

GABRIELA ALEXANDRA IPPOLITI RAMILO

**GEOPROCESSAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL E
ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO DE PASTOS EM MICROBACIA
NA ZONA DA MATA, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "*Doctor Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2002

GABRIELA ALEXANDRA IPPOLITI RAMILO

**GEOPROCESSAMENTO PARA CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL E
ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO DE PASTOS EM MICROBACIA
NA ZONA DA MATA, MG**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “*Doctor Scientiae*”

APROVADA: 20 de dezembro de 2002.

Elpídio Inácio Fernandes Filho
(Conselheiro)

Walter Antônio Pereira Abrahão

Reinaldo Bertola Cantarutti

Antônio Francisco Sá e Melo Marques

Prof. Liovando Marciano da Costa
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Marcelo e ao Thiago, por fazerem parte da minha vida.

Ao Brasil, pela sua carinhosa acolhida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas espaciais, por ter cedido a imagem do sensor TM/Landsat-5 utilizada neste estudo, especialmente ao Professor José Carlos Neves Epiphanyo, pelo estímulo.

Ao Professor Orientador Liovando Marciano da Costa, pelo ensinamento, pela confiança e pelo apoio.

Aos Professores Conselheiros Elpídio Inácio Fernandez Filho e Carlos Antônio A. Soares Ribeiro.

Aos integrantes da Banca Examinadora, Walter Antônio Pereira Abrahão, Reinaldo Bertola Cantarutti e Antônio Francisco Sá e Melo Marques, pelas sugestões apresentadas.

Ao Professor Carlos Ernesto G. R. Schaefer, pela colaboração.

BIOGRAFIA

GABRIELA ALEXANDRA IPPOLITI RAMILO, Filha de Miguel Ippoliti e Julia Rosa Ramilo, nasceu em 19 de outubro de 1968, em Montevideo, Uruguai.

Em 1995 graduou-se como Engenheira Agrônoma na Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Em 1997 conclui seus estudos de Mestrado em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos (SP).

Em 1998 iniciou o Curso de Doutorado no Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG).

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
CAPÍTULO I. GEOPROCESSAMENTO PARA DELINEAMENTO E ANÁLISE DA REDE DE DRENAGEM E DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO MUNICÍPIO DE VIÇOSA (MG)	1
RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO	3
1.1. Uso dos MDE para delineamento da rede de drenagem e das bacias hidrográficas	4
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
3. RESULTADOS	13
4. CONCLUSÕES	21
5. BIBLIOGRAFIA	22
CAPÍTULO II. GEOPROCESSAMENTO PARA DELINEAMENTO DE UNIDADES GEOAMBIENTAIS NA BACIA DO CÓRREGO IPIÚNA (MG)	25
RESUMO	25
ABSTRACT	26
1. INTRODUÇÃO	26
2. ÁREA DE ESTUDO	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5. CONCLUSÕES	46
6. BIBLIOGRAFIA	47

	Página
CAPÍTULO III. CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE FOTOGRAFIAS VERTICAIS PARA ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO	50
RESUMO	50
ABSTRACT	51
1. INTRODUÇÃO.....	52
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	54
3. RESULTADOS	57
4. CONCLUSÕES.....	62
5. BIBLIOGRAFIA.....	63
CAPÍTULO IV. COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA COBERTURA EM PASTOS DA ZONA DA MATA (MG)	65
RESUMO	65
ABSTRACT	66
1. INTRODUÇÃO.....	67
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	68
2.1. Estrutura de amostragem	68
2.2. Técnicas para a estimativa da cobertura	69
2.3. Análise estatística dos dados de cobertura	70
3. RESULTADOS	71
4. CONCLUSÕES.....	74
5. BIBLIOGRAFIA.....	75
CAPÍTULO V. ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO A PARTIR DE IMAGENS TM/LANDSAT-5 EM PASTOS DA ZONA DA MATA (MG)	76
RESUMO	76
ABSTRACT	77
1. INTRODUÇÃO.....	78
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	80
2.1. Amostragem para estimativa da cobertura do solo.....	80
2.2. Processamento digital da imagem TM/Landsat-5	82
2.3. Análise das relações entre dados de campo e dados orbitais	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	91
5. BIBLIOGRAFIA.....	92

RESUMO

IPPOLITI RAMILO, Gabriela Alexandra, D.S. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2002. **Geoprocessamento para caracterização geoambiental e estimativa da cobertura do solo de pastos em microbacia na Zona da Mata, MG.** Orientador: Liovando Marciano da Costa. Conselheiros: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Antonio A. Soares Ribeiro.

Este trabalho apresenta um estudo quantitativo da cobertura do solo em área de pastos na Zona da Mata, MG, que visou a avaliação de técnicas para a estimativa da cobertura e a geração de modelos de relacionamento entre essas estimativas e dados espectrais. Vários processamentos serviram de base para a estratificação da área de estudo, com objetivos de amostragem, e permitiram derivar informações relevantes vinculadas à modelagem hidrológica e morfometria de bacias, em escala municipal, e à distribuição de pedoformas e vegetação, no âmbito de microbacia. Foi implementada uma estratégia de amostragem em parcelas de 1 hectare nos estratos geoambientais dominantes, para avaliação da cobertura por meio de duas técnicas: intercepção dos pontos de uma corda e classificação de fotografias verticais da superfície. As estimativas obtidas foram comparadas estatisticamente e utilizadas para a determinação de correlações com os dados espectrais derivados de uma imagem TM/Landsat-5 sincrônica com os dados de campo. A maior parte das implementações foi realizada por meio de geoprocessamento, se destacando: (a) a geração de uma base de dados espaciais; (b) a classificação digital de dados (imagem TM e fotografias detalhadas da cobertura) (c) a análise digital do terreno; (d) o pré-processamento de dados orbitais; (e) a geração de imagens-índice e (f) a realização de análises espaciais. Os métodos de estimativa da cobertura do solo apresentaram resultados muito variáveis e estatisticamente diferentes para a maior parte das

classes de cobertura avaliadas, evidenciando que a seleção do método de campo pode influenciar a geração de modelos a partir de dados espectrais. Em concordância com esse resultado, a baixa predição dos valores espectrais a partir das estimativas da cobertura do solo, impossibilitou a obtenção de modelos com significado prático.

ABSTRACT

IPPOLITI RAMILO, Gabriela Alexandra, D.S. Universidade Federal de Viçosa, December of 2002. **Geoprocessing tools for geoenvironmental characterization and ground cover estimating in “Zona da Mata” pastures, MG.** Adviser: Liovando Marciano da Costa. Committee members: Elpídio Inácio Fernandes Filho e Carlos Antonio A. Soares Ribeiro.

This work presents a quantitative study of ground cover in a pasture area of "Zona da Mata" (MG) that aims empirical models generation using field and remote sensing data. With sampling objectives, several processes were applied for study area stratification that allowed to derive important information linked to: (a) hydrological modeling and watershed morphometry, at county level and (b) distribution of landform attributes and soils/landform identification at catchment scale. For ground cover evaluation at field level, a sampling strategy was implemented in 1 hectare plots of geoenvironmental dominant strata, using two techniques: point interception and vertical pictures classification. The estimates were statistically compared and then used for correlation determination with data from synchronous TM/Landsat-5 image. Most of implementations was accomplished using geoprocessing tools (Geographical Information Systems and digital image processing): (a) spatial data base generation; (b) digital classification of data (TM image and vertical pictures of the ground cover); (c) digital analysis of terrain features; (d) pre-processing of digital data; (e) spectral indices generation and (f) spatial analysis. The ground cover estimate methods showed highly variable results and were statistically different for most of the ground cover classes. This evidenced that field method selection can influence models generation using remote sensing data. Low prediction of the spectral values from the ground cover estimates disabled the models generation with practical meaning.

CAPÍTULO I

GEOPROCESSAMENTO PARA DELINEAMENTO E ANÁLISE DA REDE DE DRENAGEM E DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO MUNICÍPIO DE VIÇOSA (MG)

RESUMO

Este trabalho apresenta a utilização e avaliação de procedimentos de análise digital do relevo para o delineamento e a caracterização da rede de drenagem e das bacias hidrográficas, em estudo de caso no Município de Viçosa (MG). Foi gerado um Modelo Digital de Elevação (MDE) hidrologicamente consistente, por meio do procedimento de “aprofundamento” da rede de drenagem vetorial (“stream burning”); a partir do MDE foi derivada a matriz de escoamento acumulado e obteve-se o delineamento da rede de drenagem utilizando os métodos de “limiar fixo” e de “caminho de mínimo custo acumulado”. Esses métodos foram avaliados, quantitativamente, por meio de comparação com a rede de drenagem vetorial derivada da cartografia da região. Para as condições fisiográficas da região de estudo, o método de “aprofundamento” da rede de drenagem no MDE possibilitou a caracterização adequada do escoamento da água. O método do caminho de mínimo custo acumulado aplicado no MDE ajustado por “aprofundamento” da rede de drenagem, permitiu obter uma representação da rede de drenagem que apresentou ampla concordância com a representação cartográfica. As bacias hidrográficas da região em estudo possuem ampla variabilidade no tamanho dentro de uma mesma ordem de classificação, enquanto que ao considerar outras características como forma, elevação e declividade possuem valores semelhantes dentro de uma mesma ordem e entre ordens diferentes.

Termos de indexação: Sistema de Informação Geográfica, Modelo Digital de Elevação, bacia hidrográfica, rede de drenagem.

ABSTRACT

GEOPROCESSING TOOLS FOR DIGITAL DELINEATION AND ANALYSIS OF DRAINAGE NETWORK AND WATERSHEDS IN A COUNTY LEVEL

Watersheds and stream network delineating can be done from an input DEM (Digital Elevation Model) using functions available in current raster GIS (Geographical Information System). Derived features and surface descriptors are the primary input to most surface hydrologic models. This work reports the use of GIS tools for automatic identification and extraction of stream network, watersheds and morphometric and topographic features in a county level. Digital analysis of topographic features starting from 1:50.000 scale cartographic information made possible efficient extraction of the drainage network. Derived basins showed wide variability in size and more homogeneous conditions in another characteristics as form, elevation and slope.

Index terms: Geographic Information System, Digital Elevation Model, watershed, morphometry, drainage network.

1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios básicos da análise hidrológica é o delineamento e caracterização morfológica das bacias hidrográficas e da rede de drenagem associada. O conhecimento dessas características é de utilidade em numerosas aplicações, tais como na modelagem dos fluxos hidráulicos, do transporte e da deposição de poluentes químicos, na predição de inundações e na compreensão de questões geomorfológicas, geológicas e pedológicas (Ceballos & Schnabel, 1998; Thierfelder, 1998; Wang & Yin, 1998; Rocha & Kurtz, 2001).

Atualmente, o delineamento automatizado e posterior análise das bacias hidrográficas e da sua respectiva rede de drenagem pode ser feito a partir de representações digitais do relevo denominadas Modelos Digitais de Elevação (MDE), utilizando as ferramentas disponíveis na maior parte dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Garbrecht & Martz, 1999). De acordo com Ribeiro (2002), essa abordagem tem substituído, com vantagens, os métodos manuais tradicionalmente utilizados. Entre as vantagens citadas, se encontram a possibilidade de obtenção de resultados menos subjetivos, em menor tempo e replicáveis (Tribe, 1992; Ribeiro, 2002). Por outra parte, a exatidão das características extraídas a partir dos MDE é comparável à obtida por métodos manuais (Garbrecht & Martz, 1993; Eash, 1994).

Este trabalho apresenta a utilização e avaliação de procedimentos de análise digital do relevo para o delineamento e a caracterização da rede de drenagem e das bacias hidrográficas em estudo de caso, no Município de Viçosa (MG).

1.1. Uso dos MDE para delineamento da rede de drenagem e das bacias hidrográficas

A prática de usar o MDE para derivar representações da rede de drenagem e das bacias hidrográficas foi estimulada a partir do desenvolvimento do algoritmo denominado “Deterministic-8Node” (D8) (O’Callaghan & Mark, 1984). Este algoritmo determina que em uma grade de células que representam os valores altimétricos do relevo, o escoamento da água acontece a partir de cada célula para um dos seus oito vizinhos (ortogonais e diagonais) na direção da maior declividade. O processamento produz uma rede de células com forma de árvore que representa os caminhos do sistema de escoamento das bacias hidrográficas (Pozzebon, 2000). Tribe (1992) destacou que existem três situações, mas que não é possível atribuir uma direção de escoamento às células do MDE por meio desse algoritmo: (a) locais, com duas ou mais possíveis direções de drenagem; (b) áreas planas, onde as células apresentam a mesma elevação e (c) depressões espúrias ou falsas depressões (“sinks”), representadas por células com elevação menor àquela das células circundantes.

De acordo com Tribe (1992) e Garcia & Camarasa (1999), as depressões espúrias são muito frequentes nos MDE e derivam-se de erros nos dados de entrada ou erros introduzidos no processo de interpolação. As falsas depressões constituem um problema importante na geração de modelos de predição do escoamento, pois confundem o direcionamento do escoamento e devem ser removidas para a geração de um MDE consistente no ponto de vista hidrológico. Ribeiro (2002) destacou que a maioria dos interpoladores disponíveis nos SIG foi desenvolvida para a representação de variáveis distribuídas em forma contínua; entretanto, o relevo, sendo composto por divisores de água e vertentes, caracteriza-se por apresentar linhas de descontinuidades. A utilização desses interpoladores para a geração de MDE introduz distorções, como as depressões espúrias, que descaracterizam a rede de drenagem e, portanto, o escoamento superficial.

Um dos métodos mais simples utilizado para a remoção das depressões espúrias, envolve a diminuição das diferenças entre os valores altimétricos da depressão e aqueles das suas células vizinhas, por meio da aplicação de um filtro. Tribe (1992) apontou que esse método não remove todas as depressões espúrias. Jenson & Domingue (1988) destacaram que o método remove somente as depressões mais superficiais; por outra parte,

o processo de filtragem pode provocar a perda de informação relevante (Bevaqua & Floris, 1987). Recentemente, Santos (2001) realizou a modelagem do escoamento da bacia do Rio Turvo Sujo (MG) e para eliminação dos erros de interpolação aplicou um filtro de média no MDE. O trabalho não apresentou, porém, uma avaliação da qualidade do MDE ajustado nem da modelagem do escoamento da água derivada a partir desse procedimento.

Jenson & Domingue (1988) trabalharam o conceito de eliminação das depressões espúrias por meio do seu “preenchimento” até a elevação da célula vizinha de menor elevação. Este conceito tem sido implementado no módulo Grid do software ArcInfo (ESRI, 1997), na extensão Spatial Analyst do software ArcView 3.2 (ESRI, 1999) e na customização implementada pelo Center for Research in Water Resources da Universidade de Texas (Austin) denominada CRWR-PrePro (Olivera & Maidment, 1999) como parte do algoritmo *fill*, entre outros softwares.

Com o intuito de assegurar a convergência do escoamento superficial para a drenagem mapeada e a eliminação das depressões espúrias, Hutchinson (1989) desenvolveu um método de interpolação que foi posteriormente implementado no algoritmo TOPOGRID do software ArcInfo (ESRI, 1997). De acordo com Tribe (1992) as depressões que não são eliminadas por esse processamento, se encontram relacionadas a erros nos dados de entrada ou insuficiente densidade de valores altimétricos.

A grade que descreve a direção de escoamento de cada célula é fundamental para todas as análises hidrológicas realizadas no ambiente matricial de processamento de dados geográficos (Mizgalewicz & Maidment, 1996), pois a acurácia de todas as informações derivadas depende da modelagem do escoamento na superfície. Assim, como parte de um estudo de modelagem de transporte de agro-químicos por meio de SIG, Mizgalewicz & Maidment (1996) apresentaram um processo de ajuste do MDE para a obtenção da matriz de direção de escoamento, que envolveu o incremento arbitrário do valor altimétrico das células do MDE que se encontraram fora da rede de drenagem mapeada, retendo os valores originais do MDE nas células da rede de drenagem. O algoritmo *fill* utilizado no MDE ajustado por meio desse processamento, permitiu a eliminação das depressões espúrias na rede de drenagem “aprofundada”; esse processamento foi denominado “burning-in streams”. Os autores destacaram que devido às alterações nos valores altimétricos das

células, a matriz ajustada não pode ser utilizada para outro propósito que não seja a estimativa da direção de escoamento.

Algumas limitações têm sido descritas para a técnica de “aprofundamento” da rede de drenagem, fundamentalmente em áreas planas. Saunders & Maidment (1996) observaram distorções nos limites de bacias, enquanto que Reed (1999), citado por Saunders (1999), observou resultados semelhantes e destacou que a diferença introduzida no processamento, entre as elevações da rede de drenagem e as células da superfície, possui uma influência significativa na forma em que as direções de escoamento são atribuídas nas áreas planas. Mizgalewicz & Maidment (1996) destacaram que o valor adicionado às células localizadas fora da rede de drenagem é arbitrário, porém deve ser sempre superior ao valor altimétrico da maior elevação do MDE.

Hellweger (1997) mostrou que o processo de “aprofundamento” da rede de drenagem introduziu drenagens paralelas em regiões de relevo plano. Para correção de algumas dessas anomalias, vários ajustamentos do MDE tem sido propostos (Garbrecht & Martz, 1999b; Hellweger, 1997; Ribeiro, 2002). De acordo com Rubert (2000), em regiões de topografia acentuada, com hidrografia bem encaixada, o preenchimento das depressões no modelo aprofundado é suficiente para a geração de um MDE hidrologicamente consistente; porém, essa mesma condição não é verificada nas regiões de planícies, onde se detecta acentuada discrepância entre o trajeto dos cursos de água e a drenagem numérica (Garbrecht & Martz, 1999a). Uma vez preenchidas as depressões e conhecidas as direções de escoamento, a rede de drenagem pode ser delineada por meio de diferentes procedimentos. De acordo com Garbrecht & Martz (1999a) as características da rede extraída do modelo dependem da definição das células fonte (iniciais) dos canais nos dados digitais. Dos métodos usados para a extração da rede de drenagem se destacam os descritos nos parágrafos seguintes.

Um dos métodos considera o cálculo da grade de escoamento acumulado e de um limiar de acumulação do escoamento a partir do qual considera-se a formação de canais. A grade de escoamento acumulado representa o número de células que contribuem com escoamento para uma célula de interesse ao longo da direção de escoamento da água na superfície, variando de zero (para os divisores da água), a valores muito grandes na seção de deságüe da bacia hidrográfica (Maidment, 1999).

Uma vez obtida a grade de escoamento acumulado, deve ser escolhido um limiar que representa a mínima área de drenagem à montante necessária para a manutenção de um canal (Pozzebon, 2000). Diferentes valores resultam em uma rede de drenagem com valores totais de comprimentos de canais também diversos e pode ser utilizado um valor limiar de escoamento acumulado constante ou variável de acordo com o método da área crítica dependente da declividade (Montgomery & Foufoula-Georgiou, 1993; Tribe, 1992). De acordo com Garbrecht & Martz (1999a), a utilização de um limiar constante tem sido mais difundida, fundamentalmente pelo seu caráter mais prático e, devido a que a estimativa precisa dos valores da declividade em cada ponto da superfície requer um MDE de alta resolução ou medições de campo.

Por outra parte, deve-ser considerado que a escolha de um limiar constante supõe que o escoamento é gerado de maneira uniforme em toda a área e, que a resposta geomorfológica e erosiva para o escoamento é espacialmente homogênea (Martz & Garbrecht, 1995). Maidment (1999) recomenda a utilização da “regra do Milhar/Milhão” (“Thousand/Million rule”) como guia para a escolha do limiar mais adequado; a regra sugere também o tamanho de célula apropriado para representação do MDE de uma região e é enunciada como segue: “A área apropriada para representação de uma célula do MDE corresponde ao tamanho da área de estudo, dividido por um milhão. A mínima área de drenagem para a definição do começo de um canal é de 1000 células desse tamanho”.

Um outro método utilizado para o delineamento da rede de drenagem a partir do MDE hidrologicamente consistente consiste na utilização do MDE como superfície de “mínimo custo” (os valores de elevação de cada célula representam o custo ou impedância) e reconhecimento das nascentes na hidrografia mapeada, as que são consideradas como células iniciais a partir das quais existe formação dos canais. A partir desses planos de informação podem ser delineados os caminhos de mínimo custo acumulado (resistência mínima) a partir das células iniciais, que representam os canais da rede de drenagem. Partindo dos planos de informação de direção de escoamento, escoamento acumulado e rede de drenagem, podem ser individualizadas as bacias hidrográficas para posterior caracterização e análise morfométrica utilizando as ferramentas padrões de um SIG.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo abrange uma superfície de 300 km² e corresponde ao Município de Viçosa. Este município encontra-se localizado na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais (Brasil), entre as coordenadas 20°39'14" a 20°50'32" S e 42°45'17" a 43°00'13" WGr (Figura 1).



Figura 1. Esquema de localização do Município de Viçosa (MG).

As informações de referência utilizadas nas análises foram extraídas das cartas topográficas da região em escala 1:50.000 (IBGE 1976; 1977; 1979a,b) e compreenderam as curvas de nível de 20 m em 20 m e os pontos cotados, a rede hidrográfica e os limites do município.

