identificação mineral em solos tropicais**. São José dos Campos: INPE, 1999. 185 p.

PONZONI, F. J. SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 127 p.

REATTO, A. *et al.* **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Olaria-DF**. 1 mapa. Escala 1:300.000. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000.

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. Juiz de Fora: Ed. do Autor, 2007. 220 p.

SALLUN, A. E. M.; FILHO, W. S., KARMANN, I. Diagnóstico do meio físico da Bacia Hidrográfica do Rio Congonhas, MG. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 16, n. 1, p. 37-50, 2008.

SANTOS, C. A.; FLORENZANO, T. G.; DALLA NORA, E. L. Estudo geológico-geomorfológico da microbacia leste do Araripe com aplicação de variáveis morfométricas derivadas a partir de dados SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3355-3362.

SHIMABUKURO, Y. E. et al. Using shade fraction image segmentation to evaluate deforestation in Landsat thematic mapper images of the Amazon region. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 19, n. 3, p. 535-541, Feb. 1998.

_____.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, Ann Arbor, v. 29, p. 16-20, 1991.

SILVA, S. S. et al. Uso de dados SRTM aplicados a levantamentos pedológicos: o caso do Projeto de Assentamento Favo de Mel, Acre / Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2187-2189.

SIRTOLI A. E. *et al.* Atributos do relevo derivados do modelo digital de elevação e suas relações com os solos. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-319, 2008.

SOUZA, E. R.; FERNANDES, M. R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 21, n. 207, p. 15-20, nov./dez. 2000.

STEIN, D. P. *et al.* Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na Bacia do Peixe-Parapanema. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 4., 1987, Marília. **Anais...** Marília: ABGE, 1987. p. 105-135.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A. Sistematização dos fatores da EUPS

em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 57, n. 3, p. 235-244, 2005.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada**: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1991. 295p.

VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.) **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008b. cap. 3, p. 73-104.

_____. **Estimativa de variáveis topográficas por geoprocessamento para modelagem da perda de solos**. Rio Claro: Faculdade Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual de São Paulo, 1999.

_____. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3595-3602.

_____. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008a. 72 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses**: a guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58 p.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO 1A. Programação em linguagem LEGAL para conversão de ND em refletância

```
// Exemplo de conversão de Imagem-ND para Imagem-Refletância aparente pela
// equação //geral proposta por Markham & Baker (1986);
//Cálculo do NDVI
{
Imagem SAVI255, IV255, ima1, ima2, ima3,
ima4, ima5, ima7, tm1, tm2, tm3, tm4, tm5, tm7, IV2("Landsat");
Numerico
re1("Numerico"), re2("Numerico"), re3("Numerico"), re4("Numerico"), re5("Numerico"), re7("Numerico"),
IVNA1("Numerico"), SAVI("Numerico");
tm1=Recupere(Nome="Banda1");
tm2=Recupere(Nome="Banda2");
tm3 = Recupere (Nome="Banda3");
tm4 = Recupere (Nome="Banda4");
tm5=Recupere(Nome="Banda5");
tm7=Recupere(Nome="Banda7");
re1=Novo(Nome="tm1_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
re2=Novo(Nome="tm2_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
re3=Novo(Nome="tm3_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
re4=Novo(Nome="tm4_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
re5=Novo(Nome="tm5_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
re7=Novo(Nome="tm7_refl", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
IVNA1=Novo(Nome="IV_Refalg", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
IV2 = Novo (Nome = "IVDN_RefAlg", ResX = 30, ResY= 30);
IV255 = Novo (Nome = "IV255", ResX = 30, ResY =30);
SAVI=Novo(Nome="SAVI", ResX=30, ResY=30, Escala=100000, Min=0, Max=50);
SAVI255 = Novo (Nome = "SAVI255", ResX = 30, ResY =30);
```



```

ima1 = Novo (Nome = "ima1reflect", ResX = 30, ResY= 30);
ima2 = Novo (Nome = "ima2reflect", ResX = 30, ResY= 30);
ima3 = Novo (Nome = "ima3reflect", ResX = 30, ResY= 30);
ima4 = Novo (Nome = "ima4reflect", ResX = 30, ResY= 30);
ima5 = Novo (Nome = "ima5reflect", ResX = 30, ResY= 30);
ima7 = Novo (Nome = "ima7reflect", ResX = 30, ResY= 30);
re1 = Digital (0.001896484 * (tm1 - 28));
re2 = Digital (0.003959682 * (tm2 - 10));
re3 = Digital (0.00333765 * (tm3 - 7));
re4 = Digital (0.004172521 * (tm4 - 4));
re5 = Digital (0.00268646 * (tm5 - 4));
re7 = Digital (0.00385787 * (tm7 - 3));
ima1= Imagem (re1 * 527.2915409);
ima2= Imagem (re2 * 252.5455552);
ima3= Imagem (re3 * 299.6119823);
ima4= Imagem (re4 * 239.663271);
ima5= Imagem (re5 * 372.2370459);
ima7= Imagem (re7 * 259.2103918);
IVNA1 = (re4 - re3)/(re4 + re3);
IV2= Imagem ((re4 - re3)/(re4 + re3));
IV255 = Imagem (255 * ((re4 - re3) / (re4 + re3)));
SAVI = ((re4-re3)/(re4+re3+0.5) * 1.5);
SAVI255 = Imagem (255* ((re4-re3)/(re4+re3+0.5) * 1.5));
}