A base de dados e as análises foram geradas utilizando ferramentas do “software” ARC/INFO™ versão 7.1.1 (ESRI, 1997). O procedimento utilizado é descrito a seguir:

- a) Preparação da rede de drenagem vetorial. Para prevenir a geração de erros nos processamentos posteriores, a malha hidrográfica vetorial extraída das cartas topográficas em escala 1:50.000 foi editada para a obtenção de uma rede de arcos simples, conectados e orientados na direção de escoamento (Maidment, 1999; Saunders, 1999; Rubert, 2000). A rede de drenagem editada foi posteriormente convertida para o formato matricial;
- b) Preparação dos dados altimétricos. O plano de informação de curvas de nível foi editado para assegurar a sua coerência com a hidrografia mapeada de acordo com as recomendações propostas por Rubert (2000); a representação vetorial das curvas de nível ultrapassou os limites do município com o objetivo de evitar erros de interpolação nas bordas;
- c) Geração de um MDE hidrológicamente consistente:
- Interpolação dos valores altimétricos (curvas de nível e pontos cotados) por meio do método de interpolação TOPOGRID (ESRI, 1997), utilizando uma resolução espacial de 20 m x 20 m e os arcos da rede de drenagem mapeada como linhas de ruptura para favorecer uma melhor representação do trajeto dos cursos de água;
 - “Aprofundamento” da rede de drenagem mapeada (“stream burning”). Os valores altimétricos das células correspondentes à rede de drenagem mapeada foram diminuídos no valor arbitrário de 10.000 m, enquanto que se conservaram os valores originais das células não pertencentes à rede de drenagem;
 - Ajuste do MDE “aprofundado”, por meio do procedimento de preenchimento das depressões espúrias, para correção dos erros no direcionamento do escoamento;
 - Normalização do MDE por adição dos valores subtraídos no processo de aprofundamento. Se não houvesse qualquer depressão espúria ao longo da hidrografia, a diferença entre os valores altimétricos das células da rede de drenagem e do MDE ajustado por meio do preenchimento das depressões espúrias deveria possuir o mesmo valor subtraído (neste caso, 10.000 m). Porém, na matriz diferença, foram verificados valores menores do que 10.000, indicando que algumas células foram preenchidas. Sendo assim, às células do MDE ajustado pertencentes à rede de drenagem mapeada, foi adicionado o menor valor da matriz diferença;
 - Cálculo das direções de escoamento. A grade gerada apresentou valores inteiros de 1 a 128 (2^0 até 2^7) (Figura 2);

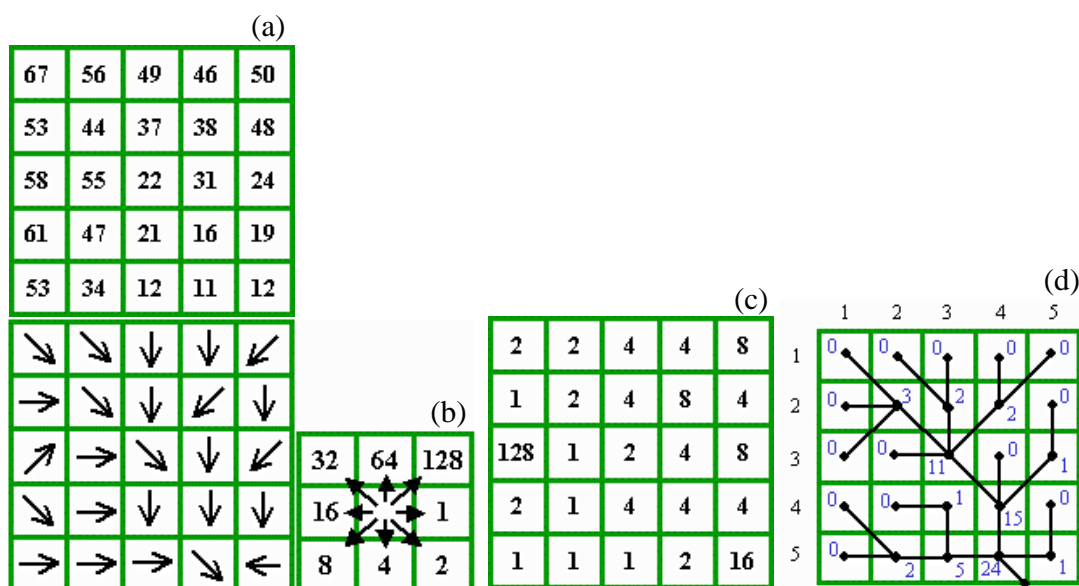


Figura 2. Representação do cálculo das direções de escoamento. (a) MDE. (b) Direções de escoamento atribuídas às células do MDE de acordo com os valores das células vizinhas (direção de maior declividade). (c) Matriz de direções de escoamento. (d) Matriz de escoamento acumulado. FONTE: Adaptado de Maidment (1999).

- d) Cálculo do escoamento acumulado, que contou quantas células à montante contribuíram para o escoamento em cada célula considerada (Figura 2);
- e) Delineamento da rede de drenagem. Foi testado o desempenho de dois procedimentos; por um lado, a utilização de um limiar fixo baseado na “regra do Milhar/Milhão” (Maidment, 1999) na grade de escoamento acumulado, fixando um valor maior do que 50 células para o início dos canais, que equivale a uma área de 2 ha (tamanho das células: 20 m x 20 m). Por outro lado, o delineamento do caminho de mínimo custo acumulado no MDE ajustado, utilizando como células fonte as nascentes dos canais extraídas do plano de informação contendo a hidrografia mapeada no formato vetorial;
- f) Hierarquização da rede de drenagem delineada de acordo com o critério hierárquico proposto por Strahler (1952) (Figura 3);
- g) A avaliação quantitativa da rede de drenagem delineada a partir do MDE foi realizada por comparação com a rede de drenagem mapeada, de acordo com o seguinte procedimento:
- Geração de uma matriz de distância euclidiana à rede hidrográfica mapeada;

- Conversão da malha hidrográfica delineada a partir do MDE para uma matriz booleana (0 = Falso, 1 = Verdadeiro);
- Multiplicação da matriz de distância euclidiana pela matriz booleana de rede de drenagem, para a obtenção de uma nova matriz na qual os valores das células representaram o distanciamento da rede de drenagem extraída do MDE em relação à drenagem cartografiada.

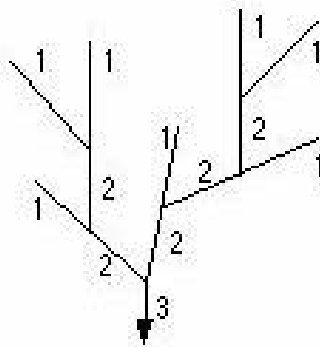


Figura 3. Representação do critério proposto por Strahler (1952) para hierarquização da rede de drenagem e das bacias hidrográficas associadas. Os números representam as diferentes ordens hierárquicas e as linhas representam os canais de drenagem.

- h) Delineamento das bacias hidrográficas correspondentes às distintas ordens hierárquicas (a ordem da bacia hidrográfica correspondeu à ordem do canal principal). Para isto, deveram ser identificados os pontos de descarga da água (pontos de máximo valor de escoamento acumulado) na rede hidrográfica correspondente a cada ordem;
- i) Análise morfométrica das bacias hidrográficas. As bacias hidrográficas de distinta hierarquia foram caracterizadas de acordo com as suas propriedades geométricas, orográficas e lineais (sistema de drenagem associada). As características avaliadas foram: área e perímetro total, comprimento dos eixos maior e menor, orientação (ângulo entre o eixo horizontal e o eixo maior da bacia hidrográfica medido a partir do leste - 0°, no sentido anti-horário), largura média (quociente entre a área e o eixo maior da bacia hidrográfica), elevação, declividade, comprimento da rede de drenagem e densidade de drenagem. Os índices calculados foram: excentricidade (relação entre o eixo menor e o eixo maior da bacia hidrográfica) e coeficiente de compacidade (K_c). K_c é definido como a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia (Equação 1); quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o respectivo coeficiente de compacidade (Villela & Matos, 1975; Rocha &

Kurtz, 2001). Em igualdade dos restantes fatores, a tendência para grandes cheias será tanto mais acentuada quanto mais próximo da unidade for o valor de K_c (condição de circularidade).

$$K_c = \frac{P}{2\pi r} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: P é o perímetro da bacia hidrográfica e A é a sua área.

3. RESULTADOS

A Figura 4 apresenta um recorte do MDE obtido da interpolação por meio do método TOPOGRID (ESRI, 1997). A discretização das depressões espúrias nesse modelo mostrou que ainda permaneceram alguns pontos da superfície com erros, que foram posteriormente corrigidos com o procedimento de aprofundamento do MDE e preenchimento das depressões. As depressões remanescentes localizaram-se fundamentalmente em áreas de baixo adensamento dos dados de elevação (curvas de nível muito espaçadas no plano horizontal) (Figura 4).

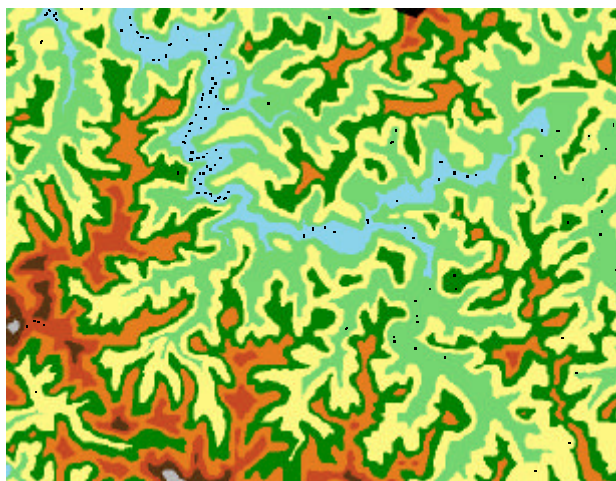


Figura 4. Recorte do MDE obtido da interpolação dos valores altimétricos do Município de Viçosa por meio do método de interpolação TOPOGRID (ESRI, 1997). As células de cor preta identificam a localização de depressões espúrias.

A partir do MDE ajustado por meio do procedimento de aprofundamento da rede de drenagem, foram derivados os valores associados às principais características topográficas

do Município de Viçosa (Quadro 1) assim como a distribuição das classes de direção de escoamento (Figura 5). A distribuição percentual das classes de direções de escoamento variou entre 11 % e 14 % da superfície total do município, mostrando que não existe uma direção de escoamento preferencial do terreno para nenhum dos oito pontos cardeais considerados. Esta condição encontra-se provavelmente associada à falta de controle geológico estrutural dominante em uma direção.

Quadro 1. Características topográficas do Município de Viçosa derivadas a partir do MDE ajustado por meio do procedimento de aprofundamento da rede de drenagem.

Característica	Altimetria	Declividade (%)
Valor mínimo	575,6 m	0
Valor máximo	950,7 m	209,7
Média	720,70 m	29,0
Desvio padrão	52,7 m	17,4
C.V.	7,3 %	60,0

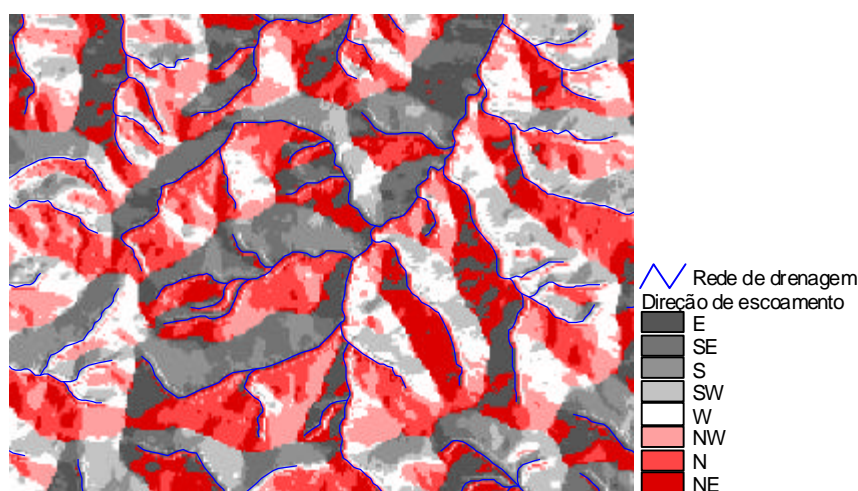


Figura 5. Recorte da grade de direção de escoamento obtida a partir do MDE ajustado por meio do procedimento de “aprofundamento da rede de drenagem”; na legenda se destacam os oito pontos cardeais associados ao valor das células. A rede de drenagem sobreposta foi extraída da carta topográfica em escala 1:50.000.

A comparação entre a rede de drenagem delineada a partir do MDE ajustado e a hidrografia mapeada, mostrou uma estreita concordância visual no caso do delineamento

por meio do procedimento do caminho de mínimo custo acumulado (Figura 6a). Já a rede de drenagem derivada da aplicação do limiar de 50 células (20 m x 20 m) na grade de escoamento acumulado, apresentou maior adensamento que a malha hidrográfica mapeada e diferenças na localização das células iniciais dos canais; porém, o trajeto principal dos canais concordou com a rede mapeada (Figura 6b).

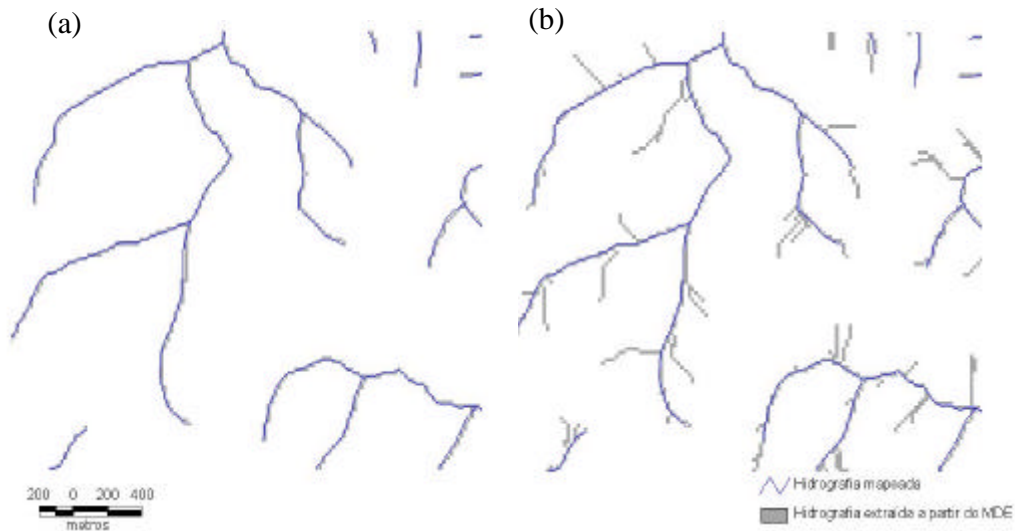


Figura 6. Detalhe da rede de drenagem delineada a partir do MDE e comparação (por superposição) com a rede de drenagem da cartografia da região (1:50.000). (a) Método do caminho de mínimo custo acumulado. (b) Método do limiar fixo (50 células de 20 m x 20 m).

A avaliação quantitativa do procedimento de ajustamento do MDE e do caminho de mínimo custo acumulado mostrou que 74 % dos canais de drenagem delineados a partir do MDE apresentaram superposição com a rede de drenagem mapeada (o distanciamento entre os canais foi de 0 m), enquanto que o restante 26 % apresentaram um afastamento máximo de 20 m (largura de 1 célula) (Figura 7). Observou-se, porém, que essas distorções com respeito à rede de drenagem mapeada podem ser atribuídas, na maioria dos casos, à representação matricial e ao tamanho de célula utilizado nas análises (20 m x 20 m) (Figura 7). Foi determinada ainda, uma concordância muito boa entre os pontos de inserção dos canais em ambas redes de drenagem (Figura 7).

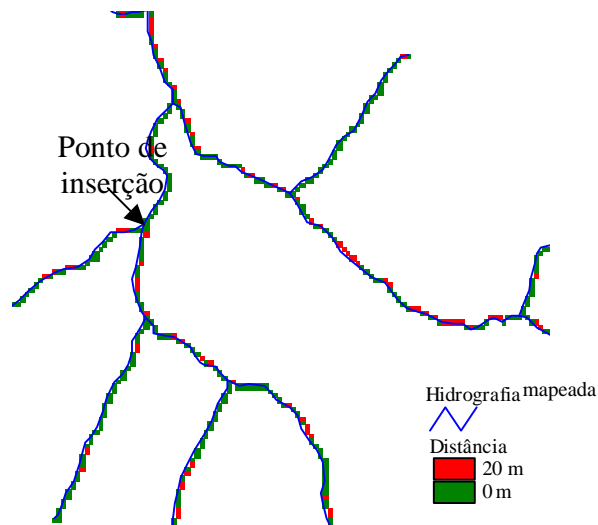


Figura 7. Recorte da área de estudo mostrando o resultado da avaliação quantitativa da rede de drenagem delineada a partir do MDE “aprofundado”. As células de cor vermelha e de cor verde representam a rede de drenagem extraída do MDE, com valores da distância à hidrografia mapeada (0 m e 20 m).

A rede de drenagem extraída a partir do MDE pelo caminho de mínimo custo acumulado apresentou uma extensão total de 572,3 km. Os valores do comprimento das vias de drenagem nas bacias hidrográficas de diferente ordem (coluna “Total” do Quadro 2) mostraram que mais do 78 % dos canais estão incluídos na bacia hidrográfica de maior ordem (ordem 5), que corresponde à bacia do Rio Turvo Sujo.

A densidade de drenagem (Quadro 2) possui valores muito parecidos entre as bacias hidrográficas de diferentes ordens, com valores médios entre 2,0 e 2,1 km/km²; de acordo com Villela & Matos (1975), esses valores permitem afirmar que os conjuntos de bacias em questão apresentam densidade de drenagem moderada a alta. Entre as bacias hidrográficas da mesma ordem também se constatou homogeneidade nos valores de densidade de drenagem, com coeficientes de variação em torno de 20 % (Quadro 2).

Quadro 2. Características quantitativas associadas à rede de drenagem do Município de Viçosa, nas bacias hidrográficas de ordens 2 a 5 (Strahler, 1952).

Ordem	Média	C.V.*	Valor Mín/Máx	Total
-----Comprimento da rede de drenagem (km)*-----				
2	3,3	54,5	0,9/11,1	342,8
3	14,5	60,1	4,8/34,7	378,3
4	52,8	50,3	26,6/101,5	316,9
5	...	...	...	449,7
-----Densidade de drenagem (km/km ²)*-----				
2	2,1	23,8	1,4/4,4	
3	2,0	15,0	1,5/2,7	
4	2,1	14,2	1,8/2,5	
5	2,0	...	...

*C.V. Coeficiente de variação, expresso em %.

O número de bacias hidrográficas delineadas foi de 103, 26, 6 e 1 para as ordens 2 a 5, respectivamente (Figura 8). Foi determinada uma ampla variação no tamanho das bacias hidrográficas da mesma ordem (Quadro 3) que em todos os casos se manifestou em coeficientes de variação superiores a 50 %.

A partir dos quocientes entre os valores médios do eixo menor e do eixo maior para cada conjunto de bacias hidrográficas de diferente ordem (Quadro 3), verificou-se que estas se afastam da forma circular, onde tal quociente apresentaria valor igual à unidade. As bacias hidrográficas de ordens 2, 3 e 4 apresentam a maior excentricidade, com valor igual a 0,5, enquanto que a menor excentricidade foi observada para a bacia hidrográfica de ordem 5 (bacia do Rio Turvo Sujo) com valor igual a 0,8.

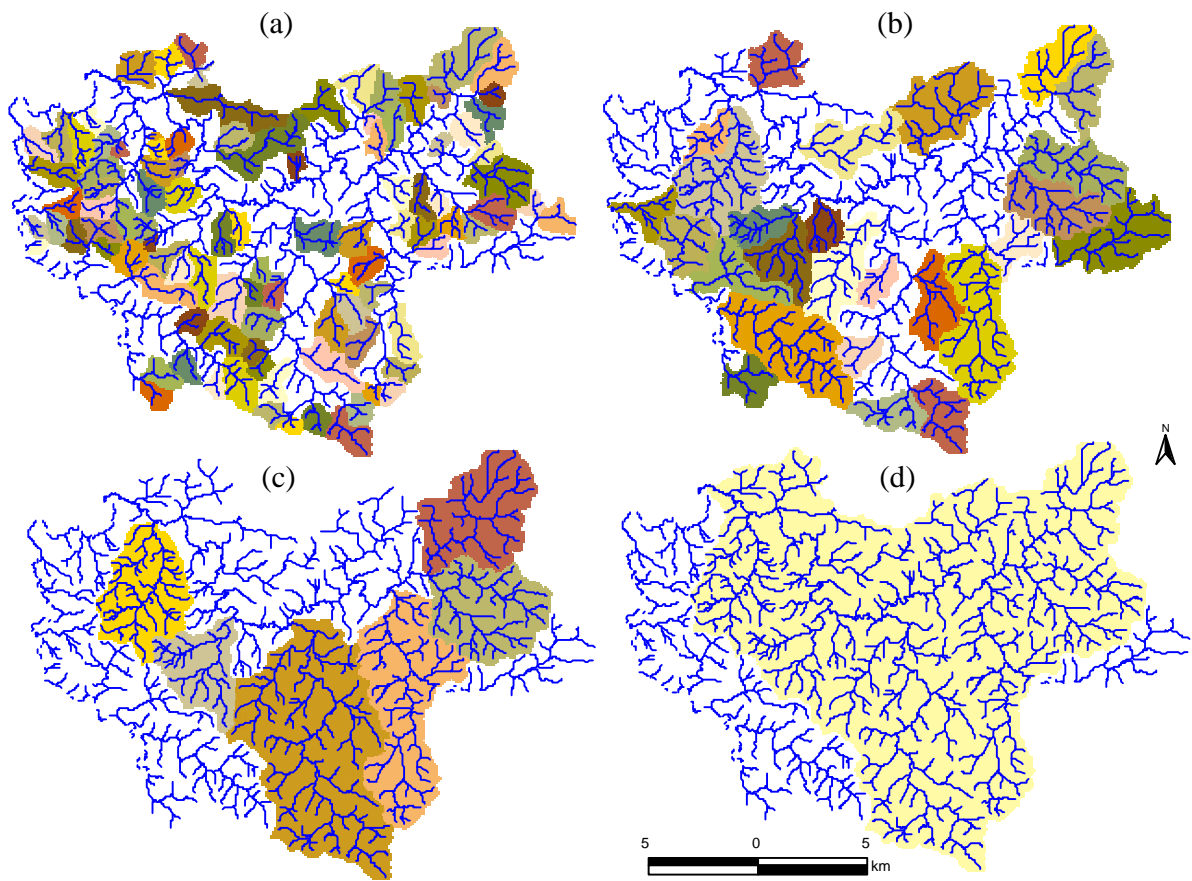


Figura 8. Bacias hidrográficas delineadas a partir do MDE “aprofundado”. (a) 103 bacias hidrográficas de 2^a ordem (Strahler, 1952); (b) 26 bacias hidrográficas de 3^a ordem; (c) 6 bacias hidrográficas de 4^a ordem;. (d) Bacia hidrográfica de 5^a ordem (bacia do Rio Turvo Sujo);

Quadro 3. Características quantitativas associadas às dimensões e à forma das bacias hidrográficas do Município de Viçosa.

Ordem (Strahler)	Média	C.V.*	Valor Min/Máx
-----Área (ha) *-----			
2	168,3	60,4	19,7/576,3
3	724,5	57,2	264,8/1726,0
4	2600,6	59,4	1219,1/5522,3
5	22735,8	...	...
-----Eixo maior (m) *-----			
2	918,7	38,5	333,2/2677,2
3	1988,2	36,1	1120,0/3682,2
4	3698,2	39,5	2248,0/5768,9
5	9023,9	...	...
-----Eixo menor (m) *-----			
2	547,9	27,1	188,4/1059,6
3	1096,9	24,7	639,7/1725,4
4	2163,0	22,0	1726,3/3046,9
5	8019,8	...	...
-----Orientação (graus) *-----			
2	90,4	23,0	2,2/178,6
3	81,7	62,3	15,9/175,5
4	100,2	40,3	46,7/167,8
5	175,9	...	...

*C.V. Coeficiente de variação, expressado em %.

A orientação das bacias hidrográficas de ordens 2, 3 e 4 apresentou valores médios que oscilaram em torno de 90° (orientação N-S). No caso da bacia hidrográfica de quinta ordem, a orientação apresentada foi maior (175,9°), aproximando-se do eixo X (direção W-E) (Quadro 3).

O cálculo dos coeficientes de compacidade (Kc) permitiu constatar semelhança nas formas das bacias hidrográficas entre ordens diferentes, com valores de 1,6, 1,7, 1,8 e 2,0 para as ordens 2 a 5, respectivamente; esses valores associam-se a condições de baixa tendência a enchentes (Villela & Matos, 1975). Dentro de uma mesma ordem também foi constatada homogeneidade nas formas, sendo que os valores do coeficiente de variação de Kc não ultrapassaram o 10 %.

Os dados do Quadro 4 permitiram observar uma grande semelhança na altitude média das bacias de diferente ordem, com valores entre 715,4 m (bacia hidrográfica de quinta ordem) e 736 m (média de altitude das bacias hidrográficas de segunda ordem). Enquanto à declividade média das bacias, encontrou-se também grande semelhança nos valores, entre 22% e 24%.

Quadro 4. Características quantitativas associadas à altimetria e à declividade das bacias hidrográficas do Município de Viçosa.

Ordem (Strahler)	Média	Valor Min/Máx
-----Altitude (m)-----		
2	736,0	578,9/950,7
3	733,9	578,9/950,7
4	728,3	599,1/922,4
5	715,4	599,4/922,4
-----Declividade (%)-----		
2	29,9	0/152,3
3	29,7	0/179,4
4	29,1	0/121,0
5	28,1	1/176,6

4. CONCLUSÕES

1. A análise digital do terreno a partir da informação cartográfica 1:50.000 possibilitou a extração eficiente da rede de drenagem e das bacias hidrográficas em nível municipal;
2. Para as condições fisiográficas da região de estudo (i.e. relevo predominante fortemente ondulado, cursos de água encaixados, divisórias de água bem marcadas), o método de “aprofundamento” da rede de drenagem no MDE possibilitou a caracterização adequada do escoamento da água;
3. O método do caminho de mínimo custo acumulado, aplicado no MDE ajustado por “aprofundamento” da rede de drenagem, permitiu obter uma representação da rede de drenagem que apresentou uma concordância de 74 % quando sobreposta à representação cartográfica;
4. As bacias hidrográficas da região em estudo apresentaram ampla variabilidade no tamanho dentro de uma mesma ordem hierárquica, enquanto que outras características como forma (avaliada pela excentricidade e o coeficiente de compacidade), elevação e declividade se mostraram relativamente semelhantes dentro de uma mesma ordem e entre ordens diferentes;
5. O método utilizado pode auxiliar, de uma maneira simples e objetiva, a escolha e localização adequada de bacias representativas da região, assim como estudos de natureza variada.

5. BIBLIOGRAFIA

- BEVAQUA, G. & FLORIS, R. A surface-specific line tracking and slope recognition algorithm. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 40:219-227, 1987.
- CEBALLOS, A. & SCHNABEL, S. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Extremadura, SW Spain). *Journal of Hydrology*, 210:146-160, 1998.
- EASH, D.A. A geographic information system procedure to quantify drainage-basin characteristics. *Water Resources Bulletin*, 30:1-8, 1994.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. ARC/INFO v. 7.1.1. Redlands, ESRI, 1997. Programa de computador. 2 CD-ROM.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. ArcView v. 3.2. Redlands, ESRI, 1999. Programa de computador. 1 CD-ROM.
- GARBRECHT J. & MARTZ, L.W. Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models: the bills creek experience. *Water Resources Bulletin*, 29:909-916, 1993.
- GARBRECHT J. & MARTZ, L.W. Digital elevation model issues in water resources modeling. In: 1999 ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, California, 1999. Proceedings. California, ESRI, 1999a. Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>>. Acesso em: 3 jan. 2002.
- GARBRECHT J. & MARTZ, L.W. TOPAZ. Digital landscape and watershed analysis. EUA, USDA-ARS/University of Saskatchewan, 1999b.
- GARCIA M.J.L. & CAMARASA, A.M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM – Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain). *JAG*, 3-4:187-194, 1999.
- HELLWEGER, F.L. AGREE – DEM Surface Reconditioning System. Austin, Universidade de Texas, 1997. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>>. Acesso em: 18 dez. 2002.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106:211-232, 1989.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Senador Firmino. SF-23-X-B-IV-4. Rio de Janeiro, 1976. Carta topográfica em escala 1:50.000.

- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ervália. SF-23-X-B-V-4. Rio de Janeiro, 1979a. Carta topográfica em escala 1:50.000.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Teixeira. SF-23-X-B-V-1. Rio de Janeiro, 1979b. Carta topográfica em escala 1:50.000.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Ubá. SF-23-X-D-II-1. Rio de Janeiro, 1977. Carta topográfica em escala 1:50.000.
- JENSON, S.K. & DOMINGUE, J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54:1593-1600, 1988.
- MAIDMENT, D.R. Watershed and stream network delineation using digital elevation models. California, ESRI, 1999. Disponível em: <<http://campus.esri.com/campus/myoffice/mycourses/CourseHome/index.cfm?c=11&CFID=4993661&CFTOKEN=15455665>>. Acesso em: 5 jan. 2002.
- MARTZ L. W. & GARBRECHT, J. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method – Comment. *Journal of Hydrology*, 167:393-396, 1995.
- MIZGALEWICZ, P.J. & MAIDMENT, D.R. Modeling agricultural transport in midwest rivers using Geographic Information Systems. Austin, Center for Research in Water Resources, 1996. Disponível em: <http://www.ce.utexas.edu/org/crwr/reports/rpt96_6/disstab.htm>. Acesso em: 19 dez. 2002.
- MONTGOMERY, D.R. & FOUFOULA-GEORGIU, E. Channel network source representation using digital elevation models. *Water Resources Research*, 29:3925-3934, 1993
- O'CALLAGHAN, J.F. & MARK D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28:323-344, 1984.
- OLIVERA F. & MAIDMENT, D.R. GIS Tools for HMS Modeling Support. In: 1999 ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, California, 1999. Proceedings. California, ESRI, 1999. Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap801/p801.htm>>. Acesso em: 3 jan. 2002.
- HELLWEGER, F.L. AGREE – DEM Surface Reconditioning System. Austin, Universidade de Texas, 1997. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishydro/ferdi/research/agree/agree.html>>. Acesso em: 18 dez. 2002.
- OLIVERA, F. Spatial Hydrology of the Urubamba river system using Geographic Information Systems (GIS). Austin, Universidade de Texas, 1996. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/ce397/urubamba/peru.htm>>. Acesso em: dez. 2002.
- POZZEBON, E.J. Simulação de escoamento em microbacia hidrográfica utilizando Sistemas de Informações Geográficas e modelagem hidrológica. Tese (Doutorado). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2000. 234p.
- RIBEIRO, C.A.A.S. Modelos digitais hidrológicamente consistentes. Viçosa, DEF/UFV, 2002. 8p. Apostila do Curso “Tópicos avançados em Sistemas de Informação Geográfica”.
- ROCHA, J. S. M. & KURTZ, S. M. J. M. Manejo integrado de bacias hidrográficas. 4.ed. Santa Maria, CCR /UFSM, 2001. 302p.

- RUBERT, O.A.V. Codificação automática de regiões hidrográficas utilizando Sistemas de Informações Geográficas. Dissertação (Mestrado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 67p.
- SANTOS, A.R. Caracterização morfológica, hidrológica e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Turvo Sujo, Micro-região de Viçosa, MG. Tese (Doutorado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 125p.
- SAUNDERS, W. Preparation of DEMs for use in environmental modeling analysis. In: 1999 ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, California, 1999. Proceedings. California, ESRI, 1999. Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap802/p802.htm>>. Acesso em: 3 jan. 2002.
- SAUNDERS, W.K. & MAIDMENT, D.R. A GIS assessment of nonpoint source pollution in the San Antonio-Nueces coastal basin. Austin, Center for Research in Water Resources, 1996. Disponível em: <<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/gishyd97/library/saunders/report.htm>> Acesso em: dez. 2002.
- STRAGER, M.P.; FLETCHER, J.J.; YUILL, C.B. Hydrologic modeling for acid mine drainage in west Virginia. In: 1998 ANNUAL ESRI USERS CONFERENCE, California, 1998. Proceedings. California, ESRI, 1998. Disponível em: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc98/PROCEED/TO500/PAP478/P478.HTM>>. Acesso em: 3 jan. 2002.
- STRAHLER, A.L. Dynamic basis of geomorphology. Geological Society America Bulletin, 63:923-938, 1952.
- THIERFELDER, T. The morphology of landscape elements as predictors of water quality in glacial/boreal lakes. Journal of Hydrology, 207:189-203, 1998.
- TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. Journal of Hydrology, 139:263-293, 1992.
- VILLELA, S.M. & MATTOS, A. Hidrologia aplicada. 4.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p.
- WANG, X.; YIN, Z.Y. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales. Journal of Hydrology, 210:221-241, 1998.

CAPÍTULO II

GEOPROCESSAMENTO PARA DELINEAMENTO DE UNIDADES GEOAMBIENTAIS NA BACIA DO CÓRREGO IPIÚNA (MG)

RESUMO

Este trabalho apresenta a utilização de ferramentas de geoprocessamento para o delineamento e análise de unidades geoambientais em um estudo de caso em microbacia do Município de Viçosa (MG). Foi elaborado um mapa preliminar de distribuição das pedoformas com base em atributos derivados do Modelo Digital de Elevação: elevação, declividade, curvatura e modelagem do escoamento da água na superfície. A partir da classificação supervisionada MAXVER de uma imagem TM/Landsat-5 obteve-se o mapa de distribuição das classes de cobertura do solo que, integrado à distribuição das pedoformas da microbacia por meio de operações de análise espacial, possibilitou o delineamento de unidades geoambientais. Os procedimentos utilizados permitiram a geração de um mapa preliminar de distribuição das pedoformas da bacia do Córrego Ipiúna, com exatidão geral de 81 %. As pedoformas predominantes (80 % da superfície total da bacia hidrográfica) estão representadas pelas encostas onduladas e fortemente onduladas, convexas e côncavas, associadas a Latossolos Vermelho-amarelos distróficos (horizonte A moderado e câmbico, respectivamente). O mapa de unidades geoambientais apresentou 15 classes, com domínio dos pastos em todas as formas da paisagem, e valor máximo de 67 % na superfície ocupada pelas encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas onde predominam os Latossolos Vermelho-amarelos distróficos (horizonte A moderado). As informações detalhadas no trabalho servem de embasamento para o planejamento integral da bacia hidrográfica; os dados utilizados se encontram disponíveis no sistema de informação digital e podem ser usados para gerar os mapas temáticos que se façam necessários aos objetivos do planejamento e da caracterização de unidades geoambientais específicas.

Termos de indexação: Sistema de Informação Geográfica, Modelo Digital de Elevação, pedoformas, TM/Landsat-5, cobertura do solo, unidades geoambientais.

**GEOPROCESSING TOOLS FOR GEOENVIRONMENTAL UNITIES
IDENTIFICATION IN A CATCHMENT OF “MAR DE MORROS” (MG)**

ABSTRACT

This work presents geoprocessing tools use for identifying and map geoenvironmental unities at catchment scale in Viçosa Region, part of Zona da Mata, Minas Gerais state. A preliminary map of dominant soils distribution was elaborated with base in derived attributes of the Digital Elevation Model: elevation, slope, curvature and flow accumulation model. From the supervised MAXVER classification of TM/Landsat-5 image was obtained the map of cover distribution. Spatial overlay of preliminary soil map and cover distribution map made possible the discrimination of basin's geoenvironmentals units. The reported procedures allowed the generation of a preliminary map of soils distribution with general accuracy of 81 %. The predominant soil/landform class (80% of basin surface) is represented by hillsides wavy and strongly wavy, convex and concave with LVAd soils. Geoenvironmental map presented 15 classes, with domain of pastures in all landscape forms. The presented information is relevant for basin management and can be represented a quick and economical option compared to manual analysis.

Index terms: Geographic Information System, Digital Elevation Model, soil/landform identification, TM/Landsat-5, land cover, geoenvironmental unities.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização morfológica da superfície terrestre é essencial para o conhecimento dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem na paisagem. A forma do terreno influencia o fluxo da água, o transporte de sedimentos e poluentes, a natureza e distribuição de habitats de plantas e animais, e é também uma expressão dos processos geológicos e do intemperismo (Blaszczynski, 1997).

O reconhecimento das relações entre os solos e as formas da paisagem constitui a base dos métodos de mapeamento de solos (Gessler et al., 1996). Tradicionalmente é utilizada a análise estereoscópica de fotografias aéreas para o delineamento manual das unidades de solo-paisagem que posteriormente são constatadas no campo. A análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação dessas unidades; é uma alternativa rápida e econômica que pode ser aplicada para a quantificação e classificação do relevo, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem (McBratney et al. 1991; Odeh et al., 1991; Gessler et al., 1996).

A posição na paisagem influencia os processos de formação dos solos e as características pedológicas; sendo assim, os principais atributos topográficos usados para a discriminação de pedoformas são a elevação, a declividade, a orientação e a curvatura da superfície terrestre (Moore et al., 1991; Irvin et al. 1997). Em geral, os métodos que organizaram a superfície de acordo com um modelo morfológico conhecido, mostraram eficiência para a predição da ocorrência das classes de solos (Moore et al., 1993; Irvin et al., 1997; Miranda et al., 1999).

Por outro lado, o conhecimento da distribuição espacial da cobertura do solo em nível regional e a associação com a informação de pedoformas, é um pré-requisito importante para o sucesso do planejamento e diagnóstico de microbacias hidrográficas (Assad et al.,

1993; Rocha & Kurtz, 2001). Quando esses dados são apresentados em forma de mapas, tornam-se um material indispensável na definição do grau de proteção do solo pela cobertura vegetal, do uso racional do solo e auxiliam também na definição da aptidão agrícola e de estratégias de monitoramento dos recursos naturais (Beltrame, 1991).

De acordo com McDaniel & Hass (1982), a estratificação da paisagem em unidades geoambientais uniformes em termos de cobertura vegetal e classes de solos é o passo prévio à utilização dos dados de sensores Landsat nos levantamentos detalhados de características da vegetação. Apesar da sua importância, os mapas de unidades geoambientais são de difícil elaboração manual, principalmente quando a área de estudo é heterogênea. Tal dificuldade é contornada quando os dados são introduzidos e analisados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), por meio de processos automáticos e semi-automáticos de análise e elaboração de cartas temáticas.

O presente trabalho utilizou procedimentos baseados em técnicas de geoprocessamento para a determinação de unidades geoambientais a partir da análise dos dados digitais do relevo e de imagens TM/Landsat-5, em estudo de caso em microbacia hidrográfica da região da “Zona da Mata” (MG). Os objetivos principais foram: (a) a identificação e classificação de pedoformas e, (b) a caracterização e análise da distribuição das classes de cobertura do solo de acordo com as pedoformas da região, para delineamento de unidades geoambientais.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à microbacia do Córrego Ipiúna localizada no Município de Viçosa (MG) entre as coordenadas $20^{\circ}41'12''$ a $20^{\circ}44'57''$ S e $42^{\circ}55'28''$ a $42^{\circ}58'54''$ WGr. A bacia hidrográfica abrange uma superfície de 1791 ha (Figura 1) e é tributária do Rio Turvo Sujo. Esta área foi escolhida ao acaso entre as bacias hidrográficas de quarta ordem (Strahler, 1952) delimitadas pelas técnicas de geoprocessamento descritas no Capítulo I e apresenta condições representativas da região, em termos de forma, tamanho, sistema de drenagem e uso do solo.

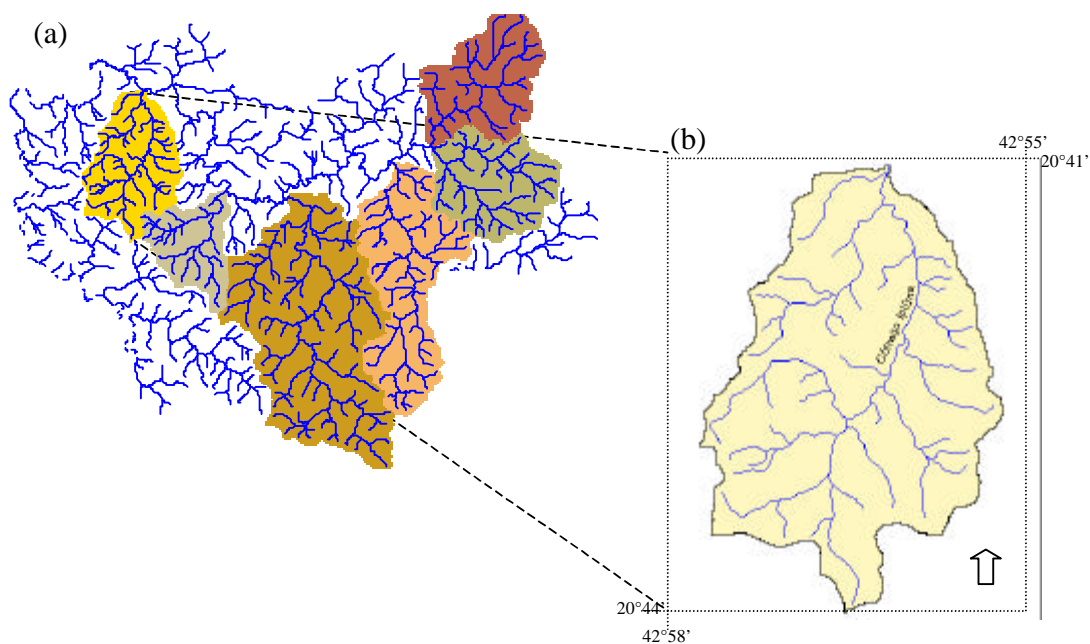


Figura 1. Esquema de localização da área de estudo. (a) Bacias hidrográficas de quarta ordem (Strahler, 1952) no Município de Viçosa. (b) Bacia do Córrego Ipiúna.

A litologia local é constituída predominantemente por gnaisses, os quais caracterizam-se pela alternância de bandas claras formadas por feldspatos e quartzo, e bandas escuras nas que predominam os minerais hornblenda e biotita. O relevo típico é de “mar de morros”, característico de regiões soerguidas do leste Atlântico desenvolvidas

sobre rochas predominantemente granítico/gnáissicas do Pré-Cambriano (Complexo Cristalino).

Corrêa (1984) descreveu o predomínio de vertentes convexo-convexas e convexo-côncavas (curvatura-perfil) alinhadas em forma de espigões, entremeadas por vales de fundo aplainado, formados por terraços e planícies fluviais, onde se encaixam cursos de água pouco expressivos. Os topos apresentam-se geralmente aplainados, constituindo os divisores de água para as pequenas bacias de drenagem existentes. Como descrito por Rezende (1971), as formas dos interflúvios representam uma seqüência assimétrica côncava-convexa-topo e parte íngreme das vertentes, acima dos terraços fluviais (Figura 2).

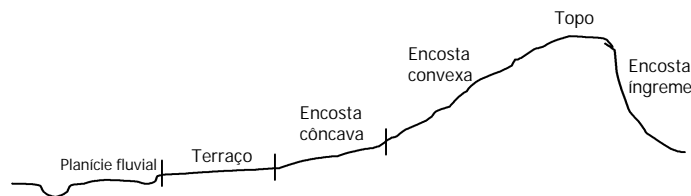


Figura 2. Esquema do perfil de conformação típica das vertentes no Planalto de Viçosa. Fonte: Rezende (1971).

Nos topos, encostas onduladas e planos inclinados podem ser encontrados LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos (LVAd). Os solos de topos aplainados mais extensos são os mais elevados da paisagem; a sua topografia é plana e correspondem a latossolos amarelados (matiz mais amarela que 2,5 YR) geralmente mais profundos e desenvolvidos, enquanto que em posições inferiores, sobretudo no terço inferior das elevações o LVAd mostra-se menos amarelado e geralmente profundo, em pedoformas convexo-convexas, ou mais raso, em pedoformas convexo-côncavas.