```

ANEXO 2A. Programação em linguagem LEGAL para cálculo do fator LS

```
{
//Declaração
Digital S ("Declividade");
Digital L ("Altimetria");
Digital LS ("Indices");
//Instanciação
S= Recupere (Nome="Declividade1");
L= Recupere (Nome="Comprimento_Rampa1");
LS = Novo (Nome ="LS", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 20000, Min=
0, Max= 3000);
//Operação
LS =(0.0094*L^0.63*S^1.18);
}
```

ANEXO 3A. Programação em linguagem LEGAL para conversão do fator C

```
{
// Parte 1- Declaracao
// Definição de Variaveis
Tematico Uso ("Uso_do_Solo");
Numerico Usopeso ("UsoPond");
Tabela tabpeso (Ponderacao);
// Parte 2 - Instanciacao
// Recuperacao do mapa de Uso do solo
Uso = Recupere (Nome = "Mapa_Uso_Solo");
// Definicao da Tabela de Pesos
tabpeso = Novo (CategoriaIni = "Uso_do_Solo",
"Solo Descoberto" : 1.0,
"Reflorestamento" : 0.0001,
"Pastagem" : 0.01,
"VSEM" : 0.003,
"VSEI" : 0.007);
// Criacao do novo mapa de uso do solo ponderado
Usopeso = Novo (Nome = "UsoPond", ResX = 30, ResY = 30, Escala =
100000);
// Parte 3 - Operacao de Ponderacao
Usopeso = Pondere (Uso, tabpeso);
}
```

ANEXO 4A. Programação em linguagem LEGAL para cálculo da Erosão Laminar (EUPS).

```
{
//Declaração
Digital CP ("Numerico");
Digital LS ("Numerico");
Digital K ("Numerico");
Digital EUPS ("Numerico");
//Instanciação
CP= Recuper (Nome="CP");
LS= Recuper (Nome="LS");
K= Recuper (Nome="K");
EUPS = Novo (Nome ="EUPS", ResX = 30, ResY = 30, Escala = 10000,
Min= 0, Max= 3000);
//Operação
EUPS =(K*CP*LS*3441);
}
```