Os ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos (PVAd) dominam no terraço, que se caracteriza por apresentar uma declividade baixa (0-8 %). O contato entre o terraço e a encosta, em alguns casos é abrupto e em outros, mais suave, concordância que pode ser visualizada pelo perfil com o formato de uma sigmóide. Nos casos em que o contato é abrupto o terraço está parcialmente recoberto por depósitos de sopé da encosta, e a pedoforma é tipicamente convexo-convexa.

Os CAMBISSOLOS HÁPLICOS Distróficos latossólicos (CXbd latossólico) e LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos câmbicos (LVAd câmbico)

ocupam as vertentes mais íngremes da paisagem, inclusive as bordas das ravinas; são solos rasos e muito sujeitos à erosão. Os CXbd apresentam-se nas superfícies mais íngremes freqüentemente com exposição do horizonte C ou saprolito. Rezende (1971) destacou que os perfis de solos localizados nas áreas de maior declividade são os menos espessos da toposeqüência, pois tal posição favorece a morfogênese, levando estes solos a um constante rejuvenescimento por erosão. Na planície fluvial, dominam os solos das classes GLEISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos (GXbd) e NEOSSOLOS FLÚVICOS Distróficos gleicos (RUbd gleico).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O método de trabalho utilizou ferramentas de geoprocessamento e compreendeu três etapas fundamentais: (a) delineamento de pedoformas; (b) classificação da cobertura do solo e, (c) delineamento de unidades geoambientais (Figura 3). As informações de referência utilizadas nas análises foram armazenadas no “software” ARC/INFO™ versão 7.1.1 (ESRI, 1997) e estiveram representadas por: (a) pontos com coordenadas obtidas por meio de GPS (“Global Positioning System”); (b) mapas da rede hidrográfica, estradas e curvas de nível, extraídos da carta topográfica em escala 1:50.000 (IBGE, 1979) e (c) imagem TM/Landsat-5 do dia 27 de abril de 2001, “Worldwide Reference System” (WRS) 217-074, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (INPE, 2001).

A) Delineamento de pedoformas

Para a análise digital do terreno foi gerado um MDE por meio do uso do modelo TOPOGRID (Hutchinson, 1989; ESRI, 1997). Utilizou-se um tamanho de célula de 20 m x 20 m e incorporou-se como restrição a rede de drenagem, conectada e orientada de acordo com a direção do escoamento da água. Para a discriminação das geoformas foram considerados atributos primários derivados do MDE relacionados aos processos de formação do solo (Moore et al., 1991): elevação, declividade e curvatura em cada ponto da superfície, assim como também a matriz de escoamento acumulado, calculada segundo o procedimento descrito no Capítulo I.

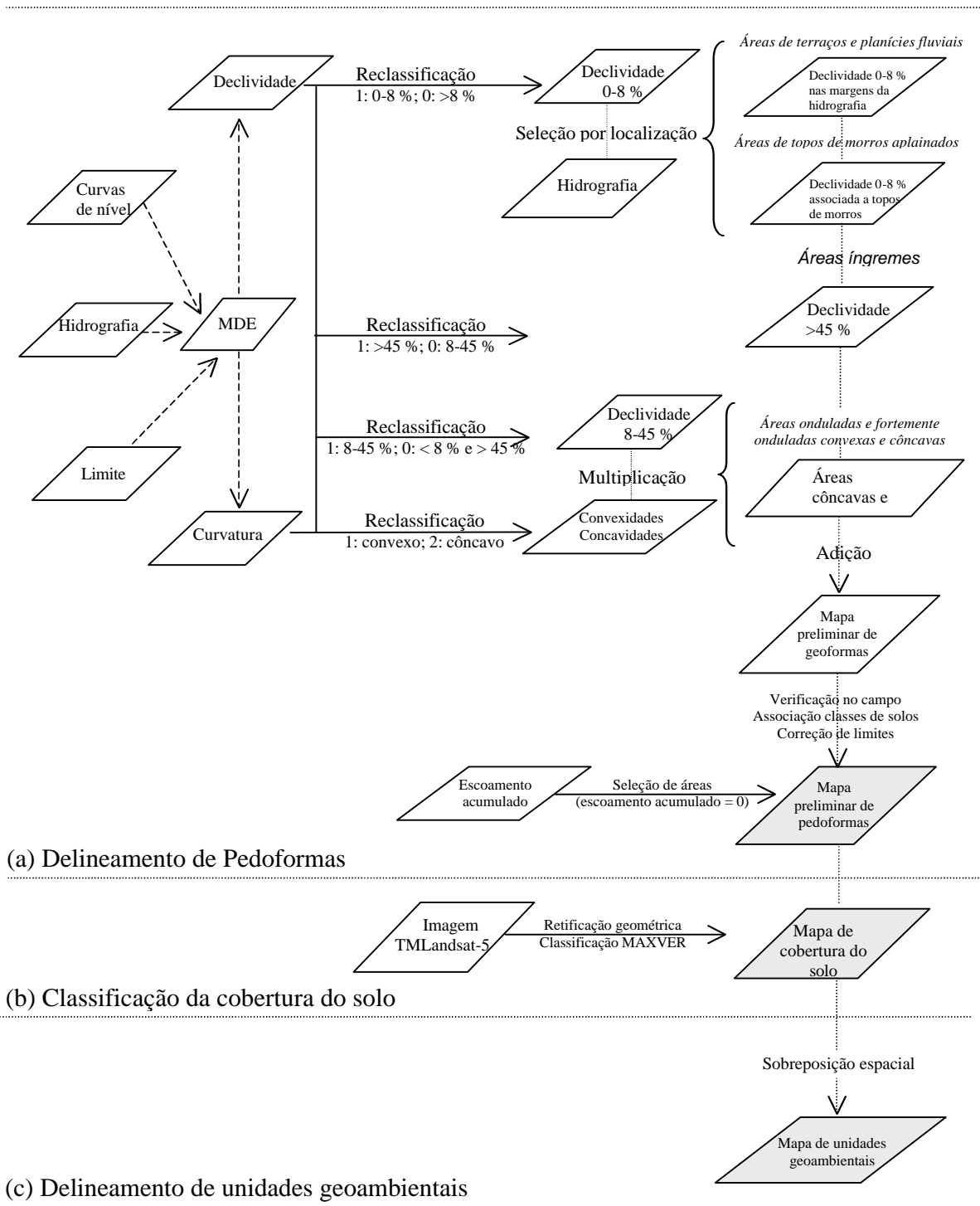


Figura 3. Diagrama das operações realizadas para a obtenção do mapa de unidades geoambientais.

A declividade representa a primeira derivada da altitude e os valores das células da matriz de declividade correspondem à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. A curvatura do terreno representa a segunda derivada da altitude e os valores das células da matriz de curvatura associam-se à concavidade ou à convexidade das vertentes. A curvatura de uma vertente está relacionada a fatores tais como teor de água no solo, fluxo convergente/divergente e taxa de erosão/deposição (Moore et al., 1991).

A delimitação das *áreas de terraços e planícies fluviais* esteve baseada no fatiamento (reclassificação) da grade de declividade em áreas com declividade entre 0 e 8 % e áreas com declividade superior a 8 % (Figura 3). No plano de informação resultado da reclassificação foram selecionados os polígonos com declividade entre 0 e 8 % que se encontraram associados à rede de drenagem. Para isto, foi realizada uma operação de “seleção por localização” dos polígonos que intersectaram as linhas do plano de informação contendo a informação vetorial sobre hidrografia; a seleção foi posteriormente copiada para um novo plano de informação que identificou as áreas de terraço e planície fluvial. Por meio da inversão da seleção anterior, foram discriminadas as áreas com declividade entre 0 e 8 % associadas aos *topos de morros aplainados* (Figura 3).

O processamento para a discriminação das geoformas *onduladas e fortemente onduladas* esteve baseado na classificação das áreas com declividade entre 8 e 45 % e na análise da curvatura da superfície na direção da encosta (discriminação de áreas convexas e côncavas) (Figura 3). Por último, as *áreas íngremes* corresponderam àquelas com declividade acima de 45 % (Figura 3).

Um mapa preliminar de distribuição de *geoformas* foi obtido por meio da união dos seguintes planos de informação: terraço e planície fluvial; topos de morros aplainados; áreas onduladas e fortemente onduladas (côncavas e convexas) e áreas íngremes. Esse mapa serviu de base para o trabalho de campo, a partir do qual foram introduzidas correções nos limites das unidades visando uma melhor concordância com a realidade da região e foram constatadas as associações entre as geoformas e as classes de solos dominantes, para elaboração de um mapa preliminar de *pedoformas*. Foram localizados pontos com GPS (Global Positioning System) para observação da classe de solo e geoforma relacionada. Esses pontos foram armazenados no SIG para verificação da concordância com o mapa preliminar de geoformas, a que foi avaliada por meio da exatidão geral (Story & Congalton, 1986).

Para correção da classificação de geoformas, foi utilizada a matriz de escoamento acumulado obtida segundo o procedimento descrito no Capítulo I e que representa o número de células à montante que contribuem para o escoamento em cada célula considerada. As células de valor zero na matriz de escoamento acumulado representam os divisores de água.

B) Classificação da cobertura do solo

O mapa de distribuição da cobertura do solo foi obtido por meio da classificação supervisionada da imagem TM/Landsat-5. Os pontos de coordenadas conhecidas, obtidos com GPS, e o mapa da rede de drenagem serviram de base para a retificação geométrica da imagem por meio de polinômio de primeiro grau e reamostragem pelo vizinho mais próximo, correção que precedeu à classificação.

O algoritmo utilizado para a classificação da imagem foi o de distribuição gaussiana por máxima verossimilhança (MAXVER) (Mather, 1993; Richards, 1995) implementado no “software” ERDAS Imagine versão 8.4 (ERDAS, 1999), assumindo-se igual probabilidade de ocorrência das classes. Esse classificador supõe que a distribuição dos “pixels” que formam as distintas classes ajusta-se a uma curva normal. Isto permitiu descrever cada categoria por uma função de probabilidade e dessa forma, calcular a probabilidade de um “pixel” pertencer a uma determinada classe. As amostras das classes espectrais relacionadas a formas de cobertura do solo, para treinamento do classificador, foram obtidas dos trabalhos de campo e do mapa de uso e cobertura da terra do ano 1997 elaborado pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF-MG, 1997) e possuíram um tamanho maior que $30p$ “pixels” onde p representou o número de canais utilizados na classificação (i.e. bandas TM/Landsat-5: 1, 2, 3, 4, 5 e 7). Esse tamanho satisfaz o requerimento para amostras representativas apontado por Mather (1993). Após o procedimento de classificação supervisionada, realizou-se uma uniformização das distintas classes de cobertura do solo por meio da utilização de um filtro passa baixa de média 3×3 ; desta maneira, eliminaram-se “pixels” classificados em forma isolada, melhorando o aspecto visual da classificação.

A exatidão geral da classificação (P_0) foi calculada pelo quociente entre o total de amostras classificadas corretamente e o número total de amostras, segundo a Equação 1.

Nessa equação, N representa o número total de amostras contempladas pela matriz de erro; n_{ii} representa os elementos da diagonal principal e m o número de classes presentes na matriz. A exatidão de cada classe individual também foi calculada; para isso, o número de amostras classificadas corretamente em uma classe foi dividido pelo número total de unidades amostrais dessa categoria derivado dos dados de campo (referência). Essa medida de exatidão indicou a probabilidade de uma amostra de referência estar corretamente classificada (Story & Congalton, 1986).

$$P_0 = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{N}$$

Equação 1

C) Delimitação de unidades geoambientais

O mapa de unidades geoambientais foi obtido por meio da sobreposição espacial do mapa de pedoformas e do mapa de cobertura do solo (Figura 3), utilizando a operação de união de conjuntos; o procedimento permitiu obter um mapa com novos polígonos e atributos resultantes da combinação dos mapas de entrada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A) Delimitação de pedoformas

Os dados extraídos do mapa preliminar de geoformas permitiram verificar a dominância das formas convexas e côncavas, onduladas e fortemente onduladas (78,6 %) e menor expressão geográfica das restantes formas da paisagem (Quadro 1). Por meio da comparação das observações realizadas no campo com a classificação de geoformas, determinou-se uma concordância de 72 % (exatidão geral). Tomando como base essa classificação de geoformas, foram introduzidas algumas modificações na análise espacial visando alcançar uma melhor concordância com a realidade de campo. As observações realizadas e as operações posteriormente efetuadas no laboratório são sintetizadas nos parágrafos seguintes.

Quadro 1. Classificação preliminar de geoformas da bacia do Córrego Ipiúna: superfície das classes.

Geoforma	Área (ha)	Área (%)
Encostas convexas onduladas e fortemente onduladas	747	41,7
Encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas	661	36,9
Áreas íngremes	217	12,1
Terraço e planície fluvial	89	4,9
Topos de morros aplainados	77	4,4
Total	1791	100

Por um lado, foi observada a superestimativa das áreas classificadas como íngremes. No mapa preliminar de geoformas, estas áreas ocuparam uma superfície de 12,1 % do total

da bacia hidrográfica (Quadro 1). Para melhorar a correspondência com as observações de campo, foi adotado um limiar de 50 % na matriz de declividade, em lugar da consideração inicial de 45 %. As áreas íngremes assim delineadas, foram associadas às classes de solos CXbd, CXbd latossólico e LVAd câmbico; as áreas com declividade entre 45 e 50 % foram acrescentadas às classes de superfícies onduladas e fortemente onduladas (côncavas e convexas).

Por outro lado, constatou-se no mapa preliminar de geoformas, a subestimativa da superfície classificada como topo, expressada por uma superfície total de menos de 5 % (Quadro 1); observou-se que áreas de topo relativamente extensas e contínuas em forma de espigões (correspondentes às divisórias d'água) se encontravam descontínuas na classificação preliminar de geoformas. Para aprimoramento da continuidade dos polígonos, foi utilizada a matriz de escoamento acumulado obtida a partir do MDE segundo o procedimento descrito no Capítulo I. Nesse plano de informação, foram selecionadas as células associadas às divisórias d'água (escoamento acumulado igual a zero) e que tinham interseção com os topos de morros da classificação preliminar das geoformas (“seleção por localização”). Posteriormente, as áreas selecionadas foram unidas às áreas de topos de morros da classificação preliminar de geoformas, para geração de um novo plano de informação contendo a distribuição das áreas de topos de morros aplainados, que foram associadas à classe de solos LVAd (com horizonte A proeminente ou moderado).

A partir das modificações introduzidas na classificação preliminar de geoformas, observou-se que a superfície correspondente a topos de morros aplainados aumentou em 5 % enquanto que a superfície ocupada por áreas íngremes diminuiu em 6 % (Quadro 1 e Quadro 2). As áreas onduladas e fortemente onduladas côncavas e convexas associadas a solos LVAd (com horizonte A moderado) e LVAd (com horizonte A câmbico) são dominantes na bacia hidrográfica, ocupando quase o 80 % da superfície total (Quadro 2), enquanto que a classe de menor expressão geográfica corresponde aos terraços (solos dominantes PVAd) e planícies fluviais (solos dominantes GXbd, RUBd gleico), com 5 % da superfície total (Quadro 2). O valor de exatidão geral obtido após a introdução das modificações foi de 81 %, e indicou aprimoramento da classificação.

Quadro 2. Classificação preliminar de pedoformas da bacia do Córrego Ipiúna: superfície das classes.

Pedoforma	Área (ha)	Área (%)
Encostas convexas onduladas e fortemente onduladas: LVAd A moderado	716	40,0
Encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas: LVAd câmbico	709	39,6
Topos de morros aplainados: LVAd A proeminente (moderado)	171	9,6
Áreas íngremes: CXbd, CXbd latossólico, LVAd câmbico	106	5,9
Terraço: PVAd e Planície fluvial: GXbd, RUbd gleico	89	4,9
Total	1791	100

Na Figura 4a apresenta-se o mapa preliminar de distribuição de pedoformas da bacia do Córrego Ipiúna. Em escala de maior detalhe (Figura 4b) apresenta-se a classificação de pedoformas sobreposta ao modelo sombreado do relevo; essa operação permite obter uma aparência do relevo em 3 dimensões.

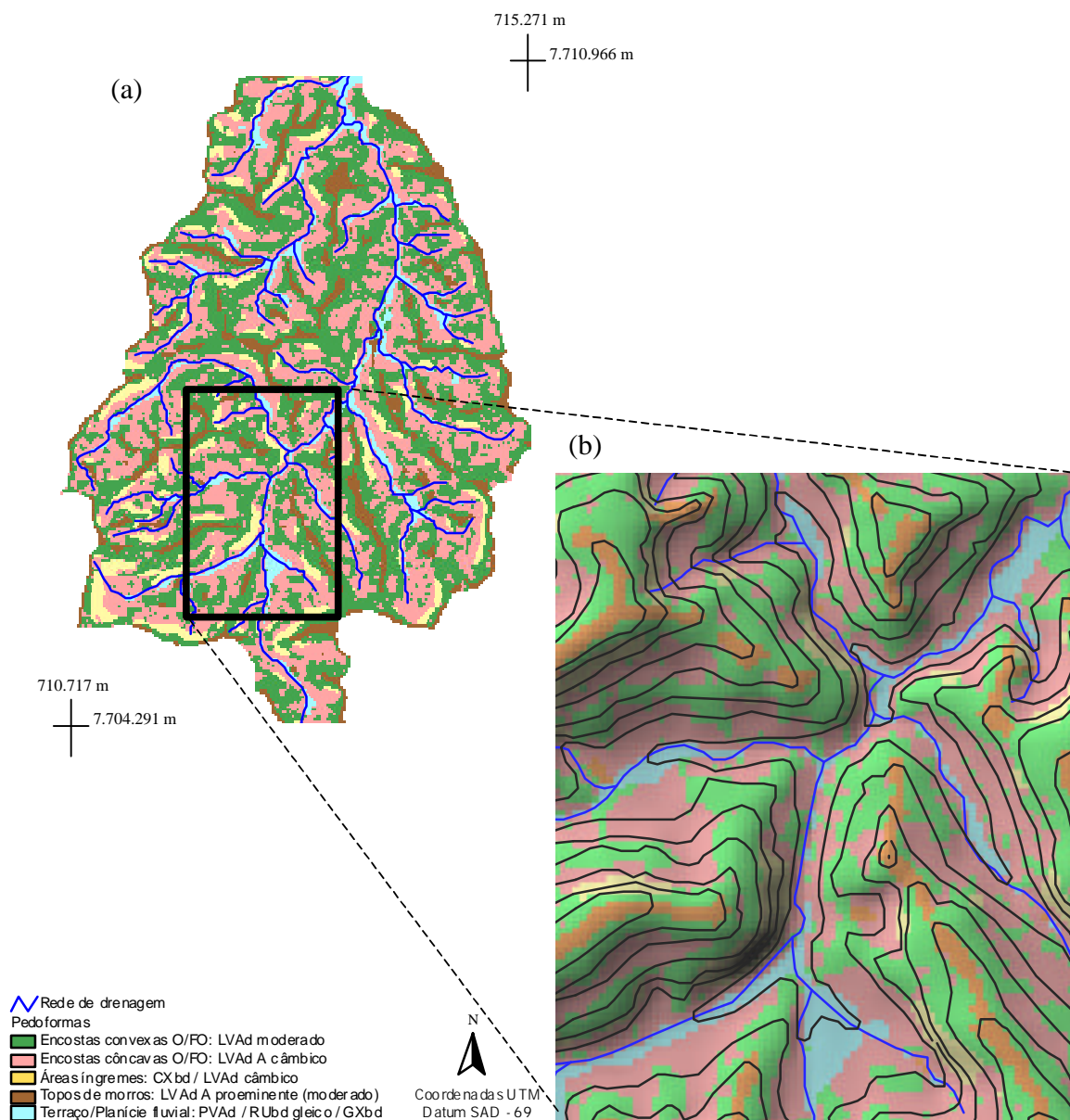


Figura 4. Distribuição de pedoformas na bacia do Córrego Ipiúna. (a) Mapa preliminar de pedoformas, escala 1:65.000. (b) Detalhe da classificação sobreposta ao modelo sombreado do relevo, com informação de curvas de nível (linhas de cor preta), escala 1:20.000.

O método de caracterização de pedoformas utilizado permitiu a classificação objetiva da superfície da bacia do Córrego Ipiúna, utilizando exclusivamente como informação de base a carta topográfica 1:50.000 da região e posterior verificação de campo. Nas

interpretações manuais as dificuldades envolvidas na interpretação dos dados associados ao relevo são múltiplas e introduzem subjetividade.

Destaca-se que um aprimoramento do método seria possível de se obter por meio da utilização de material básico com maior resolução espacial (mapas topográficos de maior resolução, menor espaçamento vertical entre curvas de nível), de modo a permitir a geração de modelos digitais de elevação mais detalhados que possibilitariam uma separação também mais detalhada das geofomas, fundamentalmente nas áreas de planície fluvial.

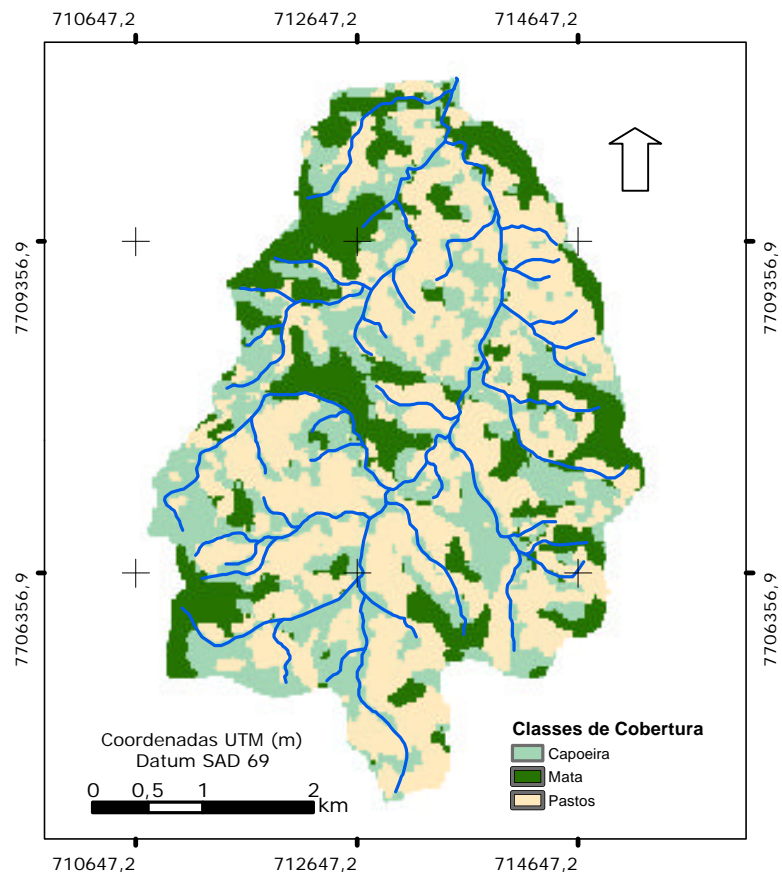


Figura 5. Distribuição das classes predominantes de cobertura do solo da bacia do Córrego Ipiúna.

B) Classificação da cobertura do solo

A classificação da cobertura do solo da bacia do Córrego Ipiúna (Figura 5) considerou as classes predominantes utilizadas pelo mapeamento do IEF na região (IEF-MG, 1997): mata, capoeira e pasto. As classes do solo de menor expressão geográfica, como áreas dedicadas à agricultura familiar e mata ciliar foram incluídas nas precedentes.

A partir do resultado da classificação (Figura 5), foi realizada a quantificação da superfície ocupada por classe de cobertura (Quadro 3). Destaca-se que os pastos constituem a cobertura dominante, ocupando mais da metade da superfície da bacia hidrográfica (59,5 %); a área restante encontra-se ocupada por mata (22,3 %) e capoeira (18,2 %). Observa-se também que o maior grau de fragmentação corresponde à capoeira, que apresenta o maior número de polígonos e o menor tamanho médio dos fragmentos (1,8 ha); a menor fragmentação foi constatada para a cobertura de pastos, condição que fica determinada tanto pelo escasso número de polígonos como por seu maior tamanho médio (48,5 ha) (Quadro 3).

Quadro 3. Superfície ocupada pelas distintas classes de cobertura do solo na bacia do Córrego Ipiúna.

Classe de cobertura	Número de Polígonos	Tamanho médio dos polígonos (ha)	Área (ha)	Área (%)
Pasto	22	48,5	1064,6	59,4
Mata	127	3,3	399,4	22,3
Capoeira	182	1,8	327,0	18,3
Total	291	...	1791,0	100

As informações obtidas nos trabalhos de campo permitiram verificar que a delimitação das classes de cobertura do solo foi bem sucedida. No Quadro 4 apresenta-se a matriz de erro elaborada a partir da comparação dos dados de campo com os dados da classificação (Story & Congalton, 1986).

Quadro 4. Comparação dos dados de campo com os dados da classificação de cobertura do solo: matriz de erro.

Classe de cobertura (referência)	Classe de cobertura (classificação)			
	Pasto	Mata	Capoeira	Total
Pasto	165	2	2	169
Mata	0	13	7	20
Capoeira	5	3	12	20
Total	170	22	17	209

O valor da exatidão geral (P_0) na classificação da cobertura do solo foi de 90 %, enquanto que os valores de exatidão das classes foram 97 %, 65 % e 60 % para pasto, mata e capoeira, respectivamente. A maior confusão do classificador foi registrada entre as coberturas de mata e capoeira devido a estas apresentarem uma resposta espectral semelhante. A cobertura de pastos foi classificada satisfatoriamente apresentando em alguns casos confusão com a classe capoeira, devido também a semelhanças espectrais, fundamentalmente em áreas de capoeiras incipientes.

C) Delineamento de unidades geoambientais

A análise de sobreposição espacial da distribuição das pedoformas e das unidades de cobertura do solo possibilitou a geração do mapa preliminar de unidades geoambientais que apresentou 15 classes (Quadro 5).

Em todas as formas da paisagem, a classe “pasto” constitui a cobertura dominante com valor médio de área relativa à superfície das pedoformas de 52 %, e valores máximo e mínimo de 67 % e 42 % nas encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas (solos dominantes LVAd - horizonte A moderado) e topos de morros (LVAd - horizonte A proeminente ou moderado), respectivamente (Figura 6). A classe “pasto” apresenta ainda, maior importância absoluta nas áreas côncavas e convexas onduladas e fortemente onduladas (solos predominantes LVAd câmbico e LVAd com A moderado), correspondendo a 25,0 % e 23,2 % da área total da bacia hidrográfica, respectivamente. Em seqüência, destaca-se a unidade geoambiental composta pela classe de cobertura “mata”

localizada em encostas convexas onduladas e fortemente onduladas (LVAd câmbico), com valor de 10 % da superfície total da bacia hidrográfica. As restantes unidades geoambientais ocupam, individualmente, superfícies menores do que 10 % da superfície total da bacia do Córrego Ipiúna.

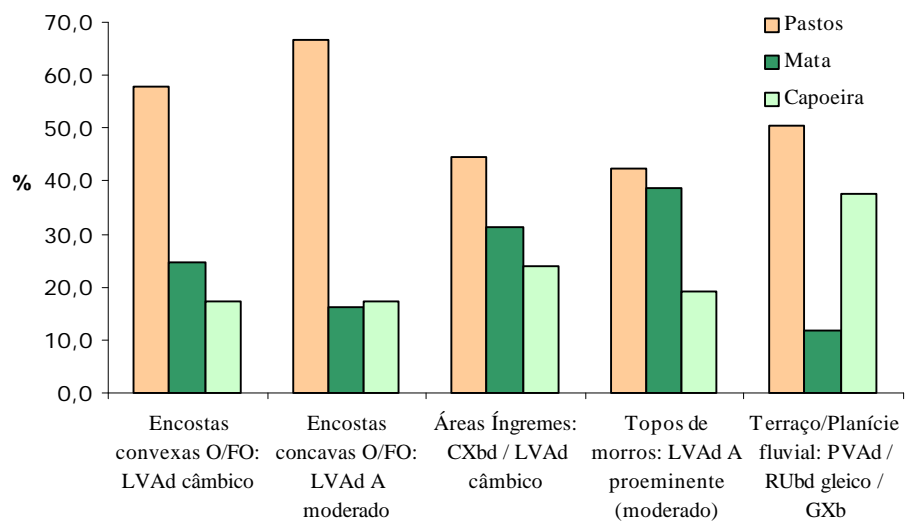
Quadro 5. Superfície ocupada pelas unidades geoambientais discriminadas na bacia hidrográfica do Córrego Ipiúna.

Pedoforma	Classe de cobertura	Área (ha)	Área absoluta (%) *	Área relativa (%) **
Encostas convexas O/FO: LVAd câmbico	Capoeira	125,0	7,0	17,4
	Mata	179,0	10,0	24,9
	Pasto	416,0	23,2	57,8
Encostas côncavas O/FO: LVAd (horizonte A moderado)	Capoeira	122,0	7,0	17,3
	Mata	114,0	6,0	16,2
	Pasto	469,0	25,0	66,5
Áreas Íngremes: CXbd / LVAd câmbico	Capoeira	27,0	2,0	24,1
	Mata	35,0	2,0	31,3
	Pasto	50,0	2,8	44,6
Topos de morros: LVAd (horizonte A proeminente ou moderado)	Capoeira	31,0	2,0	19,3
	Mata	62,0	3,0	38,5
	Pasto	68,0	3,8	42,2
Terraço/Planície fluvial: PVAd / RUbd gléico / GXb	Capoeira	35,0	2,0	37,6
	Mata	11,0	1,0	11,8
	Pastos	47,0	3,0	50,5
Total		1791	100	

* Percentagem com respeito à área total da bacia hidrográfica; ** Percentagem com respeito à superfície total da pedoforma.

O maior valor relativo da classe de cobertura “mata” (39 %) encontra-se associado às posições de topos de morros (solos LVAd com horizonte A proeminente ou moderado); as menores ocorrências dessa cobertura foram constatadas nas encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas e nas áreas de terraços e planícies fluviais (com solos dominantes PVAd / RUbd gléico / GXb), com 16 % e 12 %, respectivamente (Figura 6). Já a classe capoeira é dominante nas áreas de terraços e planícies fluviais (37 %), com menor ocorrência em áreas de encostas onduladas e fortemente onduladas, onde corresponde ao 17 % da superfície total de cada pedoforma (Quadro 5, Figura 6).

Figura 6. Unidades geoambientais: distribuição das classes de cobertura (pasto, mata, capoeira) nas pedoformas da bacia do Córrego Ipiúna.



5. CONCLUSÕES

1. Por meio da utilização das ferramentas de geoprocessamento foi extraída informação morfológica relevante para fins de mapeamento pedológico a partir dos atributos do relevo, em nível de microbacia.hidrográfica;
2. Os procedimentos utilizados permitiram a geração de um mapa preliminar de distribuição das pedoformas da bacia do Córrego Ipiúna, com exatidão geral de 81 %;
3. O método de classificação de pedoformas proposto constitui uma alternativa rápida e econômica em relação ao delineamento manual e possibilita o aumento da eficiência nos trabalhos de campo de levantamento de solos e estratificação das formas do relevo para fins de amostragem;
4. As análises espaciais possibilitaram a integração da distribuição de classes de cobertura e de pedoformas para geração de um mapa com 15 unidades geoambientais, sendo os pastos a cobertura dominante em todas as formas da paisagem, com valor máximo de 67 % nas encostas côncavas onduladas e fortemente onduladas onde predomina a classe de solos LVAd (horizonte A moderado);
5. O maior valor relativo da cobertura “mata” (39 %) encontra-se associado às posições de topos de morros (solos LVAd com horizonte A proeminente ou moderado), enquanto que a classe capoeira é dominante em áreas de terraços e planícies fluviais (37 %), com menor ocorrência em áreas de encostas onduladas e fortemente onduladas.

6. BIBLIOGRAFIA

- ASSAD, E.D.; SANO, E.E.; MEIRELLES, M.L.; MOREIRA, L. Estruturação de dados geoambientais no contexto de microbacia hidrográfica. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E., ed. Sistemas de Informações Geográficas – Aplicações na agricultura. Brasília, EMBRAPA, 1993. p.87-107.
- BELTRAME, A.V. Uma aplicação do sensoriamento remoto no planejamento físico de microbacias hidrográficas. *Agropecuária Catarinense*, 4:37-41, 1991.
- BLASZCZYNSKI, J.S. Landform characterization with Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63:183-191, 1997.
- CORRÊA, G.F. Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa, MG. Dissertação (Mestrado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 86p.
- ERDAS. ERDAS IMAGINE v. 8.4. Atlanta, ERDAS, 1999. Programa de computador. 1 CD-ROM.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. ARC/INFO v. 7.1.1. Redlands, ESRI, 1997. Programa de computador. 2 CD-ROM.
- GESSLER P.E.; MOORE I.D.; McKENZIE N.J.; RYAN P.J. Soil-landscape modeling in southeastern Australia. In: GOODCHILD M.F.; STEYAERT L.T.; PARKS B.O. JOHNSTON C.; MAIDMENT D.; CRANE M.; GLENDINNIN S. ed. GIS and environmental modeling: progress and research issues. Fort Collins, GIS World, 1996. p.53-58.
- HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106:211-232, 1989.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Teixeira. SF-23-X-B-V-1. Rio de Janeiro, 1979. Carta topográfica em escala 1:50.000.

- IEF-MG. INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Mapa de cobertura do solo do Município de Viçosa, 1997. Mapa digital.
- INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Imagem de satélite Landsat TM-ORB 217 P 074. 27 de abril de 2001. Imagem de satélite. 1 CD-ROM.
- IRVIN, B.J.; VENTURA, S.J.; SLATER, B.K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. *Geoderma*, 77:137-154, 1997.
- MATHER, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. 3.ed. Chichester, John Wiley & Sons, 1993. 352p.
- McDANIEL, K.C.; HAAS, R.H. Assessing Mesquite-Grass Vegetation Condition from Landsat. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 13:441-450, 1982.
- McBRATNEY, A.B.; HART, G.A.; McGARRY, D. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *Journal of Soil Science*, 3:513-533, 1991.
- MIRANDA, L.H.F.; IPPOLITI, G.A.; OLIVEIRA, C.M.L.; FERNANDES FILHO, E.I.; ABRAHÃO, W.A.P. SIGUBÁ. Sistema de Informação Geográfica do Município de Ubá. Ubá (MG), Prefeitura Municipal de Ubá, 1999. 63p. Relatório de trabalho elaborado para a Prefeitura do Município de Ubá.
- MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, 5:3-30, 1991.
- MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A. PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, 57:443-452, 1993.
- ODEH, I.O.A.; CHITTLEBOROUGH, D.J.; McBRATNEY, A.B. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma*, 49:1-32, 1991.
- REZENDE, S.B. Estudo de crono-toposequências em Viçosa-Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1971. 71p.
- ROCHA, J. S. M.; KURTZ, S. M. J. M. Manejo integrado de bacias hidrográficas. 4. ed. Santa Maria, Edições UFSM CCR /UFSM, 2001. 302p.
- STORY, M.; CONGALTON, R. Accuracy assessment: a user's perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:397-399, 1986.

STRAHLER, A.L. Dynamic basis of geomorphology. Geological Society America Bulletin, 63:923-938, 1952.

CAPÍTULO III

CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE FOTOGRAFIAS VERTICAIS PARA ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO

RESUMO

A quantificação da cobertura do solo é de grande importância para a avaliação do estado da vegetação e da degradação dos solos. Este trabalho apresenta um método para a obtenção de “cartas da cobertura” a partir da classificação digital de fotografias de 1 m² de área, obtidas em forma vertical sobre a superfície do solo. O método apresentou um amplo grau de concordância com as estimativas visuais e permitiu separar de maneira detalhada três tipos de cobertura: vegetação verde, vegetação seca e solo exposto. As principais confusões do classificador foram observadas entre áreas com solo exposto e áreas com vegetação seca. Em algumas cartas da cobertura, teve que ser considerada a classe “sombra”, originada pela posição da câmara com respeito ao sol; isto, porém, não resultou em um empecilho, pois os valores dos “pixels” sombreados foram bem caracterizados e o cálculo da cobertura em cada fotografia foi realizado por consideração daqueles “pixels” não sombreados.

Termos de indexação: método fotográfico, classificação digital, estimativa da cobertura do solo, pastos.

ABSTRACT

DIGITAL CLASSIFICATION OF VERTICAL PICTURES FOR SOIL COVER ESTIMATE

Ground cover quantification is a relevant factor for vegetation evaluation and natural resources degradation studies. This work presents a method for cover estimation in pastures condition. Vertical pictures of 1 square meter was obtained on the surface and classified using digital supervised techniques. The method presented a wide agreement degree with the visual estimates and it allowed to separate 3 types of covers: green vegetation, dry vegetation and bare soil. Main confusions of the classifier were observed among areas with exposed soil and areas with dry vegetation. In some cover classifications was observed shade by the position of the camera with regard to the sun; this was not a unsolved task because the values of the "shaded pixels" were well characterized and the cover calculation in each quadrant was accomplished by consideration of "non shaded pixels".

Index terms: photographic method, digital classifier, ground cover estimation, pastures.

1. INTRODUÇÃO

A cobertura do solo, definida como a projeção vertical da vegetação na superfície, destaca-se como uma característica quantitativa de interesse para a avaliação dos pastos, que além de ser importante para a definição da produtividade, constitui um fator fundamental para a determinação do estado da vegetação e da degradação da paisagem.

Friedl et al. (1994) salientaram a necessidade do conhecimento preciso da dinâmica espacial e temporal da cobertura do solo, para sua inclusão em modelos do ciclo do carbono e nitrogênio, da produtividade primária líquida, do comportamento da hidrologia superficial, da erosão e do clima. Além disto, a informação da cobertura do solo em áreas de pastos é requerida na maioria dos estudos de planejamento efetivo do controle da erosão (Shelton et al., 1997) e de monitoramento de mudanças locais e globais (Purevdorj et al., 1998).

Brown (1954) descreveu vários métodos para estimativa da cobertura do solo por vegetação, entre os que se destacam: (a) observação direta da superfície; (b) geração de “cartas da cobertura”; (c) interceptação de uma linha; (d) interceptação de pontos. A geração de cartas da cobertura foi descrito como um procedimento detalhado que permite representar a distribuição e área ocupada pelas classes de cobertura em uma unidade de amostragem. As principais desvantagens apontadas para esse método se encontraram relacionadas ao grande esforço e tempo associado à geração das estimativas, devido a que as fotografias da superfície são analisadas visualmente. Tais empecilhos podem ser superados com o auxílio de técnicas de processamento de imagens, que permitem realizar de uma maneira automática ou semi-automática o agrupamento em classes, dos elementos (“pixels”) com resposta espectral semelhante (por exemplo, pastos em estado vegetativo ou

seco, resíduos e solo exposto).

Este trabalho descreve um método para a elaboração de cartas da cobertura por meio da classificação digital de fotografias verticais de 1 m², em áreas de pastos da região de “mar de morros” (Município de Viçosa, MG). Objetivou-se a avaliação da exatidão do procedimento quando comparado às estimativas visuais, a sua facilidade de implementação e o tempo necessário para as operações. Especificamente, o trabalho serviu de base metodológica para estudos posteriores de quantificação da cobertura do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área correspondente à microbacia do Córrego Ipiúna localizada no Município de Viçosa (MG), entre as coordenadas 20°41'12" a 20°44'57" S e 42°55'28" a 42°58'54" WGr, e abrange uma superfície de 1791 ha. Os pastos ocupam mais da metade da superfície da bacia (59,5 %), e a outra fração encontra-se ocupada por mata (22,3 %) e capoeira (18,2 %) de acordo com a classificação da cobertura realizada no Capítulo II. A composição predominante dos pastos é a associação de “capim gordura” (*Melinis minutiflora* Paul de Beauv.) e “grama batatais” (*Paspalum notatum* L.), com manchas de “sapé” (*Imperata brasiliensis* Trin.). As áreas de agricultura são descontínuas e pouco significativas e concentram-se nos leitos maiores e terraços.

A amostragem da cobertura do solo foi realizada nas unidades geoambientais representadas por pastos localizados em encostas onduladas e fortemente onduladas (côncavas e convexas), definidas utilizando as técnicas de geoprocessamento descritas no Capítulo II. As áreas de amostragem foram localizadas de maneira aleatória por meio do sorteio das coordenadas planas de um dos seus vértices usando o programa Microsoft Excel 2000 (MICROSOFT, 2000). As áreas sorteadas foram analisadas visualmente no campo e amostradas de acordo com a sua acessibilidade a partir das estradas existentes na região. Finalmente, foram selecionados 20 locais onde se obtiveram fotografias verticais da cobertura superficial no formato digital, que serviram de base para as avaliações metodológicas. O trabalho baseou-se na análise de 100 fotografias verticais da cobertura obtidas nos diferentes locais de amostragem selecionados.

Em cada ponto de amostragem foi colocado um marco quadrado abrangendo 1 m² de superfície, que serviu como referência para a obtenção das imagens. As fotografias foram obtidas com uma câmara fotográfica digital, que capturou a resposta espectral em três

bandas do espectro visível (vermelho: 0,63-0,69 μm ; verde: 0,52-0,60 μm e azul: 0,45 - 0,52 μm), disposta na posição vertical sobre o quadrado por meio de sustentação manual a uma altura aproximada de 1,50 m. O tamanho das fotografias foi de 640 x 480 “pixels”.

As fotografias digitais obtidas no campo foram classificadas para a obtenção das “cartas da cobertura” por meio do algoritmo de distribuição gaussiana por máxima verossimilhança (Mather, 1993; Richards, 1995) implementado no “software” ERDAS Imagine versão 8.4 (ERDAS, 1999), levando-se em consideração a resposta nas três bandas espectrais.

A separabilidade espectral das diferentes classes foi avaliada por meio da análise dos gráficos de respostas espectrais das amostras de treinamento das imagens (agrupadas por classes), análise das estatísticas descritivas de cada classe (média e variância) e, pelo cálculo do valor da divergência espectral entre as classes (Richards, 1995). A medida da divergência tem sido muito empregada nos trabalhos de classificação de imagens, pois estabelece um critério quantitativo que permite avaliar a possibilidade de discriminação das diferentes classes (Chuvieco, 1990). Baseia-se nos valores do vetor de médias e matriz de variância-covariância entre pares de classes consideradas na classificação.

Finalmente, o resultado da técnica de classificação semi-automática foi avaliado por meio da comparação com os resultados da interpretação visual (matriz de confusão) e posterior cálculo da exatidão das classes e da estatística Kappa (K), utilizada por vários autores para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e os resultados obtidos a partir das classificações (Cohen, 1960; Rosenfield & Fitzpatrick-Lins, 1986; Foody, 1992). Foi utilizada a formulação proposta por Jensen (1986), citado por Mather (1993), para cálculo do limite de confiabilidade inferior associado com o valor de exatidão geral da classificação.

Calculou-se pela Equação 1 a estimativa de Kappa (Congalton, 1991), onde m representa a dimensão da matriz quadrada de erro; n_{ii} representa o número de observações na linha i , coluna i (diagonal da matriz); n_{i+} e n_{+i} são os totais marginais da linha i e da coluna i , respectivamente, enquanto que N refere-se ao número total de observações.

$$\hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^m n_{ii} - \sum_{i=1}^m (n_{i+} n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^m (n_{i+} n_{+i})} \quad (\text{Equação 1})$$

O valor de \hat{K} refere-se ao nível de concordância observado entre os dados da classificação e a realidade interpretada visualmente nas fotografias digitais, com relação à concordância esperada quando as amostras de referência forem distribuídas ao acaso em cada uma das categorias da classificação.