ANEXO 5A. Programação em linguagem LEGAL para conversão do fator K

```
{
// Parte 1- Declaracao
// Definição de Variaveis
Tematico Solo ("Solo");
Numerico Solopeso ("Numerico");
Tabela tabpeso (Ponderacao);
// Parte 2 - Instanciacao
// Recuperacao do mapa de Uso do solo
Solo = Recupere (Nome = "Solo1");
// Definicao da Tabela de Pesos
tabpeso = Novo (CategoriaIni = "Solo",
"CX" : 0.0237,
"GX" : 0.0355,
"LVd" : 0.0263,
"RL" : 0.0368);
// Criacao do novo mapa de uso do solo ponderado
Solopeso = Novo (Nome = "K", ResX = 30, ResY = 30, Escala =
100000);
// Parte 3 - Operacao de Ponderacao
Solopeso = Pondere (Solo, tabpeso);
}
```

ANEXO 5A. Programação em linguagem LEGAL para conversão do fator P

```
{
// Parte 1- Declaracao
// Definição de Variaveis
Tematico Uso ("Uso_do_Solo");
Numerico Pratpeso ("UsoPond");
Tabela tabpeso (Ponderacao);
// Parte 2 - Instanciacao
// Recuperacao do mapa de Uso do solo
Uso = Recupere (Nome = "Mapa_Uso_Solo");
// Definicao da Tabela de Pesos
tabpeso = Novo (CategoriaIni = "Uso_do_Solo",
"Solo Descoberto" : 1.0,
"Reflorestamento" : 0.5,
"Pastagem" : 1.0,
"VSEM" : 1.0,
"VSEI" : 1.0);
// Criacao do novo mapa de uso do solo ponderado
Pratpeso = Novo (Nome = "PratPond", ResX = 30, ResY = 30, Escala =
100000);
// Parte 3 - Operacao de Ponderacao
Pratpeso = Pondere (Uso, tabpeso);
}
```

ANEXO 6A. Programação em linguagem LEGAL para Modelagem das Classes de Solos

```
// Programa para determinação das classes de solos.
// Dados os mapas de declividade, Hipsometria e Forma da terra.
{
// Declaracao das variaveis temáticas
Tematico decl ("Declividade"), FT ("Forma_Terreno"), Solo ("Solo");
Numerico alt("Dados_Morfometricos");
// Instanciacoes das variáveis temáticas
decl = Recupere(Nome="Declividade1");
FT = Recupere(Nome="Forma_do_Terreno1");
alt = Recupere(Nome="Altitude1");
Solo = Novo(Nome="Solo",ResX=30,ResY=30,Escala=25000);
Solo = Atribua(CategoriaFim = "Solo")
{
"GX" : decl.Classe == "0-3" && (FT.Classe == "Convergente Côncavo"
|| FT.Classe == "Convergente Retilíneo") && alt < 850,
"CX" : decl.Classe == "0-3" && (FT.Classe == "Divergente Retilíneo" ||
FT.Classe == "Planar Retilíneo") && alt < 850,
"LVd" : decl.Classe == "0-3" && (FT.Classe == "Divergente Retilíneo" ||
FT.Classe == "Planar Retilíneo") && alt > 850,
"RL" : decl.Classe == "20-45" || decl.Classe == "45-75",
"RL" : decl.Classe == "3-8" && (FT.Classe == "Divergente Retilíneo" ||
FT.Classe == "Planar Retilíneo" || FT.Classe == "Divergente Convexo" ||
FT.Classe == "Divergente Côncavo" || FT.Classe == "Convergente
Convexo" || FT.Classe == "Planar Convexo") && alt > 780,
"RL" : decl.Classe == "8-20" && (FT.Classe == "Divergente Retilíneo" ||
FT.Classe == "Planar Retilíneo" || FT.Classe == "Divergente Convexo" ||
FT.Classe == "Divergente Côncavo" || FT.Classe == "Convergente
Convexo" || FT.Classe == "Planar Convexo" ) && alt > 780,
"RL" : Outros
};
}
```