As amostras de referência usadas na avaliação da classificação foram independentes das amostras de treinamento e escolhidas ao acaso em cada fotografia, por meio do uso de uma rotina de amostragem espacial aleatória existente no software ERDAS 8.4.

3. RESULTADOS

Na classificação semi-automática foram consideradas as classes: vegetação verde (pastos em estado vegetativo), vegetação seca (pastos secos ou resíduos vegetais secos), solo exposto (solo desprovido de vegetação ou resíduos vegetais) e sombra.

Em algumas fotografias foram originados sombreamentos pela posição da câmara fotográfica em relação ao sol, condição influenciada pelo acidentado relevo local; por isto, a classe sombra foi incluída na legenda da classificação. Avaliou-se “a priori” que a inclusão dessas áreas em alguma das outras classes não conduziria a resultados adequados na classificação, pois os seus valores não se encontraram relacionados com um tipo específico de cobertura. O sombreamento foi atribuído ao posicionamento manual da câmara (sem uso de tripé) para obtenção das fotografias verticais. Porém, a falta de uso de um tripé foi vantajosa quanto à eficiência, pois permitiu maior rapidez na obtenção dos dados no campo.

Na Figura 1, apresentam-se os gráficos das respostas espectrais médias das amostras de treinamento extraídas em três fotografias, que representam a tendência geral do comportamento das classes.

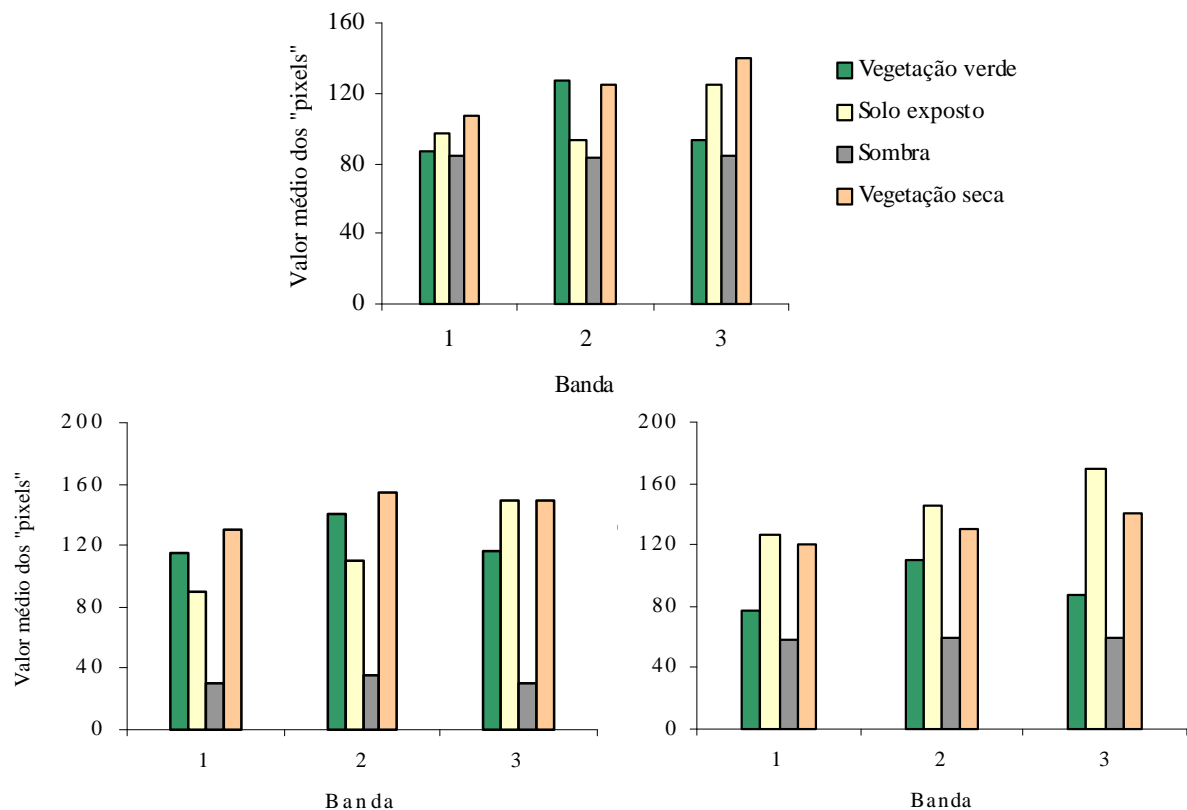


Figura 1. Respostas espectrais médias das classes de cobertura para três fotografias. Bandas 1: Azul (0,45 -0,52 μm); 2: Verde (0,52-0,60 μm); 3: Vermelho (0,63-0,69 μm). O valor médio dos “pixels” pode variar entre 0 e 255.

A resposta da vegetação apresenta uma quebra na ascensão (valor de brilho associado à reflectância) entre as bandas do azul (0,45-0,52 μm) e do vermelho (0,63-0,69 μm), com um pico de reflexão na banda correspondente ao comprimento de onda associado à cor verde (0,52-0,60 μm), dando um aspecto de convexidade nesse trecho da curva espectral (Figura 1). As curvas correspondentes às amostras de solo exposto apresentaram em geral um comportamento ascendente desde a banda do azul até a banda do vermelho. A tendência no comportamento das áreas com vegetação seca ou com resíduos foi espectralmente similar ao de áreas de solo exposto, com valores de brilho maior ou menor que aqueles dependendo possivelmente, da umidade e classe de solo. Essa tendência concorda com o observado em vários trabalhos nos quais as diferenças na refletância entre solos expostos e solos com resíduos ou vegetação seca foram pouco perceptíveis, fundamentalmente na região visível do espectro (Gausman et al., 1977; Stoner et al., 1980; Wanjura & Bilbro Jr., 1986; McMurtrey et al., 1993; Daughtry et al., 1995). A resposta espectral nas áreas de

sombra foi caracterizada por valores muito baixos em quaisquer das bandas. Na Figura 2 pode ser observado o resultado da classificação semi-automática para as três fotografias correspondentes às amostras da Figura 1.

O relacionamento entre respostas espectrais das classes foi também avaliado pelo valor da divergência espectral. Em todos os casos este valor foi elevado quando se consideraram os pares de classes: vegetação verde e vegetação seca, ou vegetação verde e solo exposto, indicando melhor separabilidade espectral entre essas classes (valores variáveis entre 50 e 100). Porém, para os pares de classes solo exposto e vegetação seca esse valor foi inferior (valores inferiores a 20) denotando sobreposição de respostas espectrais.

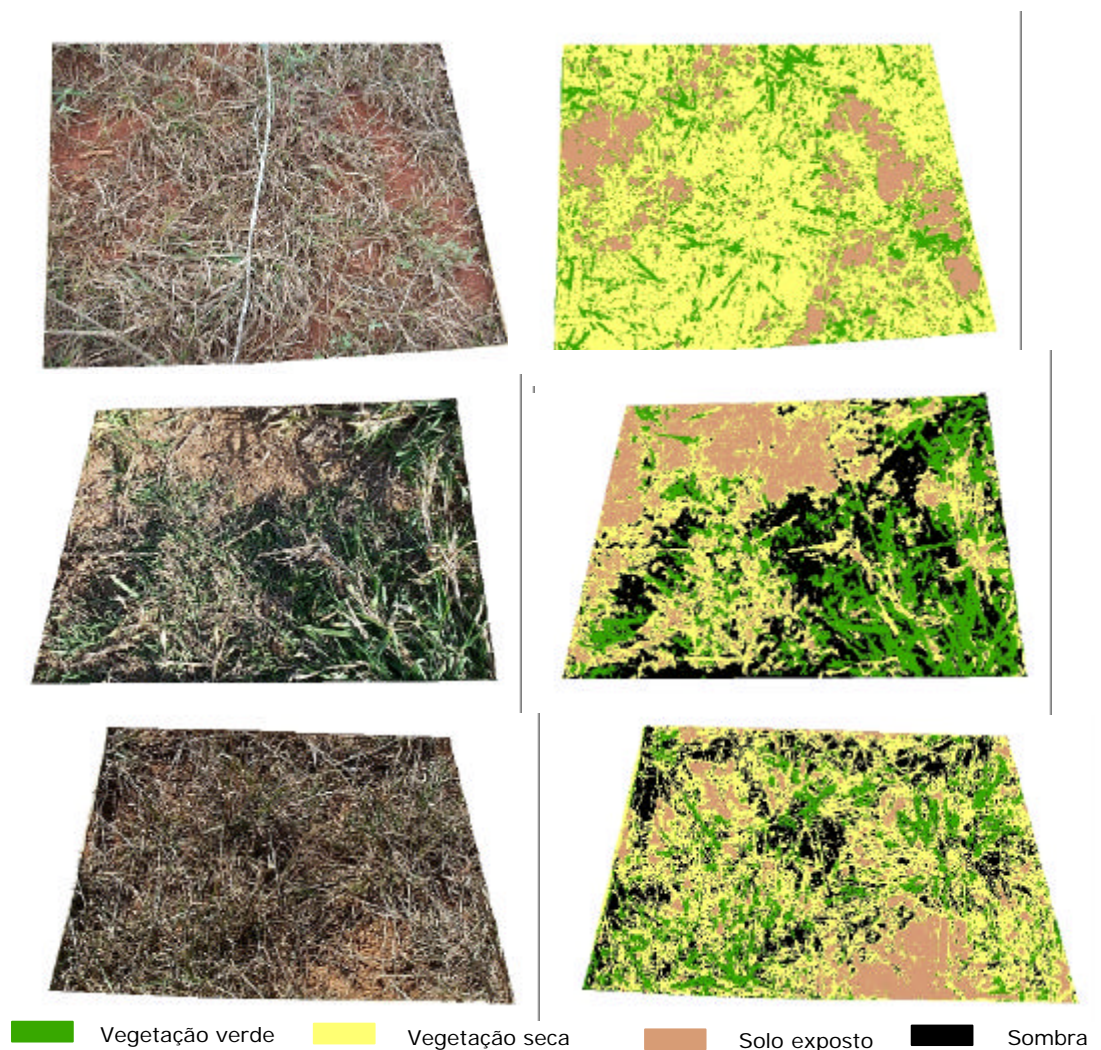


Figura 2. Cartas da cobertura obtidas por meio da classificação digital de fotografias verticais.

O valor da exatidão geral da classificação foi de 82,6 %. O limite menor de confiabilidade associado com esse valor de exatidão para 95 % das amostras foi de 78,7 %. Esse resultado indica que 95 % das amostras consideradas para a avaliação da classificação apresentaram exatidão verdadeira de 78,7 % ou maior. Nas classes individuais, a maior exatidão foi observada para a vegetação verde, na qual grande parte dos pontos amostrados se encontraram corretamente classificados, não apresentando confusão com a classe de solo exposto ou vegetação seca.

Por outra parte, a menor exatidão individual foi observada para a classe de solo exposto, que apresentou várias amostras de referência classificadas como vegetação seca, resultado concordante com a avaliação de separabilidade realizada com a análise das curvas e com o valor da divergência espectral.

O valor obtido para a estatística Kappa foi de 0,73; de acordo com Landis & Koch (1977), a qualidade da classificação associada a esse valor é “muito boa” e significa que a classificação é 73 % melhor do que se esperaria se as amostras de referência tivessem sido aleatoriamente atribuídas às distintas classes da classificação. Por outra parte, deve ser destacado que nas cartas da cobertura observou-se um detalhamento minucioso da distribuição das diferentes classes de cobertura, informação que por interpretação visual e desenho manual requereria muito tempo para ser obtida.

4. CONCLUSÕES

1. O método de classificação semi-automática das fotografias verticais da superfície apresentou um alto grau de concordância com a avaliação visual (exatidão geral: 82,6 %) e para cada classe individual (vegetação seca, vegetação verde, solo exposto e sombra);
2. As maiores confusões do classificador foram originadas entre as classes vegetação seca e solo exposto devido à semelhança nas respostas espectrais;
3. O método de posicionamento manual da câmara introduziu sombreamento nas fotografias; porém, permitiu a obtenção eficiente de dados no campo em termos de tempo e custo.

5. BIBLIOGRAFIA

- BROWN, D. Methods of surveying and measuring vegetation. Inglaterra: Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, 1954. 223p.
- CHUVIECO, E. Fundamentos de teledetección espacial. Madrid, Rialp, 1990. 451p.
- COHEN, J.A. A coefficient of agreement for nominal scales. Educational and Psychological Measurement, 20:37-46, 1960.
- CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37:35-46, 1991.
- DAUGHTRY, C.S.; McMURTREY, J.E.; CHAPELLE, E.W.; DULANEY, W.P.; IRONS, J.R.; SALTERWHITE, M.B. Potential for discriminating crop residues from soil by reflectance and fluorescence. Agronomy Journal, 87:165-171, 1995.
- ERDAS. ERDAS IMAGINE v. 8.4. Atlanta, ERDAS, 1999. Programa de computador. 1 CD-ROM.
- FOODY, G.M. On the compensation for chance agreement in image classification accuracy assessment. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58:1459-1460, 1992.
- FRIEDL, M.A.; MICHAELSEN, J.; DAVIS, F.W.; WALKER, H.; SCHIMEL, D.S. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. International Journal of Remote Sensing, 15:1401-1420, 1994.
- GAUSMAN, H.W.; LEAMER, R.W.; NORIEGA, J.R.; RODRIGUEZ, R.R.; WIEGAND, C.L. Field measured spectroradiometric reflectances of disked and non disked soil with and without wheat straw. Soil Science Society of America Proceedings, 41:793-796, 1977.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. Biometrics, 33:159-174, 1977.

- MATHER, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. 3.ed. Chichester, John Wiley & Sons, 1993. 352p.
- McMURTREY, J.E.; CHAPELLE, E.W.; DAUGHTRY, C.S.T.; KIM, M.S. Fluorescence and reflectance of crop residue and soil. *Journal of Soil and Water Conservation*, 48:207-213, 1993.
- MICROSOFT Corporation. Microsoft Excel 2000. EUA, Microsoft, 2000. Programa de computador. 1 CD-ROM.
- PUREVDORJ, TS.; TATEISHI, R.; ISHIYAMAS, T.; HONDA, Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19:3519-3535, 1998.
- RICHARDS, J.A. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 3.ed. Berlin, Springer-Verlag, 1995. 340p.
- ROSENFELD, G.H.; FITZPATRICK-LINS, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52:223-227, 1986.
- SHELTON, D. P.; KANABLE, R.; JASA, P.J. Field crops, Conservation and Management. USA, UNL, 1997. Disponível em: <<http://www.ianr.unl.edu/pubs/fieldcrops/g1133.htm>>. Acesso em: 27 Ago. 2002.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; WEISMILLER, R.A.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F. Extension of laboratory –measured soil spectra to field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 44:572-574, 1980.
- WANJURA, F.; BILBRO Jr., J.D. Ground cover and weathering effects on reflectance of three crop residues. *Agronomy Journal*, 78:694-698, 1986.

CAPÍTULO IV

COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA COBERTURA EM PASTOS DA ZONA DA MATA (MG)

RESUMO

A identificação das técnicas mais adequadas para a avaliação quantitativa da cobertura do solo em áreas de pastos, possibilita a interpretação dos dados obtidos por sensoriamento remoto e a geração de modelos que relacionam os dados de campo com dados espectrais. O presente trabalho teve por objetivo a comparação de dois métodos de campo para a estimativa da cobertura do solo: a identificação visual dos pontos interceptados pelas marcas de uma corda e a classificação digital de fotografias verticais da superfície, com a finalidade de avaliar a concordância dos resultados e conhecer as principais vantagens e limitações de cada método. Os resultados mostraram diferenças estatisticamente significativas entre as estimativas da cobertura por vegetação verde e seca obtidas pelos dois métodos. Já para o caso da cobertura solo exposto, as diferenças nas estimativas obtidas pelos dois métodos não foram estatisticamente diferentes. Os valores de cobertura obtidos em cada parcela foram muito variáveis entre métodos e indicaram que a seleção do método de campo pode influenciar os resultados do processamento de dados na geração de modelos de relacionamento entre a cobertura e os dados espectrais obtidos por sensores remotos.

Termos de indexação: estimativa da cobertura do solo, métodos de campo, pastos, análise estatística.

ABSTRACT

The identification of more adapted techniques for ground cover quantitative evaluation in pastures improves the remote sensing data interpretation and models generation. This work compared two methods of ground cover estimation: intercepted point and vertical pictures digital classification. Results showed significant statistical differences among the cover estimates provided by the methods. Values obtained in the parcels were very variable among methods and indicated that method selection can influence the relationship models among the cover and remote sensing data.

Index terms: ground cover estimation, field methods, pastures, statistical analysis.

1. INTRODUÇÃO

No Estado de Minas Gerais 65 % da superfície se encontra ocupada por pastos (IBGE, 2002); porém, apesar da sua importante expressão em termos de área e de valor econômico, os níveis de utilização e de produtividade se encontram muito afastados dos valores potenciais (Diogo, 1995). O conhecimento mais profundo de algumas características quantitativas e qualitativas dos pastos, bem como a definição de técnicas pelas quais as suas condições possam ser avaliadas no nível regional, é de fundamental importância para o estabelecimento de um programa de utilização e manejo que vise o aumento da produtividade e ao mesmo tempo a conservação dos recursos naturais. A estimativa da fração do solo coberta por vegetação é uma característica quantitativa de importância fundamental nos modelos de produtividade nas áreas de pastos e possibilita a tomada de decisões quanto aos sistemas de manejo mais adequados.

Zhou et al. (1998) avaliaram as estimativas da cobertura obtidas por meio de diferentes métodos de campo e determinaram grande variabilidade e diferenças significativas nos resultados. Esses autores destacaram que uma das limitações da utilização de dados de sensoriamento remoto em regiões de pastos é precisamente, a falta de estimativas consistentes da cobertura do solo no campo e o seu adequado relacionamento com os dados espectrais.

Desta forma, o estudo e reconhecimento das técnicas mais adequadas para a avaliação quantitativa da cobertura do solo em regiões de pastos apresenta importância para a geração de modelos que relacionem essas estimativas com os valores de reflectância registrados pelos sensores remotos. A obtenção de resultados consistentes dos valores da cobertura do solo nos trabalhos de campo possibilita a interpretação correta dos dados obtidos por sensoriamento remoto orbital.

O presente trabalho teve por objetivo a comparação de dois métodos de estimativa da cobertura do solo em região de pastos: a identificação visual dos pontos interceptados pelas marcas de uma corda e a classificação digital de fotografias verticais da superfície.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área correspondente à bacia do Córrego Ipiúna localizada no Município de Viçosa (MG) entre as coordenadas 20°41'12" a 20°44'57" S e 42°55'28" a 42°58'54" WGr, e abrangeu uma superfície de 1791 ha. De acordo com os resultados apresentados no Capítulo II, os pastos apresentam uma maior importância relativa nas áreas côncavas e convexas onduladas e fortemente onduladas (solos predominantes LVAd A moderado e LVAd câmbico) correspondendo a 25 % e 23 % da área total da bacia hidrográfica, respectivamente. A composição vegetal predominante é a associação de “capim gordura” (*Melinis minutiflora* Paul de Beauv.) e “grama batatais” (*Paspalum notatum* L.), com manchas descontínuas de “sapé” (*Imperata brasiliensis* Trin.).

2.1. Estratégia de amostragem

A amostragem da cobertura do solo foi concentrada nas unidades geoambientais representadas por encostas onduladas e fortemente onduladas (côncavas e convexas) com pastos, que constituem 48 % da superfície total da microbacia hidrográfica. Essas áreas foram discriminadas utilizando as técnicas de geoprocessamento descritas no Capítulo II, e são representativas do relevo e da vegetação local pela sua expressão em termos de superfície. O trabalho de campo foi realizado entre os dias 11 e 19 de maio de 2001, durante a “época seca” da região.

As áreas de amostragem foram escolhidas de maneira aleatória por meio do sorteio das coordenadas planas de um dos seus vértices usando o programa Microsoft Excel 2000 (MICROSOFT, 2000) e posteriormente localizadas no campo com o auxílio da carta topográfica da região em escala 1:50.000 (IBGE, 1979) e um aparelho de posicionamento

global (GPS - Global Positioning System) marca GARMIN GPSIII Plus. Após reconhecimento, foram selecionadas para amostragem 20 áreas de acordo com a sua acessibilidade a partir das estradas existentes na região; nestas, a amostragem foi realizada em parcelas de 100 m por 100 m (1 ha). A escolha das amostras dentro de cada parcela foi realizada de maneira sistemática de acordo com a disposição esquematizada na Figura 1.

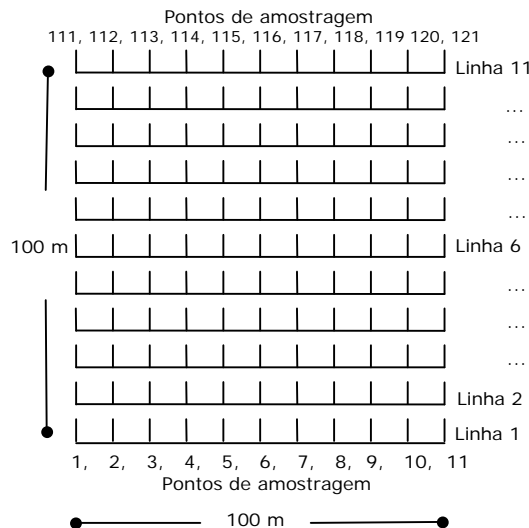


Figura 1. Esquema de localização das linhas e dos pontos de amostragem dentro de cada parcela.

Para a localização dos pontos de amostragem dentro de cada parcela, foi utilizada uma corda de poliéster de 1 cm de diâmetro e 100 m de comprimento identificada cada 10 m com marcas vermelhas. A corda sempre foi deslocada e esticada por dois operários que procuraram deixá-la em contato máximo com a superfície do solo. O deslocamento da corda foi de 10 passos compridos (aproximadamente 10 m); isto representou 11 linhas e 121 pontos de amostragem em cada parcela selecionada.

2.2. Técnicas para a estimativa da cobertura

Foram utilizadas duas técnicas de campo para a estimativa da cobertura do solo: identificação visual dos pontos interceptados pelas marcas de uma corda e fotografias digitais da superfície; ambas descritas a seguir.

(a) *Identificação visual dos pontos interceptados pelas marcas de uma corda.* Este método é uma adaptação do método de amostragem por pontos que utiliza um aparelho com pinos distanciados regularmente (Brown, 1954). A corda identificada cada 10 m foi

alinhada e esticada nas duas pontas para deixá-la rasante com a superfície e, em uma planilha projetada com esse fim, foi registrado para cada ponto de interceptação a presença de vegetação verde, vegetação seca ou de solo descoberto (denominadas neste trabalho, “classes de cobertura do solo”). Para cada observação foram levadas em consideração as recomendações apresentadas por Shelton et al. (1997). Para o cálculo da cobertura do solo estimada em cada parcela de 1 ha, realizou-se a contagem de pontos discriminados por classes de cobertura do solo e, posteriormente, multiplicaram-se os valores das contagens pelo fator (100/121) que permitiu expressar as observações de cada classe de cobertura do solo em termos de percentagem.

(b) *Fotografias verticais nos pontos interceptados pelas marcas de uma corda.* Em cada parcela de 1 ha foram considerados 33 pontos de amostragem localizados nas linhas 1, 6 e 11 da corda (Figura 1) para a obtenção de fotografias verticais no formato digital (tamanho de 640 x 480 “pixels”). Em cada ponto foi colocado um marco quadrado abrangendo uma área de 1 m² que serviu como referência para a obtenção das imagens. As fotografias foram obtidas com uma câmara fotográfica sustentada manualmente em forma vertical sobre o marco quadrado. As imagens obtidas foram classificadas para a geração de “cartas da cobertura” de acordo com o método descrito no Capítulo III. Para estimativa dos valores de cada classe de cobertura, foi utilizado o valor da média aritmética das 33 fotografias em cada parcela.

2.3. Análise estatística dos dados de cobertura

Os dados coletados no trabalho de campo foram analisados estatisticamente utilizando rotinas do software STATISTICA (Statsoft, 1995). Os testes realizados incluíram a análise da normalidade dos dados (teste de Lilliefors) e o teste t de Student (amostras dependentes) para determinação da igualdade entre as estimativas das médias populacionais obtidas pelos dois métodos avaliados (método fotográfico e interceptação de pontos).

3. RESULTADOS

As classes de cobertura consideradas nas estimativas foram vegetação seca (pastos secos ou áreas com resíduos vegetais secos), vegetação verde (pastos em estado vegetativo) e solo exposto (solo desprovido de vegetação). O Quadro 1 apresenta as estimativas das classes de cobertura obtidas pelos métodos avaliados, para as 20 parcelas selecionadas.

O resultado do teste de Lilliefors mostrou que tanto os valores obtidos mediante a classificação digital das fotografias verticais quanto pelo método de interceptação de pontos se apresentam distribuídos normalmente quando utilizado um nível de significância de 0,01.

Quadro 1. Estimativas das classes de cobertura nas parcelas selecionadas (%).

Parcela	----- Método fotográfico-----			----- Interceptação de pontos -----		
	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto
1	57,03	31,93	11,04	33,64	45,45	20,91
2	45,45	35,07	19,48	18,18	43,64	38,18
3	60,96	29,77	9,27	34,00	46,00	20,00
4	44,56	38,67	16,77	11,82	64,55	23,64
5	43,69	33,49	22,82	15,45	67,27	17,27
6	54,93	26,24	18,83	10,91	78,18	11,91
7	45,3	41,97	12,73	10,00	77,27	12,73
8	54,83	31,85	13,32	15,45	74,55	10,00
9	46,76	34,37	18,87	9,09	70,91	20,00
10	45,25	38,19	16,56	7,27	82,73	10,00
11	47,27	36,81	15,92	7,27	75,45	17,27
12	39,64	36,77	23,59	8,18	80,91	11,91
13	51,29	37,66	11,05	10,91	77,27	11,82
14	53,36	28,6	18,04	14,55	61,82	23,64
15	45,57	30,39	24,04	10,91	80,91	8,18
16	49,77	32,91	17,32	11,00	78,18	11,82
17	42,1	35,99	21,91	4,53	76,36	19,09
18	52,98	24,47	22,55	14,55	60,91	24,54
19	48,81	43,32	7,87	0,90	72,72	26,36
20	46,84	34,66	18,5	7,27	80,91	11,82

As estatísticas descritivas dos valores de cobertura obtidos pelos dois métodos avaliados apresentam-se no Quadro 2.

Quadro 2. Estatísticas descritivas dos valores de cobertura do solo obtidos pelos métodos avaliados (valores em %). n = 20

Estatística	-----Vegetação seca-----		-----Vegetação verde-----		-----Solo exposto-----	
	Método Fotográfico	Interceptação de pontos	Método Fotográfico	Interceptação de pontos	Método Fotográfico	Interceptação de pontos
Média	48,82	12,79	34,15	69,79	17,02	17,55
Valor mínimo	39,64	0,90	24,47	43,64	7,87	8,18
Valor máximo	60,96	34,00	43,32	82,73	24,04	38,18
Desvio Padrão	5,45	8,25	4,84	12,39	4,84	7,39
Coef. de variação		64,50		17,75		42,11

Nos dados do Quadro 2 observam-se diferenças nos valores médios, mínimos e máximos das estimativas obtidas pelos dois métodos, mais acentuadas para as coberturas vegetação seca e vegetação verde. Já no caso da cobertura solo exposto essas diferenças são menores. A dispersão dos valores em torno da média, avaliada mediante o desvio padrão (dispersão absoluta), foi sempre maior no caso das estimativas obtidas pelo método de interceptação de pontos. Esse último método apresentou uma dispersão relativa dos valores, avaliada por meio do coeficiente de variação, até quase seis vezes superior (no caso da vegetação seca) ao valor estimado pelo método fotográfico.

O teste t de Student confirmou que existem diferenças estatisticamente significativas entre as estimativas obtidas pelos dois métodos de avaliação da cobertura (método fotográfico e interceptação de pontos), tanto para a cobertura por vegetação seca quanto para a cobertura por vegetação verde (nível de significância de 0,01). Já as estimativas da área coberta por solo exposto não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os métodos, no nível de significância de 0,01.

A experiência adquirida com os dois métodos utilizados para a estimativa da cobertura vegetal, permite destacar as principais vantagens e limitações de cada um deles. No método de interceptação de pontos, as observações não possuem área. A vantagem do método se encontrou em que a redução do tamanho das unidades amostrais esteve diretamente relacionada com o aumento do número de observações que puderam ser obtidas em cada parcela.

No caso do método fotográfico, as unidades amostrais possuem área de 1 m^2 e o número de observações que podem ser realizadas sem comprometer a eficiência do trabalho é menor do que no método de interceptação de pontos. Neste trabalho, de um total de 11 linhas em cada parcela, três foram amostradas pelo método fotográfico, visando a eficiência em termos de tempo, espaço de armazenamento e processamento dos dados.

Para utilização do método de interceptação de pontos se recomenda que sejam adotadas algumas regras de avaliação das amostras que minimizem os critérios subjetivos, como: (a) que as leituras sejam realizadas sempre pelo mesmo operador; (b) evitar remover a corda do local para realizar a leitura; (c) observar o ponto em linha reta vertical e consistentemente no mesmo ponto de cada marca (central ou um dos lados); (d) as marcas na corda devem ser de tamanho reduzido e de cor contrastante com a vegetação.

4. CONCLUSÕES

1. Os métodos considerados (fotográfico e interceptação de pontos) determinaram estimativas da cobertura do solo por vegetação verde e por vegetação seca estatisticamente diferentes. Já para o caso da cobertura solo exposto, as diferenças nas estimativas obtidas pelos dois métodos não foram estatisticamente diferentes;
2. O método de interceptação de pontos foi mais rápido tanto no trabalho de campo como no posterior processamento dos dados; porém, os seus resultados mostraram uma maior variabilidade do que o método baseado nas fotografias verticais da superfície;
3. Os valores de cobertura obtidos em cada parcela foram muito variáveis entre métodos e indicaram que a seleção do método de campo pode influenciar os resultados do processamento de dados para a geração de modelos de relacionamento entre a cobertura e os dados espectrais obtidos por sensores remotos orbitais.

4. BIBLIOGRAFIA

- BROWN, D. Methods of surveying and measuring vegetation. Inglaterra, Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, 1954. 223p.
- DIOGO, S.J.M. Composição botânica e valor nutritivo da dieta selecionada por novilhos em pastagem natural de Viçosa – MG. Tese (Doutorado). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1995. 108p.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Agropecuário 1995-1996. Brasil, IBGE, 2002. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>, 2000>. Acesso em: 19 Out. 2002.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Teixeira. SF-23-X-B-V-1. Rio de Janeiro, 1979. Carta topográfica em escala 1:50.000.
- MICROSOFT. Excel 2000 for Windows. EUA, Microsoft, 2000. Programa de Computador. 1 CD-ROM.
- SHELTON, D. P.; KANABLE, R.; JASA, P.J. Field crops, Conservation and Management. USA, UNL, 1997. Disponível em: <<http://www.ianr.unl.edu/pubs/fieldcrops/g1133.htm>>. Acesso em: Ago. 2002.
- STATSOFT. STATISTICA for Windows. Tulsa, Statsoft, 1995. Programa de Computador. 1 CD-ROM.
- ZHOU, Q.; ROBSON, M.; PILESJÖ, P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands. International Journal of Remote Sensing, 19:1815-1820, 1998.

CAPÍTULO V

ESTIMATIVA DA COBERTURA DO SOLO A PARTIR DE IMAGENS TM/LANDSAT-5 EM PASTOS DA ZONA DA MATA (MG)

RESUMO

Os dados registrados por sensores remotos imageadores possibilitam a obtenção de medições indiretas da cobertura do solo, quando calibrados por meio de um modelo empírico. O objetivo deste estudo foi a determinação de relações entre as estimativas de cobertura do solo realizadas por meio de técnicas de campo e os valores de índices espectrais (RVI, NDVI, SAVI, DVI, MSAVI, GVI, IPVI) e dados de reflectância derivados de uma imagem TM/Landsat-5, por meio de análise de correlação linear de Pearson. A integração dos dados de campo e dos dados orbitais foi realizada em um Sistema de Informação Geográfica. Os resultados indicaram que as estimativas da cobertura do solo não apresentaram correlações lineares estatisticamente significativas com os valores de reflectância nem com os índices espectrais calculados. As correlações com os diferentes índices espectrais ou bandas nas faixas do verde, vermelho e infravermelho próximo, não apresentaram diferenças estatísticas. Os resultados alcançados impossibilitaram, nesta etapa do trabalho, a geração de modelos entre os dados de sensoriamento remoto e a cobertura do solo.

Termos de indexação: Sistema de Informação Geográfica, estimativa da cobertura do solo, TM/Lansat-5, índices espectrais, correlação.

RELATIONSHIPS BETWEEN PERCENT VEGETATION COVER AND TM/LANDSAT-5 DATA IN ZONA DA MATA PASTURES

ABSTRACT

Quantification of ground cover represents a great goal in pastures remote sensing. Fraction vegetation cover can be predicted using empirical approaches included the development of statistical models built from image and ground data collected at the same locations. In this work was used TM/Landsat-5 spectral wavebands information and ground data for correlation studies. Pearson correlation analysis between ground cover measures and spectral indices (RVI, NDVI, SAVI, DVI, MSAVI, GVI, IPVI) and reflectance were performed. Field and remote sensing data were integrated in a Geographical Information System. Ground cover estimations didn't present statistical significant linear correlations with the reflectance values nor with spectral indices. The reached results disabled in this stage of the work, the model generation between ground cover and remote sensing data.

Index terms: Geographic Information System, ground cover estimation, TM/Landsat-5, spectral indices, correlation.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de monitoramento da cobertura do solo por meio de levantamentos de campo e fotointerpretação não são efetivos em termos de custo e tempo para avaliações em escala regional (Boyd, 1986). Em contraposição, o potencial dos dados de sensoriamento remoto orbital para o monitoramento da cobertura do solo em regiões de pastos tem sido reconhecido em vários estudos (Prince & Tucker, 1986; Tucker & Seller, 1986; Pickup et al., 1993). Porém, a falta de pesquisa dos relacionamentos entre as estimativas da cobertura com dados de campo e os dados espectrais tem limitado a sua aplicação em trabalhos em escala regional (Zhou et al., 1998). Os dados registrados pelos sensores possibilitam a obtenção de medidas indiretas da cobertura do solo quando calibrados por meio de um modelo físico ou de um modelo empírico que vincule as estimativas da cobertura obtidas no campo com os valores de reflectância registrados nas imagens. Esses últimos modelos apresentaram validade para um amplo intervalo de cenas e sensores (Tucker 1979; Ajai et al., 1983; Friedl et al., 1994; Dungan, 1998).

Os modelos empíricos se agrupam em duas categorias de acordo com os tipos de dados espectrais utilizados: (a) os que utilizam índices espectrais derivados da combinação das bandas individuais das imagens e (b) os que utilizam a calibração da reflectância da cobertura em regiões específicas do espectro eletromagnético. Dentro dos índices espectrais avaliados nos modelos, se destacam os Índices de Vegetação (IV) (McDaniel & Haas, 1982; Graetz et al., 1988; Dymond et al., 1992; Leprieur et al., 1994; Wittich & Hansing, 1995; Todd et al., 1998; Purevdorj et al., 1998).

O presente trabalho visou a determinação de relações estatísticas entre as estimativas da cobertura do solo obtidas por métodos de campo e os dados espectrais registrados por uma imagem TM/Landsat-5. Objetivou-se a avaliação do desempenho de diferentes índices

espectrais e de valores de reflectância quanto a seu potencial para predizer a cobertura por pastos, em estudo de caso em uma microbacia da região da Zona da Mata de Minas Gerais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo corresponde à microbacia do Córrego Ipiúna localizada no Município de Viçosa (MG) entre as coordenadas 20°41'12" a 20°44'57" S e 42°55'28" a 42°58'54" WGr, e compreende uma superfície de 1791 ha. De acordo com os resultados apresentados no Capítulo II, os pastos constituem a cobertura dominante, ocupando mais da metade da superfície da bacia (59,5 %); a outra fração encontra-se ocupada por mata (22,3 %) e capoeira (18,2 %). A composição predominante dos pastos é a associação de “capim gordura” (*Melinis minutiflora* Paul de Beauv.) e “grama batatais” (*Paspalum notatum* L.), com manchas de “sapé” (*Imperata brasiliensis* Trin.).

2.1. Amostragem para estimativa da cobertura do solo

A amostragem da cobertura do solo foi concentrada nas unidades geoambientais representadas por encostas onduladas e fortemente onduladas (côncavas e convexas) com pastos, que representam 48 % da superfície total da microbacia, definidas utilizando as técnicas de geoprocessamento propostas no Capítulo II.

As áreas escolhidas de maneira aleatória foram localizadas no campo entre os dias 11 e 19 de maio de 2001 com o auxílio da carta topográfica da região em escala 1:50.000 (IBGE, 1979) e um aparelho de posicionamento global (GPS - Global Positioning System) marca GARMIN GPSIII Plus. Após reconhecimento, foram selecionadas para amostragem 20 áreas de acordo com a sua acessibilidade a partir das estradas existentes na região; a localização e perímetro de tais áreas foram armazenados, junto com os restantes planos de informação espacial, no “software” ARC/INFO™ versão 7.1.1 (ESRI, 1997). A Figura 1 apresenta a localização das parcelas selecionadas e o aspecto da paisagem característica da

área de estudo.

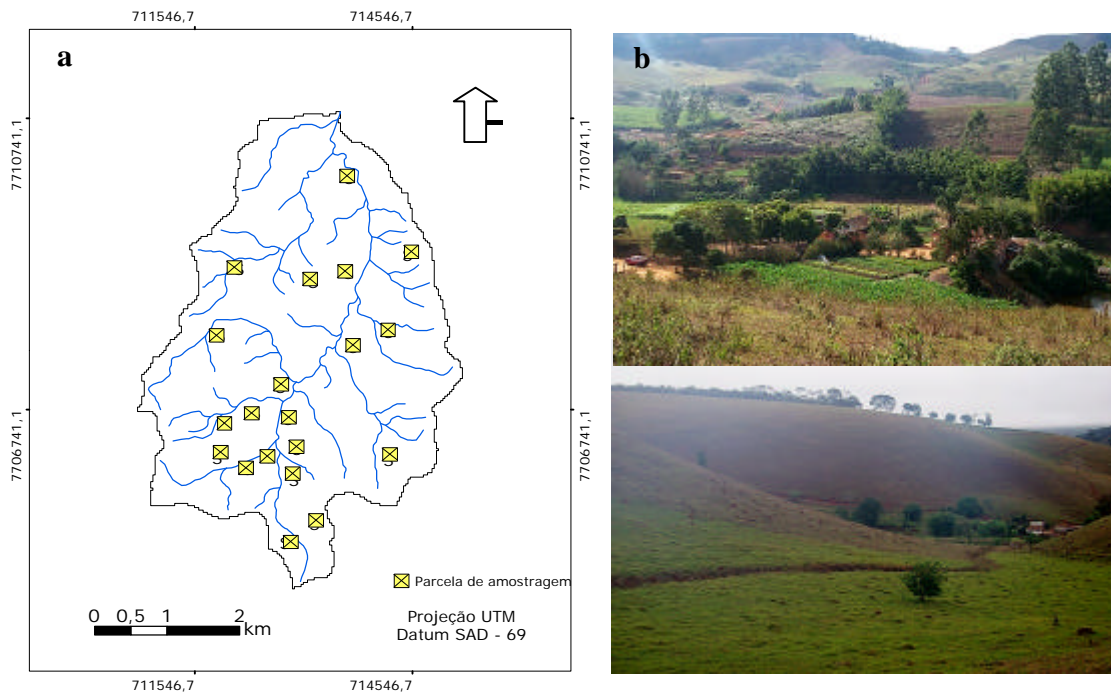


Figura 1. (a) Esquema de localização das parcelas amostradas na bacia do Córrego Ipiúna. (b) Aspecto da paisagem característica da área de estudo.

Para a localização das unidades amostrais dentro de cada parcela, foi utilizada uma corda de poliéster de 1 cm de diâmetro e 100 m de comprimento identificada cada 10 m com marcas vermelhas. A corda sempre foi deslocada e esticada por dois operários que procuraram deixá-la em contato máximo com a superfície do solo. O deslocamento da corda foi de 10 passos compridos (aproximadamente 10 m); isto representou 11 linhas e 121 pontos de amostragem em cada parcela selecionada. Em alguns casos, as parcelas não foram totalmente regulares devido a deslocamentos da corda condicionados pelo relevo fortemente ondulado; porém, a sua localização foi sempre controlada por meio do registro das coordenadas espaciais dos pontos opostos de cada linha no aparelho de GPS. O esquema de amostragem sistemático utilizado em cada parcela é apresentado na Figura 2.

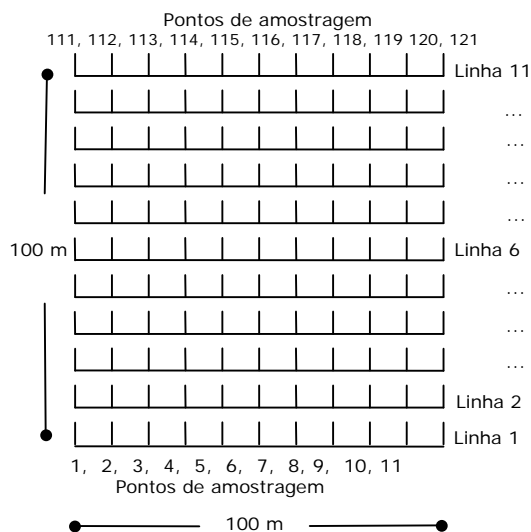


Figura 1. Esquema de localização das linhas e dos pontos de amostragem dentro de cada parcela.

Para a estimativa da cobertura do solo em cada uma das parcelas selecionadas, foram utilizados os dois métodos descritos no Capítulo IV: (a) identificação visual dos pontos interceptados pelas marcas de uma corda e (b) fotografias digitais da superfície. As classes de cobertura consideradas nas estimativas foram: vegetação seca (pastos secos ou áreas com resíduos vegetais secos), vegetação verde (pastos em estado vegetativo) e solo exposto (solo desprovido de vegetação).

2.2. Processamento da imagem TM/Landsat-5

Neste estudo foi utilizada uma imagem TM/Landsat-5 do dia 27 de abril de 2001, “Worldwide Reference System” (WRS) 217-074, bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (INPE, 2001). Os ângulos azimutal e de elevação solar na data da passagem foram $46,89^\circ$ e $42,92^\circ$, respectivamente. O tamanho dos “pixels” das bandas consideradas é de 30 m x 30 m (0,09 ha); desta forma, cada parcela de amostragem (1 ha) abrangeu aproximadamente 11 “pixels”.

O processamento da imagem consistiu nas seguintes operações: (a) retificação geométrica; (b) conversão de número digital para valores de reflectância aparente; e (c) geração de imagens-índice. A implementação foi realizada no “software” ERDAS Imagine versão 8.4 (ERDAS, 1999).

A) Retificação geométrica

Quando o objetivo do estudo é a análise da correlação entre as medições da cobertura com índices espectrais derivados dos dados do satélite, é necessária a extração dos “pixels” da imagem que se correspondem espacialmente àqueles locais onde foram coletados os dados de campo. A acurácia no posicionamento tanto dos “pixels” da imagem como das parcelas no campo é crítica para assegurar correspondência espacial entre os dois conjuntos de dados. Neste trabalho, coordenadas de pontos obtidas com GPS, e a carta topográfica em escala 1:50.000 (IBGE, 1979) serviram de base para a retificação geométrica da imagem TM/Landsat-5 por meio de polinômio de primeiro grau e re-amostragem pelo vizinho mais próximo (Mather, 1993; Richards, 1995). O resultado desse procedimento foi avaliado por meio do erro médio quadrático das diferenças entre as posições dos pontos de controle de referência e as posições calculadas a partir da equação de transformação. Os resultados foram considerados adequados para os objetivos do estudo, quando essas diferenças foram menores do que um “pixel” (Milne, 1988; Townshend et al., 1992). Após a correção geométrica, a imagem foi recortada para a obtenção de um novo módulo de acordo com o limite da bacia do Córrego Ipiúna.

B) Conversão dos números digitais para valores de reflectância aparente

O valor da energia refletida associada a cada “pixel” é representado nas imagens digitais por uma grandeza denominada número digital (ND), que não possui um significado físico direto. Para o cálculo de imagens-índice, vários autores reconheceram a importância de conversão dos ND para valores de reflectância (Epiphanyo & Formaggio, 1988; Guyot & Gu, 1994). Neste trabalho, essa conversão de valores foi realizada utilizando as relações propostas por Markham & Barker (1986). Os ND da imagem bruta foram convertidos em valores de radiância por meio da Equação 1; os valores obtidos foram posteriormente convertidos em valores de reflectância utilizando a Equação 2.

$$RAD_{\lambda} = L_{\min \lambda} + \frac{(L_{\max \lambda} - L_{\min \lambda})}{255} ND \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

RAD_{λ} = radiância espectral, em $m W cm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$

$L_{min\lambda}$ = radiância espectral correspondente ao ND mínimo

$L_{max\lambda}$ = radiância espectral correspondente ao ND máximo

ND = número digital do “pixel” considerado

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESol_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

ρ = reflectância exo-atmosférica

L_{λ} = radiância espectral no detector, em $mW cm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$

d = distância Terra-Sol, em unidades astronômicas (aproximadamente igual a 1)

$ESol_{\lambda}$ = irradiância solar exoatmosférica média, em $m W cm^{-2} \mu m^{-1}$

θ_s = ângulo zenital solar (neste estudo equivale a $47,08^\circ$)

A partir da transformação para valores de reflectância aparente foram obtidas novas bandas, as quais não constituíram os dados de reflectância real dos alvos, pois em seu cálculo foi utilizada a irradiância no topo da atmosfera (ESol). Entretanto, Godoy Jr. & Novo (1989) observaram que em uma determinada cena os valores de reflectância aparente variam linearmente com os de reflectância real.

C) Geração de imagens-índice

Os Índices de Vegetação (IV) são índices espectrais concebidos para ressaltar a resposta espectral da vegetação com respeito aos solos e estão baseados nas diferenças quantitativas entre a radiação refletida, transmitida e absorvida por esses dois tipos de alvos (Jackson & Huete, 1991). Foram gerados inicialmente com a finalidade de acompanhar o desenvolvimento das culturas, porém tiveram seu uso estendido para o mapeamento da vegetação e para a sua avaliação com relação a desfolhamento, colheitas e cortes (Szekielda, 1988). Diversos estudos têm demonstrado correlações significativas entre esses índices e parâmetros associados com o vigor e produtividade das plantas como biomassa foliar verde (Tucker, 1979), IAF (Índice de Área Foliar) (Lo, 1986; Running et al., 1989), densidade de vegetação e cobertura (Ormsby et al., 1987) e estado das culturas (Wiegand et al., 1992).

As informações contidas em uma única banda são insuficientes para caracterizar a condição da vegetação; assim, os IV são desenvolvidos por combinações de duas ou mais bandas. A escolha das bandas a serem utilizadas depende dos objetivos do trabalho e da experiência do usuário (Shimabukuro, 1997). No entanto, as faixas do espectro que mostraram-se mais valiosas e assim mais utilizadas são as relativas ao vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP) (Huete, 1988; Baret & Guyot 1991; Myneni et al., 1995) onde evidencia-se o maior contraste entre a vegetação sadia em relação à vegetação seca e sobretudo com respeito aos solos.

Neste estudo foram calculados vários índices de vegetação a partir dos valores de reflectância da imagem TM/Landsat-5 (Quadro 1).

Quadro 1. Definição dos índices de vegetação avaliados.

Índice	Fonte	Conceito ¹
Ratio Vegetation Index	Jordan (1969)	$RVI = \frac{IVP}{V}$
Normalised Difference Vegetation Index	Deering et al. (1975)	$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V} = \frac{RVI - 1}{RVI + 1}$
Soil Adjusted Vegetation Index	Huete (1988)	$SAVI = \frac{IVP - V}{IVP + V + L} (1 + L)$
Difference Vegetation Index	Tucker (1979)	$DVI = IVP - V$
Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2	Qi et al. (1994)	$MSAVI_2 = \frac{IVP + 1 - \sqrt{(2IVP + 1)^2 - 8(IVP - V)}}{2}$
Green Vegetation Index	Crist & Cicone (1984)	Ortogonalização com informação de 6 bandas (TM): banda "greenness"
Infra-red Percentage Vegetation Index	Crippen (1990)	$IPVI = \frac{IVP}{IVP + V} = \frac{1}{2}(NDVI + 1)$

¹ V e IVP: Valores de reflectância nas faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, respectivamente.

2.3. Análise das relações entre dados de campo e dados orbitais

Em cada parcela amostrada foram obtidas as estimativas da cobertura do solo e os valores dos índices espectrais médios ou reflectâncias médias (valor médio dos “pixels” abrangidos por parcela). Com esses dados foram elaborados diagramas de dispersão dos valores e testes de correlação de Pearson (Produto-Momento), considerando as estimativas de cobertura do solo como variável independente e os valores médios dos “pixels” das imagens como variável dependente. As análises estatísticas foram implementadas no “software” STATISTICA (Statsoft, 1995).

Para a obtenção dos valores médios dos índices espectrais e da reflectância dentro de cada parcela, foram utilizadas funções de “estatística zonal” disponíveis no Sistema de Informação Geográfica (SIG), o esquema da operação apresenta-se na Figura 3.

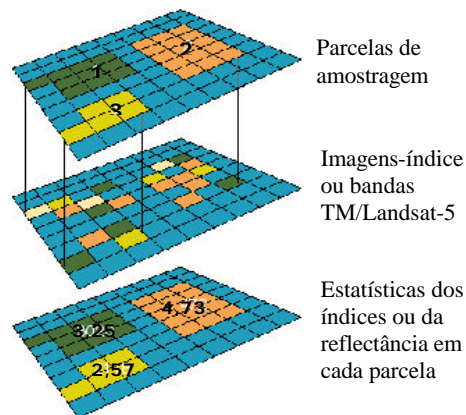


Figura 3. Implementação das funções de “estatística zonal” no SIG.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir das estimativas da cobertura e dos valores dos índices espectrais em cada parcela, foram derivados os diagramas de dispersão (Figura 4) e testes de correlação entre as variáveis.

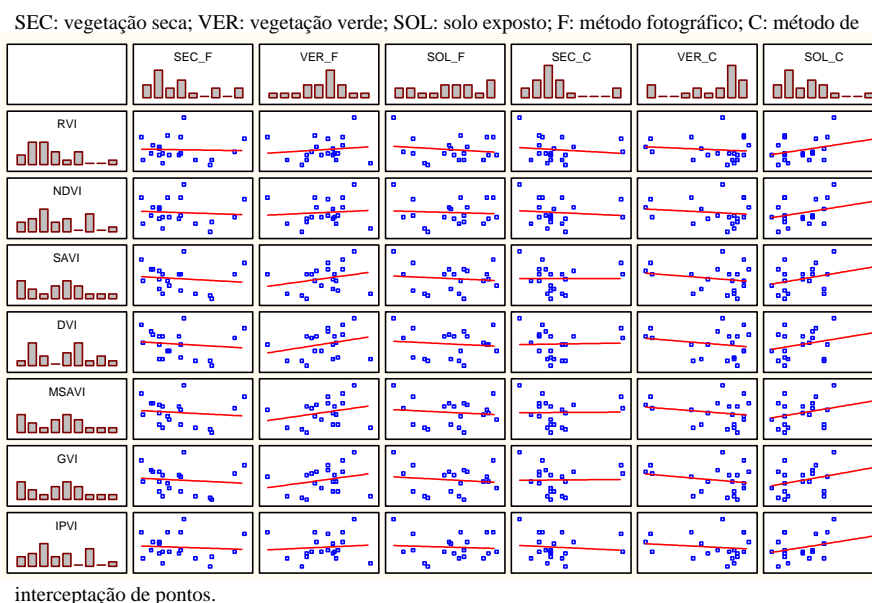


Figura 4. Diagramas de dispersão dos conjuntos de dados.

A inspeção visual dos gráficos de dispersão (Figura 4) indica a inexistência de relações lineares entre os valores da cobertura do solo e os índices espectrais. Observa-se uma grande dispersão dos valores em torno da reta de mínimos quadrados que fica evidenciada pelos resultados do teste de correlação (Quadro 3), onde os valores dos coeficientes de correlação (r) se apresentaram não significativos ($n = 20$ e $\alpha = 1\%$). Isto significa que nenhuma das combinações, entre os dados de estimativa de cobertura e

índices espectrais médios, revelou uma relação funcional linear, sendo em todos os casos aceita a hipótese de que a reta de regressão é paralela ao eixo das abscissas. Estes resultados indicam que os valores de cobertura explicam muito pouco da variação observada nos índices.

Quadro 3. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson (r) entre estimativas da cobertura (método fotográfico e de interceptação de pontos) e índices espectrais obtidos da imagem TM/Landsat-5. n = 20 e $\alpha = 1\%$.

Índice espectral	-----Método fotográfico-----			-----Método de interceptação de pontos-----		
	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto
RVI	-0,036	0,124	-0,151	-0,125	-0,116	0,331
NDVI	-0,076	0,088	-0,069	-0,097	-0,134	0,332
SAVI	-0,121	0,248	-0,104	0,004	-0,198	0,329
DVI	-0,122	0,269	-0,108	0,028	-0,198	0,303
MSAVI	-0,115	0,260	-0,115	0,010	-0,198	0,322
GVI	-0,105	0,243	-0,127	0,016	-0,216	0,345
IPVI	-0,076	0,088	-0,069	-0,097	-0,134	0,332

Dentro do intervalo de valores apresentados pelo coeficiente de correlação, os maiores valores podem ser observados para as estimativas de solo exposto pelo método de interceptação de pontos e os diversos índices espectrais considerados. Para determinar possíveis diferenças dos coeficientes de correlação entre métodos de estimativa para classe de cobertura, os pares de valores do Quadro 3, foram comparados usando o teste bilateral de distribuição normal em nível de significância igual a 0,01. Os resultados do teste indicaram que os valores desses coeficientes de correlação não diferem estatisticamente.

No Quadro 4, são apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson entre as estimativas de cobertura do solo obtidas pelos dois métodos avaliados e os valores médios da reflectância nas bandas do verde (banda TM-2: 0,52-0,60 μm), vermelho (banda TM-3: 0,63-0,69 μm) e infra-vermelho próximo (banda TM-4: 0,76-0,90 μm). Os resultados mostraram a mesma tendência do que as correlações observadas com os índices espectrais. Todos os valores de r foram não significativos em nível de significância de 0,01 e não apresentaram diferenças entre métodos de estimativa no teste de igualdade de valores, confirmando uma baixa associação entre as estimativas da cobertura e a reflectância espectral nas bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo.

Quadro 4. Valores dos coeficientes de correlação de Pearson (r) entre estimativas da cobertura (método fotográfico e de interceptação de pontos) e bandas espectrais da imagem TM/Landsat-5. n = 20 e $r = 1$ %.

Banda espectral	-----Método fotográfico-----			----Método de interceptação de pontos----		
	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto	Vegetação seca	Vegetação verde	Solo exposto
TM-2: 0,52-0,60 μm	-0,2285	0,2683	0,0992	0,0688	-0,0526	0,0177
TM-3: 0,63-0,69 μm	-0,1148	0,1901	0,0046	0,1334	-0,0793	-0,0141
TM-4: 0,76-0,90 μm	-0,1368	0,2786	-0,0823	0,0707	-0,1828	0,2298

A partir do trabalho realizado, podem ser enumeradas algumas prováveis causas para os baixos valores de correlação observados entre os dados da cobertura do solo e índices ou bandas espectrais. Por um lado, existe uma inexatidão potencial na localização espacial dos dados de campo, que pode se refletir nos valores de correlação calculados. A imagem TM/Landsat-5 foi georreferenciada com uma acurácia de ± 30 m (1 “pixel”) e as parcelas com acurácia de ± 8 m. Embora esses valores são toleráveis nas análises espaciais de recursos naturais, pode acontecer que em algumas parcelas, parte dos “pixels” da imagem não se correspondam com as parcelas no terreno. De qualquer forma, como as parcelas foram localizadas em áreas de condições de solo e vegetação pouco variáveis (estrato de unidades geoambientais dominantes), essa situação deveria ter um efeito mínimo nos valores de correlação calculados entre os dados da imagem e as variáveis de campo.

Em adição aos erros potenciais introduzidos pela localização espacial das parcelas e a retificação geométrica da imagem, a estimativa utilizada para a cobertura em cada parcela - valor único para a totalidade da parcela - talvez não seja a melhor representação da cobertura. Da mesma forma, a definição de um único valor espectral - valor médio dos “pixels” para cada parcela – pode influenciar os valores de correlação. Com isto supõe-se que a distribuição das classes de cobertura é homogênea desde a primeira até a última linha amostrada, porém, em alguns casos verificaram-se variações, que poderiam ser consideradas por outro delineamento de amostragem.

Outros fatores tais como ângulo de inclinação solar, topografia, tipo de plantas e estado fenológico, tornam uma relação aparentemente simples em complexa, que pode

requerer uma forma diferente de processamento dos dados que permita a identificação de relações entre as estimativas da cobertura do solo e os valores de índices espectrais ou valores de reflectância derivados da imagem TM/Landsat-5.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

1. As estimativas da cobertura do solo não apresentaram correlações lineares estatisticamente significativas (coeficiente r de Pearson) com os valores de reflectância nem com os índices espectrais calculados a partir da imagem TM/Landsat-5;
2. O desempenho dos diferentes Índices de Vegetação foi muito parecido, e as correlações não foram significativamente diferentes do ponto de vista estatístico;
3. Foi observada baixa predição dos valores espectrais (variáveis dependentes) a partir das estimativas da cobertura do solo. Isto impossibilitou a obtenção de modelos com significado prático;
4. Assim, recomenda-se: (a) a realização de medições de reflectância no campo que permitam um primeiro nível de relação entre cobertura do solo e valores espectrais em uma situação experimental mais controlada; (b) a utilização de imagens com resolução espacial maior do que 30 m x 30 m correspondentes a várias épocas do ano; (c) a delimitação de parcelas permanentes no campo que possibilitem a realização de estudos multitemporais e minimizem os efeitos de erros na localização dos dados; (d) a geração de uma base de dados espaciais e não espaciais para as bacias estudadas; (e) a medição de outras variáveis biofísicas relacionadas ao vigor e produtividade dos pastos como Índice de Área Foliar (IAF), biomassa verde e matéria seca.

6. BIBLIOGRAFIA

- AJAI K.D.S.; CHATURUEDI, G.S.; SINGH, A.K.; SINHA, S.K. Spectral assessment of leaf area index, chlorophyll content and biomass of chickpea. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49:1721-1732, 1983.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35:161-173, 1991.
- BOYD, W.E. Correlation of rangeland brush canopy cover with Landsat MSS data. *Journal of Range Management*, 39:268-271, 1986.
- CRIPPEN, R. E. Calculating the Vegetation Index Faster. *Remote Sensing of Environment*, 34:71-73, 1990.
- CRIST, C.P.; CICONE, R.C. Application of the tasseled cap concept to simulate Thematic Mapper data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50:343-352, 1984.
- DEERING, D.W.; ROUSE J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT*, 10, Ann Arbor, 1975. Proceedings. University of Michigan, 1975. p. 1169-1178.
- DUNGAN, J. Spatial prediction of vegetation quantities using ground and image data. *International Journal of Remote Sensing*, 20:267-285, 1998.
- DYMOND, J.R.; STEPHENS, P.R.; NEWSOME, P.F.; WILDE, R.H. Percentage vegetation cover of a degrading rangeland from SPOT. *International Journal of Remote Sensing*, 13:1999-2007, 1992.
- EPIPHANIO J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. TM/Landsat-5 data to evaluate wheat and bean percent soil cover and leaf area index. In: *1988 CONGRESS OF THE*

- INTERNATIONAL SOCIETY FOR PHOTOGRAMETRY AND REMOTE SENSING. Kyoto, 1988. Proceedings. Kyoto, ISPRS, 1988. p.658-666 (B-10).
- ERDAS. ERDAS IMAGINE v. 8.4. Atlanta, ERDAS, 1999. Programa de computador. 1 CD-ROM.
- ESRI. Environmental Systems Research Institute. ARC/INFO v. 7.1.1. Redlands, ESRI, 1997. Programa de computador. 2 CD-ROM.
- FRIEDL, M.A.; MICHAELSEN, J.; DAVIS, F.W.; WALKER, H.; SCHIMEL, D.S. Estimating grassland biomass and leaf area index using ground and satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 15:1401-1420, 1994.
- GODOY JR., M.; NOVO, E.M. Processamento digital de dados TM/Landsat no monitoramento de águas interiores. São José dos Campos, INPE, 1989. 26p. (INPE-4956-PRE/1533).
- GRAETZ, R.D.; PECH, R.P.; DAVIS, A.W. The assessment and monitoring of sparsely vegetated rangelands using calibrated Landsat data. *International Journal of Remote Sensing*, 9:1201-1222, 1988.
- GUYOT, G.; GU, X. Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT/HRV and Landsat/TM data. *Remote Sensing of Environment*, 49:169-180, 1994.
- HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25:295-309, 1988.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Teixeira. SF-23-X-B-V-1. Rio de Janeiro, 1979. Carta topográfica em escala 1:50.000.
- INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Imagem de satélite Landsat TM-ORB 217 P 074. 27 de abril de 2001. Imagem de satélite. 1 CD-ROM.
- JACKSON, R. D.; HUETE, A.R. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200, 1991.
- JORDAN, C. F. Derivation of Leaf Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50:663-666, 1969.
- LEPRIEUR, C.; VERSTRAETE, M.M.; PINTY, B. Evaluation of the performance of various vegetation indices to retrieve vegetation cover from AVHRR data. *Remote Sensing Review*, 10:205-284, 1994.
- LO, C. P. Applied remote sensing. New York, Longman, 1986, 393p.

- MARKHAM, B.L.; BARKER, J.L. Landsat MSS and TM postcalibration on dynamic ranges of exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. Lanham, EOSAT, 1986. 21p. (Landsat Technical Notes n°1).
- MATHER, P.M. Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. 3.ed. Chichester, John Wiley & Sons, 1993. 352p.
- McDANIEL, K.C.; HAAS, R.H. Assessing Mesquite-Grass Vegetation Condition from Landsat. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 13:441-450, 1982.
- MILNE, A. Change detection analysis using Landsat imagery: a review of methodology. In: 1988 INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, Edinburgh, 1988. Proceedings. Edinburgh, European Space Agency, 1988. p.541-544.
- MYNENI, R. B.; HALL, F. G.; SELLERS, P. J.; MARSHAK, A. L. The interpretation of spectral vegetation indices. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 33:481-486, 1995.
- ORMSBY, J. P.; CHOUDHURY, B. J.; OWE, M. Vegetation spatial variability and its effects on vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 8:1301-1306, 1987.
- PICKUP, G.; CHEWINGS, V. H.; NELSON, D. J. Estimating changes in vegetation cover over time in arid rangelands using landsat MSS data. *Remote Sensing of Environment*, 43:243-263, 1993.
- PRINCE, S.D.; TUCKER, C.J. Satellite remote sensing of rangelands in Botswana II: NOAA/AVHRR and herbaceous vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 7:1555-1570, 1986.
- PUREVDORJ, TS.; TATEISHI, R.; ISHIYAMAS, T.; HONDA, Y. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19:3519-3535, 1998.
- QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A.R; KERR, Y.H.; SOROOSHIAN, S. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48:119-126, 1994.
- RICHARDS, J.A. Remote sensing digital image analysis: an introduction. 3.ed. Berlin, Springer-Verlag, 1995. 340p.
- RUNNING, S. W.; RAMAKRISHNA, R. N.; PETERSEN, D. L.; BAND, L.E.; POTTS, D.F.; PIERCE, L.L.; SPANNER, M.A. Mapping regional forest evapotranspiration and

- photosynthesis coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, 70:1090-1101, 1989.
- SHIMABUKURO, Y. E. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto: notas de aula dadas no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 1997. Apostila.
- STATSOFT. STATISTICA for Windows. Tulsa, Statsoft, 1995. Programa de Computador. 1 CD-ROM.
- SZEKIELDA, K. Satellite monitoring of the earth. New York, John Wiley, 1988. 326p.
- TODD, S.W.; HOFFER, R.M., MILCHUNAS, D.G. Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19:427-438, 1998.
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.O.; GURNEY, C.; McMANUS, J. The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30:1054-1060, 1992.
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8:127-150, 1979.
- TUCKER, C.J.; SELLER, P.J. Satellite Remote Sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7:1395-1416, 1986.
- WIEGAND, C. L.; EVERITT, J. H.; RICHARDSON, A. J. Comparison of multispectral video and SPOT-HRV observations for cotton affected by soil salinity. *International Journal of Remote Sensing*, 13:1511-1525, 1992.
- WITTICH, K.P.; HANSING, O. Area-averaged vegetative cover fraction estimated from satellite data. *International Journal of Biometeorology*, 38:209-215, 1995.
- ZHOU, Q.; ROBSON, M.; PILESJÖ, P. On the ground estimation of vegetation cover in Australian rangelands. *International Journal of Remote Sensing*, 19:1815-1820, 1998.